

Politechnika Wrocławska
Wydział Architektury

ROZPRAWA DOKTORSKA
p.t.

**Morfologia
lekkich systemów konstrukcyjnych
kształtowanych w procesie
deformacji geometrycznej**

autor

mgr inż. Romuald Tarczewski



Promotor:

dr hab inż. arch. prof. nadzw. P.Wr. **Janusz Rębielak**

Wrocław 2004

Morfologia lekkich systemów konstrukcyjnych kształtowanych w procesie deformacji geometrycznej

Spis treści

1.	Przedmiot i tezy pracy	4
1.1.	Wprowadzenie	4
1.1.1.	Uwagi wstępne	4
1.1.2.	Zakres pracy	6
1.1.3.	Obecny stan zagadnienia	6
1.2.	Cel i tezy pracy	7
1.2.1.	Cel pracy	7
1.2.2.	Tezy pracy	8
2.	Ewolucja formy konstrukcji membranowych	9
2.1.	Ewolucja historycznych sposobów kształtowania konstrukcji namiotowych	9
2.1.1.	Namiot jako tradycyjne schronienie człowieka	9
2.1.2.	Namioty ludów koczowniczych	10
2.1.2.1.	Namioty szkieletowe	11
2.1.2.2.	Namioty membranowe	18
2.1.4.	Wielkie konstrukcje namiotowe od starożytności do XIX w.	28
2.1.4.1.	Namioty jako obiekty prestiżu i luksusu	28
2.1.4.2.	Renesans wielkich namiotów w XIX w.	58
2.2.	Rozwój współczesnych konstrukcji membranowych	62
2.2.1.	Powstanie współczesnych konstrukcji namiotowych	62
2.2.2.	Rozwój konstrukcji pneumatycznych	67
2.2.2.1.	Wczesne zastosowania techniki pneumatycznej	67
2.2.2.2.	Pierwsze koncepcje konstrukcji pneumatycznych w budownictwie	69
2.2.2.3.	Początki współczesnych konstrukcji pneumatycznych	74
2.2.2.4.	Rozwój konstrukcji pneumatycznych do połowy lat 70. XX w.	78
2.2.3.	Współzależność rozwoju konstrukcji namiotowych i pneumatycznych	81
2.3.	Zarys historii rozwoju konstrukcji prętowych kształtowanych poprzez sprężanie	83
2.3.1.	Uwagi wstępne	83
2.3.2.	Pierwsze zastosowania	83
2.3.3.	Dźwigar samowypiętrzalny O. Sircovicha	86
2.3.4.	System Strarch	87
2.3.5.	Wypiętrzalne powierzchniowe konstrukcje prętowe	91
2.3.6.	Konstrukcje wypiętrzalne z blachy trapezowej	93
3.	Podstawowe zasady kształtowania konstrukcji membranowych	94
3.1.	Uwagi wstępne	94
3.2.	Podstawowe cechy konstrukcji membranowych	94
3.3.	Określanie formy konstrukcji membranowych	96
3.3.1.	Zasady ogólne	96
3.3.2.	Metody modelowania numerycznego	98
3.3.3.	Wykroje	99
3.3.4.	Przykład wstępnego doboru formy konstrukcji membranowej	101
3.4.	Podstawowe formy geometryczne konstrukcji membranowych	105
4.	Klasyfikacja konstrukcji membranowych	112
4.1.	Uwagi wstępne	112
4.2.	Klasyfikacja konstrukcji namiotowych	113
4.2.1.	Klasyfikacja wg Wł. Borusiewicza	113
4.2.2.	Klasyfikacja wg F. Otto i P. Stromeyera	113
4.2.3.	Klasyfikacja funkcjonalna	114
4.2.4.	Propozycja klasyfikacji morfologicznej	114
4.3.	Klasyfikacja konstrukcji pneumatycznych	117
4.3.1.	Klasyfikacja wg A. Tarczewskiego	117
4.3.2.	Klasyfikacja wg W. Jeremiasza	118
4.3.3.	Klasyfikacja wg K. Ishii	119
4.3.4.	Klasyfikacja konstrukcyjna wg G. Minke	120
4.3.5.	Klasyfikacja morfologiczna wg T. Herzoga	122
4.3.6.	Propozycja klasyfikacji konstrukcji pneumatycznych	122

5.	Konstrukcje kształtowane metodą deformacji geometrycznej	123
5.1.	Podstawy metody deformacji geometrycznej	123
5.1.1.	Koncepcja metody	123
5.1.2.	Fazy kształtowania konstrukcji	124
5.1.3.	Wykorzystanie zmiennej sztywności do kształtowania konstrukcji	125
5.1.4.	Podstawowe zależności opisujące wypiętrzanie konstrukcji	126
5.2.	Stalowe konstrukcje prętowe	128
5.2.1.	Schemat ogólny	128
5.2.2.	Konstrukcje wielopoziomowe	129
5.2.3.	Badania modelu konstrukcji prętowej	130
5.2.3.1.	Charakterystyka modeli do badań	130
5.2.3.2.	Konstrukcje o sztywności stałej na długości	133
5.2.3.3.	Konstrukcje o sztywności zwiększonej w części środkowej	133
5.2.3.4.	Konstrukcje o sztywności zmniejszonej w części środkowej	133
5.2.3.5.	Konstrukcje o sztywności stałej na długości, z obciążeniem zewnętrznym	135
5.2.3.6.	Wyniki pomiarów	137
5.3.	Konstrukcje pneumatyczne	141
5.3.1.	Zastosowanie modularnych elementów pneumatycznych w konstrukcjach powłokowych	141
5.3.1.1.	Budowa modularnych powłok pneumatycznych	142
5.3.1.2.	Elementy składowe	142
5.3.1.3.	Przenoszenie sił wewnętrznych	143
5.3.2.	Zastosowanie sprężania i samowypiętrzania do kształtowania modularnych powłok pneumatycznych	144
5.3.2.1.	Proces samowypiętrzania	144
5.3.2.2.	Zastosowanie sprężania do konstrukcji uprzednio scalonych	145
5.3.3.	Regulacja sztywności i twardnienie	146
5.3.3.1.	Konstrukcje o zmiennej sztywności	146
5.3.3.2.	Konstrukcje dostosowujące się – samosztynniejące	147
5.3.4.	Szczegóły techniczne	149
5.3.4.1.	Modularne poduszki pneumatyczne	149
5.3.4.2.	Połączenia poduszek	151
5.3.4.3.	Węzły przelotowe	153
5.3.4.4.	System dostarczania powietrza	155
5.3.5.	Przykłady zastosowań modularnych powłok pneumatycznych	157
5.3.5.1.	Proste powłoki walcowe	157
5.3.5.2.	Zestawy prostych powłok walcowych	158
5.3.5.3.	Przekrycia o kształcie paraboloidy hiperbolicznej	162
5.3.5.4.	Powłoki osiowo symetryczne, typu igloo	162
5.3.5.5.	Składany most pneumatyczny	165
5.3.5.6.	Oslony obiektów w przestrzeni kosmicznej	169
5.3.6.	Badania modelowe modularnych powłok pneumatycznych	171
5.3.6.1.	Powłoka w kształcie paraboloidy hiperbolicznej	171
5.3.6.2.	Powłoka walcowa	173
6.	Wnioski	168
7.	Bibliografia	193

Suplement – Wybrane zagadnienia z konstrukcji membranowych

1. Przedmiot i tezy pracy

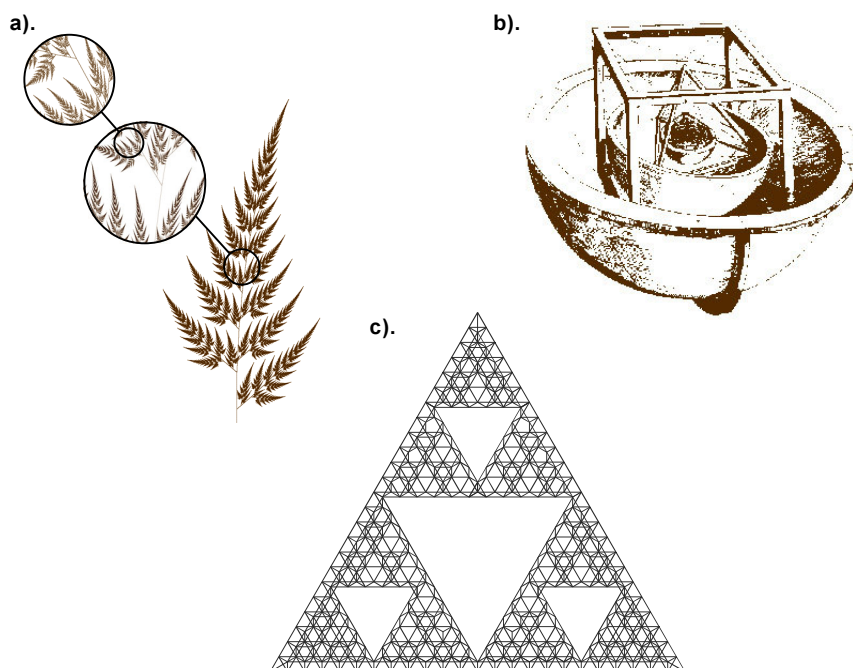
1.1. Wprowadzenie

1.1.1. Uwagi wstępne

Konstrukcje budowlane są tak projektowane, aby spełniały określone wymagania odnośnie wielkości, wymiarów, rozpiętości, obciążeń itd. W okresie ich użytkowania, zwykle kilkudziesięcioletnim, a często znacznie dłuższym — wiele z tych założeń może się zmienić. Budynki są wtedy przebudowywane, modyfikowane, szuka się dla nich nowego przeznaczenia, lub są po prostu rozbierane.

Odmienny sposób rozwoju charakteryzuje struktury tworzone przez naturę. Dostosowują się one stale do zmieniających się potrzeb i sytuacji. Właściwości struktur naturalnych mogą się zmieniać nie tylko w ciągu ich istnienia ale również wiele razy w ciągu dnia. Muszla ślimaka, skorupa orzecha czy żdźbło zbóż — są przykładami struktur wzrastających wraz z powiększeniem się zawartości, którą chronią lub niosą. Kwiaty orchidei, o płatkach ukształtowanych jako dwukrzywiznowe powłoki, które reagują na światło i dotknięcia owadów — to struktury, których dostosowywanie się do warunków w jakich funkcjonują, polega na ruchu i zmienności ułożenia [52]. Obydwa te rodzaje struktur naturalnych mogą być z powodzeniem nazwane „aktywnie dostosowującymi się” [209].

Fascynującym przejawem dostosowywania się struktur tworzonych przez naturę do warunków i potrzeb jest fraktalny charakter wielu obiektów naturalnych. Wiadomo, że większość z nich nie ma idealnych kształtów geometrycznych (*„obłoki nie są sferami, linia brzegowa nie składa się z okręgów, skóra nie jest gładka, nawet światło nie wędruje po liniach prostych”* — Benoit Mandelbrot¹⁾), ale wykazuje cechy wielokrotnego samopodobieństwa. Dotyczy to obiektów różnego rodzaju i różnej wielkości i ma charakter nieskończonego samopowielania. Przykładami mogą być konary drzew, liście paproci, czy linia brzegu morskiego [165], rys. 1.1.a). To zjawisko, opisane matematycznie w ostatnich latach przez Mandelbrota, zostało zauważone znacznie dawniej: *„Wierzę, że proporcje geometryczne posłużyły Stwórcy jako zasada, kiedy ustanowił ciągle tworzenie podobnych obiektów z podobnych obiektów”* — Jan Kepler²⁾, rys. 1.1.b).



Rys. 1.1 – fraktalne modele rzeczywistości:

- a). liść paproci – przykład samopodobieństwa w naturze
- b). pierwszy model kosmologiczny Keplera: orbity planet są wpisane kolejno pomiędzy wielościany platońskie²⁾
- c). przestrzenna struktura prętowa o warstwie górnej ukształtowanej jako trójkąt Sierpińskiego; ilustracja za [64]

¹⁾ Benoit Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, 1982

²⁾ Johannes Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, 1596

Samopodobieństwo można również odnaleźć w konstrukcjach, w których występuje wielokrotne powielanie pewnych rytmów (modułów). Przykładem mogą być przestrzenne konstrukcje prętowe ukształtowane w oparciu o takie formy fraktalne jak trójkąt lub dywan Sierpińskiego, rys. 1.1.c). [64].

Znaczna zmienność formy charakteryzuje również niektóre rodzaje współczesnych lekkich systemów konstrukcyjnych, które są przez to – w pewnym stopniu – podobne do struktur tworzonych przez naturę. Można je podzielić na trzy grupy.

Pierwsza z nich, to **konstrukcje membranowe**. Są to konstrukcje kształtowane w procesie poszukiwania formy (ang. *form-finding*), tj. takie, których kształt nie może być zdeterminowany bez określenia działających w nich sił i odwrotnie. W konstrukcjach tych, inaczej niż w „konstrukcjach klasycznych”, nie można założyć *a priori* określonej formy obiektu, a następnie poddać je analizie. Proces kształtowania geometrycznego jest więc nierozdzielny od analizy statyczno-wytrzymałościowej i jest to proces iteracyjny. Konstrukcje typu *tensegrity*¹⁾, membrany z materiałów tekstylnych, konstrukcje pneumatyczne oraz siatki cięgnowe — to przykłady takich konstrukcji, które są bardzo intensywnie rozwijane w ostatnim okresie. Zastosowano je w wielu spektakularnych obiektach zrealizowanych na całym świecie. Łączą w sobie wysoką estetykę formy architektonicznej z czytelną ekspresją rozwiązań konstrukcyjnych. Jednocześnie w rozwoju tych konstrukcji widać wyraźnie kontynuację niektórych pomysłów obecnych w budownictwie od samych jego początków. Połączenie tych koncepcji z nowoczesnymi technologiami materiałowymi oraz zaawansowaną analizą obliczeniową, stworzyło zupełnie nowe możliwości kształtowania formy konstrukcyjnej obiektów.

Drugą grupą są **konstrukcje samowypiętrzalne**. Proces samowypiętrzania przypomina otwieranie się kwiatu: początkowo płaska i niemal zupełnie wiotka konstrukcja jest wypiętrzana do założonego kształtu i uzyskuje niezbędną sztywność. Proces ten można zatrzymać, cofnąć lub powtórzyć w każdej fazie. Końcowy kształt konstrukcji może być „zaprogramowany” poprzez dobór parametrów początkowych. Można ją też ukształtować w tak szczególny sposób, aby wykazywała wzrastającą odpowiedź na zwiększające się obciążenie – są to tzw. konstrukcje samotwardniejące. Główne zalety konstrukcji samowypiętrzalnych to: możliwość wielokrotnego użycia, dostosowanie do lokalnych warunków, łatwość montażu i demontażu, różnorodność uzyskiwanych kształtów oraz ograniczenie do minimum operacji na placu budowy.

Trzecią grupę tworzą **konstrukcje rozkładalne i przenośne**. Mogą one stanowić część większych konstrukcji stacjonarnych, jako np. dachy rozkładane, jak również tworzyć samodzielne, przenośne obiekty. Charakteryzuje je wielka różnorodność stosowanych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych.

Wymienione powyżej rodzaje konstrukcji mają istotną cechę wspólną. **Podczas ich kształtowania następuje bardzo znaczna zmiana geometrii początkowej**. Proces ten przebiega w każdym z wymienionych rodzajów konstrukcji nieco inaczej.

W konstrukcjach membranowych z materiałów tekstylnych oraz w konstrukcjach pneumatycznych, odpowiednio wykrojone i połączone płaskie bryty tkaniny ulegają – pod wpływem odpowiedniego naprężenia wstępnego – dwukierunkowemu przestrzennemu zakrzywieniu uzyskując kształt pozwalający im na przenoszenie znacznych obciążeń zewnętrznych. Podobne zjawisko zachodzi, choć nieco inaczej, w siatkach cięgowych.

Konstrukcje samowypiętrzalne, niezależnie od materiału, z którego są wykonane, są wstępnie scalane jako płaskie, o stosunkowo niewielkiej sztywności. Następnie, po przyłożeniu siły sprężającej, doznają bardzo znacznych odkształceń. W efekcie, konstrukcje te ulegają wypiętrzeniu, osiągając założony kształt końcowy i uzyskują stopniowo coraz większą sztywność niezbędną do przenoszenia obciążeń.

W przypadku konstrukcji rozkładalnych i przenośnych, przy całej ich różnorodności, zmienność geometrii jest ich wspólną, wyróżniającą cechą.

Dla określenia opisanych powyżej sposobów kształtowania konstrukcji przyjęto wspólną nazwę **proces deformacji geometrycznej**.

¹⁾ Patrz przypis ¹⁾ na str. 111

1.1.2. Zakres pracy

W niniejszej pracy podjęto próbę prześledzenia ewolucji najważniejszych koncepcji konstrukcyjnych, które pojawiły się w okresie rozwoju konstrukcji kształtowanych w procesie deformacji geometrycznej.

Zakres badań ograniczono do lekkich systemów konstrukcyjnych złożonych z elementów membranowych, prętowych oraz cięgnowych z pominięciem konstrukcji rozkładalnych i przenośnych.

Określenie „membrana”, będzie tutaj używane na oznaczenie konstrukcji wykonanych z cienkich, zupełnie wiotkich materiałów takich jak tkaniny, folie, czy bardzo cienkie blachy, mogące przenosić wyłącznie siły rozciągające, które swoją sztywność i zdolność przenoszenia obciążeń uzyskują poprzez odpowiednie ukształtowanie przestrzenne oraz wstępne naprężenie.

1.1.3. Ogólna charakterystyka obecnego stanu wiedzy

Konstrukcje kształtowane w procesie deformacji geometrycznej są od zamierzonych czasów znane i stosowane w różnych kręgach cywilizacyjnych. Namioty z tkanin towarzyszą nomadom od starożytności do czasów współczesnych. Liny były wykorzystywane jako konstrukcje nośne mostów od początku naszej ery w Chinach, do konstrukcji przekryć stadionów — w starożytnym Rzymie. Konstrukcje rozkładane, początkowo niewielkich rozmiarów, stosowano już w starożytnym Egipcie i Asyrii. Elementy wymienionych rozwiązań często występowały łącznie w jednym obiekcie.

Tego typu rozwiązania były chętnie stosowane również w późniejszym okresie do wielu różnych zastosowań użytkowych, jednak głównie w obiektach tymczasowych i przenośnych. Rozwój technologii, przede wszystkim materiałowych: wprowadzenie lin stalowych i syntetycznych, tkanin na bazie włókien szklanych i poliestrowych, zastosowanie tworzyw chemicznych, uprzemysłowienie produkcji, opracowanie efektywnych metod montażu — spowodowały, że możliwe stało się zastosowanie rozwiązań dotychczas traktowanych jako tymczasowe i przeznaczone do wykonywania raczej niewielkich obiektów, w obiektach stałych, często o wielkich wymiarach i o dużym znaczeniu.

Pewne przewartościowanie poglądów estetycznych, które w związku z tym nastąpiło, wzmocniło dodatkowo zaufanie do takich rozwiązań, a nawet wytworzyło pewnego rodzaju presję na ich stosowanie. Umożliwiło to z kolei rozpoczęcie prac nad wdrażaniem dalszych rodzajów tego typu konstrukcji, kształtowanych w procesie poszukiwania formy, które uprzednio były uważane za efektowne ale raczej nie dające się praktycznie wykorzystać, np. konstrukcje typu *tensegrity*, czy wcześniej — konstrukcje pneumatyczne.

Nowe rodzaje konstrukcji spowodowały powstanie nowych problemów projektowych, gdyż okazało się, że tradycyjne metody obliczeniowe umożliwiają jedynie ich uproszczoną analizę. Początkowo, podstawową wiedzę na temat tych konstrukcji uzyskiwano na podstawie badań modelowych. Później opracowane zostały nowe metody obliczeniowe, takie jak metoda gęstości sił, czy metoda elementów skończonych, która ma charakter ogólniejszy i jest wykorzystywana również do obliczeń wielu „tradycyjnych” ale złożonych konstrukcji. Opracowano również nowe metody opisu geometrycznego, jak np. algebra formexów. Pojawienie się i upowszechnienie stosowania komputerów umożliwiło masowe obliczenia numeryczne, co w konsekwencji pozwoliło projektantom na racjonalne przeprowadzanie procesu kształtowania formy i analizy statyczno-wytrzymałościowej tych nowych rodzajów konstrukcji.

Współczesne konstrukcje kształtowane w procesie deformacji geometrycznej są obiektami, które wyróżniają się na tle innych konstrukcji swoją formą, i często również skalą.

Wśród twórców, którzy wnieśli szczególny wkład w rozwój opisywanych konstrukcji należy wymienić Macieja Nowickiego, Freia Otto, Waltera Birda, Richarda Buckminstera Fullera, Emilio Perez Piñero, Mamoru Kawaguchi.

Koncepcja wykorzystania dużych deformacji do nadawania konstrukcji kształtu, pojawiła się w pracach O.Sircovicha Saara, P.E. Ellena oraz L.C. Schmidta, w latach osiemdziesiątych XX w. W okresie tym powstał również komercyjny system konstrukcji samowypiętrzalnych – Strarch.

1.2. Cel i tezy pracy

1.2.1. Cel pracy

Celem pracy jest analiza dotychczasowego rozwoju i możliwości dalszego udoskonalenia metod kształtowania konstrukcji w oparciu o zasadę znacznej zmiany geometrii początkowej.

Przeprowadzono analizę najbardziej charakterystycznych kierunków rozwoju historycznego tych konstrukcji. Przedstawiono najważniejsze rodzaje wciąż stosowanych współcześnie prądowych rozwiązań konstrukcyjnych. Omówiono podstawowe rozwiązania oraz zasady kształtowania stosowane współcześnie.

Sformułowano i zaproponowano zastosowanie **metody deformacji geometrycznej**. Jest to metoda polegająca na spowodowaniu – w konstrukcji o założonej konfiguracji początkowej – odkształceń sprężystych o wielkości znacznie przekraczającej zakres tzw. małych odkształceń pozwalających na uproszczoną analizę statyczno-wytrzymałościową. Uzyskana nowa forma ustroju zachowuje trwałą równowagę dzięki zastosowaniu elementów służących do spowodowania odkształcenia jako elementów konstrukcji w jej postaci końcowej.

Podstawą do badań w niniejszej pracy jest propozycja zastosowania cięgną sprężającego jako docelowego elementu tworzącego jeden z pasów lub warstw konstrukcji. W takim rozwiązaniu nie występują dodatkowe elementy zdolne przenosić ściskanie w tym pasie, a jedynie cięgno – zarówno w fazie wypiętrzania jak i w fazie pracy konstrukcji.

Warstwa ściskana może być wykonana jako konstrukcja przestrzenna, która w konfiguracji początkowej tworzy niemal mechanizm. Stabilność kształtu jest w niej utrzymywana dzięki sztywności giętnej wybranych elementów. Warstwa ta może też być wykonana jako dźwigar powierzchniowy. Rozpatrzony będzie szczególny przypadek dźwigara powierzchniowego wykonanego z drobnowymiarowych modułarnych elementów pneumatycznych.

Poprzez odpowiedni dobór parametrów początkowych deformowanej konstrukcji, a szczególnie sztywności warstwy ściskanej lub sposobu, w który ta sztywność zmienia się wzdłuż rozpiętości oraz wielkości siły powodującej deformację – można określić parametry konfiguracji końcowej, w jakiej znajdzie się konstrukcja. Rozpatrzony zostanie sposób, w jaki zmienna sztywność warstwy ściskanej wpływa na konfigurację końcową.

1.2.2. Tezy pracy

Analiza ewolucji form systemów konstrukcyjnych kształtowanych w procesie deformacji geometrycznej oraz rozwiązań stosowanych obecnie w obiektach o lekkiej konstrukcji, pozwala stwierdzić ciągłość rozwoju koncepcji technicznych oraz atrakcyjność wykształconych form przestrzennych. Jednocześnie, stosowane współcześnie materiały konstrukcyjne oraz metody analizy obliczeniowej pozwalają w najbardziej efektywny sposób wykorzystać zalety rozwiązań konstrukcyjnych. Prowadzi to do sformułowania pierwszej tezy niniejszej rozprawy.

Teza I. | Koncepcje kształtowania konstrukcji w procesie deformacji geometrycznej, będące wynikiem rozwoju historycznego oraz uwzględniające najnowsze osiągnięcia materiałowe i technologiczne, umożliwiają osiągnięcie interesujących i indywidualnych form architektonicznych w obiektach realizowanych za pomocą tego rodzaju systemów.

Zaproponowana w pracy metoda, łącząc w jednym procesie kształtowanie i montaż konstrukcji, może pozwolić na kształtowanie systemów konstrukcyjnych z pakietów montażowych, które zajmując małe objętości, mogą być łatwo transportowane nawet na duże odległości i – po przewiezieniu na miejsce – szybko i łatwo rozpakowane i zmontowane, uzyskując niemal natychmiast założony kształt.

Umożliwia to realizację obiektów o różnym kształcie i przeznaczeniu, zarówno stałych jak i tymczasowych. W pierwszej grupie charakterystycznymi przykładami mogą być np. hale widowiskowo-sportowe, a w drugiej grupie np. konstrukcje szpitali polowych budowanych na terenach dotkniętych klęskami żywiołowymi. To ostatnie stwierdzenie uzasadnia sformułowanie drugiej tezy niniejszej rozprawy.

Teza II. | Metoda deformacji geometrycznej umożliwia kształtowanie szybko montowalnych, lekkich rodzajów systemów konstrukcyjnych, zarówno dla obiektów tymczasowych jak i dla obiektów stałych.

Połączenie kształtowania i realizacji proponowanych konstrukcji w jednym procesie pozwala na lepsze zrozumienie wzajemnych uwarunkowań istotnych faz powstawania obiektu i wyciągnięcia stąd wniosków służących poprawie efektywności tego procesu. Poprzez odpowiedni dobór parametrów początkowych deformowanej konstrukcji, a zwłaszcza poprzez wykorzystanie jej zmiennej sztywności możliwe jest regulowanie w szerokim zakresie uzyskiwanej postaci końcowej proponowanych systemów konstrukcyjnych. Możliwe jest zastosowanie różnych rozwiązań materiałowych i różnych konfiguracji początkowych.

Teza III. | W procesie wznoszenia konstrukcji zaprojektowanej według zasad metody deformacji geometrycznej, można stosunkowo łatwo uzyskiwać zaplanowany kształt systemu konstrukcyjnego, stosując względnie proste środki techniczne.

2. Ewolucja formy konstrukcji membranowych

2.1. Ewolucja historycznych sposobów kształtowania konstrukcji namiotowych

Historia rozwoju konstrukcji namiotowych nie jest opracowana tak dobrze jak inne działy historii architektury¹⁾. Arthur Upham Pope, z zalem stwierdza, że namioty i pawilony, „wspaniałe konstrukcje, które przez tysiące lat były dumą władców zachodniej Azji, wyroby wielkich rozmiarów, bardzo kosztowne, i – jeśli nawet nie trwałe – zawsze niezwykle piękne”²⁾ nigdy nie były traktowane poważnie przez historyków sztuki jako obiekty architektoniczne³⁾. Również obecnie stosunkowo niewielu badaczy zajmuje się tą problematyką⁴⁾.

Spółeczeństwa zurbanizowane, w pewnym okresie swojego rozwoju, odwróciły się od namiotu, najstarszej i najbardziej pierwotnej z form architektonicznych wytworzonych przez człowieka⁵⁾. Jego rola została zredukowana do zastosowań w obiektach tymczasowych, przenośnych, związanych z podróżą, wojną itp. oraz do drugorzędnych funkcji architektonicznych, takich jak osłony, markizy czy zadaszenia. W ten sposób namioty funkcjonowały przez długi czas na marginesie głównego nurtu architektury.

Przy końcu drugiego tysiąclecia wielu projektantów ponownie uległo fascynacji konstrukcjami z lekkich tkanin. O ile jednak kiedyś ceniono je za ochronę, jaką dawały mu przed żywiołami, to teraz szuka się w nich cech, które wyróżniają je spośród innych rodzajów konstrukcji: lekkości, wielkości, niezwykłych kształtów, przepuszczalności światła, czy mobilności. W jednym z opowiadań w Baśniach z tysiąca i jednej nocy król mówi „Chcę byś przyniósł mi namiot, który jest tak lekki, że jeden człowiek może nieść go w ręce i tak wielki, że może pomieścić mój dwór, armię i obóz”⁶⁾. Współczesne konstrukcje membranowe są bliskie spełnienia tego marzenia. Ich lekkość daje ludziom poczucie wolności, niezależności od ograniczeń cywilizacji. Mówi się nawet o „pokoleniu współczesnych nomadów”.

2.1.1. Namiot jako tradycyjne schronienie człowieka

Konstrukcje, które wymienia się obecnie jako najstarsze formy namiotów, były wykonywane od czasów prehistorycznych. Są to przede wszystkim szałas budowane ze wszelkich dostępnych materiałów: gałęzi, kości i skór upolowanych zwierząt, liści i kory drzew itp. Najstarsze ślady takich obiektów pochodzą z ok. 37 000 lat p.n.e.⁷⁾, rys. 2.1. Z tych pierwotnych form rozwinęło się wiele konstrukcji wykorzystywanych przez niektóre społeczności do czasów współczesnych. Niektóre z nich są wciąż wykonywane w niemal

¹⁾ Namioty są najczęściej rozpatrywane jako wyroby sztuki użytkowej, wraz z tkaninami.

²⁾ A.U. Pope, *Tents*, [w:] *A Survey of Persian Art*, Oxford, 1938–1939, III. Cytat za [174] i [45]

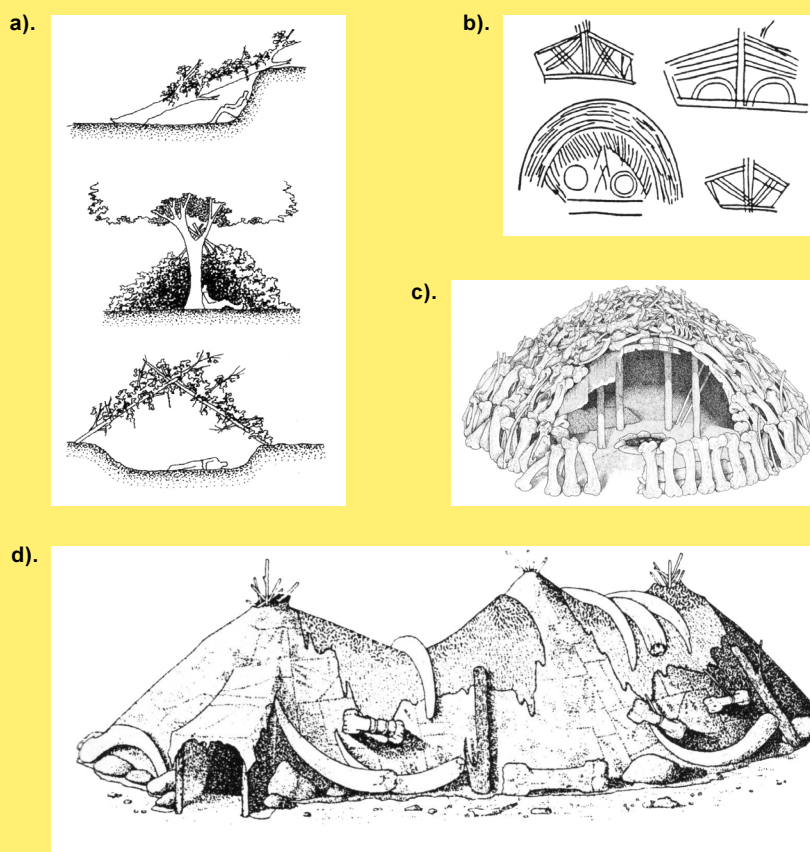
³⁾ Przyczyny tego są różne. Historia budownictwa i architektury opiera się na konkretnych, całkowicie lub częściowo odkrytych obiektach. Z powodu nietrwałości namiotów, brakuje artefaktów, stwarzających podstawę do opracowań badawczych. Historia sztuki z kolei, traktuje namiot jedynie jako element dekoracyjny lub obiekt, którego funkcja własna schodzi na dalszy plan. Badania na tekstyliami, pomijają często namioty z powodu obfitości innych produktów tekstylnych, takich jak odzież, dywany itp. [73]

⁴⁾ Spośród badaczy polskich należy wymienić zwłaszcza nieżyjącego już, Tadeusza Mańkowskiego (por. np. prace [139] [140] [141]) oraz Marię Gutkowską-Rychlewską (por. praca [175]). Za granicą, po raz pierwszy, w kontekście architektonicznym, opisał namioty perskie wspomniany Artur Upham Pope (op.cit.). Obecnie, zajmują się tymi zagadnieniami przede wszystkim badacze związani z Institut für Leichte Flächentragwerke przy Uniwersytecie w Stuttgarcie: Bertold Burkhardt i Rainer Graefe. Niezwykle szerokie badania nad namiotami używanymi w przeszłości i obecnie na Bliskim i Środkowym Wschodzie przeprowadził Peter Alford Andrews, publikując ich wyniki w pracach [44] [45] [46] i [47].

⁵⁾ Porównaj [221], str.52

⁶⁾ Cytat za [73]

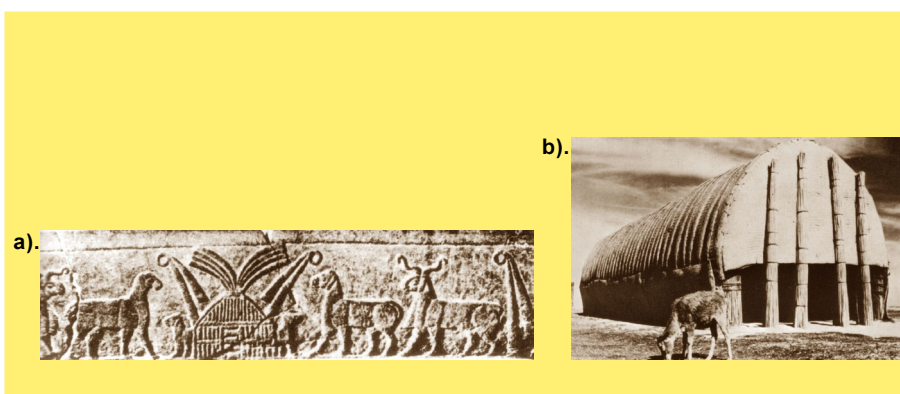
⁷⁾ Znaleźiska w Mołodowej k. Czerniowców, na Ukrainie [221]. Patrz też [55] [73] [74] [75] [228]



Rys. 2.1 – najstarsze formy namiotów - szałasów:

- a). wykorzystanie warunków naturalnych do wykonania schronienia, [194]
- b). rysunki skalne z jaskini Font-de-Gaume, Dordogne, wyobrażające prawdopodobnie letnie szałas (okres górnego paleolitu), [221]
- c). szałas z kości mamutów, wyścielany od środka skórą; Meziriczi na Ukrainie, ok. 14 000 p.Ch., rekonstrukcja, [221]
- d). szałas łowców mamutów, z Puszczy na Ukrainie; konstrukcja namiotu była oparta na żerdziach, a kości i kły mamucie służyły do obciążenia pokrycia, rekonstrukcja, [221]

identyczny sposób jak przed tysiącami lat, jak na przykład wielkie szałas z trzciny budowane w południowym Iraku, rys. 2.2. Inne, które przeszły ewolucję formy, występują w wielkiej liczbie odmian wśród współczesnych ludów koczowniczych.



Rys. 2.2 – szałas dawne i współczesne:

- a). szałas z trzciny przedstawiony na tabliczkach kamienych z Mezopotamii (okres Dżamdat Nasr), za [221]
- b). współczesna chata z rejonu Marsh Arabs w południowym Iraku, za [174]

2.1.2. Namioty ludów koczowniczych

Określenie „namiot”, jest rozumiane bardzo różnie przez badaczy. Najtrafniejsza i zarazem najszerza, wydaje się definicja, mówiąca że namiot jest to konstrukcja, w której pokrycie może być oddzielone od podparcia, i wraz z nim transportowane¹⁾²⁾.

¹⁾ Taki zakres znaczeniowy określenia „namiot” wprowadził Peter Alford Andrews, w swojej fundamentalnej pracy „Nomad tent types in the Middle East” [45]. Praca ta została włączona do publikowanego w Niemczech Tübinger Atlas des Vorderen Orients (TAVO), pod numerem: Reihe B (Geisteswissenschaften) Nr. 74/1/1–4

²⁾ W licznych, współcześnie spotykanych przykładach, przewożone jest jedynie pokrycie, podczas gdy szkielet pozostaje np. na letnim obozowisku, do następnego roku [45]

Inne definicje, wyłączają niektóre rodzaje konstrukcji namiotowych. Najczęściej, przyczyną wykluczenia jest rodzaj szkieletu (często dotyczy to np. yurt) lub pokrycia. Ponieważ, zwłaszcza w namiotach szkieletowych, materiał pokrycia jest niezwykle różnorodny (np. filc, wołok, maty lub wręcz strzecha), utrudnia to rozróżnienie namiotów od obiektów stałych. Jednakże, nie można dyskwalifikować danego rodzaju konstrukcji jedynie dlatego, że zdarza się, iż jest ona czasowo pokryta materiałem, którego nie przewozi się wraz ze szkieletem.

Podstawowy podział namiotów wydziela dwie grupy: namioty **szkieletowe** i namioty **membranowe**.

W namiotach szkieletowych, pokrycie i konstrukcja wsporcza są niezależne. Szkielet zachowuje stabilność również bez pokrycia, zupełnie odłonięty (choć czasem wzmocniony linami, przenoszącymi siły rozciągające). Pokrycie jest w tym wypadku bierne, stanowi obciążenie szkieletu i często wykonane jest z materiału o bardzo małej wytrzymałości na rozciąganie (np. filc), który nie mógłby być zastosowany w namiotach membranowych.

Namioty membranowe charakteryzuje wzajemna zależność pokrycia i konstrukcji wsporczej. Usunięcie jednego z nich, spowodowałoby zawalenie się całości¹⁾. Membrana spełnia swoją nośną i stabilizującą funkcję, dzięki odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie. Często jest dodatkowo wzmocniona linami. Namioty membranowe, są powszechnie, z powodów historycznych, nazywane „czarnymi namiotami”.

Dalszy podział obydwu, powyższych kategorii opiera się na głównych cechach konstrukcji, a następnie na występowaniu wśród różnych grup etnicznych. Niektóre rodzaje namiotów wykazują cechy wspólne zarówno dla konstrukcji szkieletowych jak i dla membranowych, i ich kwalifikacja ma charakter umowny.

Zwraca się uwagę na społeczne implikacje rodzaju konstrukcji namiotowej używanej w danej zbiorowości. Istnieje wyraźna relacja pomiędzy nimi, a charakterystycznymi cechami społecznymi. Namioty szkieletowe, o sztywnej strukturze, stwarzają wyraźny rozdział pomiędzy wnętrzem, a otaczającą przestrzenią. Są one chętnie używane przez ludy o nastawieniu skierowanym do wewnątrz, zorientowane wspólnotowo, o wyraźniejszych podziałach wewnętrznych i hierarchii. Czarne namioty, natomiast, o elastycznej konstrukcji, nie tworzą tak wyraźnej granicy. Używają ich koczownicy otwarci na zewnątrz i egalitarni, indywidualiści, dla których współzawodnictwo i intrygi są akceptowaną częścią życia²⁾.

Znaczenie namiotu wśród ludów koczowniczych wybiega daleko poza funkcje mieszkalne:

„Namiot jest uważany za uświęcone schronienie, pod którego osłoną upływa życie. Wszystkie narady klanów i zgromadzenia, odbywają się w namiocie, na który Kirgizi przysięgają: «Przysięgam na mój namiot»” – Waldemar Jochelson, Peoples of Asiatic Russia, New York 1928, cytata za [90]

2.1.2.1. Namioty szkieletowe

Namioty szkieletowe, wywodząc się bezpośrednio z najstarszych konstrukcji szałasowych, uległy szybko znacznemu zróżnicowaniu. Różnorodność ta przejawia się zarówno w preferowanych lokalnie kształtach, w rodzajach stosowanych materiałów, sposobie wznoszenia, jak również w systemach podparcia pokrycia, czy w stosowaniu tradycyjnych, typowych rozwiązań konstrukcyjnych.

Poniżej omówiono najważniejsze rodzaje namiotów, używanych współcześnie w różnych częściach świata, przez narody koczownicze.

Namioty używane na Środkowym Wschodzie | Namioty o konstrukcji szkieletowej, występujące współcześnie w Azji Środkowej, zostały bardzo szczegółowo opisane i sklasyfikowane³⁾ przez P. A. Andrews, w pracy [45].

¹⁾ Prorok Mahomet użył tej zależności jako ilustracji wzajemnych relacji w małżeństwie. Mąż jest w niej przedstawiany jako słup podtrzymujący namiot, a żona jako rozciągnięta na nim tkanina. Całość jest stabilna, jeśli oboje dobrze spełniają swoje role [45].

²⁾ Porównaj: Richard Tapper, „Felt Huts, Haired Tents, Scene Changes and Thought Structures. Tents, Identity and Society among Şahsevân and Durrânî Nomads”, w [45].

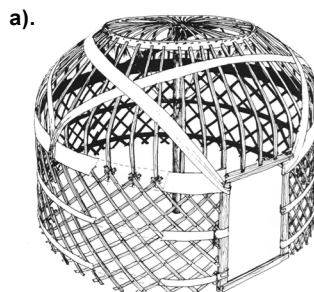
³⁾ Przy tej okazji P. A. Andrews zauważa, że powszechnie stosowane w językach zachodnich określenia namiotów szkieletowych: jurta lub kubitka, są niewłaściwe i stanowią zapożyczenia z języka rosyjskiego, który z kolei utworzył je od tureckich słów: yurt (terytorium, obozowisko) i kebit (skład, sklepik). Mongołowie używają określenia ger, a ludy pochodzenia tureckiego – określeń ev, öy i üy. Wszystkie one oznaczają mieszkanie.

Wyróżnia on czternaście głównych rodzajów konstrukcji, z których każdy ma wiele wariantów i odmian regionalnych. Poniżej krótko je omówiono. Zachowane zostały oryginalne, przyjęte w TAVO¹⁾ symbole literowe.

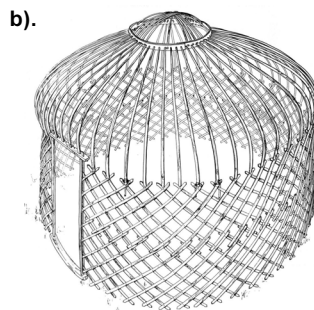
Rodzaj namiotu:

Schemat budowy:

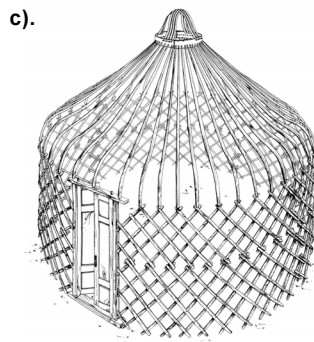
a namioty kratkowe (jurty) –
(ang. *trellis tents*)
– charakterystycznym elementem tego typu konstrukcji jest kratka — układ krzyżujących się żeber w ścianie bocznej; ich połączenia są często wykonywane w sposób umożliwiający „nożycowe” składanie kratki. Żebra dachu są ułożone promieniście i zamocowane w centralnym kole dachowym; rys. 2.3.a).



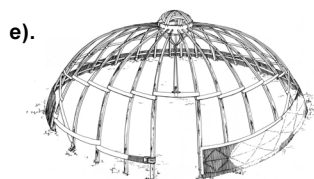
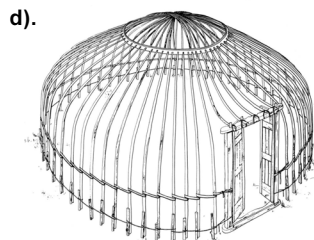
b namioty kratkowe, dwupoziomowe
(ang. *trellis tents, two-tiered*)
– żebra ścian bocznej są wykonywane z dwóch części, które mogą być oddzielnie składane i przewożone; rys. 2.3.b).



c namioty kratkowe, dwupoziomowe, spiczaste –
(ang. *trellis tents, two-tiered, pointed*)
– koło centralne jest w tego typu namiotach znacznie mniejsze niż w innych namiotach kratkowych, a dach — bardziej wyniosły; rys. 2.3.c).



d namioty żebrowe, kopulaste –
(ang. *rib tents, domed without trellis*)
– namioty żebrowe charakteryzuje układ promienistych żeber, podobnie jak w konstrukcji parasola; zachowuje on wszystkie cechy namiotu kratkowego, poza występowaniem samej kratki, rys. 2.3.d). W niektórych odmianach, wierzchołek jest zakotwiony do ziemi za pomocą liny; rys. 2.3.e).



Rys. 2.3 – główne rodzaje namiotów szkieletowych, występujących współcześnie w Azji Środkowej:

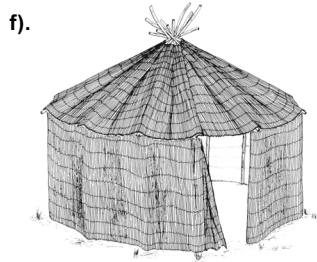
- a). namioty kratkowe (jurty)
- b). namioty kratkowe, dwupoziomowe
- c). namioty kratkowe, dwupoziomowe, spiczaste
- d). namioty żebrowe, kopulaste
- e). namioty żebrowe, kopulaste

Ilustracja za [46]

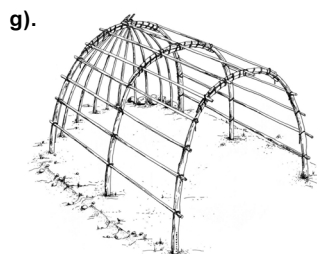
¹⁾ Patrz przypis ¹⁾ na str. 10

- e namioty żebrowe, z dachem stożkowym opartym na słupkach ścian –
(*ang. rib tents, conical roof supported on wall stakes*)

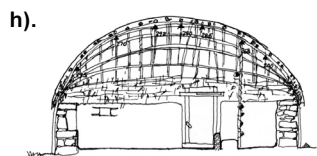
– w namiotach tego rodzaju żebra promieniste są proste, a ich dolne końce są oparte na słupkach wbitych w grunt; rys. 2.3.e).



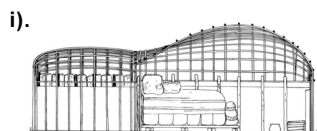
- f namioty wyginane, tunelowe –
(*ang. bender tents, tunnel-shaped*)
– we wszystkich namiotach wyginanych występują wiotkie pręty, lub wiązki, które są zamocowane w gruncie na przeciw siebie i wyginane aż do utworzenia łuku, a następnie łączone w szczycie; w namiotach tunelowych łuki są umieszczone równolegle¹⁾; rys. 2.3.f).



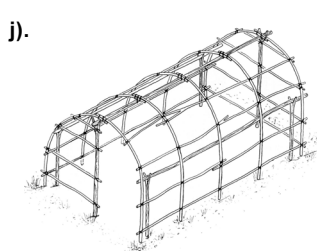
- g namioty wyginane, ze wzmocnioną ścianą –
(*ang. bender tent with consolidated wall*)
– namioty tego rodzaju mają ścianę usztywnioną w dolnej części plecionką, czasami otynkowaną; rys. 2.3.g).



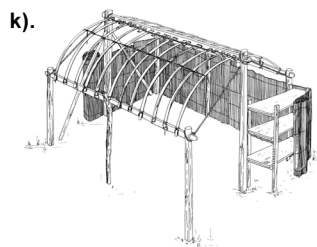
- h namioty wyginane, z aneksem w formie apsydy
(*ang. bender tent with apsidal annexe*)
rys. 2.3.h).



- i namioty sklepieniowe, wyginane –
(*ang. vaulted tents with benders*)
– namioty sklepieniowe są odmianą namiotów wyginanych, ale występuje w nich podłużny, sztywny pręt umieszczony w szczycie dachu, często podparty słupkiem na końcach; rys. 2.3.i).



- j namioty sklepieniowe, z oddzielną ramą ścienną –
(*ang. vaulted tents with distinct wall frame*)
– w namiotach tego rodzaju, żebra nie są utwierdzone w gruncie lecz zamocowane do szczytu (prostej) ściany bocznej; w miejscu zamocowania może występować podłużna belka na słupkach lub kratka; rys. 2.3.j).



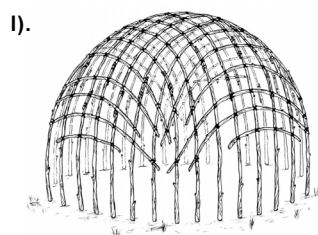
Rys. 2.3 – cd:

- f). namioty żebrowe, z dachem stożkowym opartym na słupkach ścian
g). namioty tunelowe
h). namioty wyginane, ze wzmocnioną ścianą
i). namioty wyginane, z aneksem w formie apsydy
j). namioty sklepieniowe, wyginane
k). namioty sklepieniowe, z oddzielną ramą ścienną

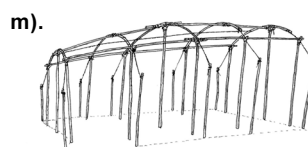
Ilustracje za [46]

¹⁾ Namioty tunelowe mają tę samą formę, co osłony na wozach i w tej formie są wykorzystywane od ok. pięciu tysięcy lat. Wiadomo, że wozów takich używali Scytowie. Przyjmuje się, że występujące obecnie namioty tunelowe, pochodzą od tamtych pierwotników, szeroko rozpowszechnionych wzdłuż południowej granicy stepów [45].

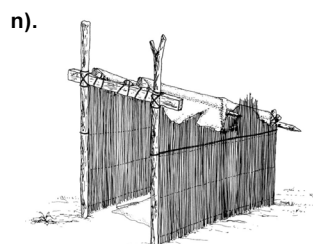
k namioty łukowo-żebrowe –
(*ang. arched armature tents*)
– w namiotach tego rodzaju, występują często dwa, krzyżujące się układy żebrowe łukowych; ponieważ zagięcie żebrowe jednego kierunku, ogranicza długość żebrowe w drugim kierunku, wielkość tego typu konstrukcji jest stosunkowo mała; rys. 2.3.k).



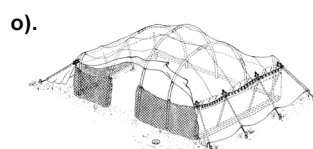
l namioty łukowe, ze słupkami ściennymi –
(*ang. arched tents with wall stakes*)
– w namiotach tego rodzaju słupki mogą występować na całym obwodzie ścian bocznych lub tylko w wybranych miejscach; mogą też występować podłużne listwy usztywniające, prostopadłe do łuków; rys. 2.3.l).



m namioty pochylone –
(*ang. lean-to tents*)
– w namiocie tym występują słupki ale nie ma łuków — stosowany jest jako okazjonalne przekrycie; ma ograniczony zasięg występowania; rys. 2.3.m).



n namioty łukowe –
(*ang. arched tents*)
– namioty łukowe są formą przejściową, pomiędzy namiotami szkieletowymi i membranowymi; łuki w układzie równoległym są stateczne pod działaniem ciężaru własnego ale nie pod działaniem wiatru; nie występują w nich podłużne elementy usztywniające; rys. 2.3.n).



Rys. 2.3 – cd:
l). namioty łukowo-żebrowe
m).namioty łukowe, ze słupkami ściennymi
n).namioty pochylone
o). namioty łukowe

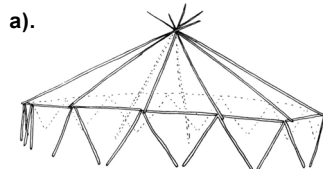
Ilustracje za [46]

Koczownicy, żyjący w innych częściach świata, wykształcili wiele innych, własnych form namiotów. Zasięg ich występowania jest zwykle ograniczony do terytorium danej narodowości. Z tego względu nie są one obecnie dodatkowo sklasyfikowane według kryteriów konstrukcyjnych.

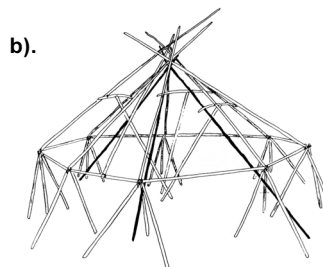
W dalszej części omówiono namioty z pięciu głównych — poza Środkową Azją — rejonów, ograniczając się do najciekawszych rozwiązań konstrukcyjnych, zwłaszcza różnych od opisanych powyżej.

Namioty koczowników syberyjskich | Życie wielu koczowniczych narodów Syberii jest zależne od stad reniferów, które wypasają. Zmieniają wraz z nimi pastwiska, nieustannie przenosząc również swe domy. Konieczność sprostania bardzo trudnym warunkom klimatycznym: silnym wiatrom i dużym opadom śniegu, częstym burzom śnieżnym i wielkim mrozom, doprowadziły do powstania oryginalnych rozwiązań konstrukcyjnych. Na uwagę zasługują zwłaszcza namioty używane przez Ewenków oraz Czucków i Koriaków [90].

Namiot używany przez Ewenków, „czorama-diu”, nazywany jest też „syberyjską kopułą geodezyjną”, rys. 2.4.a). Jego ściany są zbudowane z wielu (10, 12 lub 14) grup słupków drewnianych o równej długości, związanych razem na końcach. Ich układ jest bardzo regularny. Żerdzie tworzące dach są podpierane przez cztery maszty w środku namiotu. Pokrycie stanowią skóry renifera.



Ciekawa jest konstrukcja namiotów Czukczów i Koriaków, zwane „jaranga”, przypominająca konstrukcję namiotów Ewenków, rys. 2.4.b). Ich budowa rozpoczyna się od postawienia w środku trójnoгу z grubych żerdzi, o długości od trzech do czterech i pół metra. Wokół niego, stawiane są słupki o wysokości do półtora metra, tworzące koło o średnicy od pięciu do dziewięciu metrów. Następnie umieszczane są żerdzie dachowe oraz podpierające je maszty zakończone poprzeczką. Namioty są wewnątrz podzielone na wiele (od trzech do ośmiu) sypialni, wydzielonych dodatkowymi ścianami ze skór [90].



Rys. 2.4 – namioty koczowników syberyjskich:

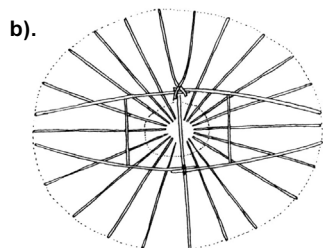
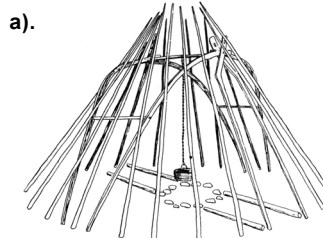
- a). namioty „czorama-diu”, tzw. syberyjskie kopuły geodezyjne, Ewenków
- b). namioty „jaranga” Czukczów i Koriaków

Ilustracje za [90]

Koczownicy syberyjscy używają również namiotów stożkowych, nieco innych w tajdze i w tundrze. Ich konstrukcja opiera się na trzech masztach, które są ustawiane na początku, a następnie uzupełniane dodatkowymi masztami w ilości od dwudziestu, do trzydziestu pięciu. W wierzchołku są one związane skręconymi wtkami brzoźowymi lub rzemieniami. Namioty te przypominają opisane poniżej, niewątpliwie pochodzące od nich, namioty tipi [3.29].

Namioty Lapończyków | Zamieszkujący północną część Skandynawii, Lapończycy, używają namiotów, które nazywają „kata”. Występują one w trzech odmianach: darniowe, z masztem widelcowym oraz z masztem zakrzywionym. Namiot z masztem widelcowym przypomina syberyjskie namioty stożkowe oraz północnoamerykańskie tipi. Namiot darniowy jest obiektem stałym, o konstrukcji analogicznej jak namiot z zakrzywionym masztem, lecz znacznie masywniejszej, pokrytej darnią. Namiot z zakrzywionym masztem stanowi oryginalne rozwiązanie Lapończyków i nie jest stosowany nigdzie indziej [90].

Szkielet namiotu z zakrzywionym masztem, rys. 2.5, składa się z szeregu pochylonych na obwodzie żerdzi oraz ramy. Rama jest wykonana z dwóch par brzoźowych lub sosnowych gałęzi naturalnie zakrzywionych w kształcie łuku, które są łączone w górnej części ramy. Dzięki ramie możliwe jest wykonywanie namiotów o większej średnicy, bez konieczności używania długich żerdzi, co ma niezwykle istotne znaczenie przy transporcie namiotów i stanowi pewne ograniczenie przy budowie namiotów tipi. Na każdej ramie opiera się dziesięć żerdzi. Wadą tego rozwiązania jest dość duży otwór dymowy.



Rys. 2.5 – namiot stożkowy z zakrzywionym masztem, używany przez Lapończyków:

- a). schemat konstrukcji
- b). rzut

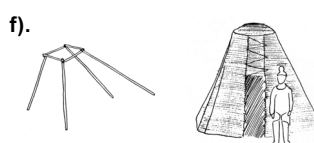
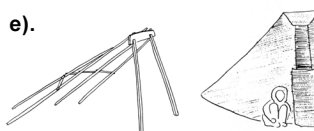
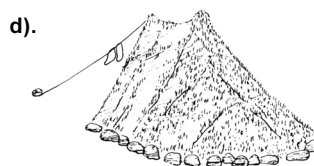
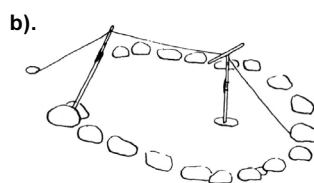
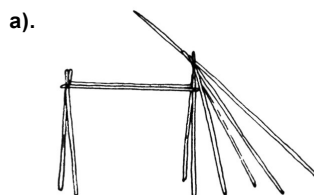
Ilustracje za [90]

Namioty Inuitów | Ludy zamieszkujące północne wybrzeża Kanady oraz południową część Grenlandii, określane są wspólną nazwą – Inuici. Używają oni kilku rodzajów namiotu: stożkowego, podobnego do stosowanych również przez innych koczowników, namiotu sklepieniowego o konstrukcji podobnej do namiotów łukowo-żebrowych, używanych w Azji Środkowej (rys. 2.3.1.), oraz specyficznego dla nich namiotu kalenicowego [90]. Namioty kalenicowe Inuitów charakteryzują się znaczną różnorodnością form. Ich wspólną cechą jest występowanie deski kalenicowej, opartej na jednym lub więcej, pionowych masztach. W rejonach ubogich w drewno, wykonuje się ją z rogów jelenia. Pokrycie namiotów stanowią skóry fok lub jeleni karibu. Te ostatnie stanowią lepszą izolację cieplną namiotu ale są mniej trwałe od skór foczych.

Eskimosi, mieszkający w rejonie Wlk. Jeziora Niedźwiedziego, budują namioty z dziesięciu żerdzi. Rozpoczynają od dwóch par skrzyżowanych masztów, ustawionych w pewnej odległości i połączonych dwiema deskami kalenicowymi. W tylnej części umieszczają się cztery maszty, które tworzą powierzchnię połowy stożka, (rys. 2.6.a). W tej części mieszkańcy siedzą.

W rejonach ubogich w drewno, eliminowane są często różne elementy konstrukcji. Nie wykonuje się np. tylnej, stożkowej części, a deski kalenicowe zastępowane są związanymi sznurami, (rys. 2.6.b). i 2.6.c). W takiej formie, namioty te cechuje niezwykła prostota i oszczędność zastosowanych środków konstrukcyjnych. Uderzające jest ich niezwykle podobieństwo do współczesnych, popularnych namiotów turystycznych, (rys. 2.6.d).

Inuici mieszkający na Grenlandii, budują namioty kalenicowe o nieco innej konstrukcji. Używają oni bardzo długich desek kalenicowych, które w tylnej części namiotu spoczywają na gruncie, a drugim końcem opierają się na krótkiej, poprzecznej desce. Deska ta jest z drugiej strony podparta dwoma masztami. Wysokość tych namiotów osiąga dwa do trzech metrów, (rys. 2.6.e). W niektórych wersjach, zamiast poprzecznej deski, stosowane są dodatkowe elementy, które powiększają wewnętrzną przestrzeń namiotu, (rys. 2.6.f).



Rys. 2.6 – konstrukcja namiotów kalenicowych Inuitów:

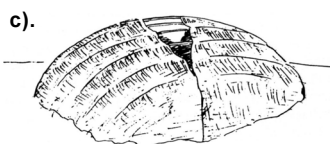
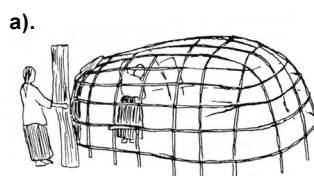
- a). namiot Eskimosów ze środkowego wybrzeża północnej Kanady
- b). uproszczone konstrukcje namiotów w rejonach ubogich w drewno
- c). j.w.
- d). widok namiotu kalenicowego o uproszczonej konstrukcji, pokrytego skarami jeleni karibu
- e). szkielec namiotu kalenicowego, budowanego przez Inuitów z Grenlandii
- f). j.w., ale w wersji z powiększoną powierzchnią wewnętrzną

Ilustracje za [90]

Namioty tajgi północnoamerykańskiej | W subarktycznych rejonach Ameryki Północnej warunki życia są zbliżone do syberyjskich, jednak nie wykształciła się tu taka różnorodność odmian systemów konstrukcyjnych stosowanych w namiotach.

Na opisywanych obszarach używane były powszechnie dwa rodzaje namiotów: sklepieniowe i stożkowe. Najbardziej rozpowszechnione były te ostatnie. Ich budowa bardzo przypominała budowę opisywanych poniżej namiotów tipi, chociaż w porównaniu z nimi, były niższe i bardziej „przysadziste” [90]. Drugi, rozpowszechniony w tym rejonie, rodzaj namiotu, to namioty sklepieniowe. Przykłady takich obiektów znajdowano w zalesionych obszarach, zwłaszcza we wschodniej części kontynentu.

Typowym przykładem takiej konstrukcji jest namiot Indian Ojibway, znad jeziora Górnego, nazywany „waginogan”, rys. 2.7.a). Rama namiotu była wykonywana z dowolnego rodzaju giętkiego drewna: wierzbowego, hikorowego, brzoźowego lub dębowego. Indianie preferowali drewno twarde, gdyż daje się ono wyginać, a po wyschnięciu usztywnia się, dzięki czemu możliwe jest stosowanie relatywnie małych przekrojów elementów. Konstrukcja namiotu jest bardzo podobna do łukowo-żebrowego z Azji Środkowej, rys. 2.3.l).



Rys. 2.7 – namioty koczowników tajgi północnoamerykańskiej:

- a). namioty sklepieniowe Indian Ojibway, „waginogan”
- b). szkielet namiotu łukowo-sklepieniowego, używanego przez Indian Kutchin – szkielet
- c). j.w. – po obłożeniu skórą

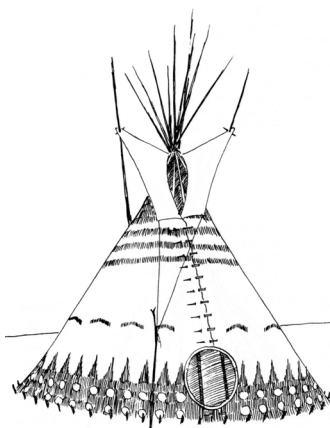
Ilustracje za [90]

Jedynym, w pełni przenośnym namiotem, znalezionym w północnoamerykańskiej tajdze, jest namiot Indian Kutchin. Z zewnątrz przypomina namiot sklepieniowy Inuitów, jego konstrukcja jest jednak zupełnie inna i unikalna. Zastosowano w niej układ dwóch poprzecznych łuków, na których oparte są zakrzywione żerdzie. Przypuszcza się, że system taki mógł się rozwinąć z namiotów pochylonych, takich jak przedstawiono na rys. 2.3.n).

Namioty północnoamerykańskich stepów | O ile ludy zamieszkujące Syberię, potrafiły udomowić najważniejsze dla nich zwierzęta – jelenie, to mieszkańcy Północnej Ameryki nie dokonali tego i byli całkowicie zależni od trudnych do przewidzenia tras wędrówek jeleni i bizonów. Z tych powodów, warunkiem przeżycia stały się umiejętności łowieckie i możliwość szybkiego przemieszczania się na duże odległości.

Namiotem Indian amerykańskich prerii jest tipi. Jest to najbardziej pomysłowy z pośród namiotów stożkowych. Jego szkielet można ustawić w ciągu pięciu minut, a pokryć go w ciągu następnych piętnastu minut.

Dwie podstawowe cechy odróżniają tipi od innych namiotów stożkowych: przede wszystkim nie mają dokładnie stożkowego kształtu, gdyż tylna część jest pochylona, ponadto są zaopatrzone w kłapy dymowe, rys. 2.8. Pochylenie tylnej części usztywnia istotnie tipi na działanie wiatru oraz powiększa powierzchnię użytkową we wnętrzu, ze względu na niesymetryczne umieszczenie ogniska. Zastosowanie kłap dymowych powoduje, że tipi są jedynymi namiotami stożkowymi, które nie wypełniają się dymem podczas palenia wewnątrz nich ognia.



Ironią losu można nazwać fakt, że amerykańskie oddziały, pacyfikujące Indian, mieszkali w tzw. namiotach Sibleya (od nazwiska wynalazcy, generała Sibleya), które były w zasadzie kopią tipi, przystosowaną do używania piecyków.

Rys. 2.8 – namiot koczowników północnoamerykańskiego stepu: tipi

Ilustracja za [90]

Opisywane cechy posiadały również namioty tego typu używane w okresie prekolumbijskim, ale pojawienie się konia i radykalny wzrost możliwości przewożenia elementów namiotu, spowodował, że nomadowie używający koni wyraźnie udoskonalili swoje mieszkania, przede wszystkim powiększając je.

We wszystkich odmianach północnoamerykańskich tipi, stosowane są proste żerdzie. Różnice polegają na sposobie ich ustawienia i połączenia w szkielet. Budowa tipi rozpoczyna się od ustawienia trzech (plemiona zachodnie, np. Siuksów i Czejenów) lub czterech (plemiona wschodnie, np. Kruków i Czarnych Stóp) głównych żerdzi. Następnie ustawiano pozostałe żerdzie. Całość związywano w wierzchołku liną, której koniec kotwiono do ziemi, bezpośrednio poniżej wierzchołka, usztywniając konstrukcję. Przed pojawieniem się koni, przeciętne tipi wykonywano z żerdzi o długości ok. czterech i pół metra, uzyskując namiot o średnicy około trzy i pół metra. Później, przeciętna rodzina konnych koczowników posiadała namiot o średnicy ok. sześciu metrów, wykonany z żerdzi o długości od sześciu do siedmiu i pół metra. Okazjonalnie wykonywano tipi o bardzo dużych wymiarach: od dziesięciu do piętnastu metrów średnicy, jednak trudno było transportować tak duże obiekty [90].

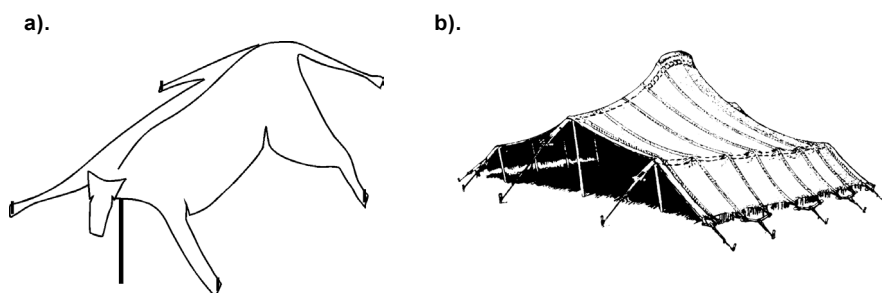
2.1.2.2. Namioty membranowe

Niewątpliwie, przełomowe znaczenie dla rozwoju konstrukcji namiotowych miało pojawienie się słynnych **czarnych namiotów**, rys.2.9.b). Torvald Faegre pisze, że „czarny namiot jest namiotem Biblii, Żydów, Arabów i setek innych plemion rozproszonych po Afryce i Azji [...] które bez niego nigdy nie zapuściłyby się na pustynię” [90]. Czarne namioty stały się później jednym z symboli koczowniczego życia (Biblia dwukrotnie wspomina w tym kontekście o czarnych namiotach Kedaru¹⁾), a później także symbolem przemijalności i kruchości życia ludzkiego [93].

Były one początkowo wykonywane ze zszytych ze sobą, czarnych, kozich skór. Później wykonywano je z grubych tkanin wełnianych: przede wszystkim z wełny koziej²⁾, ale często z dodatkiem również wełny owczej i wielbłądziej lub włókien roślinnych³⁾, rys.2.10. Czarne namioty zawdzięczają swą nazwę kolorowi koziej sierści, chociaż wiele z nich nie jest w rzeczywistości czarnych lecz barwionych na różne kolory. Powstały prawdopodobnie w Mezopotamii, gdzie udomowiono te zwierzęta. Stąd rozprzestrzeniły się na wschód aż po Mongolię i na zachód, do atlantyckich wybrzeży Afryki⁴⁾. Tkanina stała się odtąd podstawowym materiałem, z którego wykonywano namioty, a z czasem ich budowa stawała się coraz bardziej złożona.

Jedynym zwierzęciem udomowionym przez rdzennych mieszkańców Ameryki Północnej, były psy. Wykorzystywano je również do transport żerdzi do budowy namiotów, ale ich długość była ograniczona możliwościami zwierzęcia. Niektóre plemiona posiadały tak niewiele psów, że brakowało ich do zaprzęgania do sań, które musiały być pchane ręcznie [90].

Jedna z najstarszych i najprostszych konstrukcji szałasów-namiotów, skóra zwierzęcia, rozciągnięta na słupkach i przymocowana do ziemi, była jednocześnie najbliższą, co do zasady współczesnym konstrukcjom membranowym, rys.2.9.a).



Rys. 2.9 – czarne namioty:

- a). najprostsza membrana - skóra zwierzęcia rozpięta na słupkach i przymocowana do ziemi⁵⁾
- b). jedna z tradycyjnych form „czarnego namiotu”, ilustracja za [55]

¹⁾ Biblia Tysiąclecia, Wyd. Pallottinum, Poznań-Warszawa 1980, Ps 120,5 i Pnp 1,4

²⁾ Wełna kozia jest preferowanym surowcem do wyrobu namiotów, ponieważ ma relatywnie dużą wytrzymałość na rozciąganie, a włókna są dość długie. Czysta wełna owcza ulega nadmiernemu wydłużeniu pod obciążeniem, a wełna wielbłądzia ma krótkie i słabe włókna [90].

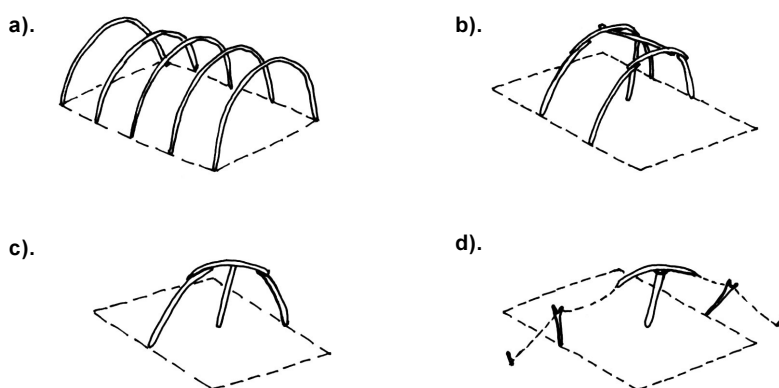
³⁾ W Biblii zawarty jest szczegółowy opis wykonania namiotu chroniącego Arkę Przymierza, którego powłoka składała się z wielu warstw: tkaniny lnianej, tkaniny z wełny koziej, barwionych skór baranich oraz skór delfinów, op.cit., Wj 26, 1÷14, 37. Jest to najstarszy zachowany opis czarnego namiotu [90].

⁴⁾ Obszar, na którym występowały w przeszłości i występują obecnie czarne namioty, pokrywa się niemal dokładnie z obszarem naturalnego występowania wielbłądów, które były podstawowym środkiem ich przewożenia [90].

⁵⁾ Rys. opracowano na podstawie: Michael Brawn, Architectural thought: the design process and the expectant eye, Architectural Press/Elsevier 2003

Prawdopodobne jest, że namioty membranowe powstały w wyniku ewolucji formy konstrukcji namiotów szkieletowych. Przebieg tego procesu nie jest znany w szczegółach, ale o jego głównych etapach można wnioskować, analizując rodzaje namiotów używane współcześnie, przez niektóre plemiona koczownicze.

Poniżej przedstawiono rozwiązania spotykane wśród ludu Durrani, w południowym Afganistanie. Wśród ludności tego plemienia, występują równocześnie trzy różne formy osadnictwa: pół-osiadła, pół-koczownicza i koczownicza. Na rys. 2.10 przedstawiono schematycznie konstrukcje wsporcze namiotów, specyficzne dla każdej z tych form. Ludność prowadząca na wpół osiadły tryb życia, buduje namioty o konstrukcji łukowej, bardzo podobne do spotykanych w Azji Środkowej (rys. 2.3.o)). Konstrukcje używane przez pół-koczowników, cechuje zmniejszona ilość łuków oraz wprowadzenie charakterystycznego dla czarnych namiotów centralnego masztu z deską kalenicową w kształcie litery T. Ten maszt jest, dla ludzi prowadzących w pełni koczowniczy tryb życia, podstawowym elementem konstrukcyjnym. W namiotach, na przeznaczonych na sezon zimowy, uzupełniają go dwoma wygiętymi żerdziami, aby uzyskać formę łukową. W namiotach letnich, oprócz centralnego masztu występują jedynie proste słupki. Przypuszcza się, że u wielu ludów, forma namiotu membranowego kształtowała się w etapach odpowiadających opisanym powyżej formom [90].



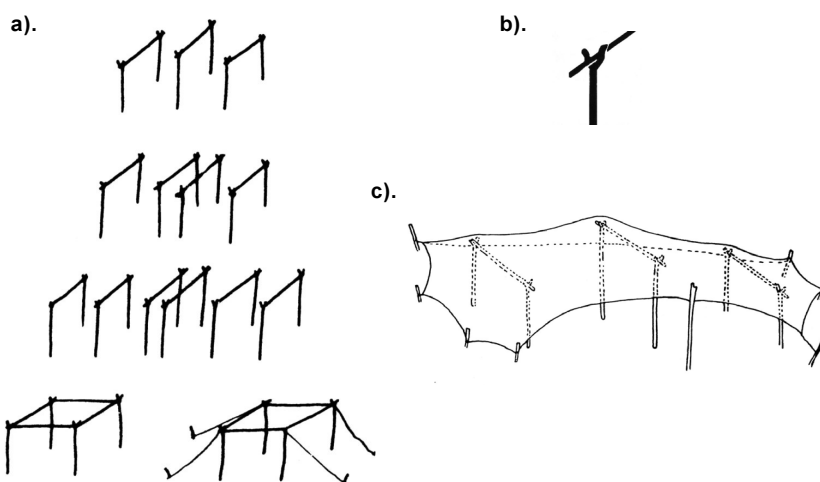
Rys. 2.10 – ewolucja systemu konstrukcyjnego czarnych namiotów, w zależności od formy osadnictwa:
a). pół-osiadłe
b). pół-koczownicze
c). koczownicze – zimowe
d). koczownicze – letnie

Ilustracje za [90]

Spośród wszystkich pierwotnych form namiotów, jedynie czarny namiot wykorzystywał pokrycie, jako element konstrukcyjny, stabilizujący szkielet, który je podtrzymywał [195]. Szkielet tych namiotów nie może samodzielnie, bez współpracy z tkaniną pokrycia, zachować stateczności. Wyróżnia się on również bardzo małą ilością elementów, głównie drewnianych, które go tworzą. Jedynie namioty Inuitów ze Wschodniej Kanady (rys. 2.6) mogą z nim pod tym względem konkurować [90]. Przy całym bogactwie występujących form czarnych namiotów, do wykonywania ich szkieletów wykorzystuje się zaledwie kilka rodzajów typowych elementów konstrukcyjnych. Są one zestawiane w różnych konfiguracjach, różniących się częstością występowania poszczególnych elementów, ich wielkością i rozmieszczeniem. Konfiguracje te są specyficzne dla kultur poszczególnych regionów i plemion. Ich różnorodność determinuje bogactwo form, w jakich występują czarne namioty.

Główne elementy konstrukcyjne, z których budowane są szkielety czarnych namiotów, to:

- ramy prostokątne. Wykonywane są z drewna. Składają się z dwóch słupków i poziomej belki-rygla. Na słupki najczęściej dobierane są żerdzie, które są w górnej części rozwidlone. Ułatwia to oparcie i zamocowanie belki, układanej w tym rozwidleniu, rys. 2.11

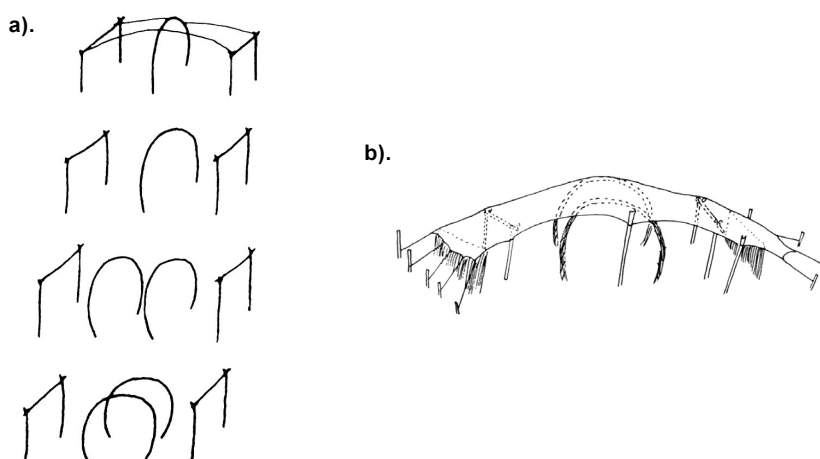


Rys. 2.11 – zastosowanie ram prostokątnych w konstrukcji czarnego namiotu:

- a). przykładowe konfiguracje ram prostokątnych
- b). sposób oparcia belek poziomych w rozwidleniach słupów; za [1.13]
- c). namiot o szkielecie z ram prostokątnych

Ilustracje a). i c). – za [90]

– rami łukowe. Mogą być wykonane z drewna lub np. z wiązek trzciny lub liści palmowych. Często wykonywane są jako proste, i dopiero podczas montażu wyginane, aż do uzyskaniażądanego kształtu, rys. 2.12.



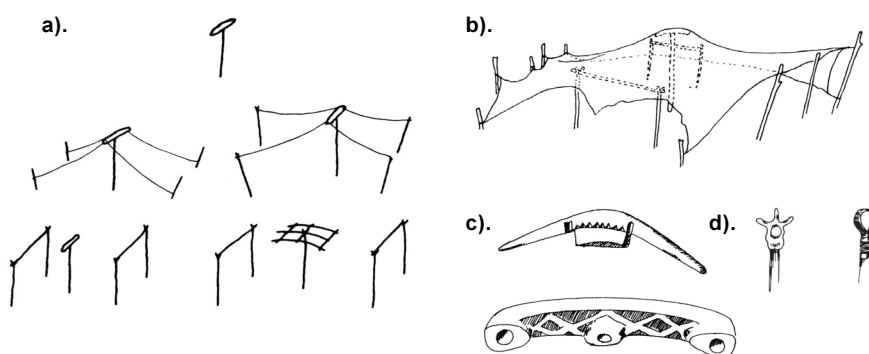
Rys. 2.12 – zastosowanie łukowych w konstrukcji czarnego namiotu:

- a). przykładowe konfiguracje ram łukowych
- b). namiot o szkielecie z ram łukowych i prostokątnych

Ilustracje za [90]

– maszt centralny. Zakończony jest deską kalenicową, co nadaje mu kształt litery T, rys. 2.13.a).b). Deska kalenicowa może mieć bardzo różną wielkość. Często jest łukowo wygięta i bogato zdobiona, rys. 2.13.c). Niekiedy zastępuje ją ciasno zwinięta wiązka szmat, umieszczona na szczycie masztu. W innych rozwiązaniach, maszt jest zakończony przelotką, przez którą przechodzi lina. Może ona być wykonana z metalu lub np. z kości kręgowej zwierząt, rys. 2.13.d).

– słupki proste; są to drewniane żerdzie o różnej długości, często – podobnie jak słupki ram – rozwidlone w górnej części



Rys. 2.13 – zastosowanie masztu centralnego z deską kalenicową w konstrukcji czarnego namiotu:

- a). przykładowe konfiguracje masztu z deską kalenicową oraz ram i słupków
- b). namiot o szkielecie z masztem centralnym
- c). przykłady desek kalenicowych
- d). przelotowe zakończenia masztu

Ilustracje za [90]

Podstawowy podział czarnych namiotów opiera się na kierunku układania i naciągania tkaniny. Ze względu na to kryterium, wyróżnia się dwa główne typy czarnych namiotów [90]:

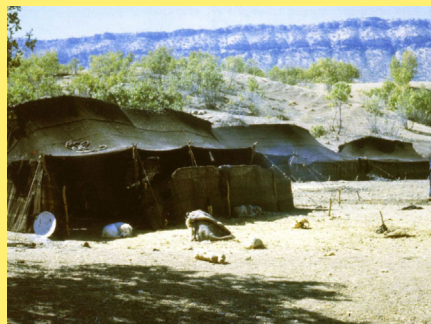
- typ wschodni (perski)
- typ zachodni (arabski)

Typ wschodni (perski) charakteryzuje się tym, że bryty tkaniny, zeszyte ze sobą wzdłuż krawędzi w taki sposób, że na połączeniach znajdują się pętle do przeciągnięcia lin naciągających. Namiot jest stawiany w taki sposób, że liny biegną równolegle do szwów, a maszty są ustawiane w linii szwów, rys. 2.14.a).

W typie zachodnim (arabskim), tkanina jest wzmocniona taśmami, nazywanymi „triga”, ułożonymi prostopadłe do szwów, łączących poszczególne bryty tkaniny. Liny napinające są podwieszone do taśm, tak że naciąganie odbywa się w kierunku prostopadłym do szwów, rys. 2.14.b). Dzięki taśmom, szwy i tkanina nie ulegają zniszczeniu.



b).



Rys. 2.14 – dwa główne rodzaje czarnych namiotów:

- a). perski – namiot koczowników, Sangesari, góra Damavand, Iran; fot. za Detail 6/94
- b). arabski – namioty Beduinów w Maroku; fot. za [194]

Czarne namioty typu arabskiego | Namioty o układzie zachodnim (arabskim), występują na dwóch podstawowych obszarach geograficznych:

- półwysep Arabski, od Eufratu na wschodzie, po Egipt i zachodnią Libię oraz północny Sudan; jest to rejon występowania namiotów Beduinów
- północna Afryka; występują tu namioty różnych plemion berberyjskich oraz Tuaregów

Namioty Beduinów, mają najszerzy zasięg występowania. Duński badacz, C.G. Feilber, w swojej monografii na temat czarnych namiotów (patrz uwagi bibliograficzne poniżej), stwierdza, że są one kulminacyjną formą ich rozwoju, najlepiej przystosowaną do warunków występujących na pustyni. Świadczy o tym płaski, aerodynamiczny dach, przystosowany do silnych wiatrów, minimalne zużycie deficytowego drewna oraz długie odciały.

Opracowania źródłowe na temat czarnych namiotów są stosunkowo późne. Pierwsze z nich pojawiły się dopiero po I wojnie Światowej. Przełomowe znaczenie miała praca:

- Ernst Rackow i Werner Caskel, *Das Beduinzelt*, Baessler-Archiv XXI, 1938
- w której znalazły się bardzo szczegółowe opisy i rysunki zarówno samych namiotów, stosowanych przez Beduinów, jak i metod ich wykonywania, ustawiania itp. Późniejsze, istotne prace, to przede wszystkim:
- C.G. Feilberg, *La Tente Noire*, Copenhagen 1944
- Jean Chapelle, *Nomades noirs du Sahara*, Paris 1958
- Klaus Ferdinand, *The Baluchistan Barrel-Vaulted Tents and its Affinities*, [w:] Folk, Vol.1 Copenhagen 1959, Vol.2 Copenhagen 1960
- L. Golvin, *L'Art de la Tente*, Alger 1960

Warte wzmianki są również wcześniejsze, cząstkowe opracowania i relacje podróżników:

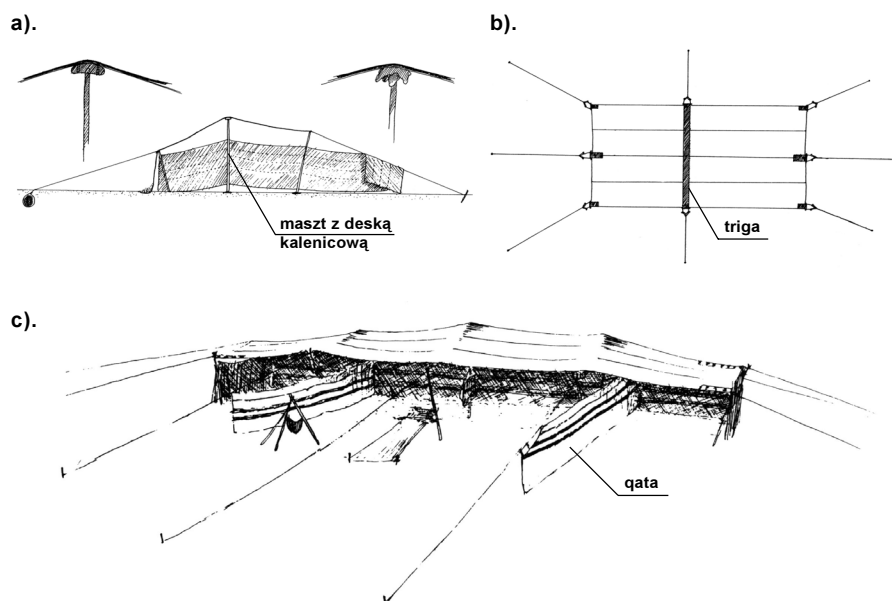
- G.W. Murray, *Sons of Ishmael. A Study of the Egyptian Bedouin*, London 1935
- Henri Lhote, *Les Touaregs du Hoggar*, Paris 1944
- Charles M. Doughty, *Travels in Arabia Deserta*, London 1921

Opracowania te koncentrują się głównie na etnograficznych aspektach namiotów. Poczynając od lat siedemdziesiątych XX w., pojawiają się prace dotyczące również kontekstu architektonicznego.

Tkanina na pokrycie namiotów Beduinów jest wykonywana z czystej wełny koziej¹⁾, rzadziej z domieszką innych włókien. Poszczególne bryty tkaniny są ze sobą zszyte – ich ilość i długość zależy od statusu społecznego i zamożności właściciela. Namioty najbiedniejszych mogą być wykonane z dwóch brytów o długości trzech i pół metra, podczas gdy namiot bogatego szejka – z sześciu brytów o długości dwudziestu metrów. Namioty składające się z większej niż ośmiu brytów tkaniny, wykonywane są w dwóch częściach, tak by ciężar każdej z nich nie przekroczył ładunku jednego wielbłąda. Poprzecznie do brytów tkaniny, przyszyte są taśmy napinające – triga, w ilości zależnej od wielkości namiotu.

Szkielet namiotu tworzą jedynie słupki. Każda taśma jest podparta trzema z nich. Maszt środkowy, najwyższy ze słupków, ma wysokość ponad dwóch metrów i jest zakończony deską kalenicową. Wielkość namiotu jest oceniana ilością masztów środkowych (a więc pośrednio – długością namiotu): jeden u biedaków, cztery u bogaczy.

Taśmy triga są zakończone napinaczami, do których przymocowuje się liny napinające. Napinacze te mogą być plecione z linki lub wykonywane z drewna w wielu wariantach. Odciaży boczne wykonywane są z lin konopnych i mają dużą długość – ponad trzydzieści metrów. Taka długość pozwala dobrze absorbować silne porywy wiatru oraz przejmować naciąg pokrycia. Ponadto, długie liny chronią otoczenie namiotu przed uciążliwymi jeźdźcami, poruszającymi się po obozowisku. Wnętrze namiotu jest przedzielone zasłoną z tkaniny, nazywaną „qata” na dwie części: mniejszą – męską i większą – żeńską. Jest ona zwykle bardzo ozdobna, tkana w specjalny sposób. Na rysunku 2.15 przedstawiono schematycznie zasady konstrukcji oraz widok typowego namiotu Beduinów.

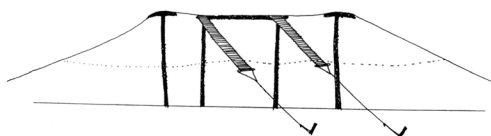


Rys. 2.15 – namioty Beduinów:

- a). przekrój poprzeczny, wzdłuż taśmy wzmacniającej tkaninę „triga”
- b). rzut
- c). widok ogólny; widoczna jest zasłona dzieląca namiot na część męską i żeńską „qata”

Ilustracje za [90]

Dwa plemiona Beduinów: Ouled Ali, z zachodniej Libii oraz Kababish, z Sudanu, budują namioty nieco odmienne od opisanych powyżej. Pierwsi z nich budują namioty wyróżniające się większą wysokością oraz dodatkowymi pętlami z tkaniny, na krańcach pokrycia równoległych do taśm triga, które służą do zaczepienia lin napinających. Namioty drugiego z wymienionych plemion charakteryzuje system konstrukcyjny składający się z ramy prostokątnej oraz dwóch masztów z deskami kalenicowymi, rys. 2.16. Namioty obydwu plemion są formą przejściową pomiędzy namiotami Beduinów, a namiotami występującymi w Afryce Północnej.



Rys. 2.16 – namioty Beduinów z plemienia Kababish

Ilustracja za [90]

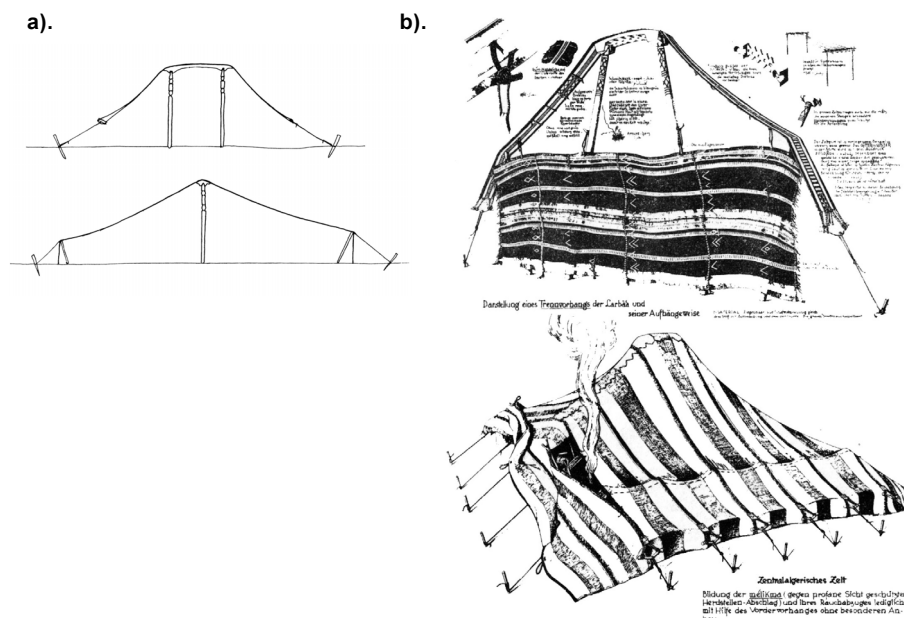
¹⁾ Beduini nazywają swoje namioty „beith sha'r” — domy z wełny

Berberowie, z Afryki Północnej, zamieszkują w dwóch, różnych rodzajach środowiska naturalnego: pustynię oraz górskie płaskowyże. Poszczególne plemiona, żyjące w swoim wyizolowanym otoczeniu, rozwinęło wielką ilość własnych form namiotów. Ich wspólne cechy, to:

- występowanie trzech taśm, z których środkowa, triga jest najszersza (ok. $20 \div 30$ cm, pozostałe ok. $10 \div 15$ cm)
- wysokie maszty środkowe
- deski kalenicowe na masztach

Nadają one północnoafrykańskim namiotom charakterystyczny profil, o wyniosłej, zakrzywionej linii kalenicowej.

Marokańscy Berberowie zamieszkują wysokie rejony gór Atlas, w których opady deszczu są większe niż w innych rejonach. Z tego powodu, budują oni namioty o znacznej, ułatwiającej odpływ wody, wyniosłości. Uzyskuje się ją dzięki dużej, zakrzywionej desce kalenicowej, opartej na dwóch masztach środkowych. Bryty tkaniny wytrzymują przeciętnie pięć lat eksploatacji. Dlatego, co roku, w październiku tkanina jest przecinana pośrodku i wstawiane są dwa nowe bryty, a usuwane są dwa skrajne, zużyte. Krawędzie tkaniny są zakończone frędzlami, dla lepszego odprowadzenia deszczu. Na rys. 2.17 i 2.18, przedstawiono namioty używane przez Berberów z Maroka.



Rys. 2.17 – namioty marokańskich Berberów:

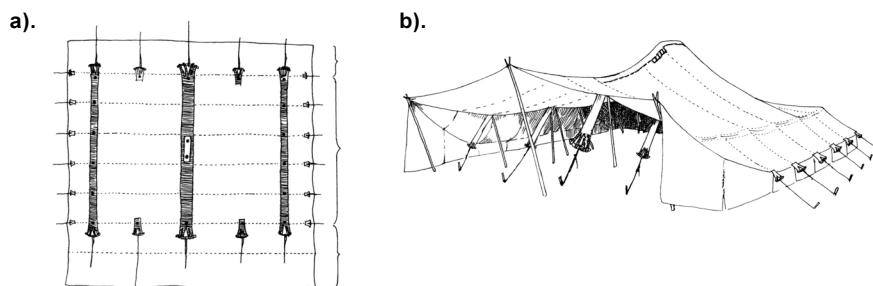
- przekrój poprzeczny i podłużny. Ilustr. za [90]
- namioty Beduinów w Maroku; rysunki pochodzą z pracy: E. Rackow, W. Caskel, Das Beduinzelt (patrz uwagi na str.21). Ilustracja za [73]



Rys. 2.18 – fragment obozowiska Berberów na płaskowyżu Adżir, w górach Atlas

Ilustracja za [174]

Algierscy Berberowie z plemienia Ouled Nail, używają namiotów podobnych do marokańskich. Są one jednak węższe, a tkanina pokrycia schodzi niemal do ziemi, dzięki czemu nie ma potrzeby stosowania dodatkowych ścian bocznych. Namioty algierskie różnią się ilością zastosowanych taśm, naszytych poprzecznie do brytów tkaniny. Ouled Nail używa pięciu taśm dla dachu, dwóch dla kłapy frontowej i jedną dla ściany tylnej. Ten typ namiotu jest przedstawiony na rys. 2.19.

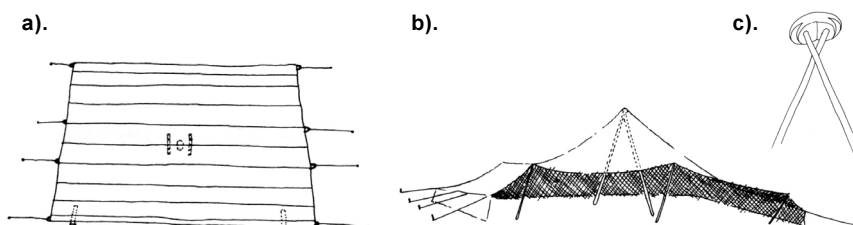


Rys. 2.19 – namioty Berberów z plemienia Ouled Nail:
a). rzut
b). widok

Ilustracje za [90]

Namioty mauretańskie są namiotami typowymi dla pustyni. Są niskie i mają łagodnie pochyłony dach, co pozwala im przetrwać silne wiatry, rys. 2.20.a).b). W porównaniu z innymi rodzajami czarnych namiotów są wyraźnie mniejsze. Charakterystyczny dla tych konstrukcji jest sposób podparcia i naciągania tkaniny. Maurowie stosują tylko jeden maszt centralny. Składa się on z dwóch żerdzi, podpierających krótką deskę kalenicową, rys. 2.20.c)., i jest umieszczony pośrodku namiotu. W każdej z bocznych krawędzi dachu znajdują się drewniane uchwyty, przez które przechodzą liny. W krawędzi frontowej, umieszczone są żelazne kółka, do połączenia ze słupkami. Nie występują taśmy napinające, dlatego tkanina jest naciągana przede wszystkim wzdłuż brytów. Cecha ta wyraźnie odróżnia te namioty od innych namiotów typu zachodniego, zbliżając jednocześnie do namiotów typu wschodniego.

Namioty nomadów zamieszkujących w terenach górzystych są większe niż namioty nomadów pustynnych, podobnie jak większe są ich stada, co wynika z wilgotniejszego klimatu.



Rys. 2.20 – namioty Maurów:
a). rzut
b). widok
c). charakterystyczne podparcie deski kalenicowej

Ilustracje za [90]

Wśród namiotów Afryki Północnej, należy wymienić także namioty Tuaregów. Cechują się one wielką różnorodnością konstrukcji – można wśród nich odnaleźć właściwie wszystkie rozwiązania stosowane również przez inne ludy. Rysunki 2.11 ÷ 2.13, na których pokazano podstawowe rodzaje rozwiązań stosowanych w namiotach typu zachodniego, przedstawiają właśnie namioty Tuaregów.

Tuaregowie używają dwóch rodzajów pokryć: mat plecionych z liści palmowych oraz skór, przede wszystkim kozich. Zarówno wąskie maty, jak i skóry są ze sobą zszywane i tworzą jednolitą powierzchnię pokrycia.

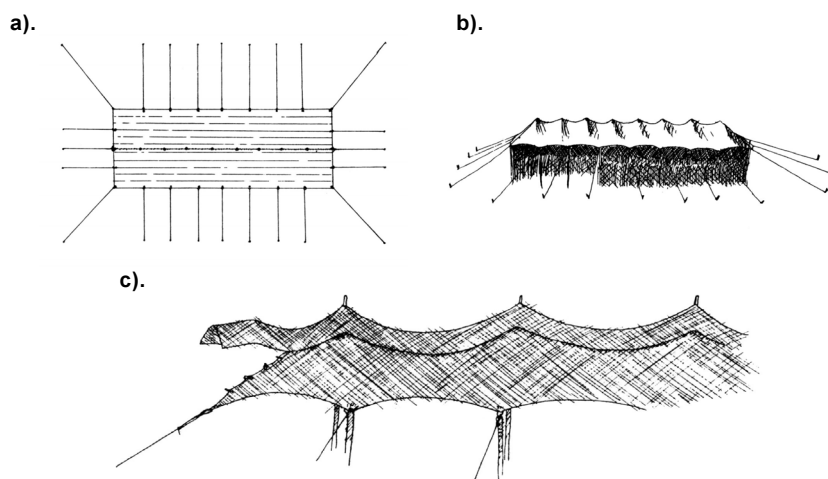
Obydwa rodzaje pokrycia mają swoje zalety i wady. Namioty pokrywane matami ustawia się dłużej, ale namioty z pokryciem ze skór są cięższe i wymagają zwiększonej ilości słupków bocznych. Maty zapewniają chłodniejszy klimat we wnętrzu w czasie upałów ale w okresie deszczowym, skóry znacznie lepiej chronią przed opadami. Niektóre plemiona Tuaregów łączą obydwa rodzaje pokrycia, układając w okresie deszczowym skóry na matach z liści.

Do wykonywania szkieletu używane jest drewno akacjowe lub tamaryszkowe. Z korzeni wykonuje się wyginane odcinki łuków, z gałęzi i pni – maszty i słupki.

Czarne namioty typu perskiego | Nomadowie żyjący na Wschodzie, są bardzo konserwatywni w zakresie formy swoich namiotów¹⁾. Ich konstrukcja jest znacznie prostsza niż konstrukcja namiotów arabskich. Ich powłoki składają się ze zszytych ze sobą brytów tkaniny, bez wzmocnienia taśmami. Odciaży są zamocowane bezpośrednio do tkaniny. Słupy szkieletu są proste lub w kształcie litery T, bez ozdób rzeźbiarskich i nie są malowane. Tkanina jest zawsze koloru czarnego i nawet tkaniny na ściany boczne nie są dekorowane. Przypuszcza się, że czarne namioty typu perskiego są bliskie formą najstarszym konstrukcjom tego typu [90].

Wielką część spośród nomadów wschodnich stanowią plemiona zamieszkujące Iran. Co szósty Irańczyk jest koczownikiem lub półkoczownikiem. Terenem, stanowiącym ich bastion są zwłaszcza Góry Zagros. Namioty górskich plemion Iranu, podobne – co do ogólnych zasad konstrukcji – do innych rodzajów namiotów, różnią się między sobą znacznie układem szkieletu, i sposobem wypiętrzenia dachu.

Na północy Iranu oraz w Turcji i Iraku, żyją Kurdowie. Dla ich namiotów charakterystyczne jest występowanie wielu wierzchołków, podpartych masztami, nieznacznie wystającymi ponad ogólną powierzchnię dachu, rys. 2.20. Z daleka, namioty te przypominają góry, wśród których są rozbite [90].

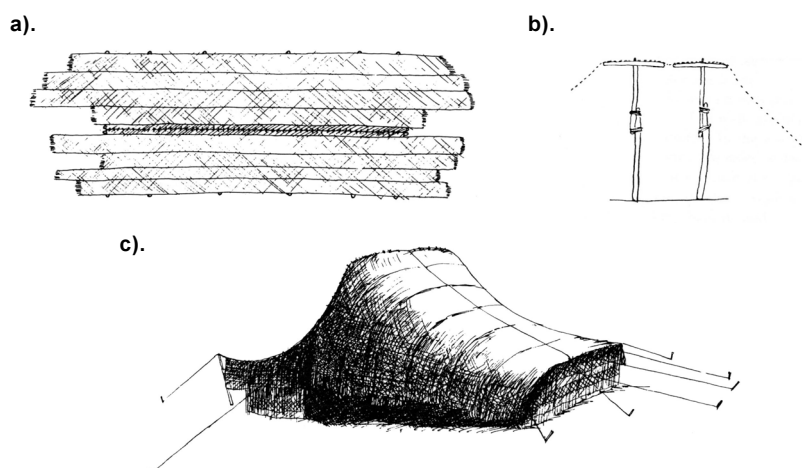


Rys. 2.21 – namioty Kurdów:
a). rzut
b). widok boczny
c). charakterystyczne „górzyste” ukształtowanie dachu

Ilustracje za [90]

Namioty żyjącego na południe, od terenów zamieszkiwanych przez Kurdów, plemienia Lur, są wykonywane w dwóch częściach. Każda z nich składa się z czterech brytów tkaniny. Zakończone są wąskimi taśmami z pętlami, za pomocą których obie części są łączone. Najdłuższe są bryty środkowe, które zwisają, osłaniając ściany szczytowe. Kalenica jest podparta przez kilka, zwykle trzy, maszty w kształcie litery T. Środkowe, najwyższe maszty są wykonane z dwóch części, dla łatwiejszego transportu. Pozostałe maszty są umieszczone wzdłuż boków i w narożach, rys. 2.22.

W kopenhaskim Duńskim Muzeum Narodowym, znajduje się egzemplarz namiotu plemienia Lur, przywieziony przez C.G. Feilberga [90].



Rys. 2.22 – namioty plemienia Lur:
a). rzut pokrycia
b). przekrój
c). widok ogólny

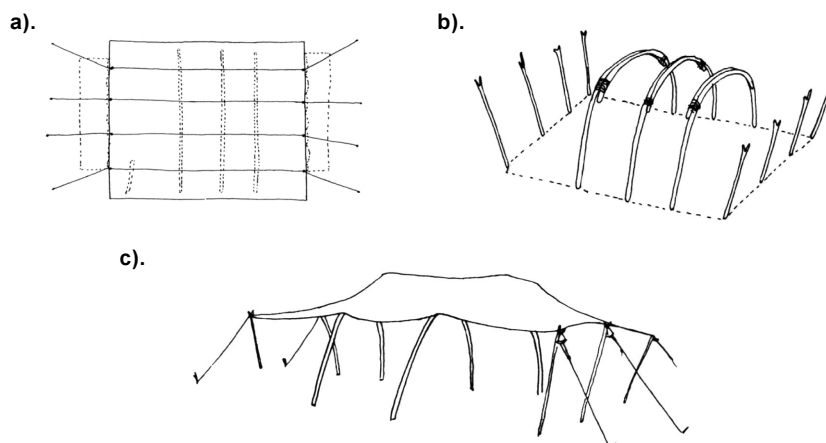
Ilustracje za [90]

¹⁾ Namiot, chroniący Arkę Przymierza, był typu perskiego. Opisowi temu odpowiadają również namioty znajdowane współcześnie w górach Zagros, w Iranie – typu Lur [90].

W Beludżystanie, na pograniczu irańsko-afgańsko-pakistańskim, budowane są czarne namioty sklepieniowe, o szkieletcie łukowym, rys. 2.23. Odkrywca tego rodzaju namiotu, duński etnograf Klaus Ferdinand (wraz z Lennartem Edelbergiem), uważa że jest on wynikiem zaadaptowania dawniejszej konstrukcji łukowej chat, do użycia z pokryciem z tkaniny [90].

Takie rozwiązanie konstrukcyjne ma liczne zalety, przede wszystkim zaś zapewnia mieszkańcom większą wysokość wnętrza. Ponadto, naciąg tkaniny może być nieco mniejszy niż w przypadku innych rozwiązań. Niektóre współczesne konstrukcje lekkich, przenośnych namiotów są wzorowane na tej konstrukcji¹⁾.

Chaty o konstrukcji łukowej zostały wyparte przez inne konstrukcje, ale nadal można je spotkać na obrzeżach obszaru występowania czarnych namiotów [90].

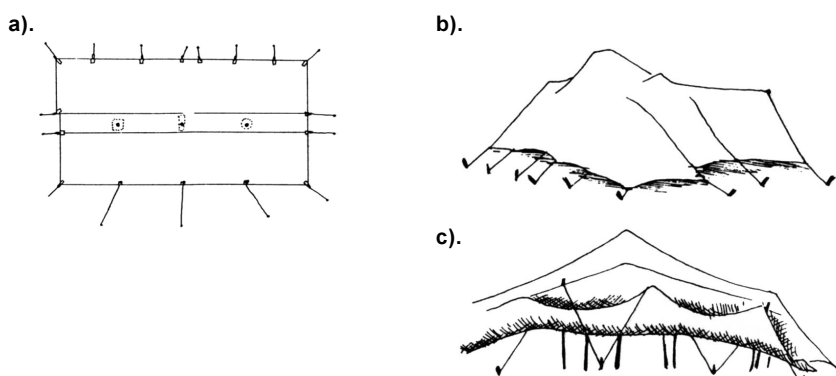


Rys. 2.23 – namioty sklepieniowe o szkieletcie łukowym, występujące w Beludżystanie:

a). rzut
b). schemat szkieletu
c). widok

Ilustracje za [90]

Namioty plemion Sistan, żyjącego w obrębie Beludżystanu, oraz Brahui, przebywającego nieco na południe, wyróżniają się szkieletem zbudowanym z trzech masztów, ustawionych wzdłuż osi podłużnej. Sistan stosują ponadto trójkątny układ odciągów, rys. 2.24.



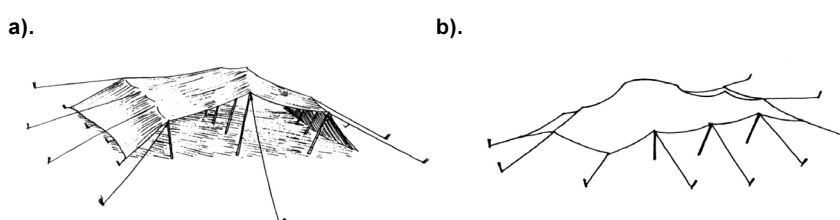
Rys. 2.24 – namioty o trójmasztowym szkieletcie, występujące na południu Beludżystanu:

a). rzut
b). widok namiotu plemienia Brahui
c). widok namiotu plemienia Sistan

Ilustracje za [90]

W Afganistanie występują cztery rodzaje czarnych namiotów, z których każdy jest używany przez inne plemię:

- namiot z prostymi masztami, plemienia Ghilzai (Pasztuni północno-wschodni); maszty zwykle są ustawione w trzech rzędach, rys. 2.25.a)
- namioty łukowe plemienia Durrani (Pasztuni południowo-zachodni); namiot ten występuje w kilku formach przejściowych, przedstawionych na rys. 2.10. Widok ogólny namiotu przedstawia rys. 2.25.b).
- opisane powyżej namioty sklepieniowo-łukowe, z Beludżystanu
- pół-stałe namioty plemienia Taimani



Rys. 2.25 – namioty występujące w Afganistanie:

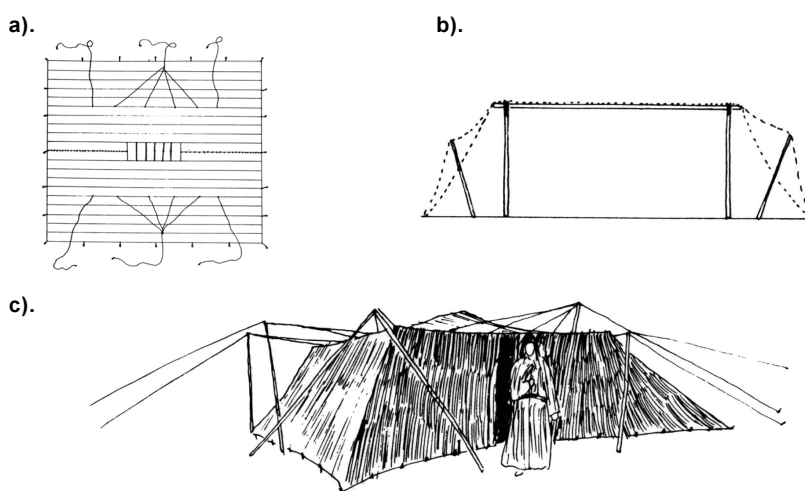
a). namiot plemienia Ghilzai
b). namiot plemienia Durrani

Ilustracje za [90]

W Tybecie, koczownictwo ma szczególną postać, gdyż występuje na dużych wysokościach. Na niżej położonych terenach ludność prowadzi osiadły tryb życia. Jednak i tam zdarzają się grupy nomadów. Wykorzystują oni jaki – jedyne zwierzęta przystosowane do życia w tak trudnych warunkach. Z ich wełny wykonywana jest tkanina na namioty.

Szkielet tybetańskiego namiotu tworzą dwa maszty podpierające belkę kalenicową, biegnącą wzdłuż namiotu. W niektórych przypadkach (np. namioty podróżne) konstrukcja namiotu ogranicza się tylko do tych elementów. Najczęściej jednak, stosowane są dodatkowe słupki zewnętrzne, do których zaczepione są liny (również wykonane z wełny jaka) podtrzymujące tkaninę. Rozmieszczenie i kąt pochylenia słupków zewnętrznych są dobierane tak, aby zapewnić jak najlepszy naciąg tkaniny. Konstrukcja taka, oglądana z zewnątrz, zadziwiająco przypomina współczesne konstrukcje membranowo-ciężnowe, rys. 2.26.

Tybetańczycy nazywają swoje namioty z wełny jaka „ba-nag”, co dosłownie oznacza „czarny namiot” [90].



Rys. 2.26 – namioty sklepieniowe używane przez Tybetańczyków:

- a). rzut
- b). przekrój
- c). widok ogólny

Ilustracje za [90]

2.1.3. Wielkie konstrukcje namiotowe od starożytności do XX w.

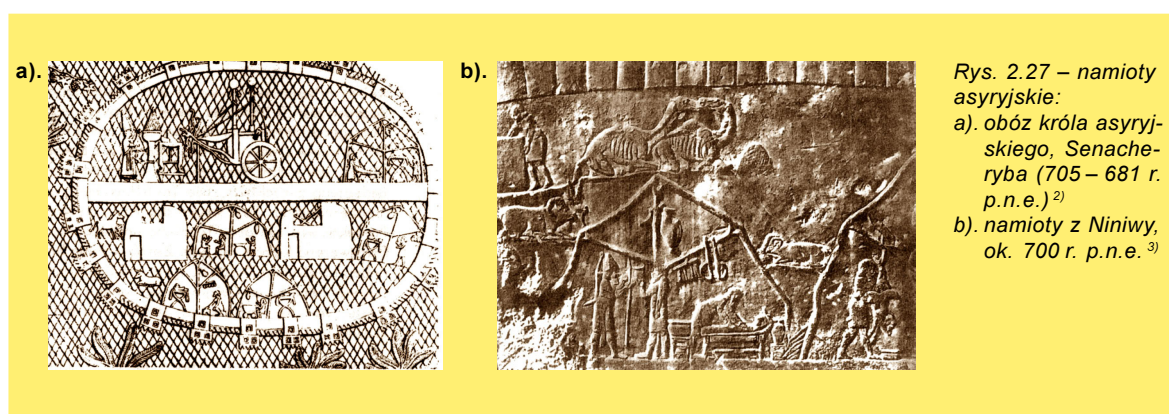
Konstrukcje namiotowe, jak żadne inne, cechuje wielka elastyczność formy. Analogiczne systemy konstrukcyjne mogą być zastosowane zarówno do małych obiektów, przeznaczonych dla indywidualnego użytku, jak i do obiektów ogromnych, mogących pomieścić tysiące osób.

2.1.3.1. Namioty jako obiekty prestiżu i luksusu

Nie tylko dla nomadów namiot był łatwym w transporcie domem. Pełnił taką rolę również dla władców, którzy często również wędrowali pół-koczowniczym trybem życia, czy to objeżdżając swoje posiadłości, prowadząc wojny, czy też przemieszczając się wraz z dworem w miejsca stosowne do kolejnych pór roku. Za przykładem władców, wielu ludzi traktowało namiot nie tylko jako stały czy też okresowy dom ale również jako narzędzie manifestacji swojego bogactwa i znaczenia. Spektakularność formy, która często jest uważana za cechę wyróżniającą konstrukcje namiotowe spośród innych, nie pojawiła się dopiero wraz ze współczesnymi, wielkimi obiektami membranowymi, lecz była znana i doceniana od dawna.

Mezopotamia i Grecja w starożytności | Namioty membranowe – „czarne”, powstały w Mezopotamii. Tam też, nastąpiło rozdzielenie dwóch nurtów rozwoju konstrukcji namiotowych. Po jednej stronie znalazły się namioty stanowiące mieszkanie zwykłych ludzi, wiodących koczowniczy tryb życia. Jego surowe reguły zdominowały formę namiotów, nadając jej typowo utylitarny, często skrajnie racjonalny, charakter. Współczesne namioty nomadów są odbiciem i kontynuacją niektórych z tych form. Po stronie przeciwnej — pojawiły się namioty władców i ludzi bardzo zamożnych, często pełniące rolę swego rodzaju obiektów użyteczności publicznej.

Dziewiętnastu pierwszych władców Asyrii jest znanych jako „królowie żyjący w namiotach”.¹⁾ Asyryjczycy podnieśli umiejętność wykonywania namiotów na bardzo wysoki poziom. Na rys. 2.27 pokazane są reliefy przedstawiające obóz wojskowy króla Sennacheryba, z początków VII w. p.n.e. oraz namioty z Niniwy, z ok. 700 r. p.n.e.



Sztukę tę przejęli od nich Medowie i Persowie⁴⁾. Ksenofont podaje, że Cyrus ofiarował królowi Medów, Kyksaresowi, najlepszy ze swoich asyryjskich namiotów⁵⁾. Namioty perskie były w starożytności słynne jako obiekty luksusowe, niezwykle wielkie i piękne, bardzo bogato wyposażone.

¹⁾ Od Tudija do Ilusumy, przełom III i II tysiąclecia p.n.e.

²⁾ Relief znaleziony w Niniwie, wg A.H. Layard, *Monuments of Niniveh*, London 1853. Ilustracja za [73]

³⁾ j.w. Ilustracja za [75]

⁴⁾ Hezychiusz z Aleksandrii pisze, że królowie perscy z dynastii Achemenidów używali namiotów i „okrągłych osłon”; za [91]

⁵⁾ Ksenofont, *Cyropedia*, V, 2,38

Athenaeus wspomina też, że Artakserkses I, król perski, ofiarował taki wspniany namiot, wraz z kosztownym wyposażeniem, Timagorasowi¹⁾, oraz że Alcybiades miał perski namiot rozbijany dla niego przez efeskich służących²⁾.

Namiot, zdobyty przez Greków w bitwie pod Platejami (479 r. p.n.e.), na perskim wodzu Mardoniosie (w istocie był to namiot Kserksesa, który miał w nim przyjmować i olśniewać swoich nowych poddanych [66]), zrobił ogromne wrażenie swoją wielkością i przepychem³⁾. Prawdopodobnie, przywieziony jako trofeum do Aten, odegrał on później istotną rolę w rozwoju greckich budowli teatralnych.

Według tradycji, forma ateńskiego Odeonu Peryklesa powtarzała formę namiotu Kserksesa⁴⁾. Znanie jest przedstawienie tego obiektu na monecie [57]. Oscar Broneer w pracy [66] wyraża pogląd, że tradycja to stała się łatwiejsza do zaakceptowania przy założeniu, że namiot ten rzeczywiście był ustawiony w dzielnicy Dionizosa i spełniał taką samą rolę, jak późniejsza budowla kamienna. Zwraca on uwagę, że pisarze greccy V w. p.n.e. i późniejsi, powszechnie używają słowa „σκηνή” na określenie namiotu o przeznaczeniu wojskowym, podczas gdy słowo „κλισίη”, używane w tym znaczeniu przez Homera, jest wówczas stosowane w znaczeniu szopy lub przybudówki – pisze o tym również Athenaeus⁵⁾. W okresie kształtowania się zabudowy teatralnej po wojnach perskich, słowo „σκηνή”, mające wcześniej nieco egzotyczną, specyficzną perską konotację („σκηνή Περσική” oznaczało luksusowe namioty pochodzenia perskiego), stało się nazwą części tej zabudowy ze względu na wykorzystanie namiotu Kserksesa do inscenizacji. Najstarszy zachowany zapis użycia go w tym znaczeniu znajduje się w „Pokoju” Arystofanesa (wiersz 731 [66]). Broneer sugeruje, że namiot ten został, po przywiezieniu do Aten, wykorzystany podczas pierwszego wystawienia Fenicjanek Frynicha, w 476/475 p.n.e., stając się prototypem stałej skene. Potwierdzenie tego może stanowić fakt, że w wielu sztukach Ajschylosa z tego okresu, niezbędny jest – jako dekoracja – wojskowy namiot. Również forma późniejszej kamiennej skene wykazuje znaczne podobieństwo do perskiej architektury pałacowej, którą zapewne w dużym stopniu naśladował namiot Kserksesa [66]. Namioty wykorzystywano również w mniejszych miastach Attyki (np. w Ikarii), gdzie nie było stałego teatru. Ostańtały one wydzielony fragment agory, który służył widowisku. Używane było określenie „πῆγμανος θέατρον” – rozbić (ustawić) teatr⁶⁾ (w polskim przekładzie użyto zwrotu „zbudował teatr”⁷⁾). O „rozbijaniu sceny teatralnej” pisze też Platon⁸⁾.

Grecy również wykorzystywali namioty do tworzenia pełnych przepychu wnętrz, zwłaszcza przeznaczonych na wystawne uczty. Opis przygotowania wielkiego namiotu na ucztę, o powierzchni dziesięciu tysięcy stóp, w którym miały się zmieścić całe Delfy, podaje Eurypides⁹⁾.

Jednym z najsłynniejszych greckich namiotów w starożytności jest namiot, w którym Ptolemeusz II Filadelfos, wydał w 275 r. p.n.e. wielką ucztę¹⁰⁾. Namiot ten opierał na słupach z drewna cedrowego o wysokości pięćdziesięciu łokci (ok. 26.6 m) i grubości nieco mniejszej niż jeden łokieć (niecałe pół metra), z których cztery środkowe miały kapitele w kształcie korony drzewa palmowego. Rozstaw słupów wynosił dwadzieścia do dwudziestu jeden łokci, tj. prawie jedenaście metrów [74]. Namiot był podzielony na wiele pomieszczeń, a jego całkowita powierzchnia wynosiła ok. 8 200 m² [73]. Całość była przykryta purpurową, pokrytą haftami tkaniną z białymi frędzlami, ukształtowaną w formie sklepień nad wnętrzem. Również ściany wykonano jako zasłony z purpurowej tkaniny. Na rys. 2.28 przedstawiono namiot Ptolemeusza II, wg egipskiej stelli.

¹⁾ Athenaeus, *Deipnosophistae* (tłum. ang. C.D. Yonge), H.G. Bohn, London 1854 [48], (wyd. w jęz. greckim: *Ἀθηναίου, Δειπνosophισται*, Ex officina Caroli Tauchni, Lipsk 1834 [49]) II, 31 (48)

²⁾ *ibidem*, XII, 47 (534). Również: Plutarch, Alcybiades, 12

³⁾ Namiot stanowił cały kompleks, w którym było miejsce dla świąt, sala bankietowa, kuchnia, a nawet pomieszczenia przeznaczone dla koni – Herodot, *Dzieje*, IX 70 i IX 82, Czytelnik, Warszawa 1959,

⁴⁾ Pauzaniusz, *Wędrówka po Helladzie*, I, 20, 4, Ossolineum, Wrocław 1973 oraz Plutarch, Perykles, 13, 5, Ossolineum, Wrocław 1953

⁵⁾ *op.cit.*, V, 20

⁶⁾ Plutarch, Kleomenes, XII

⁷⁾ Plutarch, *Żywoty sławnych mężów*, Kleomenes, przełożył M. Brożek, wyd. Ossolineum, Wrocław 1953, str. 311

⁸⁾ Platon, *Prawa*, VII, 817, Wyd. Alfa, Warszawa 1997

⁹⁾ Eurypides, *Ijon*, IV, 1128-1170, PIW, Warszawa 1967

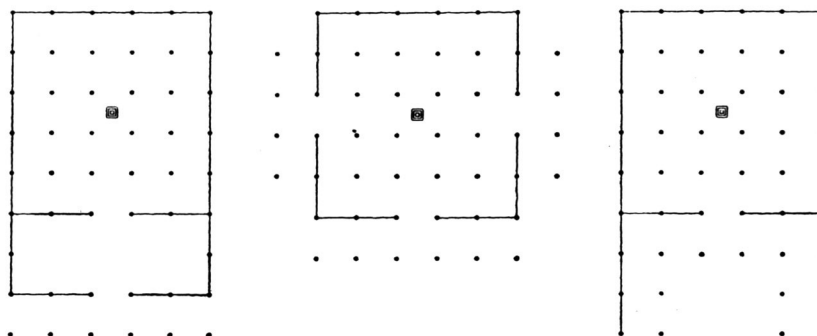
¹⁰⁾ Opis tego namiotu podaje Athenaeus, *op.cit.*, V, 25-26 (196-197), który cytuje Kalikseinos z Rodos. Bardzo obszerne studium na ten temat zawiera praca F. Studniczki [203].



Rys. 2.28 – namiot Ptolemeusza II Filadelfosa, przedstawiony na egipskiej stelli¹⁾

Pierwowzorem dla tego wspaniałego namiotu był prawdopodobnie namiot używany przez Aleksandra Wielkiego w Suzie, w roku 324 p.n.e. Namiot ten opierał się na pięćdziesięciu pokrytych złotem słupach o wysokości dwudziestu łokci (ok. 10.5 m) i przykrywał powierzchnię ok. 2 600 m². Jego układ był wzorowany na perskiej apadanie²⁾.

W pracy [203] przedstawione są trzy możliwe układy pięćdziesięciu słupów tego namiotu, nawiązujące do apadany w Persepolis, rys. 2.29. Sugeruje się tam również, że mógł to być namiot królewski zdobyty przez Aleksandra na Persach.



Rys. 2.29 – trzy warianty układu słupów namiotu Aleksandra Wielkiego.

Ilustracja za [203]

Velarium | Inwencja starożytnych Rzymian pozwoliła rozszerzyć zakres stosowania tkanin w architekturze. Ograniczał się on wcześniej do wykonywania obiektów zamkniętych o różnej wielkości – namiotów, o funkcji mieszkalnej, lub podobnej. Rzymianie zastosowali tkaniny do wykonania imponujących konstrukcji inżynierskich – osłon przeciwsłonecznych w obiektach publicznych i prywatnych. Osłony takie, nazywano *velarium*.

Nie zachowały się żadne pozostałości po tych konstrukcjach. Obecna wiedza na ich temat opiera się na licznych wzmiankach w literaturze antycznej, ilustracjach (głównie freskach i mozaikach) oraz na znalezionych śladach elementów konstrukcyjnych w zachowanych obiektach³⁾.

Konstrukcja tych niezwykłych zadaszeń do dziś nie jest ostatecznie wyjaśniona, pomimo tego, że są one przedmiotem zainteresowania historyków i architektów już od czasów Renesansu.

¹⁾ Wg Walter Wereszenski, *Atlas zur altägyptischen Kulturgeschichte*, Leipzig 1923. Rys. za [73]

²⁾ Namiot Aleksandra Wlk. w Suzie został opisany przez Charesa. Opis ten przytacza Athenaeus, *op.cit.*, XII, 54-55.

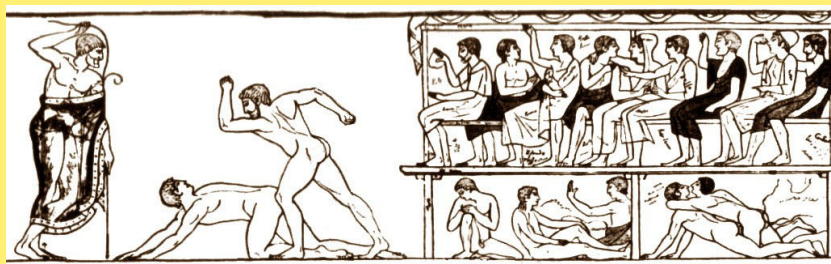
³⁾ Rozległe, interdyscyplinarne badania nad historią rozwoju konstrukcji składalnych, w tym *velarium*, przeprowadzono w Niemczech, w ramach programu badawczego SFB 64 „Weitgespannte Flächentragwerke”. Ich wyniki zostały opublikowane w pracy IL 5, „Wandelbare Dächer”, Stuttgart 1972, oraz m.in. w pracach [99] [108].

Okres, w którym velaria były stosowane, rozciągał się przez ponad sześć stuleci. Pewne ślady wskazują, że zadaszenia z płótna mogły być stosowane również w okresie poprzedzającym rok 69 p.n.e., przyjmowany za datę pojawienia się velarium:

koniec V w. p.n.e. – malowidło ściennie z etruskiego grobowca w Corneto, przedstawia dach z płótna nad trybunami przy placu igrzysk, rys.2.30.

208 p.n.e. – wzmianka o zadaszeniu przeciwsłonecznym, użytym w Rzymie, w czasie *comitium*. Mogło to być velarium²⁾

186 p.n.e. – zawalenie się masztu w Circus Maximus, w Rzymie. Mógł to być maszt, który podtrzymywał velarium³⁾



Rys. 2.30 – malowidło naścienne w grobowcu etruskim w Corneto, na którym widoczna jest osłona z płótna, rozciągnięta nad trybunami¹⁾

Poniżej zestawiono chronologicznie, w oparciu o zachowane w literaturze antycznej wzmianki, najważniejsze fakty, dotyczące okresu, w którym velarium było stosowane z całą pewnością:

69 p.n.e. – Quintus Lutatius Catulus, przywódca stronnictwa optymatów i przeciwnik Juliusza Cezara, po raz pierwszy zastosował osłonę przeciwsłoneczną z płótna – velarium, w teatrze⁴⁾. Okazją do tego były uroczystości poświęcenia odnowionej, po spaleniu w 83 r. p.n.e., świątyni Jowisza na Kapitolu, której odbudowę Q. Catulus nadzorował. Valerius Maximus pisze, że velarium pochodzi z Kampanii. Zastosowanie go w czasie igrzysk, stworzyło Catulusowi okazję do zamanifestowania swojego bogactwa. Przesadne zamiłowanie do przepychu i ostentacji, cechujące tę epokę, było również w późniejszym okresie jednym z powodów, dla których podejmowano się tych kosztownych i skomplikowanych technicznie przedsięwzięć [108].

65 p.n.e. – Juliusz Cezar zastosował w czasie igrzysk velarium z jedwabiu. Przekrywało ono Forum Romanum oraz Via Sacra, od jego domu i Clivus do Kapitolu⁵⁾

60 p.n.e. – Lentulus Spinther zastosował po raz pierwszy na velarium *carbasus* – lekką tkaninę z lnu⁶⁾

¹⁾ Malowidło to zachowało się do chwili obecnej, ale jest bardzo zniszczone. Rys. przedstawia szkic von Stackelberga z 1827 r., wg Weege F., *Etruskische Gräber mit Gemälden in Corneto*, [w:] *Jahrbuch des Kaiserlich Deutschen Archäologischen Instituts*, XXXI (1916), s. 105 i dalsze. Ilustracja za [99].

²⁾ Liwiusz, *Dzieje Rzymu od założenia miasta*, XXVII, 36, Ossolineum, Wrocław 1968/71

³⁾ Liwiusz, op. cit., XXXIX, 7, 8

⁴⁾ O wydarzeniu tym pisze w 31 r. p.n.e., Valerius Maximus, *Facta et dicta memorabilia*, II, 4, 6, B.G. Teubner, Stuttgart und Leipzig 1998 oraz ok. 77 r. n.e. – Pliniusz, *Historia naturalna*, XIX, 1, 23, Ossolineum, Wrocław 1961. Informacja ta została później powtórzona w 353 r. n.e. przez Ammianusa Marcellinusa, *Rerum gestarum*, XIV, 6, 25, który opisał też, jak pod velarium rzymskiego teatru nocuje biedota [99]. Warto zauważyć, że Q. Catulus nie był inżynierem odpowiedzialnym za instalację velarium, lecz organizatorem przedsięwzięcia i finansował je.

⁵⁾ Kasjusz Dion, *Historia rzymska*, XLIII, 24, Ossolineum, Wrocław 1967 oraz Pliniusz, op.cit., XIX, 1, 24

⁶⁾ Pliniusz, op.cit., XIX, 1, 23

32 p.n.e. – Marcellus, podczas jedenastego konsulatu Augusta, również rozpiął velarium nad całym Forum. Pozostawało ono przez całe lato⁷⁾

37–41 n.e. – Kaligula dwukrotnie rozpiął velarium nad Forum. Zakazał on stosowania go w teatrze, zezwalając jedynie senatorom na przynoszenie indywidualnych parasoli przeciwsłonecznych²⁾

66 n.e. – Neron rozpina pełne przepychu, purpurowe velarium w teatrze Pompejusza w Rzymie, na którym jest przedstawiony jako boski woźnica, otoczony złotymi gwiazdami³⁾

140 – 144 n.e. oraz 200 - 210 n.e. – informacje o naprawie velarium teatru w Efezie⁴⁾

533 n.e. – Digesta Iustiniani (część Corpus Iuris Civilis) uznaje velarium za istotne wyposażenie budynków i określa podstawowe obowiązki właścicieli domów, w zakresie bezpieczeństwa związanego z jego używaniem⁵⁾

532 n.e. – na hipodromie w Konstantynopolu, przyjęte było naciąganie velarium za pomocą koni⁶⁾

Wspomniane wcześniej zamiłowanie do ostentacji było istotnym, lecz nie jedynym powodem, dla którego rozwinięto i stosowano tak niezwykle konstrukcje dachowe, jak velarium. Niewątpliwe, podstawowym powodem była potrzeba zapewnienia ochrony przed słońcem, w czasie trwających przez długi czas igrzysk i przedstawień. Sztynne, drewniane konstrukcje, które budowano wcześniej w mniejszych teatrach, stały się dalece niewystarczające, gdy zaczęły powstawać teatry i amfiteatry o wielkich rozmiarach. Lekkie zadaszenia z tkanin, rozpięte na linach pozwalały w znacznym stopniu pokonać te ograniczenia.

Jedną z charakterystycznych cech velarium, jest to, że były one konstrukcjami składalnymi: tkanina mogła być rozciągana lub zwijana. Cecha ta nie była jednak celowym zamierzeniem inżynierskim, ale wynikała raczej z ograniczonej wytrzymałości i trwałości tkaniny. Rzymianie stosowali najczęściej lekką tkaninę lnianą, nazywaną *carbasus*⁷⁾. Ponadto, używano też tkanin jedwabnych⁸⁾ oraz bawełnianych. Specjalną odmianą tkaniny była tkanina z wełny koziej, nazywana od miejsca pochodzenia, Cylicji – *cilicum*. Wykonywane z niej velarium nazywano cylicyjskim (*Vela autem Cilicia*)⁹⁾. Warto zauważyć zbieżność miejsca wytwarzania *cilicum*, z początkiem obszaru występowania czarnych namiotów. Tkanina ta nie była zresztą, stosowana zbyt powszechnie, ze względu na swój ciemny kolor. Rzymianie preferowali płótna lniane, barwione (najczęściej na czerwono) i wzorzyście zdobione.

Aspekt koloru velarium, był istotny dla Rzymian i zwracano nań uwagę. Lukrecjusz, w 55 p.n.e. opisuje efekty świetlne spowodowane rozciągnięciem „...zaston, złotych, czerwonych i rdzawych” (O naturze rzeczy, IV, 72-83, PIW, Warszawa 1994), a także efekty akustyczne spowodowane trzepotaniem tych tkanin na wietrze, zwłaszcza, jeżeli uległy rozerwaniu (ibidem, VI, 108-112). Podobnie, w 23 p.n.e., Propertjusz opisuje łopotanie zawieszonego w teatrze velarium na wietrze (Elegie, III, 18, 11; IV, 1, 15). Również inni autorzy nawiązują do barwnych efektów związanych z velarium. Pliniusz pisze, że „...czerwone velarium nad dziedzińcem chroni mech przed słońcem” (op.cit., XIX, 1, 24). Owidiusz, w 17 r. n.e. pisze, że rozpinanie velarium w teatrze jest utartym zwyczajem (Ars amandi, I, 130), a w innym utworze porównuje „...rumieniec na białej skórze dziewcząt [...] do cienia rzucanego na atrium przez purpurowe velarium” (Metamorfozy, 10, 595). Ten sam autor, pisze, że „...promienie słońca przeświecają przez leśne liście, jak przez velarium” (ibidem, 5, 388-389).

¹⁾ Pliniusz, op.cit., XIX, 1, 24 oraz Kasjusz Dion, op.cit., LIII, 31

²⁾ Swetoniusz, Żywoty cesarów, Kaligula, 26, 5, Ossolineum, Wrocław 1987 oraz Kasjusz Dion, op.cit., LIX, 7

³⁾ Kasjusz Dion, op.cit., LXIII, 6 oraz Pliniusz, op.cit., XIX, 1, 24

⁴⁾ FiE II (Forschungen in Ephesos II), Nr 39, 40 i 41; za [99]

⁵⁾ Digesta Iustiniani, XXXIII, 7, 16; XXXIII, 7, 17; XXXIII, 7, 20; XXXIII, 7, 23

⁶⁾ Joannes Malalas, Kroniki, XVIII, 19; za [99]

⁷⁾ Pliniusz, op.cit., XIX, 1, 23

⁸⁾ ibidem, XIX, 1, 24

⁹⁾ Digesta Iustiniani, XXXIII, 7, 17



Rys. 2.31 – inskrypcja łacińska – ogłoszenie o występach gladiatorów. Tekst zakończony zwrotem „... et vela erunt”

Ilustracja za [99]

D. Lucreti Satri Valentis flaminis Neronis Caesaris Aug(usti) fili perpetui gladiatorum paria XX, et D. Lucreti Valentis fili glad. paria X pug(nabunt) pompeis VI.V.IV.III. pr. Idus Apr. venatio legitima et vela erunt. Scr(ip)tist) Aemilius Celer sing(ulus) ad luna(m)

Inskrypcja wg CIL¹⁾ IV, 3884

*) *Corpus Inscriptionum Latinarum, consilio et auctoritate Academiae Litterarum (Regie) Borussicae editum, 16 Bde, Leipzig/Berlin 1862–1943*

Sama operacja rozciągania velarium była uważana za specjalną atrakcję dla widzów, a światło, przeświecające przez barwne tkaniny, dostarczało ciekawych efektów wizualnych. Często używany zwrot „vela erunt” (tzn. „będzie velarium”) odnosił się właśnie do tego aspektu rozciągania velarium i był stosowany w ogłoszeniach informujących o igrzyskach itp. [108]. Przykład takiej inskrypcji przedstawiony jest na rys. 2.32.

Do dzisiaj zachowało się bardzo niewiele przedstawień graficznych, mogących dawać wyobrażenie o wyglądzie velarium. Są to mozaiki¹⁾, monety²⁾, oraz malowidła ściennie³⁾. Dają one jednak obraz niepełny i mocno uproszczony. Jedyny, znanym obecnie, pełny obraz velarium, zachował się na fresku z Pompejów, znalezionym w pobliżu teatru, rys. 2.32 [108] [89].



Rys. 2.32 – jedyny, zachowany, oryginalny obraz, przedstawiający pełny widok velarium. Jest to fresk, znaleziony w Pompejach, w roku 1869. Przeniesiony na panel, znajduje się obecnie w Museo Nazionale w Neapolu. Malowidło przedstawia krwawą walkę pomiędzy mieszkańcami Pompejów i Nucerii w pompejańskim amfiteatrze roku 58 n.e. (wydarzenie zostało odnotowane przez Tacyta, Roczniki, księga XVI, 17). Zaledwie ok. dziesięć lat, po wprowadzeniu velarium przez Q. Catulusa, było on już stałym wyposażeniem teatrów również poza Rzymem.

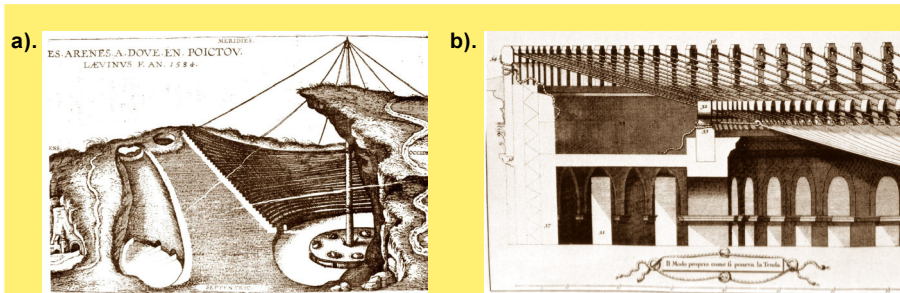
Ilustracja za [152]

¹⁾ Są to np.: fragment mozaiki na sklepieniu baptysterium na Lateranie, w Rzymie, pochodzącej z 315 r. n.e., mozaika z Lyonu, znajdująca się w Musée de la Civilisation Gallo-Romaine, w tym mieście, czy też mozaika z Kartaginy, znajdująca się w Musée Nationaux, w Le Bardo [99].

²⁾ Np. sestercje Tytusa i Aleksandra Sewera, znajdujące się obecnie w British Museum

³⁾ Istotne są zwłaszcza malowidła ściennie znalezione w Pompejach, np. pochodzące z Casa degli Epigrammi oraz Casa della Caccia Antica [99].

Od czasów Renesansu, velarium wzbudzało duże zainteresowanie, zwłaszcza architektów. Podejmowano liczne próby rysunkowej rekonstrukcji tych konstrukcji. Na rys. 2.33 przedstawiono dwie z nich: Lipsiusa, z 1575 r. oraz Fontany, z 1714 r.



Rys. 2.33 – wcześnie próby rekonstrukcji velarium:

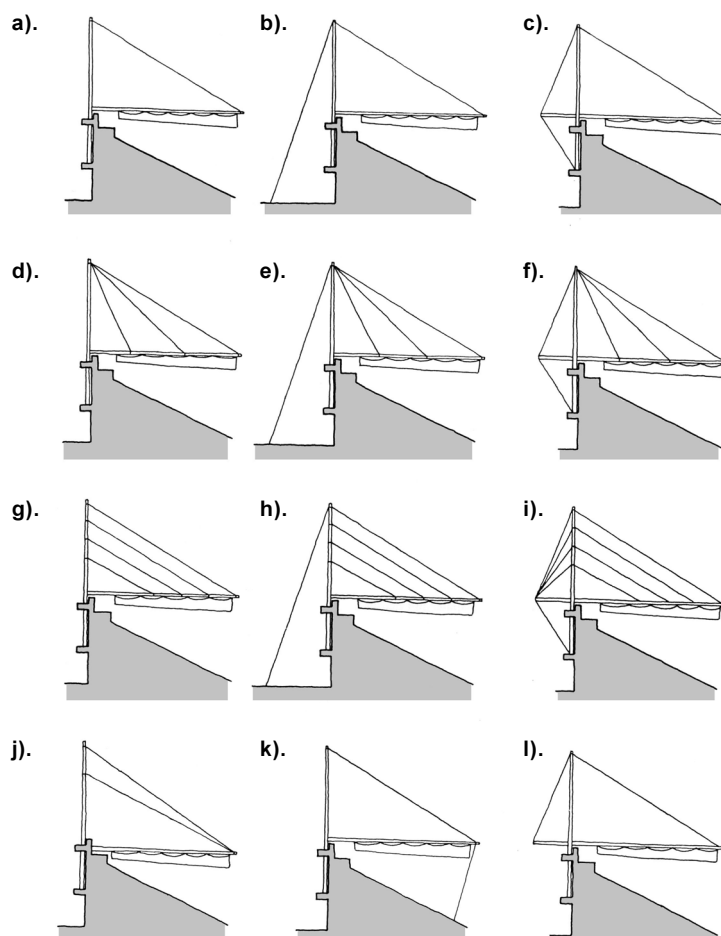
a). Lipsiusa, z 1575 r.
b). Fontany, z 1714 r.

Ilustracje za [99]

Współczesne rekonstrukcje¹⁾ pozwalają odtworzyć prawdopodobne rozwiązania konstrukcyjne velarium. Wynika z nich, że przekrycia, stosowane w różnych obiektach i na różnych obszarach, różniły się wyraźnie między sobą. Z tego powodu, można wyróżnić cztery grupy systemów konstrukcyjnych velarium. Są to systemy stosowane w:

- teatrach, amfiteatrach i stadionach rzymskich
- cyrkach rzymskich
- teatrach greckich
- teatrach w Azji Mniejszej

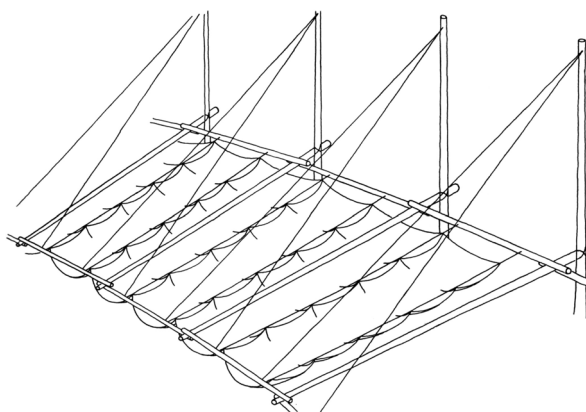
Systemy konstrukcyjne velarium, stosowane w teatrach, amfiteatrach i stadionach rzymskich, tworzą najliczniejszą grupę i najciekawszą, pod względem stosowanych schematów statycznych. Na rys. 2.34 i 2.35 przedstawiono schematy typowych systemów, stosowane w tych obiektach.



Rys. 2.34 – systemy konstrukcyjne velarium, podwieszone do pojedynczych masztów:
– z dźwigarem podwieszonym za pomocą pojedynczej liny: a). b). c). k). l).
– z dźwigarem podwieszonym za pomocą wielu lin: d). e). f). g). h). i). j).

Opracowano na podstawie [99]

1) Obszerne informacje o podejmowanych próbach odtworzenia konstrukcji velarium zawiera praca [99].

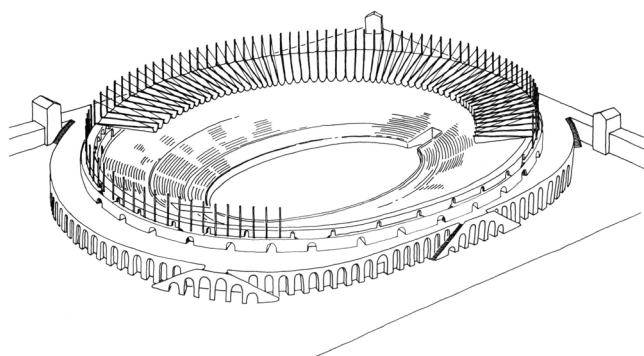


Rys. 2.35 – przykład systemu konstrukcyjnego velarium, podwieszonego do kilku masztów, za pomocą liny pojedynczej. Dodatkowo zastosowana jest przednia belka krańcowa – często zamiast niej, stosowano linę.

Ilustracja za [99]

Istota wszystkich, przedstawionych rozwiązań systemu konstrukcyjnego, polega na zastosowaniu wysokich, wspornikowo zamocowanych masztów, drewnianych, rozmieszczonych wzdłuż zewnętrznego obwodu korony trybun. Do masztów podwieszone są, za pomocą lin, promieniście usytuowane belki. Wzdłuż belek rozciągane jest płótno. Maszty mogą być usztywnione odciegami zewnętrznymi, zakotwionymi do gruntu lub do ściany zewnętrznej obiektu. Zwraca uwagę podobieństwo tych systemów, do stosowanych obecnie w konstrukcjach zadaszeń obiektów sportowych.

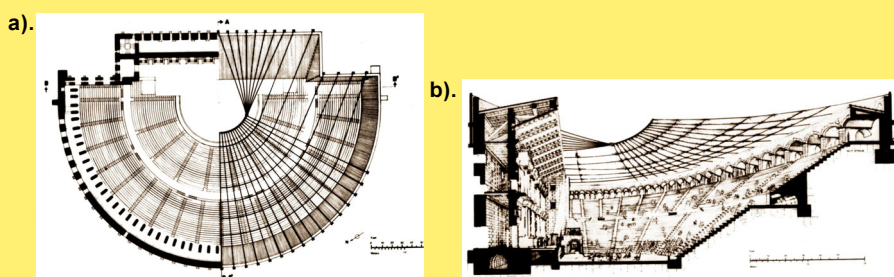
Najczęściej, belki nie były usztywnione na obciążenie działające pionowo do góry (ssanie wiatru), przeciwstawiając mu się jedynie swoim ciężarem własnym i ciężarem tkaniny. Z tego powodu, przy silnym wietrze, tkanina musiała być zwijana ¹⁾. Zaletą, przedstawionego systemu konstrukcyjnego jest to, że konstrukcja nie musi być rozmieszczona wzdłuż obwodu zamkniętego. Pozwala to na przekrywanie nie tylko całych amfiteatrów ale również wybranych fragmentów trybun, jak to przedstawia fresk z Pompejów. Na rys. 2.36 przedstawiono schemat tego obiektu.



Rys. 2.36 – schemat systemu konstrukcyjnego velarium, zastosowanego w amfiteatrze w Pompejach, przedstawionym na fresku z rys. 2.32.

Ilustracja za [99]

W teatrach stosowano najczęściej dwie niezależne konstrukcje velarium: jedną nad widownią, a druga nad sceną. Czasami scena była osłonięta wspornikowym dachem drewnianym. Rys. 2.37 przedstawia próbę rekonstrukcji velarium teatru w Aspendus.



Rys. 2.37 – velarium teatru w Aspendus. Rekonstrukcja Izenoura, z 1977 r. Charakterystyczne są liny podwieszające belki zadaszenia widowni do masztów umieszczonych za sceną.

Ilustracje za [99]

¹⁾ Marcjalis, w ostatniej dekadzie I w. n.e., pisze o tym, że velarium nie może być rozciągane przy silnym wietrze (Epigramy, IX, 38; XI, 21; XIV, 28-29)

Zadaszenia widowni stadionów rzymskich oparte były na tych samych zasadach konstrukcyjnych, co zadaszenia amfiteatrów. Różnice wynikały jedynie z kształtu tych obiektów. Stadiony miały wyraźnie wydłużony kształt (np. stadion Domicjana w Rzymie, obecnie Piazza Navona).

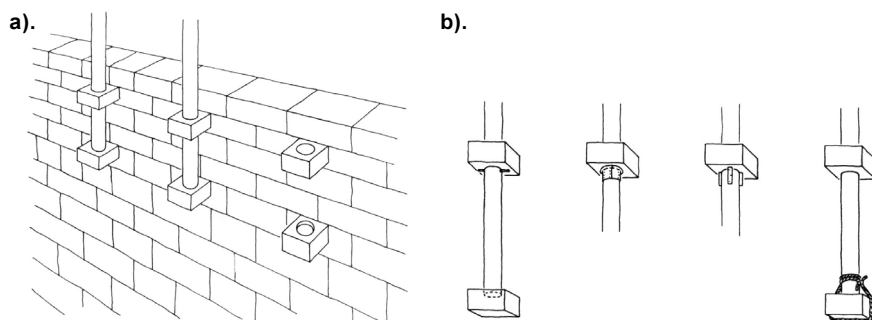
Na rys. 2.38 przedstawiony jest fragment dekoracji na szklanej wazie, przedstawiającej panoramę Puzzuoli. Widoczny jest rysunek stadionu, z umieszczonymi wzdłuż obwodu masztami, do zawieszenia velarium.



Rys. 2.38 – fragment dekoracji na szklanej butli, pochodzącej z Italii, z przełomu 3 i 4 w. n.e. obecnie przechowywanej w Muzeum Narodowym w Pradze. Rysunek przedstawia panoramę Puzzuoli, a na zamieszczonym fragmencie – widoczny jest stadion, z masztami do zawieszenia velarium

Ilustracje za [99]

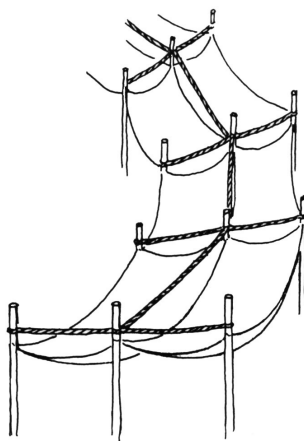
Na podstawie zachowanych pozostałości antycznych teatrów i amfiteatrów, można odtworzyć sposób mocowania drewnianej konstrukcji velarium do ścian. Maszty były umieszczane na zewnętrznej powierzchni obiektu. Wykorzystywano do tego dwa kamienie, osadzone pionowo jeden nad drugim (kamienie takie są powszechnie znajdowane w zachowanych pozostałościach obiektów). W kamieniu górnym wykonywano otwór przelotowy, przez który maszt przechodził i opierał się na gnieździe, wykonanym w kamieniu dolnym, rys. 2.39.a). Następnie zabezpieczano maszt przed wysunięciem, za pomocą żelaznych obręczy lub za pomocą lin, rys. 2.39.b).



Rys. 2.39 – sposób mocowania wspornikowych masztów do kamiennych konsoli z otworami, umieszczonych w ścianie zewnętrznej amfiteatru

Ilustracje za [99]

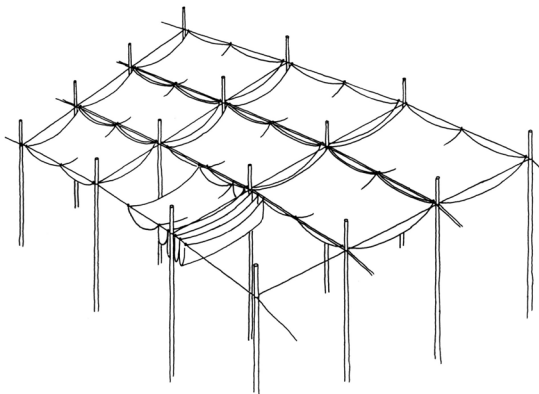
W rzymskich cyrkach, obiektach o trybunach bardzo długich i stosunkowo wąskich, stosowano zupełnie inne rozwiązanie konstrukcyjne velarium. Nie stosowano wspornikowych masztów, z podwieszonymi belkami, lecz ustawione w trzech rzędach słupki, połączone u góry linami. Pomiedzy nimi rozwieszano tkaninę. System konstrukcyjny velarium w Circus Maximus, w Rzymie, przedstawia rys. 2.40. Rozwiązanie takie było prostsze i mniej „eleganckie”, gdyż słupki w pewnym stopniu ograniczały widoczność. Było jednak z pewnością znacznie tańsze i nieco bardziej odporne na działanie wiatru.



Rys. 2.40 – velarium nad widownią w Circus Maximus, w Rzymie

Ilustracja za [99]

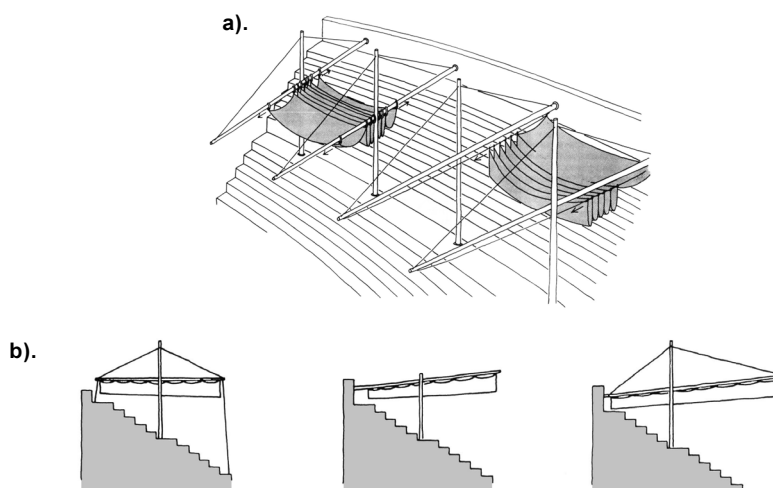
Pojawienie się velarium w teatrach greckich nastąpiło pod wpływem zwyczajów rzymskich. Grecy stosowali konstrukcje analogiczne jak w teatrach rzymskich, ale też rozwinęli własny sposób osłaniania trybun, zbliżony do stosowanego w rzymskich cyrkach. W konstrukcjach tego typu nie stosowano belek podwieszonych do masztów, lecz szeregi drewnianych słupów, między którymi rozpięte były liny, do których podwieszano tkaniny. Przykład takiego velarium przedstawia rys. 2.41.



Rys. 2.41 – velarium stosowane w teatrach greckich

Ilustracja za [99]

W teatrach Azji Mniejszej, stosowane było velarium konstruowane w zupełnie odrębny sposób. Charakterystyczne dla tego systemu konstrukcyjnego było przesunięcie linii, w której umieszczone były maszty, z zewnętrznej krawędzi korony trybun, do wnętrza – mniej więcej do połowy szerokości, rys. 2.42.a). Dzięki temu zmniejszano rozpiętość belek, o których podwieszane były bryty tkaniny. Konstrukcja była też lepiej zabezpieczona przed ssaniem wiatru, rys. 2.42.b). Zabezpieczenie to było szczególnie efektywne, jeżeli zastosowana była lina przytrzymująca przednie końce belek. Niedogodnością, wynikającą z takiego ustawienia masztów, było pewne ograniczenie widoczności.



Rys. 2.42 – velarium stosowane w teatrach Azji Mniejszej:
a). widok ogólny
b). typowe schematy systemów konstrukcyjnych

Ilustracje za [99]

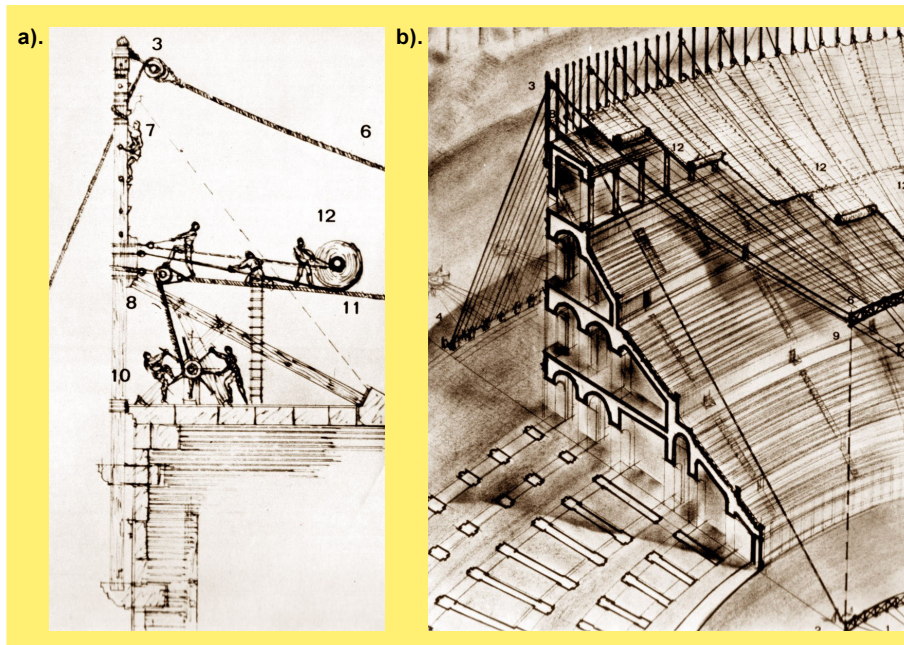
Odrębnym zagadnieniem były problemy techniczne, związane ze sposobem rozciągania i zwijania tkaniny. Ponieważ zadaszenia amfiteatrów były bardzo duże, również ciężar własny tkaniny, lin i elementów drewnianych był znaczny. Ponadto, operowanie złożonymi urządzeniami: kołowrotami, blochkami itp., wymagało dużej wprawy i zręczności¹⁾²⁾. Do wykonywania tych czynności zatrudniano zatem marynarzy, którzy zakończyli służbę we flocie³⁾. System olinowania w konstrukcjach velarium, z pewnością przypominał zatem takielunek okrętów floty rzymskiej.

¹⁾ Witrwiusz, ok. 20 p.n.e., pisze o konieczności posiadania wprawy przy rozciąganiu zasłon z płótna żaglowego w teatrach (O architekturze ksiąg dziesięć, X, praef., 3)

²⁾ O wiązaniu węzłów velarium pisze 140 r. n.e. Juvenalis, Satyry, I, 12

³⁾ O tym, że za rozciąganie velarium w Koloseum odpowiedzialni są żeglarze z floty wojennej, pisze ok. 189–192 n.e. Lampridius, Vita Commodi, 15, 5–7

Na rys. 2.43.b). przedstawiono prawdopodobny schemat systemu konstrukcyjnego velarium w rzymskim Koloseum, wg rekonstrukcji Carpiciego, z 1976 r. Urządzenia do operowania linami i tkaniną, umieszczone na koronie widowni, przedstawia rys. 2.43.a). Obiekt ten, ze względu na swoją wielkość ¹⁾ i rangę centralnego amfiteatru w Cesarstwie, był niewątpliwie wyposażony w najbardziej zaawansowane wówczas urządzenia.



Rys. 2.43 – rekonstrukcja systemu konstrukcyjnego velarium, zastosowanego w rzymskim Koloseum:

- a). instalacja do rozwijania tkaniny i sposób operowania nią
- b). przekrój przez obiekt, z zaznaczeniem elementów systemu konstrukcyjnego velarium

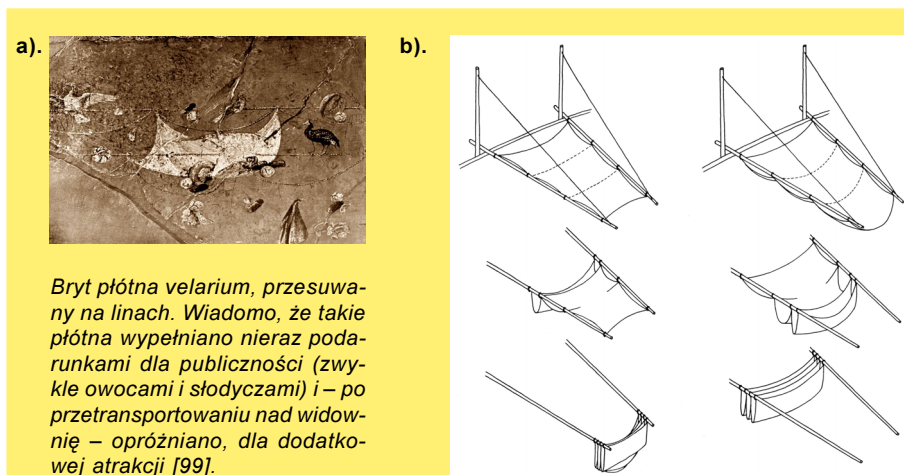
Rekonstrukcja Carpiciego, z 1976 r.

Ilustracje za [99]

Sposób przesuwania płótna jest znany dzięki freskowi znalezionemu w Pompejach, rys. 2.44.a)., który przedstawia bryt płótna przesuwany na linach dzięki umieszczonym w narożach oczkom. Jeżeli belki były ustawione radialnie, tkanina musiała być zwijana do wewnętrznej (środkowej) krawędzi, gdyż w innym przypadku jej węższa krawędź zablokowałaby się na belkach. Alternatywą było zastosowanie tkaniny odpowiednio szerszej, ale w takim przypadku, po rozciągnięciu, miała ona dość znaczny zwis w części środkowej, rys. 2.44.b).

Wśród starożytnych Rzymian popularne było też stosowanie mniejszych, indywidualnych osłon przeciwsłonecznych z tkanin. Nie są to obiekty, które pod względem wielkości i stopnia złożoności technicznej mogłyby być porównywalne z velarium stosowanym w teatrach, ale świadczą o powszechności stosowania tkanin w architekturze tego okresu. Przykłady takich osłon są przedstawione np. na znanej mozaice z Praeneste, czy też na fresku z Casa dei Pigmei, w Pompejach.

Oprócz wspomnianego wcześniej określenia „vela erunt”, używano też rutynowych określeń: „vela reducere” na zwijanie velarium i „vela inducere”, „inductiones velorum” – na określenie rozpinania velarium [3.16].



Rys. 2.44 – rekonstrukcja systemu konstrukcyjnego velarium, zastosowanego w rzymskim Koloseum:

- a). fresk z Pompejów, przedstawiający przesuwanie brytu płótna velarium po linach; [99] [108]
- b). sposób zwijania tkaniny, w zależności od jej szerokości (opis w tekście); ilustracja za [99]

1) W przypadku rzymskiego Koloseum, zadaszenie tylko górnej galerii, wymagało przykrycia 5 700 m² powierzchni, a przykrycie wszystkich miejsc na widowni – 19 100 m² [108]

Środkowy Wschód w średniowieczu | Kraje Azji Środkowej, zostały zdominowane, w okresie średniowiecza, przez władców pochodzenia mongolskiego – bezpośrednich oraz dalszych potomków Czyngiz Chana. Najstarsze, posiadane obecnie relacje, dotyczące form namiotów używanych przez Mongołów pochodzą z pierwszej połowy XIII w. – okresu ich ekspansji terytorialnej w Azji i Europie¹⁾.

Mongołowie używali namiotów o bardzo zróżnicowanej konstrukcji, różnej formie i wielkości. Były to zarówno namioty szkieletowe²⁾, jak i namioty membranowe.

Te ostatnie występowały w charakterystycznej formie tzw. namiotów dzwonowych. Jest to odmiana namiotów stożkowych, z centralnym masztem zakończonym kołem dachowym. Powoduje to, że namioty te mają kształt stożka ściętego, niespotykany wśród namiotów innych ludów. Namioty dzwonowe są widoczne na miniaturze przedstawiającej Czyngiz Chana w obozie, rys. 2.45.

Wśród namiotów szkieletowych dominuje konstrukcja kratkowa. Namioty takie osiągały bardzo duże rozmiary. Benedykt Polak i Piano Carpiniego opisują trzy wielkie namioty Güyük Chana w Karakorum. Pierwszy z nich, nazwany w relacji *tentorium magnum*, znany jest jako *Sira Ordo* (dosł. „żółty środek obozu”). Pokryty był białym filcem, a jego wielkość pozwalała – według opisu – pomieścić ponad dwa tysiące ludzi. Z innych opisów wynika, że miał on średnicę około 20 m i powierzchnię ponad 300 m².



Rys. 2.45 – Czyngiz Chan w swoim Ordosie. Widoczny jest namiot kratkowy oraz niskie namioty dzwonowe. Miniatura z „*Jāmi' al-Tavārikh*”, Rashīda al-Dīna, z ok. 1420 r., znajdująca się obecnie w Bibliotheque Nationale w Paryżu.

Ilustracja za [44]

¹⁾ Najstarsze pisemne relacje Europejczyków, zawierające informacje o namiotach używanych przez Mongołów, pochodzą m.in. od [44]:

- Rogeriusa, kononika z Nagyvárad (Węgry), naocznego świadka najazdu w latach 1241-42: „*Rogerii Carmen Miserabile*”, z ok. 1244 r.
- Giovanniego da Piano Carpiniego, posła papieskiego do chana mongolskiego, w latach 1245-47: „*Ystoria Mongalorum*”, spisana przez niego przed śmiercią w 1252 r.
- Benedykta Polaka, który współuczestniczył, wraz z Carpinim, w poselstwie papieskim do chana: *Benedictus Polonus „De itinere Fratrum Minorum ad Tartaros quae frater Benedictus Polonus viva voce retulit”*, podyktowana przez niego w Kolonii, w 1247 r.
- Simona de Saint Quentin, który uczestniczył w drugim poselstwie papieskim do chana, w 1247 r.: „*Historia Orientalis*”
- Willema van Rubruck, uczestniczącego w latach 1253-55, w drugiej francuskiej misji do chana: *Guillelmus de Rubruc „Itinerarium”*
- Marco Polo, kupca weneckiego, który podróżował po Chinach i Mongolii w latach 1271-96: „*Il milione*”, podyktowana w 1298 r. Przekład polski [170].

Najważniejsze ze źródeł mongolskich to:

- „*Sekretna historia Mongołów*” (*Mongqol-un niucha tobcha'an*) – kronika z okresu Czyngiz Chana i Ögödeja, datowana na pierwszą połowę XIII w.

Ponadto, dostępne są inne relacje cudzoziemców:

- spisana ok. 1255 r., relacja Juvainiego (‘*Alā*’ al Dīn ‘*Atā* Malik Juvainī), podróżnika arabskiego: „*Tāriḫ-i Jahān-Gusha*” – „*Historia Zdobywcy Świata*”
- relacja podróżnika perskiego, Rashīda al-Dīna: „*Jāmi' al-Tavāriḫ*”, – „*Streszczenie historii*”, pochodząca z ok. 1420 r.

²⁾ patrz rozdz. 2.1.2

Pewien pogląd o wielkości i wyglądzie dawnych tego namiotu, mogą dawać mongolskie namioty szkieletowe, budowane od dawna aż do chwili obecnej, przeznaczone na świątynie lub do odbywania zgromadzeń. Przykład takiego namiotu przedstawia rys. 2.46.

Drugi namiot Güyük Chana, określany przez Carpiniego jako *tentorium*, czyli zwykły namiot, miał nazwę: *Altan Ordo* („Złota Orda”). Był to namiot tronowy. Jego słupy były pokryte złotymi płytkami, a do połączeń użyto złotych gwoździ.

Trzeci z opisanych przez franciszkanów namiotów, określony przez nich jako *tentorium mirabile totum de purpura ruffa*, wykonany był z czerwonego aksamitu.



Rys. 2.46 – wielki, pochodzący z XVI w., namiot szkieletowy o konstrukcji kratkowej, wybudowany dla Abadaj Chana. Obecnie nie istniejący. Fotografia została wykonana w 1960 r.

Ilustracja za [44]

Mongolscy władcy bardzo chętnie używali również namioty zdobyte w czasie podbojów. Rogerius podaje w swojej relacji, że Batu Chan zdobył w bitwie pod Mohi, w 1241 r., piękny lniaany namiot węgierskiego króla Beli IV i często z niego korzystał. Podobnie było po zajęciu przez Mongołów innych krajów, zwłaszcza Persji. Tradycja perska silnie oddziaływała na formy i zdobnictwo namiotów mongolskich.

Niezwykle interesującym przykładem namiotów szkieletowych, są namioty wchodzące w skład mauzoleum Czyngiz Chana w Ordos¹⁾, rys. 2.47. i 2.48. Jest to zespół ośmiu namiotów, wyróżniających się kształtem oraz sposobem użytkowania. Wykonane są – inaczej niż inne namioty o takiej konstrukcji – na rzucie prostokątnym i posiadają charakterystyczne szpiczaste zwieńczenia dachu. Pokryte są grubym, białym filcem. Ich konstrukcja została przystosowana do wielokrotnego przewożenia w różne miejsca, poprzez umieszczenie ich na specjalnych wózkach z wysokimi kołami.

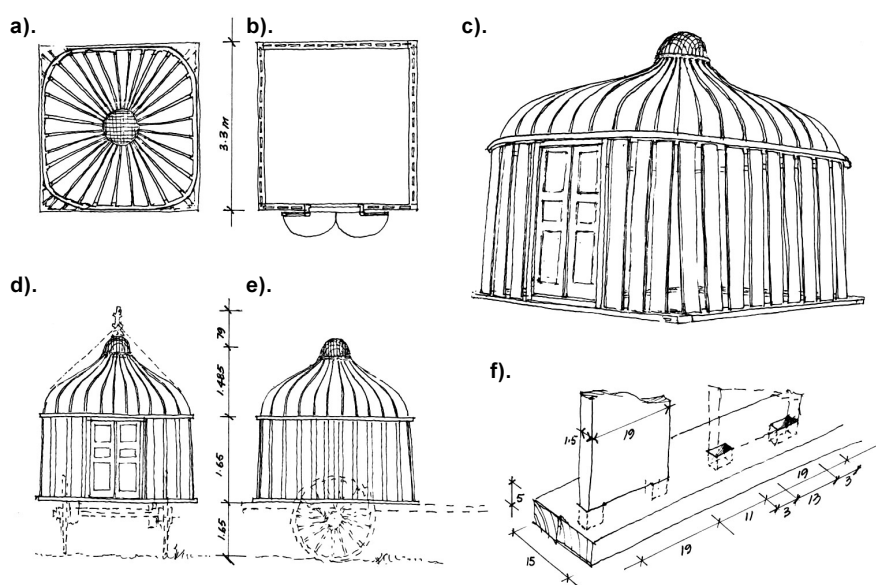
Po śmierci Czyngiz Chana, jego mauzoleum zlokalizowano na terenie Ordos (mong., liczba mnoga od „ordo”, tj. królewska rezydencja lub kwatera dowódcy). Jest to teren znajdujący się na obszarze wielkiej równiny, w zakolu rzeki Huang-ho (Mongolia Zewnętrzna, obecnie na terytorium Chin). Mauzoleum-sanktuarium składało się z ośmiu białych namiotów szkieletowych, o nietypowym, prostokątnym kształcie. W namiotach tych przechowywano szczątki twórcy mongolskiej potęgi oraz należące do niego przedmioty codziennego użytku. Namioty te określało specjalną, nazwą „chomchugh”. Były one przystosowane do przewożenia na wózkach z wysokimi kołami. Wnuk Czyngiz Chana, chiński cesarz Kubilaj Chan, ustanowił szczegółowy rytuał obchodzenia się z nimi oraz świętowania uroczystości. Konieczność przewożenia namiotów wynikała z tego, że uroczystości ku czci zmarłego organizowano w różnych porach roku, za każdym razem w innym miejscu. Sanktuarium opiekowała się grupa pięciuset rodzin (zwanych Darkhad – wyzwolenicy), specjalnie osadzonych w tym rejonie. Pełnili oni dziedzicznie różne funkcje związane z kultem Czyngiz Chana i opieką nad namiotami. Namioty odnawiano co trzy lub co dziewięć lat, w ściśle określony sposób, zachowując za każdym razem absolutną zgodność z ich dotychczasową formą. Namioty te pozostawały zachowane na tym samym obszarze, od XIII w. W drugiej połowie lat pięćdziesiątych XX w., przeniesiono je do wybudowanego w pobliżu muzeum (ostatnie zdjęcia przed przeniesienia pochodzą z 1956 r.). W okresie rewolucji kulturalnej w Chinach, namioty zniszczono. Obecnie w muzeum znajdują się kopie, wykonane w sposób bardzo odbiegający od oryginalnego [44].

¹⁾ Ordos jest obszarem ograniczonym przez wielkie zakole rzeki Huang-ho, leżącym na północny wschód od Wielkiego Muru Chińskiego.



Rys. 2.47 – namioty (chomchugh) wchodzące w skład zespołu ośmiu białych namiotów, tworzących mauzoleum Czyngiz Chana w Yeke Ejen Quorugh-a (Ordos). W widocznym na drugim planie, dwóch połączonych, nieco większych niż pozostałe, namiotach, przechowywano szczątki twórcy mongolskiego imperium. Fotografia z 1956 r.

Ilustracja za [44]



Rys. 2.48 – schemat konstrukcji namiotów z rys. 2.45:
a). rzut dachu
b). rzut podłogi
c). widok ogólny
d). widok od frontu w położeniu transportowym
e). widok boczny w położeniu transportowym
f). szczegół zachowanej oryginalnej belki podwalinowej

Ilustracja za [44]

Potomkowie mongolskich najeźdźców, tworzący elity władzy, stosunkowo szybko ulegali asymilacji w podbitych krajach. Zachowywali jednak bardzo długo relikty zachowań właściwych nomadom. W szczególności dotyczyło to zamiłowania do okazałych namiotów i sposobu korzystania z nich¹⁾.

Po rozpadzie imperium mongolskiego, władcy nowopowstałych państw poszukiwali w namiotach splendoru mającego podkreślić ich władzę i znaczenie.

Najbardziej znane, spośród namiotów z tego okresu, są namioty Timura, które zostały szczegółowo opisane zarówno w relacjach europejskich²⁾, jak i w źródłach persko-indyjskich³⁾.

¹⁾ Przykładem takiej „reliktowej” tradycji było posiadanie przez każdą z żon władcy osobnego namiotu, w którym mieszkała i w którym gościła męża. Zwyczaj ten był zachowywany na dworze Wielkich Mogołów aż do czasów Akbara [44].

²⁾ Namioty Timura oglądał, jesienią 1404 r., Don Ruy González de Clavijo, poseł króla Kastylji, Henryka III. Nie był on pierwszym posłem tego króla do Timura, ale jedynie on pozostawił tak obszerną relację z podróży. Clavijo widział, całe „miasto namiotów”, używanych na letnim obozowisku Kān-i gil („glinianka”), położonym o jedną milę od Samarkandy, przez Timura, jego rodzinę, dowódców i gości przybyłych na uroczysty ślub jego wnuków (w tym Ulug-bega). Pozostawiony przez Clavijo opis: „Historia del Gran Tamorlan”, wydany po raz pierwszy w Sewilli, w 1582 r., jest obszerny i pełen szczegółów dotyczących wykonania i sposobu zdobienia wielu z tych namiotów. Dostępny jest pełny przekład angielski [142], który jednak wg niektórych opinii, np. [44], nie jest dostatecznie precyzyjny.

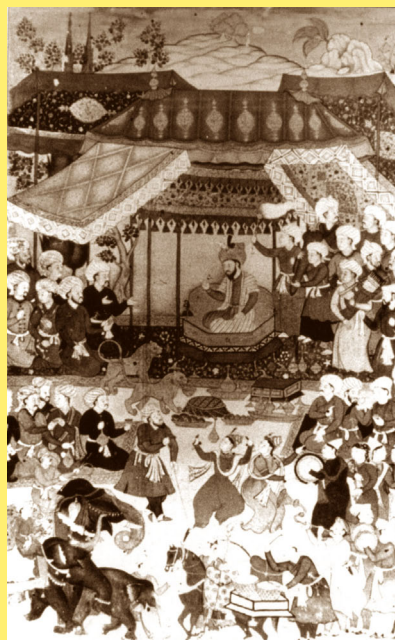
³⁾ Najważniejsze źródła miejscowe, zawierające informacje o namiotach Timura, to [44]:
– ‘Alī Yazdī Sharaf-al-Dīn: „Zafar Nāma”, powstała w latach 1419-25, oficjalna, dworska biografia Timura, będąca kompilacją relacji naocznych świadków
– Ahmad ibn Muhammad Ibn ‘Arabshāh: „‘Ajāib al-maqdūr fī ahhbār-i Tīmūr” – „Wielki Emir Timur”, powstała w latach 1436-37 relacja, której autor, jako chłopiec widział obozowisko Timura w 1404 r.

Kulminacja okazałości i przepychu wielkich namiotów nastąpiła podczas wielkiego zgromadzenia namiotów na obozowisku Kān-i Gil, koło Samarkandy¹⁾, jesienią 1404 r. Do tego obozowiska odnoszą się zachowane relacje²⁾.

W przytoczonym poniżej fragmencie opisu Clavijo, można zauważyć, że w „miasteczku namiotowym” Timura występowały zarówno namioty o konstrukcji szkieletowej, jak i namioty membranowe. Opisany jest też element specyficzny dla wschodnich obozowisk – ogrodzenie *Zalaparda*, rodzaj płotu z tkaniny, oddzielającego obszar prywatny od otoczenia. Clavijo widział ustawionych jedenaście takich ogrodzeń, a w czasie jego pobytu ustawiono jeszcze dwa dalsze. Ogółem, w obozie było ok. dwudziestu tysięcy namiotów, ustawionych w rzędach, tworzących regularne uliczki.

Relacja Clavijo jest w bardzo dużym stopniu zgodna z informacjami z kroniki *Zafar Nāma*³⁾, zawierającej dodatkowe, ważne dane, rys. 2.49.

Najważniejszym namiotem w całym obozie był wielki, szkarłatny pawilon, pełniący rolę namiotu audiencyjnego Timura. Miał on swoją własną nazwę, pod którą przeszedł do historii: „*duwāzda pāya*”, co oznacza dosłownie: „dwunastokolumnowy”.



Rys. 2.49 – Timur podczas uroczystości w Kān-i Gil, w 1404 r. Ilustracja z *Zafar Nāma* (wydanie z 1600 r.), egzemplarz znajdujący się obecnie w British Library.

Ilustracja za [44]

Fragment opisu namiotu Timura, który sporządził Ruy González de Clavijo, w swojej relacji z podróży⁴⁾:

„[...] W pobliżu tych osłon stał wielki i wyniosły pawilon, który był niczym namiot. Był on kwadratowy, wysoki na trzy kopie i szeroki na sto kroków. Miał cztery wierzchołki – sufit zaś był okrągły, jak sklepienie. Był rozpięty na dwunastu masztach, każdy tak gruby jak człowiek w piersiach. Maszty były pomalowane na złoto i niebiesko oraz na inne kolory. W rogach zaś stały maszty związane razem po trzy, tworząc całość. Kiedy rozpinano namiot, używano kół, takich jak te od wozu, które były obracane przez ludzi, a do pomocy były rozciągnięte w różnych kierunkach liny. Ze sklepienia pawilonu zwisały zamocowane do masztów jedwabne tkaniny, tworząc łuk z jednej strony na drugą. Na zewnątrz tego kwadratowego pawilonu stały portyki, połączone u góry z pawilonem, oparte na dwudziestu czterech masztach, nie tak wielkich jak te środkowe. Cały pawilon opierał się więc na trzydziestu sześciu masztach. Co najmniej pięćset czerwonych sznurów było od niego rozciągniętych. [...] Po zewnętrznej stronie, pawilon był podszuty jedwabną tkaniną, w czarne, białe i żółte pasy. Na każdym wierzchołku znajdował się wysoki maszt zakończony miedzianą kulą z półksiężcem na górze. W samym centrum stał kolejny wysoki maszt, z największą miedzianą kulą i półksiężcem. Na szczycie pawilonu, pomiędzy tymi masztami, była wieża z jedwabnych tkanin, z wieżyczkami i drzwiami wejściowymi. Kiedy wiatr uderzał o pawilon, lub wyginał maszty, na szczyt wchodzili ludzie i zabezpieczali wszystko, co mogło ulec zniszczeniu. Cały pawilon był tak wielki i tak wysoki, że z daleka przypominał zamek. Była to cudowna rzecz do oglądania i miała w sobie niewypowiedziane piękno.

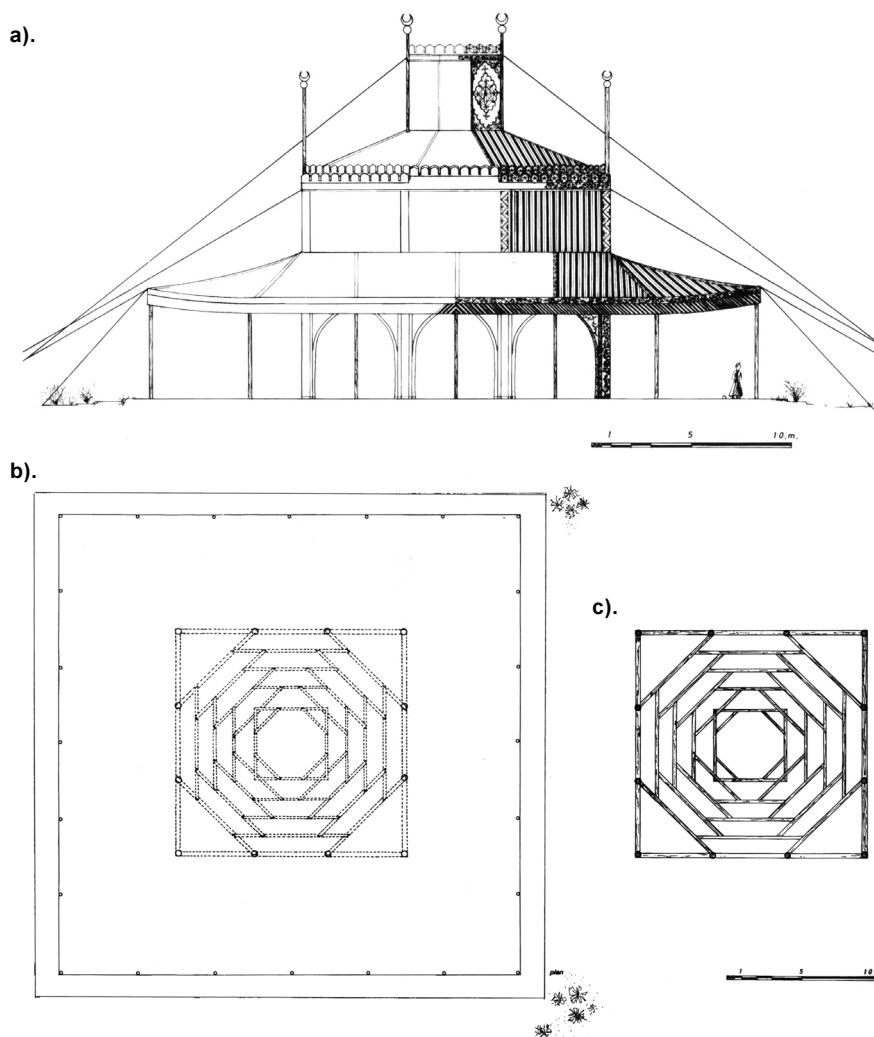
[...] Pawilon otaczało ogrodzenie z wieżyczkami, takie jak w każdym zamku lub mieście, wykonane z wielobarwnej jedwabnej tkaniny, ozdobionej na różne sposoby. Po obu stronach miało sznury do naprężania, a wewnątrz maszty, które je podpirały. Ogrodzenie było wysokie jak jeździec na koniu i otaczało okrągłą przestrzęń, która miała w poprzek około trzysta kroków. Posiadało szeroką bramę, w kształcie łuku, zwieńczoną wieżą z wieżyczkami. Ogrodzenie, nazywane *Zalaparda*, oraz wieża z wieżyczkami były ozdobione ornamentami i wzorami pięknej roboty. Po jego wewnętrznej stronie było wiele namiotów w różny sposób zawieszonych na masztach. Między nimi stał jeden wysoki namiot, który nie był rozpięty na linach. Jego ściany wykonano z żerdzi, nieco większych niż kopia, krzyżujących się ze sobą na kształt sieci. Na szczycie, inne żerdzie tworzyły wysokie zwieńczenie. Te żerdzie były zamocowane szerokimi skózanymi pasami jedna do drugiej oraz do pali wbitych w pobliżu ściany namiotu. Konstrukcja była tak wysoka, że wydawało się niewiarygodne, że mogła być zamocowana jedynie tymi opaskami [...].”

¹⁾ Wcześniej, na tym samym miejscu obozował, w 1255 r., Hulagu Chan, świętując swoje zwycięstwa.

²⁾ Był to okres, kiedy państwo Timura osiągnęło apogeum wielkości, a on sam, u schyłku życia, pragnął zmanifestować własną wielkość. Okazją do zgromadzenia był jednoczesny ślub sześciu książąt - jego wnuków. Na uroczystości znaleźli się wystannicy władców nie tylko z Europy ale również z Azji Środkowej. Obowiązkowo musieli przybyć wszyscy jego wasale z podbitych krajów oraz jego dowódcy wojskowi. Timur, jako despotyczny monarcha, motywował ich wszystkich do współzawodnictwa w wystawianiu jak najwspanialszych namiotów, aby jeszcze bardziej podnieść rangę wydarzenia.

³⁾ Patrz przypis ³⁾, na poprzedniej stronie.

⁴⁾ Tekst za [142], przekład własny.



Rys. 2.50 – rekonstrukcja namiotu Timura, opracowana w oparciu o zachowany opis Clavijo oraz kronikę „Zafar Nāma”:

- a). elewacja
- b). rzut w poziomie terenu
- c). widok od dołu, konstrukcji części podwyższonej – „sklepienia”

Ilustracje za [44]

Według opisu, tysiąc robotników potrzebowało jednego tygodnia, aby go rozbić¹⁾. Mógł on pomieścić we wnętrzu ok. dziesięć tysięcy osób. Clavijo podaje wymiary tego namiotu jako wielokrotność włóczni (*lança de armas*). Pozwoliło to ustalić jego wymiary w rzucie na 30.48×30.48 m. Wymiary w rzucie środkowej, podwyższonej części namiotu wynosiły połowę tej wielkości, a jego wysokość (bez dachu i wieży) – 10.05 m²⁾. Kształt namiotu był niezwykle i nie znajduje odpowiednika we wcześniejszych konstrukcjach. Rekonstrukcję namiotu Timura przedstawiono na rys. 2.50. [44].

Zarówno Clavijo, jak i *Zafar Nāma* opisują również, m.in. wielki namiot szkieletowy, rozbitý na dwustu masztach, nazywany *duwīst-sarī* [50]. Wyróżniał się on niezwykle wysokością.

Wykonywanie specjalnych, szczególnie okazałych namiotów, jako swego rodzaju sal tronowych oraz pomieszczeń audiencyjnych, jest tradycją pochodzenia jeszcze mongolskiego, rys. 2.51. Później przyjmowały one również formę pawilonów-baldachimów, pod którymi zasiadał władca, rys. 2.52. Taka forma była bardzo rozpowszechniona w czasach Wielkich Mogołów.

Wykonywanie tak złożonych obiektów wymagało precyzyjnego projektowania wykrojów tkanin oraz sposobu ich zdobienia. Zachowały się rysunki stanowiące projekty brytów tkaniny przeznaczonej na namioty, rys. 2.53. Istnieje również traktat w języku perskim na temat sposobów mnożenia i dzielenia, w którym jeden z rozdziałów jest poświęcony zastosowaniu tych metod do wykonywania namiotów³⁾.

¹⁾ Informacja ta wydaje się realistyczna, gdyż odpowiada dokładnie czasowi potrzebnemu do rozbicia wielkiego namiotu Akbara, podanemu w [43].

²⁾ Długość włóczni była w czasach Clavijo ściśle określona, i wynosiła jedenaście stóp, tj. 3.35 m, gdyż przed turniejami rycerskimi zawsze dokładnie je mierzono. Wiarygodność i dokładność autora została zweryfikowana dzięki podanym przez niego wymiarom obelisku Teodozjusza, w Konstantynopolu, które okazały się bardzo dokładnie określone [44].

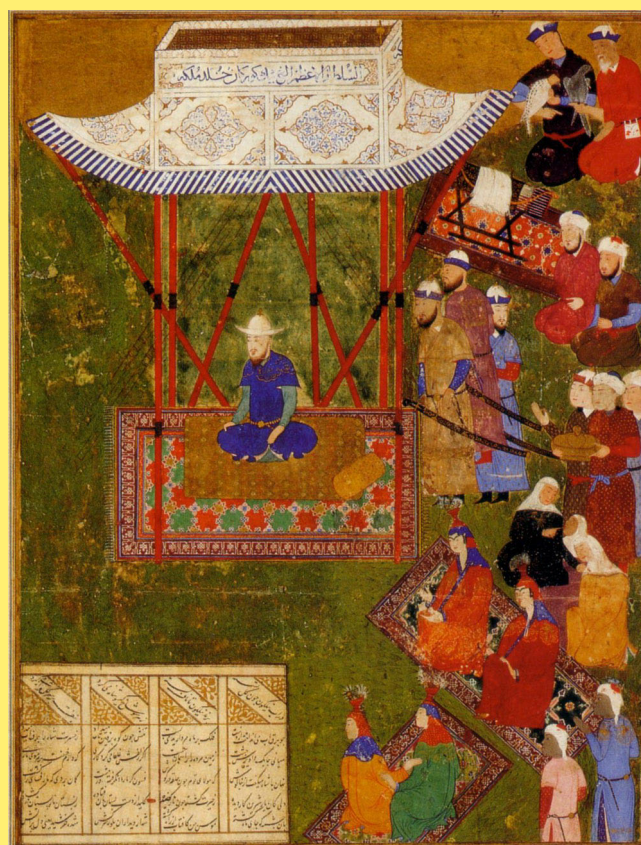
³⁾ Traktat został napisany w Heracie, w 1520 r., przez Qāsima ibn Yūsufa [44].



Rys. 2.51 – namiot tronowy i – widoczny w tyle – namiot szkieletowy, kratkowy.

Karta z albumu Dieza, pochodząca prawdopodobnie z „Jāmi’ al-Tavārikh”, Rashīda al-Dīna. Tabriz, 1307 r., obecnie w Staatsbibliothek zu Berlin, Preussischer Kulturbesitz.

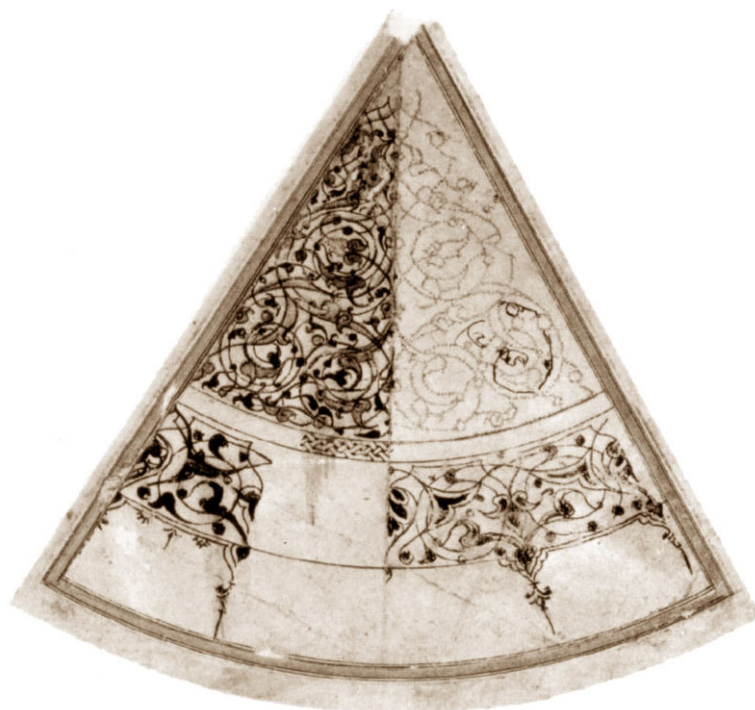
Ilustracja za [44]



Rys. 2.52 – kwadratowy pawilon Uługbega. Widoczne są ukośnie ustawione maszty usztywniające konstrukcję oraz odciąg.

Luźna karta, pochodząca z ok. 1400 r., obecnie we Freer Gallery of Art, Smithsonian Institution, w Waszyngtonie.

Ilustracja za [44]



Rys. 2.53 – projekt wykroju i sposobu zdobienia brytu tkaniny namiotowej, pochodzący z okresu timurydzkiego. Wykonany w Heracie, w XV. w., obecnie w Staatsbibliothek zu Berlin, Preussischer Kulturbesitz, Orientabteilung.

Ilustracja za [44]

Epoka Wielkich Mogołów | Następcy Timura, którzy podbili Indie i założyli dynastię Wielkich Mogołów, również traktowali namioty jako formę budownictwa równorzędną z budownictwem z kamienia, a w wielu przypadkach nawet ważniejszą. Wykształcone wówczas liczne formy, wywodziły się niewątpliwie od namiotów Timura. Historyk tej epoki, Abdul Aziz, stwierdza wręcz [50], że tak, jak Szahdżahan dominuje w dynastii Wielkich Mogołów jako budowniczy obiektów z kamienia, tak ich protoplasta Timur – jako budowniczy namiotów.

Spośród licznych form, wiele było zastrzeżonych do wyłącznego użytku władcy. Były to przede wszystkim namioty tronowe oraz używane podczas ceremonii dworskich, rys. 2.54. Zachowało się wiele tekstów źródłowych zawierających informacje o tych obiektach, m.in. opis instytucji z czasów Akbara, zawierający szczegółową systematykę namiotów dworskich, i porządkujący wcześniej stosowaną terminologię [43]. Każdy rodzaj namiotu, różniący się budową lub funkcją od innych, jest w niej nazywany odrębnym określeniem¹⁾. Poniżej wymieniono najważniejsze rodzaje namiotów, stosowane zarówno w czasach Timura, jak i w okresie rządów Wielkich Mogołów, od Hamajuna do Aurangzeba [43] [44] [50]:

- | | |
|----------------|--|
| <i>bārgāh</i> | – duży namiot audiencyjny, rozpinany na dwóch lub więcej masztach; namioty tego rodzaju były szczególnie duże i bogato zdobione; określenie to stosowano również w odniesieniu do namiotów tronowych lub ogólnie, do dworu cesarskiego |
| <i>khargāh</i> | – namiot szkieletowy, kratkowy |
| <i>khayma</i> | – namiot membranowy, z odciągami |
| <i>khema</i> | – określenie mniejszego namiotu membranowego |
| <i>chādūr</i> | – namiot membranowy z odciągami, o podpartej lub podwieszanej kalenicy |

¹⁾ Zamieszczony w [44] słownik terminologii namiotniczej, stosowanej w krajach Azji, zawiera ponad trzysta określeń pochodzenia persko-indyjskiego, dotyczących namiotów oraz około stu – dotyczących tkanin do ich wyrobu. Słownictwo namiotnicze w innych językach (tureckie, mongolskie, chińskie) jest wyraźnie uboższe.

²⁾ Autor opisu instytucji z czasów Akbara [43] pisze o namiotach *bārgāh*: „...proste spośród nich, do których wyrobu nie użyto tkaniny aksamitnej przetykanej złotem ani złotych frędzli, kosztują dziesięć tysięcy rupii i więcej. Wartość bogato zdobionych – nie da się wyrazić słowami”.



Rys. 2.54 – bardzo rozbudowane namioty audiencyjne Wielkich Mogołów:
 a). wielki podwójny namiot audiencyjny Szachdżahana (tzw. „aspak”), z lukowymi okapami i markizami na obwodzie; miniatura z 1633 r., obecnie w kolekcji królewskiej na zamku Windsor
 b). Szachdżahan udziela audiencji; XIX w. kopia z XVII w. oryginału, obecnie w Victoria & Albert Museum w Londynie

Ilustracje za [44]

Ponadto, stosowane były różnego rodzaju „akcesoria” namiotowe, np.:

- sarāparda* – rodzaj ogrodzenia, płotu, wykonywanego z grubej tkaniny rozpiętej na słupkach, najczęściej ustawianego na rzucie koła; odpowiada określeniu „Zalaparda”, w tekście Clavijo; ogrodzenia te mogły mieć średnicę nawet do trzystu kroków (ok. 91 m); w czasach Akbara do ich wykonania używano również dywanów, rys. 2.55
- gulālbar* – składana ścianka drewniana, o konstrukcji kratkowej, analogicznej jak w namiotach szkieletowych, często pokrywana tkaniną; w czasach Akbara wykonywano z niej ogrodzenia o średnicy do stu metrów, wyposażone w ciężkie drzwi z zamkami
- shāmiyāna* – rodzaj płóciennego dachu, osłony; jego powierzchnia nie przekraczała nigdy ok. dwunastu metrów kwadratowych

Występowało jeszcze wiele innych form namiotów, o bardzo konkretnym przeznaczeniu. Warto wymienić tutaj dwa z nich:

- dū-āshiāna* – namiot dwukondygnacyjny wewnątrz, ustawiany na osiemnastu słupach o wysokości prawie sześciu metrów; platforma tworząca wewnętrzny poziom była ustawiana wewnątrz, na słupach o wysokości czterech łokci; Akbar używał tego namiotu w podróży, jako pomieszczenia do snu oraz obrzędów religijnych
- namgīra* – dosł. „łapacz rosy” – prosty baldachim na czterech słupkach; ustawiany był nad podium, na którym zasiadał cesarz na tronie

Namioty Wielkich Mogołów były wykonywane niezwykle starannie i z bardzo kosztownych materiałów. Niektóre z nich były też bardzo wielkie. W roku 1651, Szahdżahan, na księżycowe święto ważenia¹⁾ kazał wznieść namiot (*bārgāh*), o wymiarach ok. 65×40 m. Miał on cztery srebrne maszty, o obwodzie 2 m i wysokości 20 m (prawdopodobnie namiot miał jeszcze dodatkowe, mniejsze maszty pomocnicze). Pokrycie wykonano z

¹⁾ Władcy z dynastii Wielkich Mogołów, obchodzili niezwykle uroczyste swoje urodziny, zarówno wg kalendarza słonecznego, jak i księżycowego. Organizowano wówczas wielkie uroczystości, których centralnym punktem było ważenie władcy, za pomocą złota, srebra i innych kosztowności. Na potrzeby tych uroczystości, wykonywano zwykle namioty o bardzo dużych rozmiarach [50].



Rys. 2.55 – ogrodzenie sarāparda, otaczające namiot audiencyjny; widoczny jest system odciągów usztywniających zarówno ogrodzenie, jak i sam namiot; „Akbar udziela audiencji” – miniatura z 1590 r., obecnie w Victoria & Albert Museum w Londynie

Ilustracja za [44]

przetykanego złotem aksamitu. Namiot przekrywał powierzchnię prawie 2 700 m² i mógł pomieścić 10 000 osób, podobnie jak namiot audiencyjny Timura [50].

W pięć lat później, ten sam władca ustawił podobny, ale jeszcze większy namiot na dziedzińcu pałacu audiencyjnego. Miał on wymiary ok. 88×34 m, i przekrywał powierzchnię niemal 2 700 m². Jego konstrukcję stanowiły czterdzieści cztery srebrne słupy, zakończone iglicami. Częstą praktyką było ustawianie kilku namiotów typu *khargāh*, pod wspólnym *bārgāh* ¹⁾.

Ustawianie namiotów było regulowane ścisłymi przepisami. Istniały szczegółowe zasady rozmieszczania namiotów różnej rangi i pełniących różne funkcje. Zasady te były inne w przypadku pobytu władcy w stolicy, a inne w czasie podróży, czy też na wyprawie wojennej [43]. Przykład wzorcowej organizacji obozu w czasie przemieszczania się całego dworu, przedstawia rys. 2.56.a). Na rys. 2.56.b). przedstawiono natomiast przykład organizacji obozu w czasie podróży mniejszej grupy.

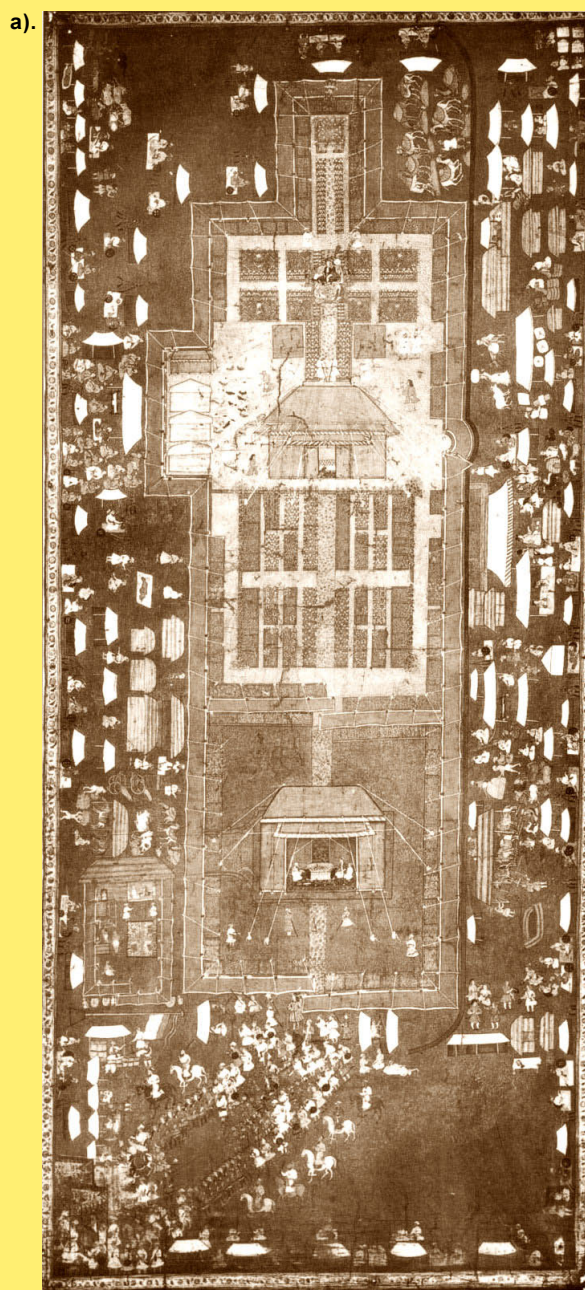
Zamiłowanie do namiotów cechowało w tej epoce nie tylko władców ale również ludzi niższego stanu, którzy wzorowali się na nich, naśladowując dworskie zwyczaje. Rysunek 2.57 przedstawia sielankową scenę wypoczynku przy namiocie.

Rozbijanie namiotów było czynnością wykonywaną rutynowo przez służbę. Ich budowa była przystosowana do częstego stawiania i składania, rys. 2.56.

Charakterystyczne dla Wielkich Mogołów łączenie elementów konstrukcji namiotowych, z obiektami kamiennymi, musiało spowodować wzajemne oddziaływanie ich formy. P.A. Andrews zwraca uwagę na wpływ, jaki miały namioty o konstrukcji szkieletowej, na kształtowanie się charakterystycznych „cebulastych” kopuł specyficznych dla architektury islamu [47].

Namiot tronowy Szahdżahana, przedstawiony na rys. 2.52.a), był używany przez długi czas również po jego śmierci. Według zachowanego opisu, w 1711 r. został ba rozkaz Bahadur Szacha wyjęty z magazynów cytadeli w Lahore i rozbity jako namiot audiencyjny. Przy jego rustawianiu pracowało dziewięćset namiotników i tysiąc pięćset żeglarzy, przez dwa tygodnie. Było wiele wypadków śmiertelnych wśród robotników. Ambasador holenderski, J.J. Ketelaar, który go widział, określił go jako „...bardzo stary, wielki namiot z jedwabiu, zdobiony złotem i srebrem”. Powodem wydobycia z magazynu tak starego namiotu był prawdopodobnie fakt, że nie istniał wówczas – i nie został później wykonany – żaden inny namiot, który mógłby się z nim równać [44].

¹⁾ Z okazji pierwszego użycia Pawiego Tronu, w 1637 r., wspomniany Szahdżahan, ustawił pod wspólnym namiotem wiele mniejszych, srebrnych oraz jeden złoty *khargāh*



Rys. 2.56 – organizacja obozów namiotowych w czasach Wielkich Mogołów:

a). układ obozu królewskiego, na planie prostokątnym; widoczne jest hierarchiczne ustawienie namiotów o różnej funkcji oraz kilkustopniowe wygrozdzenie obszaru zastrzeżonego dla władcy; Rysunek ambasadora holenderskiego, z 1712 r., obecnie w Tropenmuseum, w Amsterdamie.

b). obóz o nieco uproszczonej strukturze, ale zachowujący hierarchiczną organizację; fragment miniatury z 1646 r., przedstawiającej spotkanie księcia Murada z sułtanem Khusrau, obecnie w muzeum w Varanasi (Indie)

Ilustracje za [44]





Rys. 2.57 – „wiejski koncert” nad jeziorem; na pierwszym planie widoczny jest namiot kalenicowy, z trójkątnymi szczytami, a na planie dalszym – obozowisko namiotowe; Miniatura z roku ok. 1620-25, obecnie w Chester Beatty Library w Dublinie

Ilustracja za [44]



Rys. 2.58 – rozbijanie namiotu; fragment XVIII-wiecznej miniatury pt. „Król Bhima przyjmuje gości”, obecnie w Amar Mahal Museum w Dżammu (Indie)

Ilustracja za [44]

Chiny | Okres panowania mongolskiej dynastii Yuan oraz sąsiedztwo innych ludów Azji Środkowej, miały wielki wpływ na zakres stosowania i formy wielkich, dworskich namiotów w Chinach.

W relacji z podróży do Chin, Marko Polo¹⁾, można znaleźć opis wspaniałego namiotu, używanego przez cesarza Kubilaję podczas polowań. Z opisu tego wynika, że był to namiot szkieletowy o bardzo dużych rozmiarach, być może podobny do namiotu przedstawionego na rys. 2.57.b). Namiot był pokryty wieloma warstwami tkanin, a ponadto z zewnątrz i od wewnątrz – futrami soboli i gronostajów²⁾. Tradycje mongolskie są wyraźnie widoczne w organizacji obozów, rys. 2.59.a), jak i w kształcie namiotów, rys. 2.59.b).

Również chińscy urzędnicy, kupcy oraz ludzie zamożni, używali namiotów o konstrukcji analogicznej jak namioty używane na Środkowym Wschodzie – zarówno szkieletowych jak i membranowych, chętnie łącząc je w większe zespoły. Na rys. 2.60 przedstawiono przykład takiego obozowiska. Widoczny jest namiot o konstrukcji szkieletowej oraz typowo membranowe zadaszanie. Teren obozowiska otacza ogrodzenie z tkaniny, analogiczne do *sarāparda*. Wewnątrz ogrodzenia widoczny jest mały namiot pomocniczy.

¹⁾ Patrz fragment na następnej stronie. Zachowało się również wiele chińskich tekstów pisanych, podających informacje o namiotach, jak również wiele obrazów malowanych na jedwabiu, przedstawiających sceny rodzajowe z życia obozowego, takich jak przedstawione na rys. 2.60.

²⁾ Również w relacji Clavijo, opisane są dwa namioty Timura, wyłożone futrami szarych wiewiórek od zewnątrz, a od środka futrami popielic i gronostajów. Clavijo opisuje je jako obiekty niezwykle piękne [142].



Rys. 2. 59 – namioty wykorzystywane przez chiński dwór cesarski:

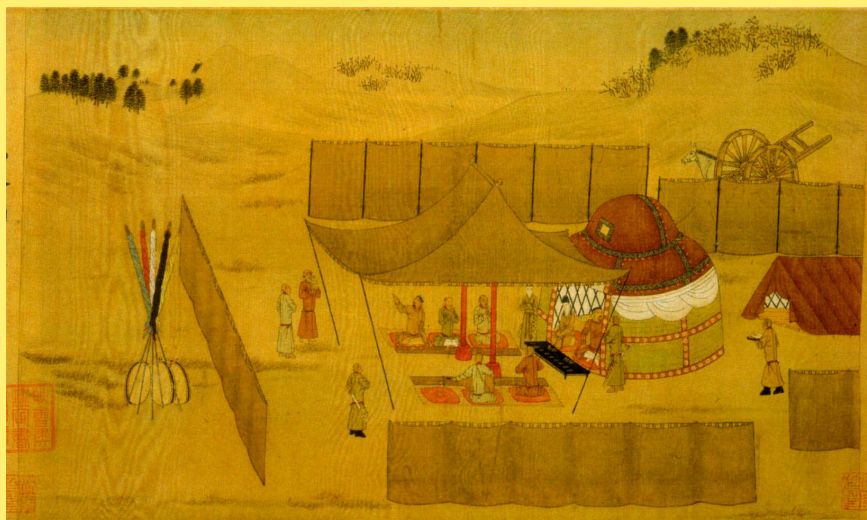
- a). obóz cesarski na planie prostokątnym – cesarz Ch'ien Lung przyjmuje raporty wojenne; miedzioryt Ch.-N. Cochina, wg oryginału J. Damascene, Francja 1772
- b). namiot audience'ny cesarza Ch'ien Lunga, w którym w roku 1793, przyjął ambasadora brytyjskiego Lorda Macartneya; w pobliżu widać kilka innych namiotów szkieletowych i membranowych; akwarela W. Alexandra, z notatnika kapitana Parisha, obecnie w British Museum

Ilustracje za [44]

Fragment opisu namiotu używanego przez cesarza Chin, Kubilaję, sporządzonego przez Marko Polo⁹⁾:

„Tak podróżując przybywa wreszcie na wielką równinę do miejsca zwanego Kaczar Modun, gdzie znajduje ustawione pawilony swoje i synów swoich, i swoich możnych, i swoich nałożnic, jest ich tam więcej niż dziesięć tysięcy bardzo pięknych i bogatych. I oto wam powiem, jak wygląda jego pawilon i jak jest wielki. Rozbijają go tam, gdzie dwór przebywa, a jest on tak wielki, że pomieścić może tysiąc rycerzy; namiot ten ma wejście od południa; i w tym namiocie, jakby w sali przebywają dostojnicy i inni ludzie. Inny natomiast przylega doń od zachodu; i w tym mieszka cesarz, jest to jakby komnata prywatna cesarza, której strzeże wielki pies. I gdy chce z kim mówić, każe go do tej komnaty sprowadzić. Poza tą wielką salą jest obszerna komnata piękna, gdzie sypia Wielki Chan. Są tam jeszcze inne namioty i komnaty, ale nie są połączone z wielkim namiotem. Wiedźcie zaiste, że owe dwie sale i owa komnata urządzone są, jak wam opowiem. Każda sala ma trzy kolumny z drogiego wonnego drzewa, bardzo pięknie rzeźbione i złoczone; od zewnątrz pokryte są całe skórami lwimi, bardzo pięknymi: gdyż są całe w pręgi czarne, czerwone i białe, jest to ubarwienie naturalne, w okolicy jest wiele lwów tej maści. I są tak doskonale ułożone, że wewnątrz ani deszcz, ni wiatr szkodzić nie mogą ani dokuczyć. Wnętrze wyścielone jest skórami gronostajów i soboli: są to futra ze wszystkich futer najpiękniejsze, najbogatsze i największej ceny. Gdyż należy wiedzieć, że skóry sobole wystarczające na męską szubę warte są w najlepszym gatunku dwa tysiące złotych bizantów, zaś zwyczajne – tysiąc bizantów. I Tatarzy zwą je królem futer. A są wielkości skóry kuny. I tymi dwoma rodzajami skór są obie sale Wielkiego Chana tak pięknie ozdobione, że dziw patrzeć, jak delikatnie są powycinane. Zaś komnata, w której sypia cesarz, łącząca się z tymi dwiema salami, jest podobnie z zewnątrz wybita skórami lwów, wewnątrz zaś skórami soboli i gronostajów; i wszystko to jest wspaniale wykonane i urządzone. A sznury przytrzymujące salę i komnatę są całe z jedwabiu. Te trzy namioty mają tak wielką wartość i cenę, że mały król nie zdołałby tego opłacić. Wokoło tych namiotów są wszystkie inne namioty bardzo pięknie urządzone i rozłożone. Kobiety cesarskie mają również bardzo bogate pawilony. Ponadto białozory i sokoły oraz inne ptaki i zwierzęta mają bardzo liczne namioty. I cóż wam powiem? Wiedźcie zaiste, że w obozie tym jest ludzi wiele ponad wszelkie pojęcie. Zdawałoby się, że Chan przebywa w największej swej stolicy. Gdyż ze wszystkich stron ściągają ludzie.”

⁹⁾ tekst za: Marko Polo, *Opisanie świata*, Wydawnictwo Alkazar, Warszawa 1993 [170]



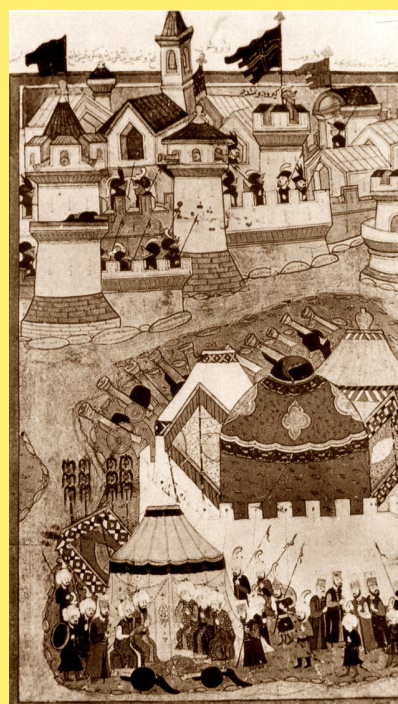
Rys. 2.60 – obozowisko zimowe w północnych Chinach. Widoczny jest duży namiot szkieletowy (kratkowy), z przylegającym namiotem recepcyjnym, kilka mniejszych namiotów oraz ogrodzenie z tkaniny; malowidło na jedwabiu z „Historii Pani Wen-chi”; XIV w. kopia XII w. oryginału, obecnie w Metropolitan Museum of Art w Nowym Jorku.

Ilustracja za [44]

Perskie i tureckie namioty wojskowe w XVII w. | Na perskich miniaturach, namioty, jako obiekty używane przez władców, są obecne od czasów Timura, do końca XVI w., rys. 2.62, kiedy to zaczynają je zastępować pawilony stałe, z pokryciem ceramicznym [91]. Szczęśliwie, w XVII stuleciu, Europa zetknęła się z namiotami o innym przeznaczeniu, które ze względu na formę, a zwłaszcza typ „architektonicznej” dekoracji, można uważać za swoistą kontynuację tamtych, wspaniałych konstrukcji. Są to wschodnie namioty wojskowe, które dotarły do Europy w okresie tureckiej ekspansji terytorialnej. Pomimo tego, że trafiły tu poprzez Turcję, tkwią one korzeniami głęboko w tradycji perskiej. Kraj ten, „...udzielający artystycznej inwencji całemu Bliskiemu Wschodowi i tu odegrał twórczą rolę, inspirując namiotnictwo tureckie” [169]. Znaczna część tureckich namiotów wojskowych została wyprodukowana w Persji, a inne wykorzystywały perskie wzornictwo. Wśród zachowanych do dzisiaj artefaktów są jednak tylko namioty tureckie ¹⁾.

Turcy gwałtownie wtargnęli do Europy pod koniec XIV w. Od tego czasu nieprzerwanie powiększali swoje zdobycze, aż w sto pięćdziesiąt lat później, po raz pierwszy oblegali Wiedeń. Na rys. 2.61 przedstawiona jest scena z tego oblężenia. Widać na niej obóz turecki, a w nim znacznych rozmiarów namioty dowódców. Podczas odwrotu, namiot sułtański dostał się w ręce chrześcijan [44].

Ogromne rozmiary tureckich obozów wojskowych i wielkość namiotów, które się w nich znajdowały, zawsze robiły ogromne wrażenie na przeciwnikach, pełniąc nawet rolę swoistej „broni psychologicznej” ²⁾.



Rys. 2.61 – obóz turecki podczas pierwszego oblężenia Wiednia przez Turków pod wodzą Sulejmana Wspaniałego, w 1529 r. Miniatura Osmańska z Muzeum Topkapi w Stambule.

Ilustracja za [205]

¹⁾ W Muzeum Narodowym w Krakowie znajduje się jeden namiot perski, zdobyty w 1676 r., pod Żurawnem, ale został on zniszczony, wskutek nieprawidłowej ekspozycji, w 1858 r.

²⁾ Do tego efektu psychologicznego nawiązywał np. hetman Jan Karol Chodkiewicz, w swojej mowie do żołnierzy, przed bitwą z Turkami pod Chocimiem, w 1621 r.: „...Nie trwóście się na widok tych niezliczonych namiotów. Wiele z nich próżnych i na uludę oczu tylko postawionych”. Cytat za [205].



Rys. 2.62 – perska miniatura „Życie obozowe”; miniatura autorstwa Mīr Sayyid ‘Alī, zamieszczona w Nizami’s Khamseh, wykonana w Tabrizie, w roku 1540, obecnie w Fogg Art Museum, Harvard University, Cambridge, USA.

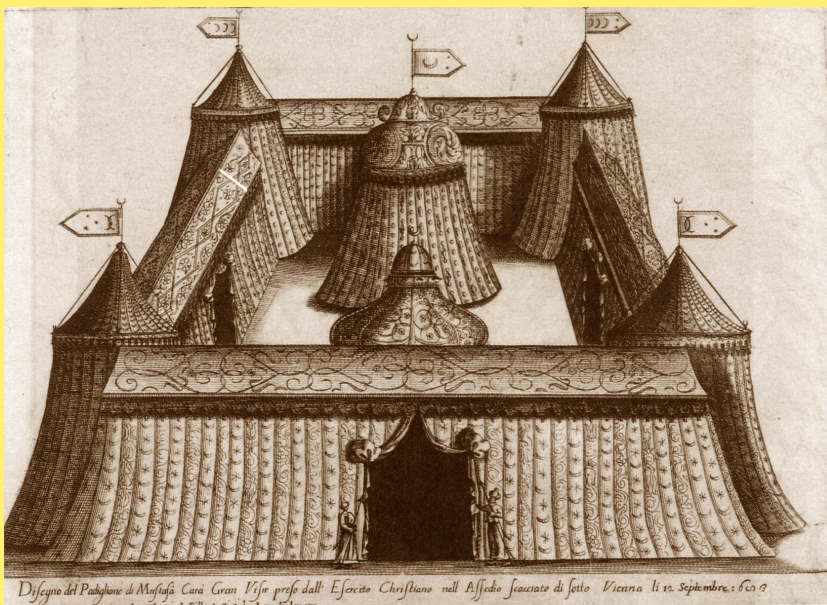
Ilustracja za [91]

Na ilustracji widoczne są różne formy namiotów średniowiecznego Środkowego Wschodu. Dominują namioty o konstrukcji szkieletowej, kratkowej (jurty): na miniaturze widoczne są aż cztery, z tego dwie – pokryte arabeskowo zdobioną tkaniną. Widoczne są również dwa namioty membranowe: biały i czarny. Wnętrze dużego namiotu audiencyjnego, widocznego na pierwszym planie, jest ozdobione tkaniną o wzorze w ostrołukowe medalliony i wyłożone dywanami. Typowe czarne namioty nie są zbyt często przedstawiane na miniaturach perskich, ponieważ używano ich głównie na południu kraju, a przejęcie ich od plemion bliskowschodnich wynikało raczej z uwarunkowań klimatycznych niż z przesłanek kulturowych [91].

Oczy Zachodu otworzyły się w pełni na bogactwo sztuki muzułmańskiego Orientu, po odsiecz wiedeńskiej w 1683 r. [169]. Obóz turecki pod Wiedniem, rys. 2.63, był nie tylko ogromny ale też pełen luksusowych i kosztownych wyrobów, w tym wspaniałych namiotów. Większość z tych namiotów, trafiła w ręce króla Jana III Sobieskiego i innych polskich dowódców. Wśród trofeów wiedeńskich wyróżniały się one swoimi znacznymi rozmiarami, zróżnicowanymi kształtami, bogactwem dekoracji i ogólnym wrażeniem egzotyki. Z tego względu przyciągały one uwagę widzów znacznie bardziej niż inne, nieraz kosztowniejsze ale mniejsze przedmioty.



Rys. 2.63 – obóz turecki – fragment obrazu „Bitwa pod Wiedniem”, Marcina Altomonte, z 1684 r. Obraz znajduje się w zbiorach zamku w Olesku¹⁾



Rys. 2.64 – namiot wielkiego wezyra Kara Mustafy Köprülü, zdobyty pod Wiedniem w 1683 r. Sztylet Nicola Billy'ego st., przechowywany w Historisches Museum der Stadt Wien.

Ilustracja za [205]

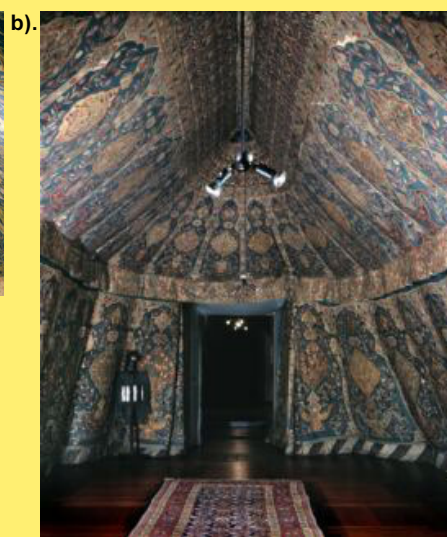
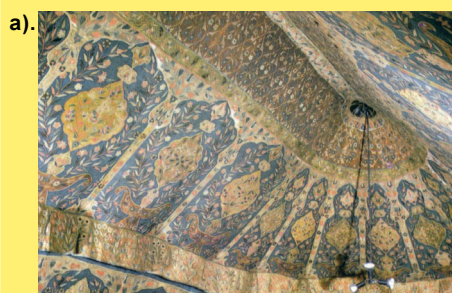
Szczególne wrażenie robił ogromny bardzo rozbudowany namiot wielkiego wezyra, rys. 2.64. Składał się on z kilku części, „[...] rozpiętych na słupach złocistych [...]”²⁾. Pięć wielkich, zachowanych w kompletnym stanie namiotów tureckich, stanowiących w większości trofea spod Wiednia, przechowywanych dzisiaj w zbiorach wawelskich, stanowi kolekcję unikatową w świecie³⁾, rys. 2.65 i 2.66.

Namioty zdobyte pod Wiedniem były wielokrotnie wystawiane na widok publiczny, zarówno przez Sobieskiego, jak i przez innych dowódców polskich. W roku 1684, przy okazji wręczenia królowi odznaczeń papieskich, urządzono w jego rezydencji w Żółkwi duży pokaz namiotów, na którym zaprezentowano nie tylko namiot Wezyra ale również namioty niższych rangą dowódców tureckich. Pod miastem rozstawiono kilkanaście zdobycznych namiotów, z których – jak pisze J. Załuski (*Analecta Historica*, 1726) „...we dwóch cyrkulach miasto jedno płócienne, dość obszernie reprezentować by się mogło”. Pokaz ten połączony był z wystawnym przyjęciem we wnętrzach namiotowych. Wydarzenie utrwalił na szkicach nadworny malarz królewski – Marcin Altomonte, rys. 2.67 [205]. Kolejnych okazji do wystawiania namiotów dostarczały okrągłe rocznice odsieczy wiedeńskiej: po raz pierwszy w setną, a następnie – dwusetną i dwieście pięćdziesiątą i ostatnio, w trzechsetną. Kolekcja Sobieskiego, traktowana przez jego następców, zwłaszcza Augusta II i Stanisława Augusta, jak własność prywatna, a nie państwowa – uległa znacznemu rozproszeniu. Obecne zbiory wawelskie są w znacznej części skompletowane ponownie w dwudziestolecie międzywojennym oraz po II wojnie światowej [206].

¹⁾ Fotografia K. Marszałek

²⁾ Namiot wielkiego wezyra został pokazany publicznie w Polsce już 2 listopada 1863 r., a więc w niecałe dwa miesiące po bitwie, kiedy Jan III Sobieski przebywał jeszcze z wojskiem na Węgrzech. Królowa Maria Kazimiera kazała rozbić ten namiot pod Łobzowem, k. Krakowa. Wydarzenie to, wraz z opisem namiotu zostało to odnotowane w kronikach Krakowa (Bibl. Jagiel. Kod. pap.3742, k.128). Poszczególne pomieszczenia namiotu były przeznaczone do urządzania narad wojennych, uroczystych posłuchań, odprawiania modłów oraz do kąpieli i wypoczynku [205].

³⁾ Kolekcję wawelską uzupełniają trzy namioty wschodnie w zbiorach Muzeum Narodowego w Krakowie (jeden w kolekcji Czartoryskich). Fragment namiotu znajduje się też w zbiorach Ossolineum. Przed II wojną światową osiem dużych namiotów wschodnich znajdowało się w kolekcji Sanguszków na zamku w Podhorcach oraz jeden – w zbiorach dawnego Muzeum Sobieskiego we Lwowie [139].



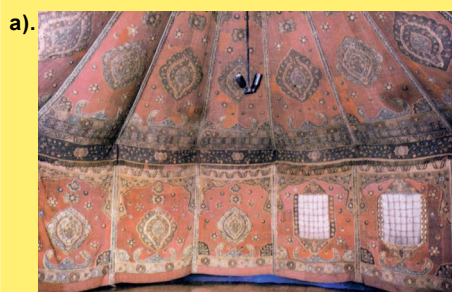
Rys. 2.65 – namiot owalny, dwumasztowy, niebieski, pochodzenia tureckiego, z XVII w., znajdujący się w zbiorach wawelskich:

a). dach

b). wnętrze

Wymiary płoty tego namiotu wynoszą: 3.20×13.50 m

Ilustracje za [169]



Rys. 2.66 – namioty czerwone znajdujące się w zbiorach wawelskich:

– centralny, szesnastoboczny, turecki, z XVII w.:

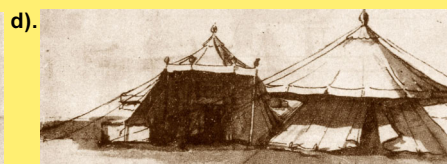
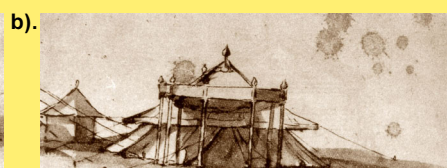
a). wnętrze

b). fragment płotu
Pojedynczy segment płotu tego namiotu ma wymiary: 2.02×1.27 m

– owalny, polski, z XVII w.

c). fragment dachu
Wymiary połaci tego namiotu wynoszą: 3.15×7.30 m, a obwód dachu: 15.90 m

Ilustracje za [169]

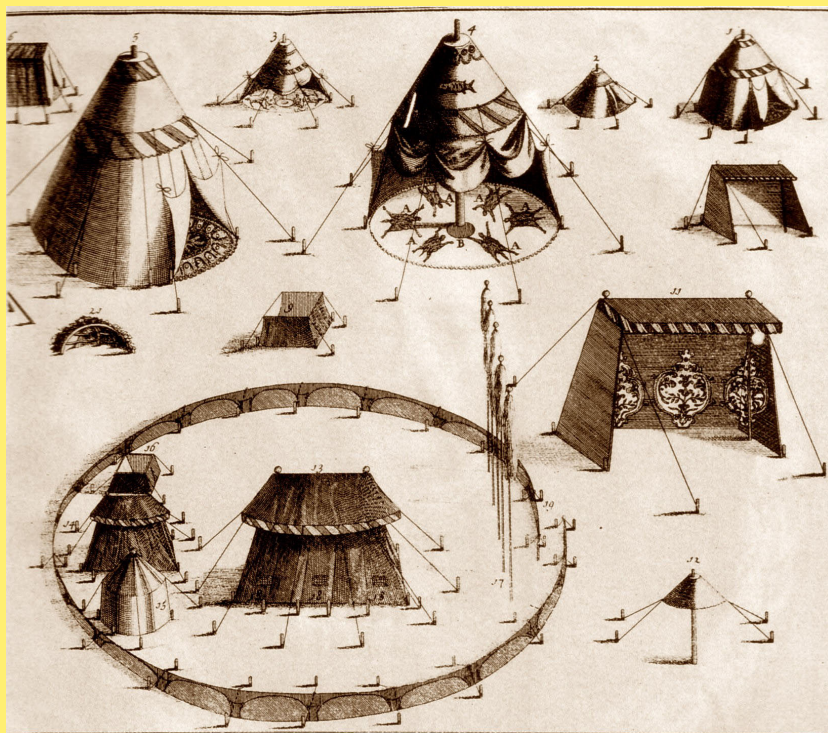


Rys. 2.67 – namioty zdobyte w kampanii wiedeńskiej, na pokazie urządzonym w rezydencji Sobieskich w Żółkwi, w 1684 r.

Rysunki Marcina Altomonte, przechowywane w zbiorach Stift Melk, Graphische Sammlung.

Ilustracje za [205]

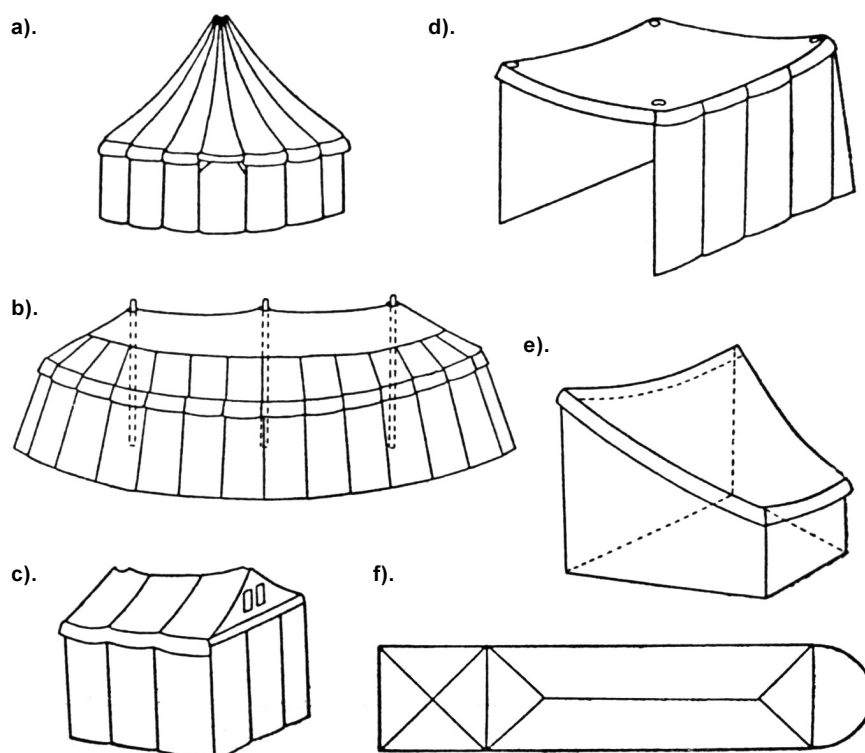
Wielu ciekawych informacji o tureckich namiotach wojskowych dostarczają ilustracje sporządzane przez Europejczyków, przy okazji poselstw odbywanych do Stambułu lub kampanii wojennych. Ilustracja L.F. Marsigli, rys. 2.68., przedstawia elementy typowej, tureckiej architektury obozowej, z drugiej połowy XVII w. Oprócz samych namiotów, widocznej jest na niej ogrodzenie z tkaniny – analogiczne do opisywanego wcześniej *sarāparda*, używanego w Indiach i w Azji Środkowej.



Rys. 2.68 – namioty osmańskie. Sztych L.F. Marsigli, ze zbiorów Biblioteki Czartoryskich w Krakowie

Ilustracja za [205]

Różnorodność form namiotów wschodnich była bardzo duża. Niemniej, można wśród nich wyróżnić kilka podstawowych schematów. Są to namioty okrągłe, z dachem stożkowym, rys. 2.69.a)., namioty o rzucie prostokątnym lub owalnym, przykryte dachem dwuspadowym, rys. 2.69.b).c). oraz namioty trójsienne, bez przedniej zasłony, z dachem prostokątnym lub trapezowym, poziomym lub pochylonym, rys. 2.69.d).e). Stosowane też namioty będące kombinacją kilku z tych form, często wydłużone w rzucie, rys. 2.69.f). [139].



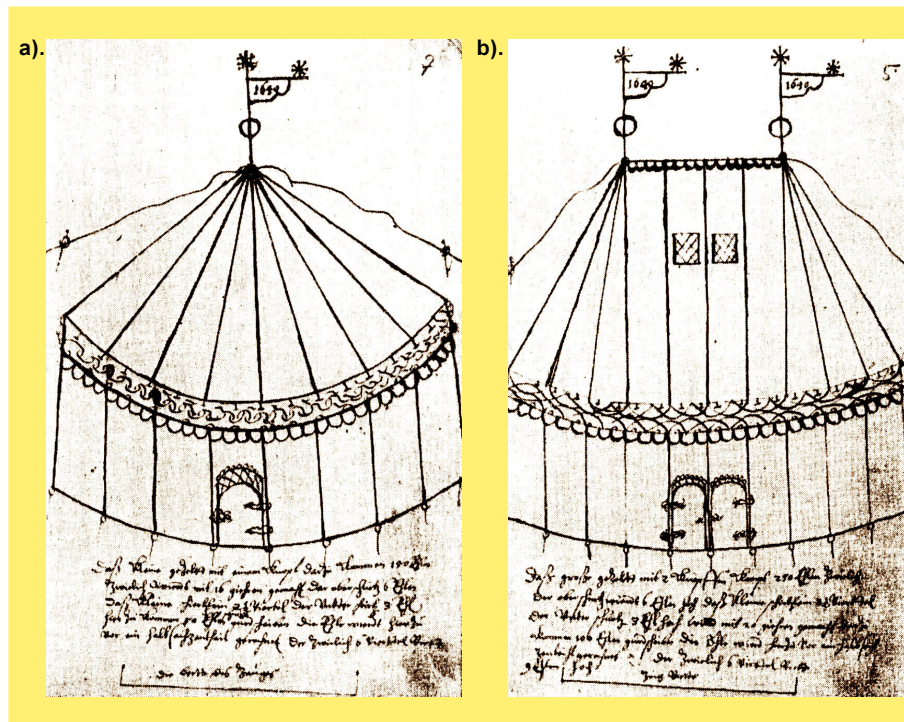
Rys. 2.69 – podstawowe formy namiotów wschodnich:
a). namiot okrągły
b). namiot owalny
c). namiot prostokątny – „szopa”
d). namiot otwarty – seywan
e). namiot z dachem płaskim
f). rzut namiotu wydłużonego
Każda z tych form występowała w licznych wariantach.

Ilustracje za [139]

Namioty polskie w XVII i XVIII w. | Produkowane w Polsce, w okresie przedrozbiorowym, namioty należy podzielić na dwie, różniące się wyraźnie grupy [175] [140]:

- namioty tradycyjne oraz
- namioty „wschodnim obyczajem skrojone”

Namioty tradycyjne, nie różniły się zasadniczo od używanych współcześnie w Europie zachodniej, rys. 2.71. Były one wykonywane na rzucie pełnego koła lub owalu, rzadziej kwadratu. Wykonywano je z grubego płótna – cwelichu. Ich wykonywanie powierzano krawcom zrzeszonym w cechach miejskich. Zachowane do dzisiaj statuty cechowe zawierają, w tematach egzaminów dla kandydatów na mistrzów, schematy podstawowych rodzajów namiotów, rys. 2.70.



Rys. 2.70 – dwa typy namiotów polskich, będących przedmiotem sztuk mistrzowskich w cechach krawieckich w Wielkopolsce i Małopolsce wschodniej:
a). małego okrągłego
b). większego owalnego
Księgi cechów krawieckich podawały wymiary namiotów oraz ilość materiału (cwelichu) potrzebnego do ich wykonania.
Rysunki z Księgi krawieckiej Wscho- wy (XVII w.).
Ilustracje za [175]

Począwszy od końca XVI w., pojawiają się wzmianki o namiotach pochodzenia wschodniego w Polsce¹⁾. Namioty te początkowo sprowadzano na zamówienie królewskie²⁾ oraz dla magnaterii³⁾. Zwycięska wyprawa wiedeńska z 1683 r. przyczyniła się bardzo do wzrostu zainteresowania nimi. Zdobyte namioty znalazły się na wielu polskich dworach szlacheckich. Ci, którzy nie mieli takich trofeów wojennych, a nie było ich stać na sprowadzenie oryginalnych namiotów orientalnych, zamawiali ich odpowiedniki u krajowych rzemieślników. Bardzo szybko powstała w związku z tym nowa gałąź przemysłu artystycznego – namiotnictwo.

¹⁾ Po raz pierwszy wiadomość o namiotach wschodnich, tureckich, została zanotowana w inwentarzu spisany 5 XII 1586 r., po śmierci króla Stefana Batorego

²⁾ Na wiosnę roku 1601, na polecenie króla Zygmunta III, kupiec ormiański ze Lwowa, Sefer Muratowicz, wyruszył na półtoraroczną wyprawę do Persji, aby zamówić i dopilnować wykonania kobierców na królewskie zamówienie. Celem wyprawy było miasto Kaszan (k. Isfahanu), słynące wówczas z produkcji tkanin, w których wytwarzaniu Persja za panowania szacha Abbāsa I Wielkiego osiągnęła najwyższy poziom. Oprócz kobierców, Muratowicz nabył także dla króla dwa perskie namioty, dla których, już w Krakowie, kazał wykonać drewniane, złożone maszty [141].

³⁾ Regestr skarbca książąt Ostrogskich w Dubnie, z roku 1615 i 1616, wymienia piętnaście namiotów cwelichowych, płóciennych i bawełnianych, a nawet skórzanymi (zapewne o konstrukcji szkieletowej). Namioty przeważnie były białe, ale również zielone i pomarańczowe. Różne było przeznaczenie namiotów. Dwie wielkie „szopy” służyły jako izby stołowe, trzecia – jako stajnia polowa („namiot koński”). W regestrze dubieńskim namioty wschodnie są wyraźnie zaznaczone jako tureckie („turskie”), stąd wniosek, że musiały się one wyraźnie różnić od namiotów powszechnie wówczas używanych w Polsce [140].



Rys. 2.71 – widok obozu wojskowego z okresu wojny polsko-szwedzkiej, w 1657 r.¹⁾

O ile importem namiotów z Turcji i Persji zajmowali się głównie Ormianie, to wyrób namiotów był specjalnością Żydów, pozostających pod opieką starostów²⁾. Namiotnicy nie byli zorganizowani w osobny cech i przemysł namiotniczy był tolerowany poza organizacją cechową. Przemysł ten koncentrował się na kresach południowo-wschodnich Polski, a jego główne ośrodki to Lwów oraz Brody³⁾. Wyroby namiotnicze tam produkowane były tak zbliżone do wzorów orientalnych, że osoba nie będąca znawcą nie jest w stanie ich odróżnić [140].

Namioty wykonywane w oparciu o wzory wschodnie wykonywano przede wszystkim z płótna (cwelichu), rzadziej – z jedwabiu⁴⁾. Na pokrycie stosowano często specjalną, impregnowaną żywicami tkaninę – *musuľbas*. Zdobienie odbywało się „robotą namiotniczą”, tj. techniką barwnych aplikacji⁵⁾.

Podstawowe określenia w tradycyjnej polskiej terminologii namiotniczej:

<i>kapa</i>	– dach namiotu
<i>płot</i>	– ściana namiotu
<i>falbana</i>	– dolna krawędź płotu
<i>szopa</i>	– namiot o dachu dwuspadowym, prostokątny lub owalny
<i>seywan</i>	– stosowane w Polsce określenie namiotów trójsściennych, z płaskim, kwadratowym stropem, bez przedniej zasłony; wyraz pochodzący od perskiego „sājāvān”, za pośrednictwem tureckiego „sajwan” – daszek do zacienienia, otwarty namiot
<i>cwelich</i>	– tkanina bawełniana albo lniana tkanina o ukośnych prążkach, drelich; używana była do wyrobu namiotów; ze śr.-w.-niem. <i>zwillich</i>
<i>musuľbas</i>	– gruba, gładka tkanina bawełniana, impregnowana specjalnymi żywicami, używana na pokrycia wierzchniej strony namiotów; nazwa pochodzi prawdopodobnie od miasta Mosul; <i>biaz</i> – tkanina (tur.)

¹⁾ Rysunek z „*De rebus a Carolo Gustavo Sveciae rege gestis commentarii*”, Samuela de Pufendorfa, wydanej w Norymberdze, w roku 1729. Ilustracja za [75].

²⁾ W inwentarzach Żydów koronnych z 1765 r. znajduje się wiadomość, że w tym czasie we Lwowie było dwóch namiotników żydowskich, tyle samo było ich w Brodach, w których działało oprócz tego dziewięciu hafciarzy żydowskich [140].

³⁾ W Brodach działała m.in. słynna manufaktura Koniecpolskich [140].

⁴⁾ W 1659 r., miasto Lwów ofiarowało w darze królowi Janowi Kazimierzowi, namiot jedwabny. Zamówiono go u lwowskich Żydów, za kwotę 750 złotych polskich [175] [140].

⁵⁾ Określenie „robotą namiotniczą” odnosiło się techniki dekoracji stosowanej w namiotach. Istniały dwie zasadnicze odmiany tej techniki. Jedną z nich polegała na wszywaniu wyciętych z sukna motywów dekoracyjnych w otwory w tle, odpowiadające rysunkowi poszczególnych elementów dekoracji. Był to jakby odpowiednik metody intarsji stosowanej w drewnie. Jej wadą było osłabienie rozcinanych powierzchni namiotu, tworzących tło, co przyspieszało zniszczenie całości. Z tego powodu, najczęściej stosowaną była technika aplikacji, tj. naszywania na tło elementów dekoracji wyciętych z tkaniny. W przypadku dekoracji o charakterze architektonicznym, np. wzór w kształcie pilastrów i łuków, wraz z fryzem, tworzących podział ściany namiotu, zestawiano często tło z lśniącej tkaniny atlasowej z aplikacjami wyciętymi z matowego, kolorowego płótna. Określenie „robotą namiotniczą” używano później do wszelkich zdobień techniką aplikacji, stosowanych w ubiorach, wyrobach tapicerskich itp. Wyroby te były zresztą często wykonywane przez namiotników. W odniesieniu do namiotów, ta mozolna i trudna technika wyszła z mody w drugiej połowie XVIII w. Namioty były wówczas wykonywane z jednolitych brytów dekoracyjnej tkaniny [175].

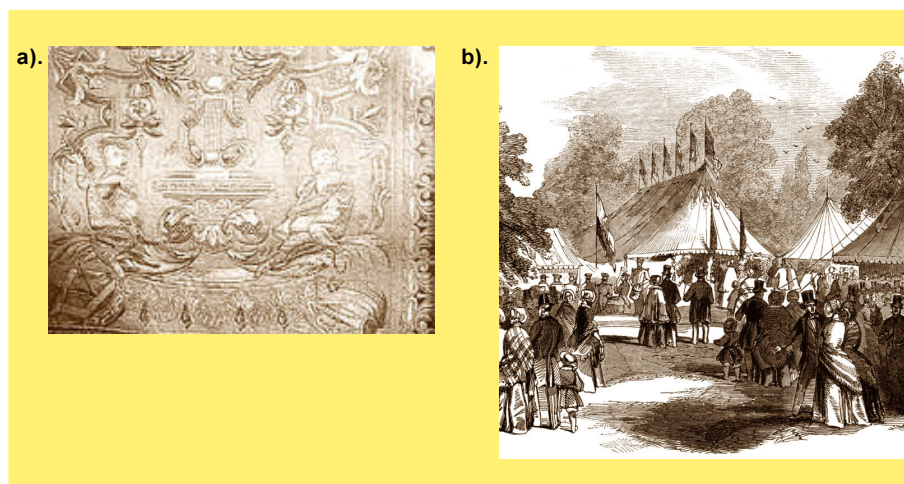
Zamówienia na namioty były bardzo szczegółowe, określały nie tylko wielkość i kształt namiotu ale również jego cechy dekoracyjne¹⁾. Wykształciło się specyficzne, „namiotnicze” słownictwo, będące mieszaniną określeń polskich oraz – spolszczonych nieraz – perskich i tureckich.

W XVIII w. wielkie, bogate namioty typu wschodniego były powszechnie używane przez magnatów w czasie podróży, używano ich w czasie przeglądu wojsk przez króla i w czasie elekcji²⁾. Były też częścią inwentarza królewskiego³⁾.

Namiotnictwo przetrwało, jako odrębna gałąź rzemiosła, do końca niepodległości Polski, później – w zasadzie zanikło⁴⁾ [140].

2.1.3.2. Renesans wielkich namiotów w XIX i XX w.

Dworskie namioty okolicznościowe | W wieku XIX, w Europie, przestała istnieć potrzeba używania dużych, reprezentacyjnych namiotów, jako obiektów służących elitom społecznym w codziennej potrzebie. Czasem jeszcze, wykorzystywano je w czasie wojny, jeżeli władca bezpośrednio dowodził wojskiem, jak to miało miejsce w przypadku Napoleona Bonaparte, który był znanym miłośnikiem pięknych namiotów, rys. 2.70.a). Znacznie częściej jednak, wykonywano takie namioty przy okazji dworskich uroczystości, festynów itp., rys. 2.72.b). Namioty te nie tworzyły nowych form, czy rozwiązań konstrukcyjnych, raczej powtarzały już znane. Są to przede wszystkim namioty okrągłe, z centralnym masztem i kilkumasztowe, owalne – często wydłużone.



Rys. 2.72 – namiot dworskie w XIX w.:
a). fragment namiotu Napoleona Bonaparte, przechowywany w klasztorze Esphigmenou, na górze Athos, w Grecji⁵⁾
b). namiot na uroczyste przyjęcie zorganizowane w rocznicę koronacji królowej Wiktorii, w Clapham k. Londynu⁶⁾

¹⁾ Zachował się m.in. kontrakt zawarty 8 maja 1754 r., w Podhorcach, przez hetmana polnego koronnego, Wacława Rzewuskiego, z namiotnikiem brodzkim, Herszkiem Kofmanowiczem. W kontrakcie tym opisany jest szczegółowo przedmiot zamówienia, kolory i rodzaj tkanin, wzory dekoracji. Termin wykonania zlecenia wynosił dwa miesiące, a jego koszt – dwa tysiące złotych polskich. Ponadto, namiotnik zobowiązywał się stawiać na każde żądanie w celu ustawienia namiotu. Namiot będący przedmiotem tej umowy, zachował się do II wojny światowej w zbiorach zamku w Podhorcach [140].

²⁾ Na obrazie Canaletta, przedstawiającym ostatnią elekcję na Woli, widać rozstawione w polu, liczne namioty.

³⁾ Król Stanisław August, pomimo tego że był na wskroś człowiekiem kultury zachodniej, posiadał ponad dwanaście namiotów typu wschodniego, których używał wraz ze swoim najbliższym otoczeniem, w podróży. Namioty te wymienia „Inwentarz Namiotów znajdujących się w magazynie IKMości Gospodarskim z dnia 11. X-briś 1798 Roku spisany”, który zachował się w Archiwum Potockich w Jabłonnie [140].

⁴⁾ Ostatni namiotnicy mieszkający w Brodach i we Lwowie zajmowali się głównie konserwacją i przerabianiem namiotów starych [175].

⁵⁾ Namiot używany przez Napoleona w czasie kampanii wojennych, zachował się do obecnych czasów. Uchodzi za arcydzieło osiemnastowiecznego tkactwa artystycznego i złoczonego haftu. Wykonany został w manufakturze Gobelin pod Paryżem. Wcześniej należał do króla Ludwika XV. Większość (trzy czwarte) jego części składowych znajduje się we Francji. Dwie z nich, brakujące do odtworzenia całości są, od 1819 r., w posiadaniu mnichów z klasztoru Esphigmenou, na górze Athos, w Grecji. Mimo oferty rządu francuskiego wykupienia tych części za każdą cenę, mnisi nie zgadzają się na sprzedaż. Za: Kathimerini (eng. edit.), 31 marca 2003.

⁶⁾ Ilustracja za [104].

Wielkie namioty cyrkowe – chapiteau | Powrót wielkich namiotów do codziennego i powszechnego użytku nastąpił dzięki rozwojowi, w XVII w., sztuki cyrkowej.

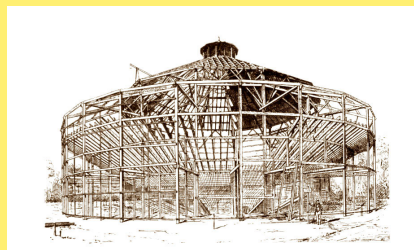
Sztuka cyrkowa w znanej dzisiaj formie powstała w Paryżu, niemal dwieście pięćdziesiąt lat temu. W niewielkim stopniu nawiązywała do antycznych widowisk cyrkowych. Pierwszy budynek cyrkowy wybudował w tym mieście Anglik, Jacob Bates, w 1767 r. Początkowo, niemal wszystkie budynki cyrkowe były wykonywane jako obiekty stałe, o konstrukcji drewnianej, czasami z elementami żelaznymi, rys. 2.73. Przed końcem XIX w., w niemal każdym dużym mieście w Europie Środkowej, znajdował się co najmniej jeden budynek cyrkowy – podobnie jak amfiteatr w miastach rzymskich. Ilość widzów była jednak nieporównywalnie mniejsza: w cyrkach mieściło się przeciętnie od jednego do czterech i pół tysiąca widzów.

Pierwszy budynek cyrkowy w Londynie, który został wybudowany w 1770 r., przy moście Westminster-skim, przez Philipa Astleya, jest opisany jako namiot o lnianym dachu. Był to pierwszy namiot cyrkowy. Około roku 1840, na Polach Elizejskich w Paryżu, wybudowano namiot cyrkowy ze smołowanego płótna lnianego. Wiadomo, że tego typu namiotów powstało znacznie więcej.

Namioty, które można było szybko postawić i równie szybko zdemontować powstały dla amerykańskich cyrków podróźnych, zwanych też kolejowymi. W roku 1867, amerykańska wędrowna grupa cyrkowa ¹⁾ przybyła do Europy. Jej namiot wraz z wyposażeniem technicznym, stał się wielką atrakcją Wystawy Światowej w Paryżu i inspiracją dla grup europejskich.

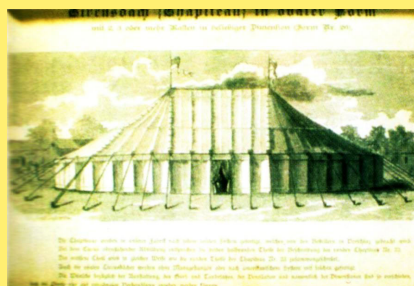
W Europie, a zwłaszcza w Niemczech, w drugiej połowie XIX w., powstało wiele zespołów cyrkowych ²⁾. Początkowo korzystały one ze stałych budynków, jednak bardzo szybko, naśladując cyrki amerykańskie, rozpoczęły działalność objazdową. Pojawiły się wówczas standardowe namioty o wymiarach dochodzących do 55 m. Niektórzy producenci oferowali je jako wyroby typowe, rys. 2.74.

Początkowo, wykonywano namioty o różnych kształtach, rys. 2.75. Ostatecznie, ustaliła się forma namiotu okrągłego, o kilku masztach ustawionych wokół areny i przechodzących przez dach namiotu, do których jest podwieszona tkanina. Stabilność konstrukcji zapewnia układ stężeń i odciągów zewnętrznych. Tego typu namioty były nieraz tak duże, że mogły pomieścić nawet dwanaście tysięcy widzów, rys. 2.76. ⁴⁾



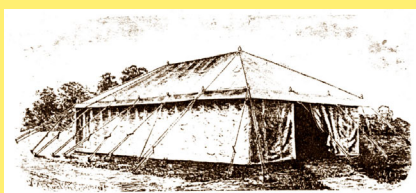
Rys. 2.73 – drewniana konstrukcja budynku cyrku w Marsylii

Ilustracja za [105]



Rys. 2.74 – dziewiętnastowieczna reklamówka namiotu cyrkowego

Ilustracja za [92]



Rys. 2.75 – wczesne, dziewiętnastowieczne namioty cyrkowe
a). prostokątny
b). okrągły

Ilustracja za [74]

¹⁾ Był to „First American Railway Circus” Spaldinga i Rogersa

²⁾ Są to m.in. takie grupy jak: Busch, Krone, czy Hagenbeck – istniejące do dzisiaj i będące synonimem najwyższej jakości sztuki cyrkowej.

⁴⁾ Np. Phineas Taylor Barnum Circus

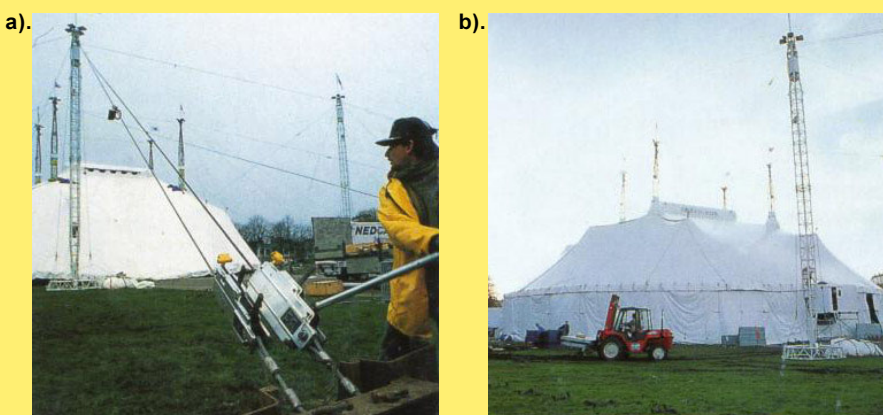


Rys. 2.76 – duży, dwunastomasztowy namiot cyrku Chipperfield:
a). widok ogólny z góry
b). wnętrze

Ilustracja za [76]

Forma ta jest powszechnie stosowana do dzisiaj, rys. 2.77. Na jej określenie przyjęła się powszechnie francuska nazwa *chapiteau*¹⁾. Stanowi ona, w pewnym stopniu, odbicie formy dawnego wielkiego namiotu audiencyjnego Timura.

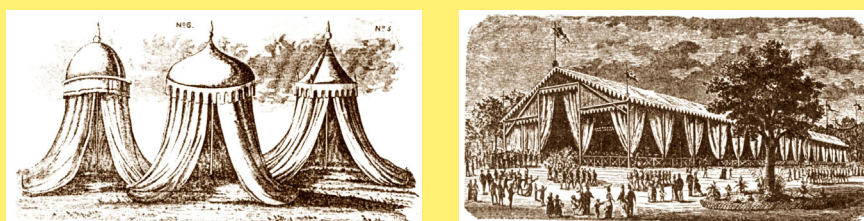
Namioty cyrkowe osiągnęły okresie swojego rozwoju wysoki stopień doskonałości technicznej. Nawet dzisiaj, ich produkcja, a także montaż i demontaż, wymagają wysokich umiejętności, doświadczenia i dobrej organizacji.



Rys. 2.77 – współczesny namiot cyrkowy: Cirque du Soleil
a). namiot w czasie podnoszenia
b). widok ogólny

Ilustracja za [105]

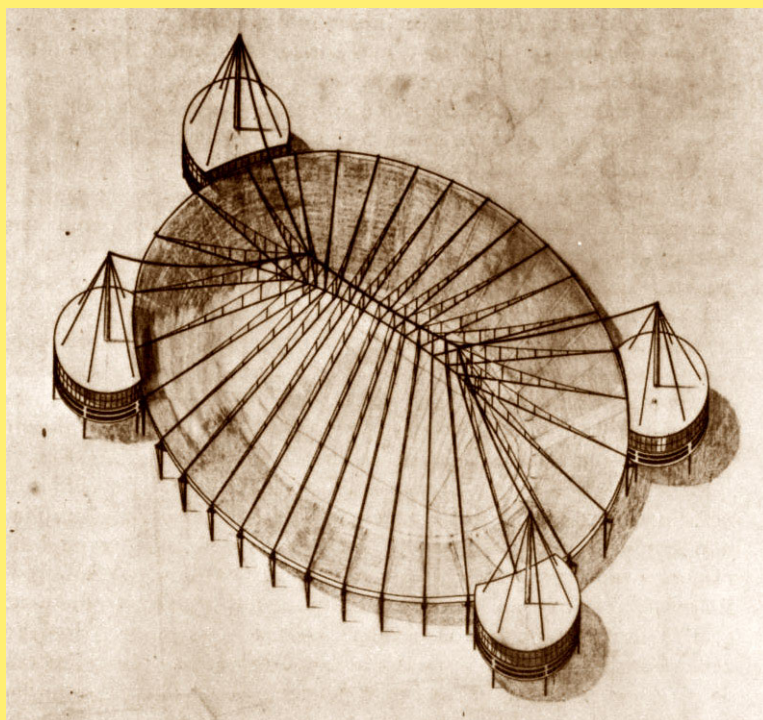
Uprzemysłowienie produkcji namiotów | Wprowadzenie mechanicznego przędzenia włókien oraz tkania tkanin, w drugiej połowie XVIII w., umożliwiło produkcję wyrobów nadających się do wykonywania dużych obiektów namiotowych [92]. Na początku XIX w. rozpoczęto seryjną produkcję namiotów użytkowych różnego rodzaju: wojskowe, magazynowe oraz – przede wszystkim – na festyny. Można było je zamówić z katalogu [76]. Powstał też przemysł produkujący takie obiekty. Były to najczęściej namioty niewielkie, rys. 2.78.a), ale zdarzały się również stosunkowo duże, zwłaszcza jeżeli pokrycie z tkaniny współpracowało ze szkieletem drewnianym, rys. 2.78.b).



Rys. 2.78 – namioty produkowane w katalogu, w XIX w.:
a). namiot okrągły, z centralnym masztem
b). hala o wymiarach 16x64 m, prod. firmy Stromeier
Ilustracje za [74]

¹⁾ *chapiteau (franc.)* = kołpak (również kapitel, głowica). Termin ten jest powszechnie używany w wielu językach na określenie dużych, okrągłych lub owalnych namiotów, o formie dostosowanej do widowisk cyrkowych, mieszczących zarówno scenę jak i widownię

Na początku XX w. pojawiły się, niezrealizowane wówczas, projekty namiotów, które były bardzo bliskie współczesnym koncepcjom konstrukcji wykorzystujących tkaniny i liny, rys. 2.79.



Rys. 2.79 – projekt nowego rozwiązania konstrukcji dużego namiotu cyrkowego, przedstawiony w 1929 r. przez architektów Heinza i Bodo Rasch, firmie L. Stromeier. Projekt nie został przyjęty, ze względu na brak zainteresowania na rynku stacjonarnymi konstrukcjami namiotowymi (dla przenośnych cyrków konstrukcja się nie nadawała), a także ze względu na obawy producenta, co do stabilności konstrukcji przy silnym wietrze.

Ilustracja za [76]

Powstanie dobrze zorganizowanego przemysłu produkującego namioty, wyposażonego w odpowiednie zaplecze techniczne, rys. 2.80, i dysponującego znacznym potencjałem produkcyjnym i finansowym, stworzyło bazę techniczną pod rozwój współczesnych konstrukcji membranowych w drugiej połowie XX w.



Rys. 2.80 – hale produkcyjne wytwórni namiotów firmy L. Stromeier & Co. w Konstancji, na początku XX w.

Ilustracja za [76]

2.2. Rozwój współczesnych konstrukcji membranowych

Uwagi wstępne | We wprowadzeniu do polskiego wydania książki F. Otto „Dachy wiszące”, z 1959 r. [157], można przeczytać:

„W historii budownictwa rzadkie są wypadki, gdy nowe konstrukcje albo materiały budowlane zmieniają w istotny sposób wygląd budowli [...]. Dachy wiszące [...] dają wszelkie podstawy do przypuszczeń, że ten typ konstrukcji wpłynie decydująco na kształt naszych przyszłych budowli halowych i przekryć wielkoprzestrzennych [...]”.

Dziś, w czterdzieści pięć lat później, można w pełni ocenić zaskakującą trafność tego poglądu. Obiekty, w których zasadnicze elementy konstrukcyjne podlegają jedynie działaniu sił rozciągających, wyróżniają się we współczesnej architekturze. Do konstrukcji tego rodzaju można zaliczyć zarówno tradycyjne dachy wiszące, konstrukcje prętowo-ciężnowe, siatki linowe czy, oczekujące wciąż na odpowiednie zastosowanie, konstrukcje typu tensegrity. Jednak najbardziej spektakularnymi są niewątpliwie konstrukcje membranowe z materiałów tekstylnych. W stosunku do nich używana jest często nazwa „konstrukcje namiotowe”.

2.2.1. Powstanie współczesnych konstrukcji namiotowych

Początki – działalność Freia Otto | Za „ojca” współczesnych konstrukcji membranowych jest uważany – słusznie – urodzony w 1925 r., niemiecki architekt i naukowiec, Frei Otto. W 1950 r. odbył on krótką praktykę w biurze konstrukcyjnym F. Severuda, który pracował wówczas z Maciejem Nowickim nad budynkiem Paraboleum w Raleigh, rys. 2.81. Zafascynowany nowym pomysłem konstrukcyjnym – dwukierunkowo zakrzywioną membraną²⁾ – rozpoczął, po powrocie do Niemiec, bardzo intensywne prace nad jego zastosowaniami, przygotowując w 1953 r. dysertację na ten temat.

Cały szereg sprzyjających okoliczności umożliwił realizację tych początkowo ulotnych koncepcji oraz wytworzenie niezbędnego zasobu wiedzy na temat ich kształtowania i realizacji. Dzięki temu możliwe była zmiana skali konstrukcji namiotowych, od niewielkich zadaszeń ogrodowych, do ogromnych, stałych obiektów użyteczności publicznej. Umożliwiło to także powstanie i rozwój całego specjalistycznego przemysłu ich wykonywania.



Rys. 2.81 – budynek Paraboleum w Raleigh (Półn. Karolina, USA) – pierwszy budynek z dwukierunkowo zakrzywionym dachem wiszącym¹⁾

Autorem podstawowego projektu był Maciej Nowicki. Pierwotnie budynek nazywał się North Carolina State Fair's Livestock Judging Pavilion. Jego obecna nazwa to: J.S. Dorton Arena.

¹⁾ Od 1972 r., budynek podlega ochronie prawnej, ze względu na swoje wartości architektoniczne. Ilustracja za [53].

²⁾ Pomysł dwukierunkowego zakrzywienia powierzchni dachu, dla jego usztywnienia pojawił się na znanym szkicu M. Nowickiego, wykonanym w związku z Paraboleum, które było projektowane w latach 1949-1952 i oddane do użytku w 1953 roku. Jednakże pierwsza realizacja tego pomysłu miała miejsce już roku 1952. Po publikacji F. Otto (Bau-technik 10/1951), który po powrocie z USA do Niemiec opisał przygotowywany projekt, szwajcarski architekt Stettbacher z St. Gallen, zaprojektował niemal identyczny ale mniejszy i tymczasowy, drewniany obiekt, jako pawilon szwajcarski na wystawie przemysłowej w Berlinie, w 1952 r. Wykonawcą tego obiektu była firma L. Stromeyer. Maciej Nowicki jest też autorem innego pionierskiego projektu: dachu podwieszonego wantowo do przechodzących przez niego pylonów. Projekt ten opracował w 1950 r. (wspólnie z C.S. Steinem), dla supermarketu w Kaliforni (nie zrealizowany).

Pierwszą z tych sprzyjających okoliczności, istotną zwłaszcza początkowej fazie, w pierwszych latach pięćdziesiątych, była obecność dużych i posiadających długą tradycję wykonywania namiotów cyrkowych, zakładów tekstylnych L. Stromeier & Co, w Konstancy. Ich dyrektor, Peter Stromeier, wykazał ogromną życzliwość dla młodego architekta, umożliwiając mu, finansując i dostarczając odpowiedniej technologii do prób w dużej skali¹⁾. Latem 1954 r. Otto przez spędził w tych zakładach „najbardziej twórczy tydzień w życiu”, a pobyt ten został uwieczniony udaną próbą zbudowania dachu membranowego o powierzchni siodłowej podpartej w czterech punktach.

Ten krótki okres eksperymentów był niezwykle owocny dla obu stron. F. Otto zapoznał się z technologią i specyfiką wykonywania obiektów z tkanin, a pracownicy firmy Stromeier poznali nowe, nieznane im wcześniej formy przestrzenne konstrukcji tekstylnych.

Porównanie wielkości i konstrukcji namiotów cyrkowych budowanych w połowie XX w. z parametrami stałych, masywnych konstrukcji prowadziło, przy głębszym zastanowieniu, do pewnej konfuzji. Obiekty, o podobnej wielkości i formie, podlegają działaniu takich samych obciążeń zewnętrznych. Dotyczy to zwłaszcza obciążenia śniegiem i wiatrem. Wymiary konstrukcji namiotów cyrkowych przekraczały zwykle 50 m, co w tradycyjnych konstrukcjach do dzisiaj jest uważane za dużą rozpiętość. Jednocześnie, konstrukcje te były wykonywane w oparciu o niezwykle uproszczone, wręcz prymitywne obliczenia i rysunki, które opracowywano zresztą bardziej z powodu wymogów formalnych, niż dla rzeczywistej potrzeby. Cały proces produkcji namiotów cyrkowych opierał się na doświadczeniu i przekazywaniu tradycji.

Frei Otto zartobliwie pisze, że „...bez istnienia sekretnych stowarzyszeń, takich jak te, które zrzeszały mistrzów budowlanych w okresie gotyku, aby chronić sekrety ich rzemiosła, powstał pewien zasób praktycznej wiedzy, który można porównać do tych sekretów, a który był nieodzowny, do budowy dobrych namiotów cyrkowych” [76].

Częścią tej wiedzy była znajomość zachowania tkaniny bawełnianej poddanej obciążeniu, która z czasem ulegała wydłużeniu, co powodowało jej „wiotczenie”. Dlatego, namiotnicy przygotowywali tkaninę nieco mniejszą od założonej, pozwalając aby przyjęła po naciągnięciu optymalną formę.

Stosowane wówczas wykroje były bardzo proste: stosowano płaskie powierzchnie na ściany i stożkowo ukształtowane dachy. Poszczególne fragmenty powierzchni były tak skrojone, że pasy tkaniny pomiędzy masztami były lekko siodłowo wygięte, przy zachowaniu synklastycznego charakteru całej powierzchni. Było to intuicyjne stosowanie przez namiotników zalet dwukierunkowego naprężania tkaniny. Potrafili oni uwzględnić wpływ tego naciągania na wykroje tkaniny. Odbывало się to metodą prób i błędów, poprzez eksperymentowanie w naturalnej skali. Ponieważ pokrycie namiotów cyrkowych wytrzymało około czterech, do pięciu lat eksploatacji, przy każdej jego wymianie, następowało stopniowe udoskonalanie stosowanych wykrojów. Wykonanie namiotu o zupełnie nowym kształcie stawiało przed producentem poważne przeszkody. Odwracając kolejność, można stwierdzić, że wykroje namiotu były znane, lecz nie znano jego końcowego kształtu po naciągnięciu, gdyż nie istniały jeszcze wówczas matematyczne metody jego wyznaczania [76].

W następnym roku, pierwszy czteropunktowy namiot siodłowy, został zaprezentowany (wraz z dwoma dalszymi) jako zadaszenie dla orkiestry, na federalnej wystawie ogrodniczej w Kassel, rys. 3.12²⁾. Była to pierwsza publiczna prezentacja nowych konstrukcji namiotowych³⁾.

Kolejnym elementem, który umożliwił stworzenie naukowych podstaw projektowania konstrukcji namiotowych, była współpraca wybitnych inżynierów konstruktorów. F. Otto udało się zainteresować tymi konstrukcjami jednego z pionierów konstrukcji sprężonych, Fritza Leonhardta. Jego znajomość zagadnień związanych z cięciami, techniką naciągu i problemami nieliniowej pracy konstrukcji umożliwiła projektowanie dużych i złożonych obiektów, dla których niemożliwe było stosowanie uproszczonego podejścia, wystarczającego dla niewielkich budowli⁴⁾.

¹⁾ Peter Stromeier, który był dyrektorem oddziału dużych namiotów, w rodzinnej firmie tekstylnej w Konstancy, uważał za swój obowiązek, wykorzystanie odziedziczonych środków do rozwoju tej gałęzi przemysłu w Niemczech [76]

²⁾ Pomysł umieszczenia na Federalnej Wystawie Ogrodniczej w Kassel, całej serii małych konstrukcji namiotowych, jako obiektów małej architektury, wyszedł od Hermanna Matterna, architekta krajobrazu, odpowiedzialnego za tę wystawę. Mattern zetknął się z F. Otto i P. Stromeierem w czasie gdy przedstawiali ofertę na wykonanie rozkładanego dachu nad letnim teatrem w Killesberg k. Stuttgartu. Czas na zaprojektowanie i wykonanie trzech konstrukcji wyniósł zaledwie sześć tygodni. Ich całkowity koszt – 25 000 DM.

³⁾ Kolejna prezentacja miała miejsce na następnej Federalnej Wystawie Ogrodniczej, w Kolonii, w 1957 r., rys. 3.31. Do zaprojektowania obiektów na tę wystawę zaprosił F. Otto jej komisarz, architekt krajobrazu – Kurt Schönbohm, który widział namioty w Kassel [76].

⁴⁾ F. Otto współpracował z F. Leonhardtem od ok. 1955 r. (projekt namiotu łukowego przy wejściu na wystawę kwiatową w Kolonii) do 1972 r. (dach dla stadionu olimpijskiego w Monachium, rys. 2.84). Leonhardt zaproponował F. Otto przeniesienie z Berlina do Stuttgartu, gdzie powstał słynny Institut für leichte Flächentragwerke (IL).

I wreszcie trzecia sprzyjająca okoliczność, to istnienie silnego zespołu geodetów, kierowanych przez Karla Linkwitza. Zespół ten jako pierwszy (i jeden z nielicznych w ogóle) opracował matematyczne metody wyznaczania kształtu naprężonej membrany, a następnie przygotowywania wykrojów niezbędnych przy produkcji, tj. przybliżania powierzchni zakrzywionych płaszczyzną¹⁾. Zbiegło się to w czasie z rozwojem techniki komputerowej – komputery o wydajności wystarczającej do przeprowadzania tych złożonych obliczeń były już wówczas dostępne dla inżynierów.

W 1954 roku ukazała się pionierska i fundamentalna praca F. Otto „Dachy wiszące”. Nie tylko przedstawił on w niej nowy rodzaj konstrukcji i wyjaśnił zasady jego kształtowania, ale również zaprezentował cały szereg idei i pomysłów, które w dużej mierze zdefiniowały dalsze kierunki rozwoju konstrukcji membranowych.

F. Otto założył w 1957 r. w Berlinie Centrum Rozwoju Lekkich Konstrukcji, z którego następnie powstał w 1964 r. przy Uniwersytecie w Stuttgarcie, Instytut Lekkich Konstrukcji (*Institut für leichte Flächentragwerke*, w skrócie – IL). Jest to wciąż do dzisiaj, jedna z najważniejszych placówek badawczych z dziedziny konstrukcji membranowych, a także konstrukcji pneumatycznych, naturalnych i szeroko rozumianych konstrukcji lekkich.

Pierwsze duże obiekty | Po raz pierwszy, charakterystyczne, kształty konstrukcji membranowych osiągnęły dużą skalę na Szwajcarskiej Wystawie Narodowej w Lozannie, w 1964 r., rys. 2.82²⁾.

Rozwiązanie to, znacznie powiększone zastosowano przy budowie pawilonu niemieckiego na światowej wystawie EXPO'67 w Montrealu, rys. 2.83³⁾. Ukoronowaniem tego okresu był cały szereg dachów zaprojektowanych nad obiektami olimpijskimi w Monachium, w 1972 r., rys. 2.84⁴⁾. Te dwa ostatnie obiekty były zaprojektowane jako siatki cięgnowe, rozpięte na dwukierunkowo zakrzywionej powierzchni⁵⁾.



Rys. 2.82 – namioty na Szwajcarskiej Wystawie Narodowej w Lozannie, w 1964 r.

Ilustracja za [76]

¹⁾ Zespół Karla Linkwitza opracował metodę znaną jako metoda gęstości sił (ang. *Force Density Method*). Inne podejście, które doprowadziło do udanych rozwiązań, to zastosowanie metody elementów skończonych i dynamicznej relaksacji – przez Michaela Barnesa.

²⁾ Pawilony na wystawie w Lozannie, w 1964 r., zaprojektował Frei Otto, a wykonał Peter Stromeyer. Ciekawostką, związaną z tą realizacją, jest fakt, że gospodarze zażądali, aby całość prac związanych z ich projektowaniem i wykonawstwem odbyła się w Szwajcarii. Z tego względu, prace projektowe odbywały się w ukryciu i były autoryzowane przez szwajcarskich inżynierów. F. Otto nie poznał w ogóle architekta tego projektu.

³⁾ Pawilon niemiecki na EXPO 67 w Montrealu został zaprojektowany wspólnie przez Rolfą Gutbroda i Freia Otto. Konstruktorem był Fritz Leonhardt, a generalnym wykonawcą – Peter Stromeyer. Koncepcja została wyłoniona w wyniku ogólnokrajowego konkursu.

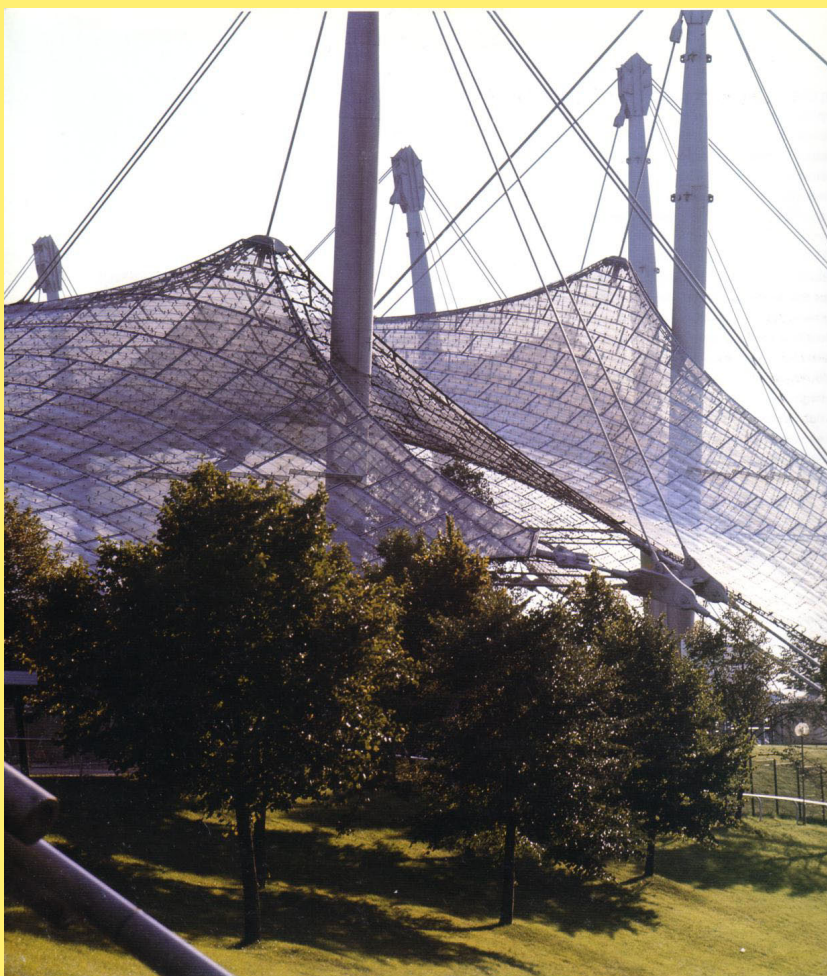
⁴⁾ Dach nad stadionem olimpijskim w Monachium nie był kryty tkaniną ale płytami ze szkła-akrylowego (Perspex), mocowanymi do siatki cięgnowej.

⁵⁾ Metoda gęstości sił (patrz przypis 1) została rozwinięta w związku z projektowaniem siatek cięgnowych dla dużych i bardzo odpowiedzialnych obiektów w Montrealu i Monachium. Dlatego przy jej zastosowaniu do membran ciągłych, tkanina jest modelowana w postaci siatki reprezentującej jej wydzielone pasma.



Rys. 2.83 – pawilon niemiecki na wystawie EXPO 67 w Montrealu

Ilustracja za [76]



Rys. 2.84 – wiszący dach nad stadionem olimpijskim w Monachium¹⁾

Ilustracja za [76]

¹⁾ Dach nad obiektami olimpijskimi w Monachium został zaprojektowany przez biuro architektoniczne Behnisch & Partner, przy współpracy Jürgena Joedicke i Freia Otto. Konstrukcję opracowało biuro Leonhardt & Andrä.

Nowe materiały | Pierwsze współczesne konstrukcje namiotowe były wykonywane z tkaniny bawełnianej. Stanowiło to dość poważne ograniczenie, z wielu względów. Z powodów wytrzymałościowych, niska wytrzymałość tkaniny bawełnianej na rozciąganie, ograniczała maksymalne, możliwe do uzyskania rozpiętości. Jej wrażliwość na czynniki atmosferyczne: wilgoć, promieniowanie ultrafioletowe, zmiany temperatur – istotnie ograniczała okres eksploatacji obiektu. Palność tkaniny bawełnianej uniemożliwiała jej zastosowanie do wykonywania przekryć obiektów zamkniętych, użyteczności publicznej.

W 1958 r., pojawił się nowy rodzaj tkaniny, która znakomicie nadawała się do wykonywania namiotów, a jednocześnie nie miała wielu wad tkanin bawełnianych. Była to tkanina poliestrowa okrywana PVC. Wprowadził ją na rynek niemiecki koncern Hoechst, pod nazwą handlową *Trevira*. Chociaż pierwsze wersje tej tkaniny odbiegały znacznie jakościowo, od produkowanych obecnie, to jej pojawienie się rozpoczęło przełom jakościowy w konstrukcjach namiotowych. W okresie tym powstało wiele interesujących, pionierskich konstrukcji. Jedną z wyróżniających się, było przekrycie basenu przy bulwarze Carnot, w Paryżu¹⁾.

Wkrótce, zaczęto stosować również inne rodzaje tkanin z włókien chemicznych: nylonowe i szklane. Wykonywano próby z różnymi rodzajami pokryć. Ze względu na znaczne wydłużenia, tkanina nylonowa nie była najodpowiedniejszym materiałem na konstrukcje namiotowe. Tkanina z włókien szklanych z powłoką poliuretanową, była z kolei bardzo wrażliwa na penetrującą wilgoć. Rozwiązanie tego problemu przyniosła dziedzina, która rozwijała się dotychczas równolegle i w zasadzie zupełnie niezależnie – budownictwo pneumatyczne.

Przełom nastąpił na wystawie EXPO'70, w Osace, gdzie zrealizowanych zostało bardzo wiele niezwykle ciekawych i nowatorskich obiektów, zarówno z dziedziny dachów membranowych, jak i konstrukcji pneumatycznych²⁾. Sukces wystawy i wielkie zainteresowanie, które wzbudziły konstrukcje membranowe, spowodowały, że zaczęto poszukiwać materiału, który pozwoliłby wykonywać takie obiekty jako budowle stałe, a nie jedynie tymczasowe, oraz uzyskiwać większe niż dotychczas rozpiętości. Powstała w USA grupa badawcza zaadaptowała (z pewnymi modyfikacjami), materiał stosowany dotychczas w innej dziedzinie techniki – tkaninę z włókna szklanego pokrytego teflonem. Tkanina taka był wcześniej stosowana do wykonywania taśm transportowych w piecach przemysłowych. Wysokie parametry wytrzymałościowe, trwałość, niepalność oraz dostępność tego wyrobu, spowodowały, że do dzisiaj jest to jeden z podstawowych materiałów stosowanych do wykonywania dużych konstrukcji membranowych. Dodatkową, niebagatelną zaletą, jest ogromna łatwość, utrzymania powierzchni takiej tkaniny w czystości, dzięki właściwościom powłoki teflonowej. Pierwszym obiektem, w którym została zastosowana, była sala sportowa dla college'u w La Verne w Kalifornii, w 1972. Architektura tego obiektu do dziś uchodzi za bardzo udaną, rys. 3.25.

W dziedzinie dachów membranowych, pojawienie się nowego materiału dało nowy, silny impuls do ich rozwoju. Zaczęto budować obiekty, które spełniały wymogi bezpieczeństwa i trwałości stawiane przez przepisy budowlane obiektom stałym. Jednocześnie wzrastała ich rozpiętość, przekraczając w połowie lat dziewięćdziesiątych XX w., „magiczną” granicę 200 m. Kolejnym krokiem było rozpoczęcie prac nad usunięciem wad konstrukcji membranowych w zakresie izolacyjności cieplnej i akustycznej. Pierwszym pomysłem było wykonywanie konstrukcji dwuwarstwowych, w których pomiędzy membrany tłoczone jest zimą ciepłe powietrze, powodujące roztopienie zalegającego śniegu. Następnie, zastosowano w konstrukcjach z podwójną membraną warstwę izolacji cieplnej (przykładem jest klinika w Masserbergu, rys. 3.26. Obecnie prowadzone są zaawansowane prace nad materiałami o odpowiednio dobranych współczynnikach pochłaniania i odbicia promieniowania cieplnego. Przewiduje się, że dzięki takim materiałom, konstrukcje membranowe będą mogły być z powodzeniem stosowane w budynkach inteligentnych, racjonalizujących zużycie energii w czasie eksploatacji [61] [183] [190].

¹⁾ Arch. R. Taillibert i F. Otto, *konstr.* – Stefan du Chateau

²⁾ Patrz rys. 2.107

2.2.2. Rozwój konstrukcji pneumatycznych

2.2.2.1. Wczesne zastosowania techniki pneumatycznej

Inspiracje | Idea praktycznego zastosowania różnych przedmiotów wypełnionych powietrzem zrodziła się niewątpliwie z obserwacji natury. Pęcherze pławne u ryb czy zachowanie niektórych płazów, np. żab z gatunku *Bufo Calamita* czy *Hyla arborea* są tu dobrymi przykładami, rys. 2.85.

Trudno jest precyzyjnie określić moment, w którym człowiek po raz pierwszy wykonał „nadmuchany” przedmiot z myślą o praktycznym zastosowaniu. Można przyjąć, że najprawdopodobniej były to najpierw zamknięte powłoki, wykonane ze skór lub wnętrzości zwierząt, mające formę bukłaków i środków służących jako pomoc do pływania (pęcherze, worki i tratwy), rys. 2.86.

Zachowały się przekazy o asyryjskich tratwach na nadmuchiwanym workach wykonanych ze skór [120]. Zastosowanie tych przedmiotów było jednak ograniczone właściwościami dostępnych wówczas materiałów i nie miało bezpośredniej kontynuacji w rozwoju technik inżynierskich.



Rys. 2.85 – mała, dość powszechnie występująca w Europie żabka *Hyla arborea* potrafi mocno wypełnić powietrzem pęcherz umieszczony w dolnej części głowy, znacznie zwiększając jego objętość. Ilustracja za [233]



Rys. 2.86 – prosty nadmuchiwany sprzęt do przepraw przez rzeki, używany wspólnie przez irańskich koczowniców

Ilustracja za [233]

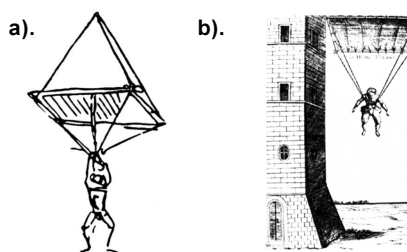
Zastosowania praktyczne | Inspiracji do rozwoju konstrukcji pneumatycznych dostarczały z pewnością również inne dziedziny techniki, w których wykorzystywano powietrze. Były to na pewno urządzenia wykorzystujące siłę wiatru: żaglowce i wiatraki. Później pojawiły się latawce i spadochrony¹⁾, rys. 2.87. Praktyczne zastosowanie tego typu konstrukcji na większą skalę, nastąpiło z chwilą pojawienia się balonów, rys. 2.88.a).

Leonardo da Vinci, który uwielbiał wykonywać różne pomysłowe zabawki, wykorzystywał w tym celu również zamknięte powłoki wypełnione powietrzem. Giorgio Vasari opisuje: „Do Rzymu udał się razem z księciem Julianem Medyceuszem na koronację papieża Leona, który był zamiłowany w naukach filozoficznych a zwłaszcza w alchemii. Tam zrobił rodzaj pasty z wosku i uformował z niej, gdy była jeszcze miękka, wdzięczne zwierzęta wypełnione powietrzem. Nadmuchane unosiły się w górę, a gdy uszło z nich powietrze, opadały na ziemię.” I dalej: „Często trzewia rzeźnicze dawał do dokładnego oczyszczenia, tak że były cieniutkie i mieściły się w ręce. W jednej z izb ustawił dwa miechy, umocował do nich trzewia i nadymał, aż napełniły dużą salę i trzeba było chronić się do kąta. Pokazał przy tym, jak owe błony stawały się przejrzyste, gdy napełniło je powietrze. Będąc małymi z początku, rozszerzały się coraz bardziej, podobnie jak talent u ludzi.” [226].

Zapotrzebowanie wojska, podobnie jak w wielu innych dziedzinach przemysłu, przyczyniło się do przyśpieszenia rozwoju i praktycznych wdrożeń konstrukcji pneumatycznych. Armia francuska, wkrótce po tym, jak pojawi-

¹⁾ Praktyczne próby ze spadochronami zostały w Europie podjęte w wyniku inspiracji informacjami o stosowaniu spadochronów na Dalekim Wschodzie. Miało to miejsce po raporcie Simona de la Loubere, który był w latach 1687-1688 ambasadorem francuskiego króla Ludwika XIV w Syjamie i widział tam akrobatów wykorzystujących w czasie skoków parasole przywiązane do pasa. Kolejne próby podjęto pod koniec XVIII w., w czasie fascynacji lotami balonowymi. Zafascynowany opisem skoków chińskich akrobatów z relacji Simona de la Loubere, Francuz L. S. Lenormand skakał sto lat później na próbę, ze sporym powodzeniem, z budynków i szczytów drzew. Nazwa „spadochron” została wprowadzona w 1783 r., właśnie przez Lenormanda. Od niego dowiedzieli się o spadochronie bracia Montgolfier. Z ich balonu wykonał skok na spadochronie A. J. Garnerin w roku 1797 [220].

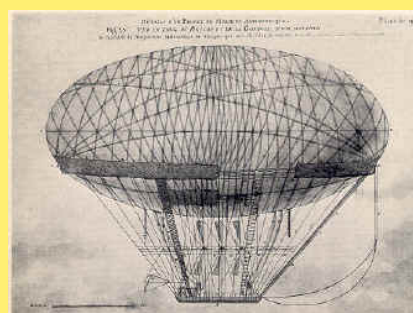
ły się pierwsze balony¹⁾, zaczęła je wykorzystywać do obserwacji przeciwnika²⁾. W czasie pierwszej wojny światowej, balony zaporowe były już istotnym elementem walki z nieprzyjacielskimi samolotami. W tym okresie nastąpił też rozwój innych wyporowych obiektów latających – sterowców, rys. 2.89³⁾.



Rys. 2.87 – pierwsze koncepcje spadochronów:

- a). rysunek Leonardo da Vinci z 1500 r. (kodeks Atlantyki, k. 1058, verso)
b). rysunek Fausto Veranzio z 1595 r. Ilustracje za [112]

Podczas II wojny światowej pojawiło się nowe wojskowe zastosowanie obiektów pneumatycznych – imitacje sprzętu bojowego dla wprowadzenia przeciwnika w błąd, rys. 2.90.⁴⁾ Kulminacją ich zastosowań była akcja dezinformacji przed lądowaniem Aliantów w Normandii [222]. Obiekty pneumatyczne znalazły swoje zastosowanie w masowej skali, chociaż jeszcze nie w budownictwie.



Rys. 2.88 – drugi publiczny start balonu na gorące powietrze, zorganizowany przez braci Josepha Michela i Jacquesa Etienne Montgolfier dla króla Ludwika XVI. Wydarzenie miało miejsce w Wersalu, 13 września 1783 r. Ilustracja za [222]

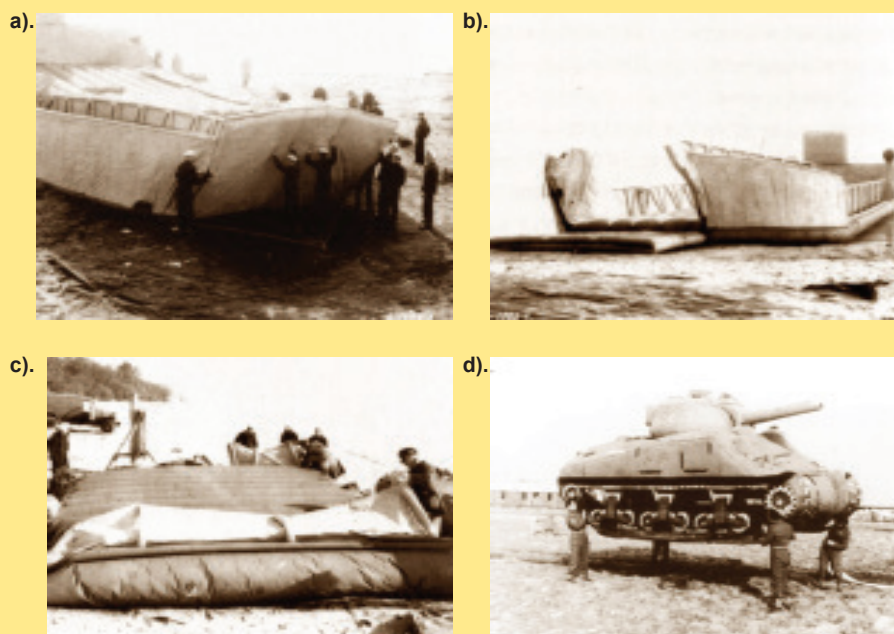
Rys. 2.89 – projekt sterowca przedstawiony francuskiej Akademii Nauk przez J.B. Meusnier, 3 stycznia 1784 r. Ilustracja za [233]

W Europie pierwszy opis balonu pojawił się w książce Cyrano de Bergeraca „Les Etats et Empires du Soleil”, opisującej napędniany gorącym powietrzem balon dzwigający w przestrzeni żagiel i kabinę. Miedzioryt stanowiący ilustrację do tej fantazji powstał 1657 r. W tych czasach równocześnie zajmował się koncepcją balonów na gorące powietrze jezuita L. Laurus. Istnieje opis, według którego 8 sierpnia 1709 r. brazylij-

ski duchowny Bartholomeu Lourenço do Gusmao wleciał w Lizbonie na wysokość 200 stóp w swoim balonie na gorące powietrze. Rosyjski manuskrypt podaje, że „...w roku 1731 zrobił Asen, pracujący u zarządcy Kriakutnego dużą kulę i napęlnił ją dymem. Trzymając się za linę wspiął się na nią i zły duch podniósł go do góry wyżej niż brzozy i poniósł w stronę dzwonnicy. Tam chwycił się za sznur od dzwonu i zaczął dzwonić. To uratowało mu życie” [112].

W dniu pierwszego pokazu balonu w Paryżu, rząd francuski wydał następującą odezwę do ludności: „W związku z uniesieniem się balonów lub kul w powietrze. Jeden z nich był wypuszczony w Paryżu, dzisiaj, 27 sierpnia 1783, o piątej po południu, na Polu Marsowym. Dokonano odkrycia, które rząd uważa za słuszne ogłosić, aby nie powodowało zaniepokojenia wśród ludności. [...] Każdy, kto by zobaczył na niebie taką kulę, która przypomina „la lune obscure”, nie powinien uważać tego za żadne groźne zjawisko, gdyż jest to tylko maszyna, która nie może prawdopodobnie spowodować żadnego zranienia i która któregoś dnia udowodni swoją przydatność dla społeczeństwa. (podpis) de Sauvigny. Lenoir” [233].

- ¹⁾ Przełom w lotach balonowych nastąpił w 1783 roku. 5 czerwca tego roku dwaj bracia, Joseph Michel i Jacques Etienne Montgolfier, z zawodu papiernicy, zaprezentowali publicznie bezzałogowy balon na ogrzane powietrze, który nazwali Ad Astra. Miało to miejsce w Annoney we Francji. Również we Francji, zaledwie dwa miesiące później – 27 sierpnia, na Polach Marsowych w Paryżu wznosił się balon wypełniony wodorem – wynalazek francuskiego uczonego Jacquesa Alexandra Césara Charlesa. Miała ona formę kuli opasanej siatką z lin, wykonanej z gumowanego jedwabiu. Balon skonstruowany przez Charlesa stał się pierwowzorem balonów gazowych i stworzył kanon, według którego budowano balony tego typu przez następne dwa stulecia.
- ²⁾ Balony były wykorzystywane przez wojsko już podczas kampanii włoskiej Napoleona. Były to balony wypełnione wodorem, konstrukcji, J.-A. Charlesa.
- ³⁾ Sterowce – chociaż ich koncepcja powstała w wyniku rozwinięcia zasady lotów balonem – nie są konstrukcjami pneumatycznymi, gdyż do zachowania ich kształtu nie jest potrzebne ciśnienie znajdującego się wewnątrz gazu. Ich powłoka ma konstrukcję sztywną lub półsztywną, z wewnętrznymi komorami wypełnionymi lekkim gazem, dzięki czemu mogą się unosić podobnie jak balony. Koncepcja sterowca powstała już w kilka miesięcy po pierwszych lotach balonem. Jej autorem był francuski generał J.B.M.C. Meusnier, znany również z pionierskich prac matematycznych w dziedzinie powierzchni minimalnych (patrz Suplement, rozdz. 1). Pierwsze sterowce, które znalazły praktyczne zastosowanie zostały opracowane przez hrabiego Ferdynanda von Zeppelin i opatentowane w 1895 r. Pierwszy lot próbny sterowca o symbolu LZ1 miał miejsce 2 lipca 1900 r.
- ⁴⁾ Pierwszą propozycję zastosowania pneumatycznych makiet sprzętu wojskowego zgłosił, w listopadzie 1939 r., dowódca 202 grupy RAF w Heliopolis, R. Collinshaw [222].



Rys. 2.90 – obiekty pneumatyczne do kamuflażu wojskowego, używane przez armię brytyjską w czasie II wojny światowej:

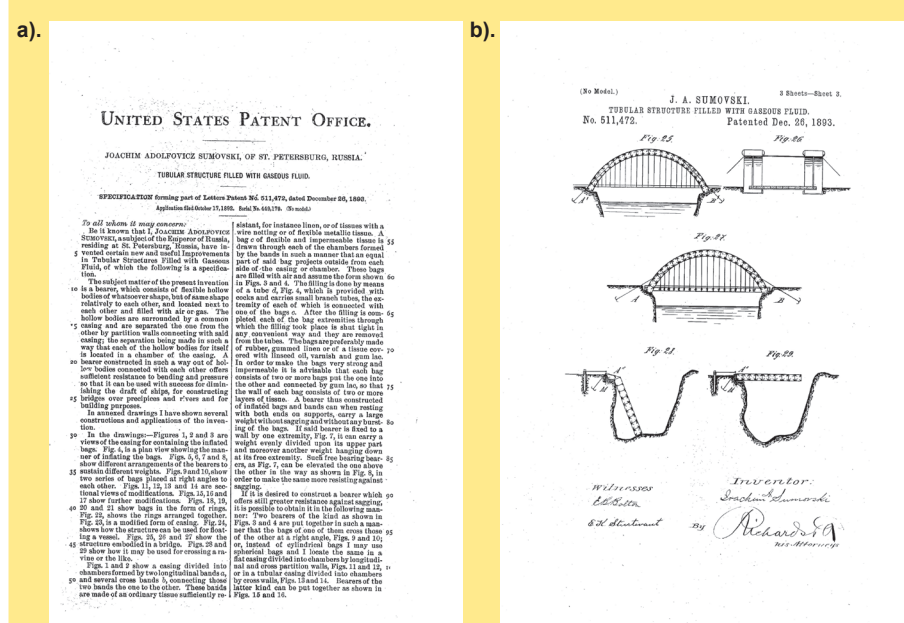
a). – c). sprzęt pływający i desantowy
d). makieta czołgu

Ilustracja za [222]

2.2.2.2. Pierwsze koncepcje konstrukcji pneumatycznych w budownictwie

Konstrukcje pneumatyczne zamknięte¹⁾ | Pierwszym udokumentowaną propozycją zastosowania konstrukcji pneumatycznej w budownictwie jest przedstawiony przez inż. Joachima Adolfowicza Sumowskiego z St. Petersburga projekt „dźwigara powietrznego”.

Projekt ten został przedstawiony przez autora w rosyjskim Ministerstwie Dróg, w latach 90. XIX wieku. Była to konstrukcja, typu zamkniętego. Zaproponował on wykorzystanie powłok w kształcie „tub” wykonanych z impregnowanej tkaniny, jako elementów nośnych konstrukcji budowlanych, np. mostów. Sumowski opatentował swój pomysł w USA, uzyskując w grudniu 1893 r. patent amerykański nr 511 472. Był to jednocześnie pierwszy pomysł zastosowania sprężania do usztywnienia konstrukcji pneumatycznej, rys. 2.91. Pomysł ten nie znalazł jednak praktycznego zastosowania i został wkrótce zapomniany [120].



Rys. 2.91 – „dźwigar powietrzny”

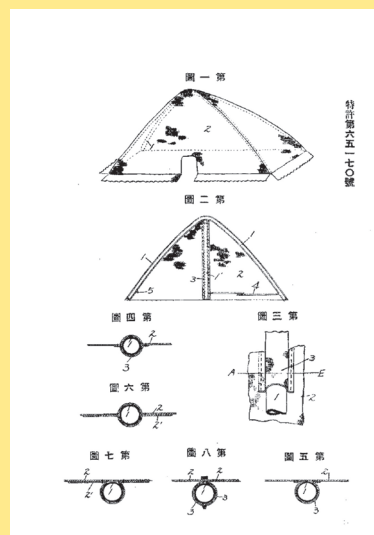
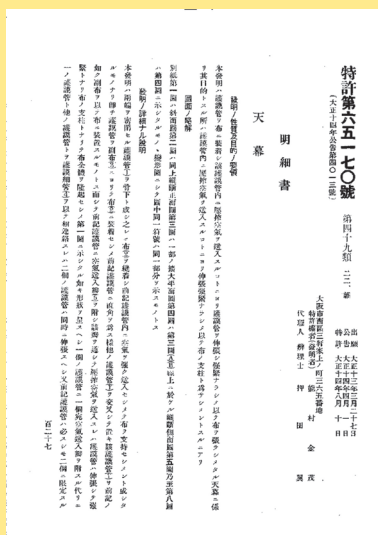
– faksymile patentu J.A. Sumowskiego uzyskanego w USA w grudniu 1893 r.²⁾ (patent nr 511 472). Pierwszy udokumentowany pomysł wykorzystania konstrukcji pneumatycznej:

- a). tekst opisu patentowego
b). rysunki przedstawiające zastosowania konstrukcji pneumatycznych do budowy mostów

¹⁾ Systematykę i nazewnictwo stosowane w odniesieniu do konstrukcji pneumatycznych omówiono w rozdz. 4.

²⁾ źródło: US Patent and Trademark Office

W 1929 r. w Japonii, Kaneshige Nohmura – właściciel założonej w 1922 r. w Osace Nohmura Tent Company, pracując nad nowymi rozwiązaniami namiotów, wpadł na pomysł zastosowania wypełnionych powietrzem cylindrów zamiast sztywnego stelażu namiotu. Rozwiązanie to zostało zaprezentowane w formie namiotu o wymiarach 2×2×2 m ze szkieletem z czterech narożnych „słupów pneumatycznych”, pod nazwą „Tent-modern”, rys. 2.93. W tym samym 1929 r. Nohmura uzyskał na nie patent japoński nr 65 170, rys. 2.92. Chociaż



Rys. 2.92¹⁾ – japoński patent nr 65 170 wydany w 1929 r. dla Kaneshige Nohmury. Patent dotyczy konstrukcji namiotu składającej się z czterech wypełnionych powietrzem pod ciśnieniem „rur” z tkaniny oraz wiotkiego pokrycia. Jest to pierwszy przykład konstrukcji pneumatycznej „żebrowej”, w której elementy wypełnione powietrzem współpracują z tkaniną pokrycia.

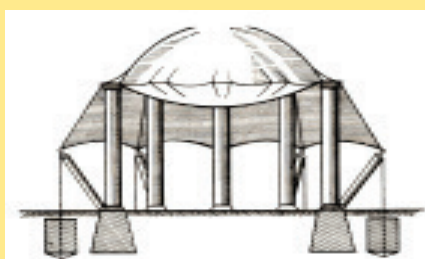
rozwiązanie to nie doprowadziło autora do koncepcji budynków pneumatycznych, to firma Nohmury – obecnie pod nazwą Taiyo Kogyo – jest jedną z czołowych firm zajmujących się konstrukcjami z tkanin i konstrukcjami przestrzennymi na świecie²⁾. Kiedy konstrukcje pneumatyczne pojawiły się w obecnej formie, firma ta stała się ich ważnym światowym wykonawcą i wniosła istotny wkład w ich rozwój [23].

W 1936 r. Rosjanin G.I. Pokrowski opublikował projekt budynku sali sportowej, w którym na słupach wypełnionych sprężonym powietrzem opierało się pokrycie w formie „soczewki pneumatycznej”. Całość była stabilizowana zakotwionymi w blokach fundamentowych linami, rys. 2.94. Projekt ten był wówczas przez samego autora uważany za fantastyczny i nie doczekał się realizacji [120].



Rys. 2.93 – zdjęcie namiotu ze stelażem pneumatycznym wg pomysłu K. Nohmury. W namiocie i obok niego synowie wynalazcy: Hiromasa i Ryotaro, zarządzający obecnie firmą Taiyo Kogyo.

Ilustracja za [23]



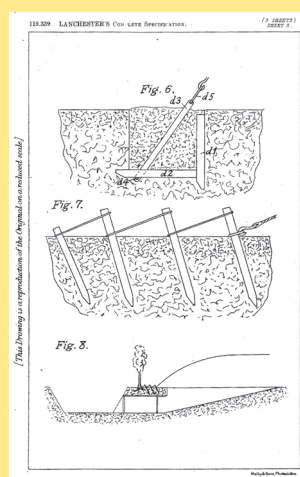
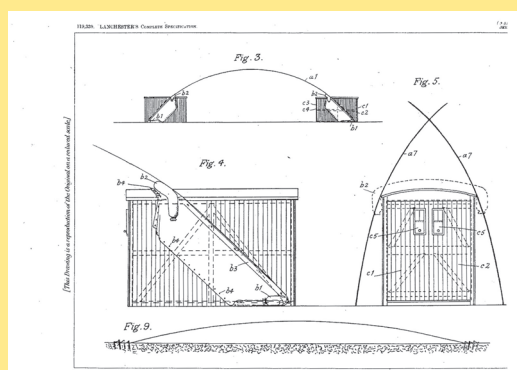
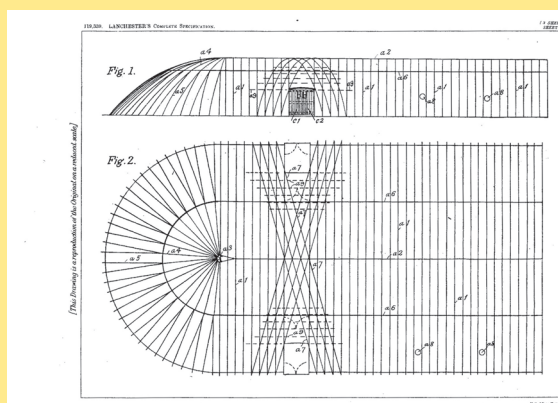
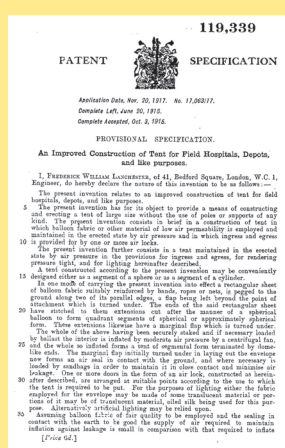
Rys. 2.94 – projekt sali sportowej przekrytej „soczewką powietrzną” opartą na pneumatycznych słupach, autorstwa G.I. Pokrowskiego, z 1936 r.

Ilustracja za [120]

¹⁾ źródło: Japan Patents Office

²⁾ Firma Nohmura Tent Company została zniszczona zupełnie podczas bombardowania na początku 1945 r. została odtworzona w sierpniu 1946 r. przez starszego syna Nohmury – Ryotaro jako zakład szwalniczy. W 1947 r. zmieniła nazwę na Taiyo Kogyo Co. Ltd. (po polsku „słoneczne przedsiębiorstwo”). Stopniowo firma zmieniła profil zajmując się budownictwem. Od 1955 r. wydzielono jej część jako Taiyo Tent. W 1967 r. otwarte zostały zakłady w Hirakata, zajmujące się opracowywaniem i produkcją dużych konstrukcji membranowych. W 1970 firma była wykonawcą wielu z zaprezentowanych na EXPO 70 w Osace nowatorskich konstrukcji z tkanin. W 1973 przejmuje amerykańską firmę Holcombe (obecnie Helios), a w 1989 – 52.5 % akcji firmy Birdair, stając się czołowym światowym wykonawcą konstrukcji z tkanin.

Konstrukcje pneumatyczne otwarte | Pierwszy pomysł obiektu pneumatycznego typu otwartego przedstawił w 1917 r. angielski inżynier Frederick William Lanchester jako „udoskonaloną konstrukcję namiotu dla szpitali polowych, magazynów i podobnych zastosowań”. Był to pneumatyczny budynek cylindryczny, ze sferycznymi zakończeniami, zawierający wszystkie elementy współczesnej konstrukcji pneumatycznej – powłokę, elementy kotwiące w gruncie, śluzę wejściową oraz instalację nadmuchową. Co więcej, Lanchester zaproponował zastosowanie dodatkowych lin wzmacniających – ten pomysł został zrealizowany znacznie później, po wielu latach rozwoju i stosowania konstrukcji pneumatycznych i jest współcześnie stosowany w przekryciach pneumatycznych o znacznych rozpiętościach. Lanchester uzyskał w 1917 r. patent angielski nr 119 339. W rozwiązaniu tym można dostrzec wyraźne inspiracje techniką balonową. Autor opisuje swój wynalazek jako „...namiot, w którym tkanina balonowa lub inny materiał o niskiej przepuszczalności powietrza jest zastosowany i utrzymywany w stanie wzniesionym dzięki ciśnieniu powietrza”. Nie jest to jednakże „odpowiednio zakotwiony balon typu lotniczego” jak podają niektóre źródła [208]. Według Lanchestera, jego „...wynalazek może być odpowiednio zaprojektowany jako wycinek sfery lub walca”. I dalej: „...prostokątne płyty tkaniny balonowej, odpowiednio wzmocnionej taśmami, linami lub siatkami, są zakotwione do gruntu”, rys. 2.95. Z uwagi na brak w tym czasie materiałów o odpowiedniej trwałości, a może także ze względu na mniejsze zainteresowanie takim rozwiązaniem po zakończeniu wojny, rozwiązanie to nie zostało zrealizowane i – podobnie jak projekt Sumowskiego – zostało zapomniane.

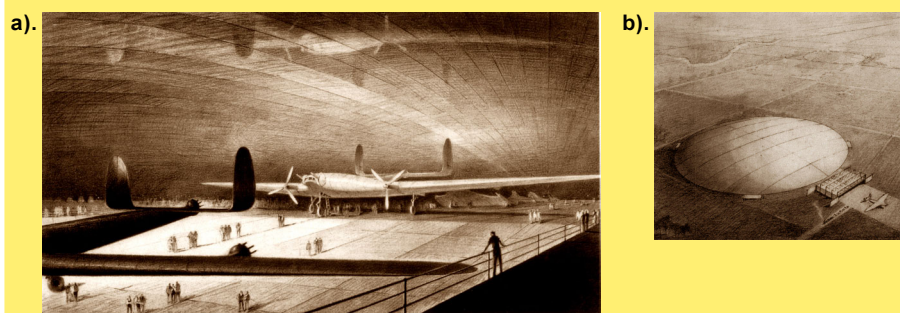


Rys. 2.95¹⁾ – faksymile patentu F.W. Lanchestera uzyskanego w roku 1917 w Anglii (patent nr 119 339). Rozwiązanie zawierało wszystkie charakterystyczne rozwiązania cechujące współczesne konstrukcje pneumatyczne. Pierwszy udokumentowany opis konstrukcji pneumatycznej typu otwartego.

W 1938 r. F.W. Lanchester opublikował projekt pneumatycznej kopuły o średnicy 330 m, rozpiętej nad budynkiem podstawy o rzucie kwadratowym. W konstrukcji kopuły przewidziane zostały poziome pierścieniowe liny wzmacniające, zamiast bardziej potrzebnych liny południkowych. Również ten projekt nie został zrealizowany.

¹⁾ źródło: Patents Information Unit, Leeds, Wlk. Brytania

Następny projekt budynku pneumatycznego powstał w 1942 r. dzięki Amerykaninowi Herbertowi H. Stevensowi. Idąc za pomysłem Lanchestera, opracował on projekt hangaru lotniczego. Zamiast tkaniny, do wykonania powłoki zaproponował on zastosowanie cienkiej blachy stalowej grubości zaledwie 1.19 mm (3/64 cala), w arkuszach o szerokości 228 cm (90 cali), łączonych poprzez spawanie elektryczne. Powierzchnia powłoki stanowiła bardzo płaski wycinek sfery o średnicy 365.8 m (1 200 stóp). Tak płaska, chociaż znacznie mniejsza, konstrukcja pneumatyczna zostanie zrealizowana dopiero w 1970 r.¹⁾ Stevens, wraz ze swym współpracownikiem Alem Bushem, zaprezentował swój pomysł amerykańskiemu War Production Board, a następnie – na wykładzie w Architectural League of New York, w 1943 r., rys. 2.96. Pomysł metalowej konstrukcji pneumatycznej powróci, i zostanie zrealizowany w latach 70. XX w.²⁾



Rys. 2.96²⁾ – projekt hangaru lotniczego o konstrukcji pneumatycznej z blach stalowych, opracowany przez H.H. Stevensa, w 1942 r.:

a). widok wnętrza
b). widok obiektu z góry

Ilustracja za [82].

Charakterystyczne jest, że zarówno pierwszy projekt Lanchestera jak i projekt Stevensa powstały w okresie wojny (odpowiednio w 1917 i 1942 roku). Obydwa miały przeznaczenie wojskowe: szpitale polowe i hangary lotnicze oraz charakteryzowały się właściwą tylko konstrukcjom pneumatycznym, cenną w owym czasie możliwością szybkiego montażu. W obu projektach widać chęć ich autorów przyczynienia się do wysiłku wojennego ich krajów. Żaden z tych projektów nie był zastosowany w praktyce i zostały one po prostu zapomniane.

Konstrukcje pneumatyczne jako deskowania dla żelbetu | Już w latach 30. XX w., w Hiszpanii, zastosowano pneumatyczne rury, jako elementy deskowania przy wykonywaniu betonowych rurociągów kanalizacyjnych. Później, rozwiązanie takie było często stosowane, rys. 2.98.

Kalifornijski architekt Wallace Neff³⁾, wpadł na pomysł zastosowania tej techniki do wykonywania budynków mieszkalnych. Po sześciu latach prób, w okresie 1934-1941, opracował odpowiednie rozwiązanie i uzyskał na nie w dniu 20 stycznia 1942 r. amerykański patent nr 2270229, rys. 2.97.a). Był to tzw. Airform House lub Airhouse. Pierwszy próbny obiekt wykonany został już w roku następnym, 1942. Był to budynek o średnicy ok. 42 m. Łącznie wykonano do dzisiaj w tej technologii na całym świecie ok. 1200 budynków o różnej wielkości, rys. 2.97 [110].



Rys. 2.97 – eksperymentalny budynek żelbetowy (Experimental Dome House) wg projektu W. Neffa, wykonany na deskowaniu pneumatycznym, w 1946 r., w Pasadenie. Stan obecny.

Ilustracja za [233].

¹⁾ Był to pawilon amerykański na EXPO 70 w Osace

²⁾ Niskoprofilowe przekrycie pneumatyczne z blachy nierdzewnej wykonano w 1978 r. dla hali sportowej uniwersytetu Dalhousie w Halifax (Kanada), wg proj. inż. D.A. Sinoskiego [41]. W latach siedemdziesiątych XX w. prowadzono też prace nad zastosowaniami pneumatycznych konstrukcji zamkniętych, swego rodzaju poduszek z blachy [101] [149].

³⁾ Wallace Neff (1895-1982) jest uważany za czołowego przedstawiciela architektury kalifornijskiego „złotego wieku” – lat dwudziestych i trzydziestych, XX w. Nieliczne z zachowanych rezydencji, które projektował, są dziś uważane za dziedzictwo kultury i osiągają niezwykle wysokie ceny.

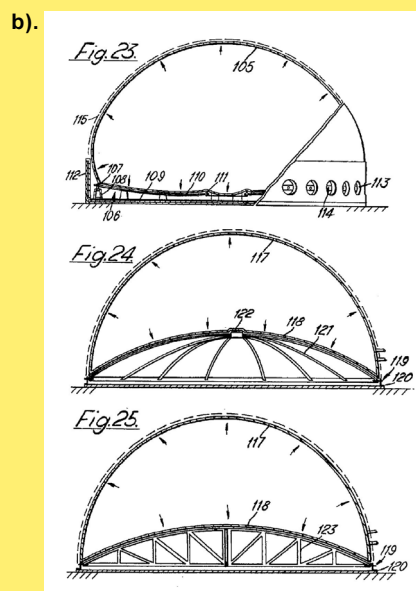
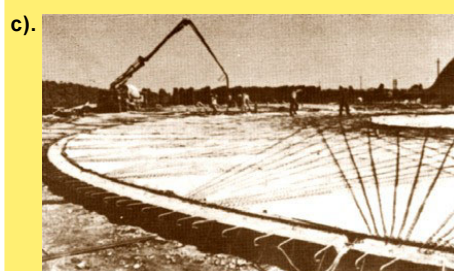
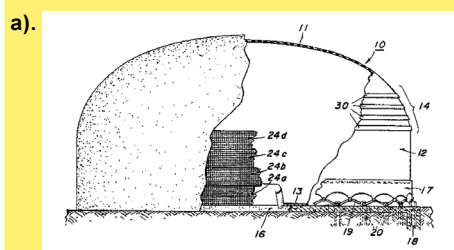
Airhouse Neffa był budynkiem o walcowych ścianach, przykrytych wycinkiem sfery. Wykonywany był poprzez układanie betonu na powierzchni odpowiednio ukształtowanej powłoki pneumatycznej, wykonanej z tkaniny nylonowej impregnowanej neoprenem, rys. 2.99.a). Po związaniu betonu, wypompowywano powietrze z wnętrza powłoki, a następnie usuwano ją samą. Sposób układania betonu był jednak niezbyt wygodny i wymagał użycia rozbudowanych rusztowań.

Niedogodności te wyeliminowane zostały w rozwiązaniu opracowanym w 1965 r. przez włoskiego inżyniera Dante Bini, tzw. Binishells.



Rys. 2.98 – pneumatyczny element deskowania rurociągów betonowych, wykonywanych in situ, stosowany współcześnie. Produkt firmy Noe (Francja).

Ilustracja za [112].



Rys. 2.99 – wykonywanie kopuł żelbetowych na konstrukcji pneumatycznej stanowiącej deskowanie:

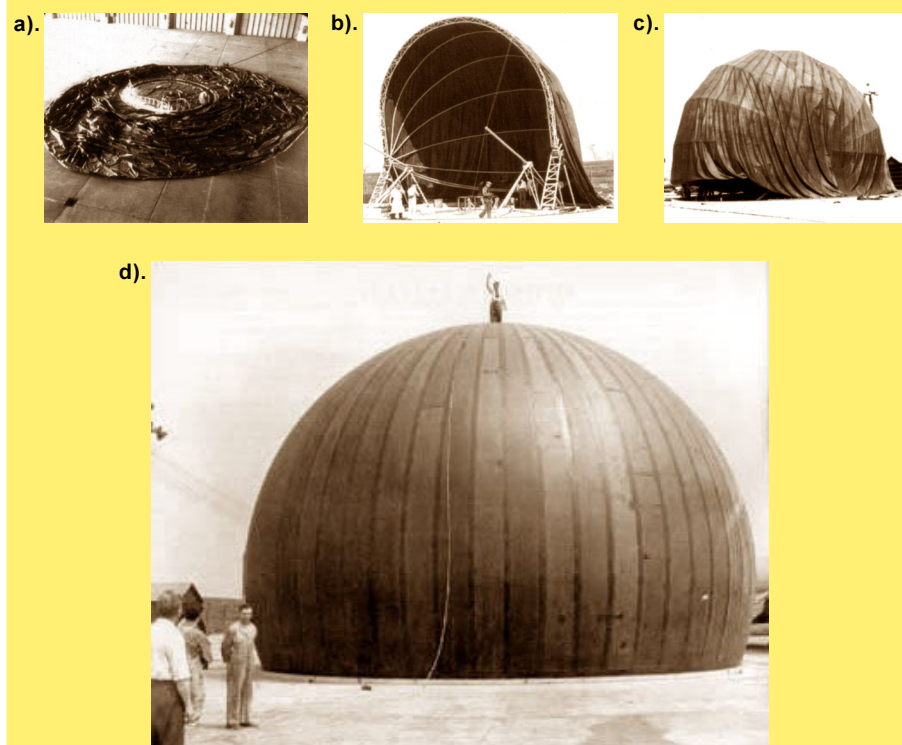
- schematy wykonania kopuły W. Neffa. Rysunek wg patentu amerykańskiego nr 2270229
- schemat wykonywania kopuły żelbetowej w technologii Domecrete Heifetza. Rysunek wg patentu brytyjskiego nr 1242647
- wykonywanie kopuły żelbetowej w technologii Binishell – faza betonowania przed wypiętrzeniem. Ilustracja za [110]

Ogólna zasada była taka sama – beton jest formowany na powłoce pneumatycznej. Jednak Bini zaproponował układanie betonu na powierzchni powłoki przed wypełnieniem jej powietrzem, w pozycji „płaskiej”, rys. 2.99.c). Następnie, po wypiętrzeniu i związaniu betonu, obiekt był gotowy. Zbrojenie w kopułach Binishells jest wykonywane ze spiralnie ukształtowanych prętów, aby możliwe było ich wydłużenie podczas wypiętrzenia.

Izraelski inżynier Haim Heifetz, w 1969 r. opracował system Domecrete. W konstrukcji jego pomysłu beton jest natryskiwany na zewnętrzną powierzchnię deskowania pneumatycznego. Beton jest nakładany warstwami, a w trakcie tej czynności umieszczane są w ścianie instalacje, obramowania okien itd. Heifetz wyeliminował ciężkie elementy brzegowe, kotwiące powłokę, poprzez pomyślowe zastosowanie promieniście rozmieszczonych kratownic, dociążonych brzegowym rękawem wodnym, rys. 2.99.b). Problemy Neffa z „zapadaniem się” środkowej części deskowania pod ciężarem betonu, wyeliminowane zostały poprzez zwiększenie ciśnienia wewnątrz powłoki ($1.0 \div 10.0 \text{ kN/m}^2$).

Ogółem opracowano jeszcze kilka systemów wykonywania powłok żelbetowych na deskowaniu pneumatycznym¹⁾. Do chwili obecnej wykonano na świecie w tej technologii ponad 44 tys. obiektów, z tego ok. 40 tys. w systemie Domecret, ok. 1.2 tys. w systemie Neffa i ponad 1.6 tys. w systemie Binishell.

¹⁾ Np. francuski system PIRS [110].



Rys. 2.100 – pierwsza, prototypowa, pneumatyczna osłona radaru zrealizowana w 1948 r.:

- a). próbne rozłożenie powłoki
- b). i c). fazy rozkładania tkaniny
- a). konstrukcja po zakończeniu montażu. Na szczycie stoi autor rozwiązania – W. Bird.

Ilustracje za [82]

2.2.2.3. Początki współczesnych konstrukcji pneumatycznych

Pierwsze konstrukcje Waltera Birda | Pierwszy w świecie, rzeczywisty budowlany obiekt pneumatyczny był budowlą typu otwartego. Pełnił on rolę osłony anteny radiolokacyjnej. Obiekt ten miał kształt kopuły sferycznej o średnicy 15.25 m i wysokości 12.2 m. Obiekt został zrealizowany przez Waltera Birda w 1948 r.

Konstrukcja powstała w wyniku prac nad cienkimi, niemetalicznymi, odpornymi na warunki atmosferyczne osłonami, przeznaczonymi dla nowych systemów radarowych opracowanych w USA pod koniec II wojny światowej. Prace te rozpoczął w 1946 r. Walter Bird, zastępca kierownika Działu Rozwoju w Cornell Aeronautical Laboratory w Buffalo, w stanie Nowy Jork ¹⁾. Aby sprostać wymaganiom eksploatacyjnym postawionym przez armię, kopuła powinna być odporna na działanie wiatru o prędkości do 200 km/h i dużych obciążeń śniegiem. Żadna dodatkowa konstrukcja wsporcza nie była dopuszczalna, gdyż mogło to spowodować zakłócenia w pracy radarów.

Pracując nad nowym rozwiązaniem W. Bird nie wiedział o wcześniejszych projektach budowli pneumatycznych. Będąc z wykształcenia inżynierem lotnictwa poszukiwał rozwiązań w dziedzinie sobie najbliższej, dochodząc niezależnie do tych samych rezultatów co jego poprzednicy, a następnie – nie zaprzestając prac badawczych – doprowadził do wdrożenia ich wyników.

Badania modeli pneumatycznych wykonanych w mniejszej skali w tunelu aerodynamicznym wykazały, że stabilność konstrukcji może być osiągnięta dzięki wstępnemu naprężeniu wytrzymałej powłoki o kształcie kulistym poprzez utrzymywanie w jej wnętrzu relatywnie niedużego nadciśnienia, rzędu 0.45 kPa. Ponieważ rezultaty tych badań były zachęcające, podpisano z Laboratorium umowę na wykonanie prototypu. Pełnowymiarowy prototyp osłony był wykonany i został zmontowany w 1948 r., rys. 2.100.

Wyjątkowo duże zalety eksploatacyjne tej pierwszej osłony pneumatycznej, a przede wszystkim mały koszt i łatwość realizacji w odległych, trudno dostępnych miejscach, spowodowały że szybko zdecydowano o jej zastosowaniu w instalacjach radarowych na północy USA i w Kanadzie. Dzięki tym obiektom powstała nowa dziedzina budownictwa.

¹⁾ Z Walterem Birdem współpracował jego szef, Ed Dye.

Przez pewien czas rozwiązanie to było tajne, ale kiedy na początku lat pięćdziesiątych XX w. powstało już ponad sto takich obiektów wzdłuż północnej granicy Stanów Zjednoczonych, ukrywanie ich stało się niemożliwe, rys. 2.102.

Pierwsze konstrukcje pneumatyczne – osłony radarów zostały nazwane radom od słów: radar i dome (ang. kopuła).

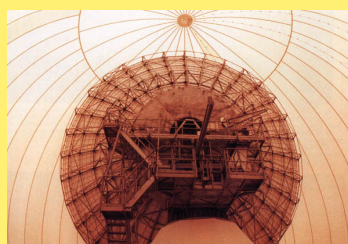
Istotnym elementem konstrukcji powłok tych obiektów jest zastosowanie odpowiedniego materiału, który – posiadając wymaganą trwałość i zalety eksploatacyjne, takie jak odporność na czynniki atmosferyczne, niepalność, łatwość utrzymania w czystości, własności hydrofobowe (woda i lód mogą zakłócać działanie radaru) – nie stanowiłoby przeszkody dla promieniowania wykorzystywanego w osłanianych urządzeniach.

Przykładem takiego materiału jest RAYDEL® produkowany przez koncern Chemfab. Jest to cała rodzina materiałów na bazie włókien szklanych i PTFE (teflon) o parametrach dostosowanych do wykonywania kopuł o różnej wielkości, przeznaczonych do wielokrotnego montażu i demontażu etc. Cechują go m.in. niskie wartości statycznych dielektrycznych.



Rys. 2.101 – powłoka pneumatyczna W. Birda, zastosowana w stacji badawczej kierowanych pocisków rakietowych

Ilustracja za [82]



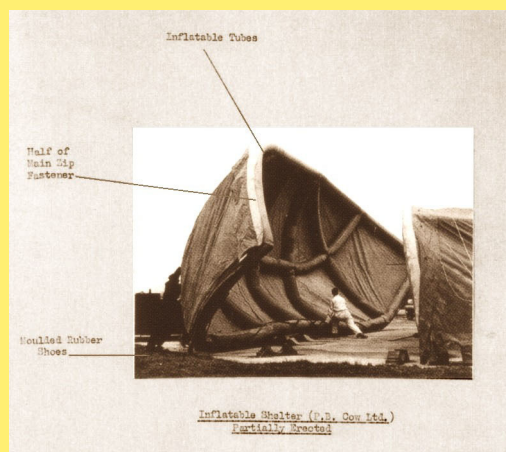
Rys. 2.102 – widok ogólny i wnętrza konstrukcji pneumatycznych osłon instalacji radarowych (radom). Stacja w Raisting w Niemczech (1963 r.)

Ilustracja za [233]

Przez około dziesięć lat początkowego rozwoju prace nad konstrukcjami pneumatycznymi skupiały się na wyprodukowaniu najodpowiedniejszych materiałów i na wdrożeniu tych konstrukcji dla potrzeb wojska, rys. 2.101. Kiedy w wyniku gromadzonych doświadczeń utwierdzono się w przekonaniu, że konstrukcje pneumatyczne reprezentują najefektywniejszą formę konstrukcyjną, dogodną dla uzyskiwania dużych, wolnych od podpór obiektów – zajmujący się nimi zespół zaczął pracować nad rozszerzeniem zakresu ich zastosowań również na inne obszary, takie jak wykonywanie obiektów magazynowych i sportowo-rekreacyjnych.

W roku 1956 Bird wraz z czterema kolegami założył firmę „Birdair Structures Inc.”, której zadaniem miało być doprowadzenie do zastosowania komercyjnego w architekturze i budownictwie konstrukcji pneumatycznych oraz dalsza kontynuacja prac badawczych dla celów wojskowych. Jako pierwszy został wykonany niewielki magazyn. Realizacja ta miała wykazać potencjalne możliwości takiego przenośnego obiektu do przechowywania różnych zapasów, uwypuklając jego główne zalety: pełną ochronę przed warunkami atmosferycznymi, łatwy i szybki montaż bezpośrednio na gruncie, – a co za tym idzie – ograniczenie nakładów na transport i eksploatację. Wkrótce potem zespół ten przedstawił konstrukcję chroniącą otwarty basen pływacki, umożliwiającą jego całoroczną eksploatację.

Przedsięwzięcie okazało się dochodowe i od razu pojawiło się wiele firm konkurencyjnych. Na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX wieku w USA istniało już około pięćdziesięciu podobnych firm. Wiele z nich nie wytrzymało konkurencji i przestało istnieć. Większość z firm podejmujących działalność w tej nowej dziedzinie budownictwa nie dysponowała początkowo doświadczeniem porównywalnym z doświadczeniem Birda i popełniały one szereg błędów technicznych. Przykładem może być niepowodzenie projektu osłon pneumatycznych zaprojektowanych dla RAF, rys. 2.103. Jedynie te firmy, które nie dały się zwieść pozornej łatwości wykonywania budynków pneumatycznych i rzetelnie podeszły do problemu, zdołały przetrwać na rynku.



Rys. 2.103 – próbny montaż dwuczęściowej osłony dla małej wyrzutni rakiet, opracowanej dla RAF, w 1960 r. – dwanaście lat po udanej próbie prototypu W. Birda. Błędy techniczne spowodowały, że konstrukcji nie udało się ustawić, pomimo wysiłków czterastoosobowego zespołu. Projekt ostatecznie zarzucono.

Ilustracja za [222]

Pierwsze reakcje projektantów | We wczesnym okresie rozwoju konstrukcji pneumatycznych niewielu architektów przejawiało zainteresowanie tym nowym rodzajem konstrukcji, wykorzystującym rozwiązania inżynierskie i materiały nie występujące w przyrodzie do wykonywania budynków. Konstrukcje pneumatyczne były wówczas stosowane przede wszystkim do wykonywania obiektów wojskowych, a w budownictwie cywilnym realizowano proste, jednoprzestrzenne budynki halowe. Stosowane wówczas typowe formy oceniano jako nie dające się do szerszego zastosowania w budownictwie. Nie rozpoznano również jeszcze możliwości przekrywania dużych rozpiętości dla potrzeb wypoczynku i sportu, co później stało się jedną z ważniejszych dziedzin stosowania budowl pneumatycznych.

W odróżnieniu od architektów i inżynierów budowlanych, którzy przejawiali niewielkie zainteresowanie konstrukcjami pneumatycznymi i nie mieli doświadczenia ani kwalifikacji technicznych do ich projektowania – producenci wyrobów stosowanych do wykonywania tych konstrukcji wykazywali duży entuzjazm i aktywność w ich promowaniu. Oni też byli animatorami większości działań w początkowym okresie.

Grupa ludzi, którzy rozpoczęli prace nad konstrukcjami pneumatycznymi była przekonana, że konstrukcje z tkanin, a szczególnie konstrukcje pneumatyczne mają ogromne potencjalne możliwości zastosowania w budownictwie, zwłaszcza w dziedzinie obiektów o dużych rozpiętościach. Chociaż w tym okresie istniały warunki dla zademonstrowania możliwości tych konstrukcji w zastosowaniu do dużych kopuł osłonowych dla anten radiolokacyjnych – wiadano, że kluczowe jest zdobycie zainteresowania architektów i inżynierów dla wykorzystania zasady „podpierania powietrzem” powłoki zewnętrznej. Walter Bird występował z tego powodu często z wykładami w stowarzyszeniach zawodowych oraz na sympozjach.

Oczekiwana przez wynalazców i producentów konstrukcji pneumatycznych możliwość współpracy z architektami i inżynierami pojawiła się jednak przy okazji opracowywania obiektów wystawowych na targach i ekspozycjach. Tutaj to oni byli istotnie zainteresowani powstaniem czegoś nowego i niezwykłego, co zwróciłoby powszechną uwagę. Byli też mniej niż zazwyczaj związani ograniczeniami i wymaganiami formalnymi, a często i finansowymi. Oprócz tego, jeżeli zakładano, że budynki będą wykorzystywane przez rok lub dwa, trwałość materiału nie miała istotnego znaczenia. Wystaw objazdowych organizowano wówczas niezmiernie dużo i łatwość transportowania oraz prostota wznoszenia były ważnymi zaletami. Prestiżowe wystawy światowe stworzyły możliwość zademonstrowania wszechstronności konstrukcji z tkanin [120].

Ciekawym przykładem obiektu z tego okresu jest budynek teatru letniego w Bostonie, którego dach stanowiła zamknięta, soczewkowa poduszka pneumatyczna o średnicy 43 m, wykonana z PVC, a ściany boczne były wykonane z tkaniny, rys. 2.104. Była to pierwsza zrealizowana konstrukcja tego typu (1959 r.). Zaprojektowano ją jako obiekt sezonowy, ustawiany wiosną i składany jesienią. Niestety przetrwała tylko jeden sezon, gdyż sztorm, który zaatakował Boston, zniszczył ją [136] [20].



Rys. 2.104 – budynek letniego teatru w Bostonie (Boston Tent Theatre), wybudowany w 1959 r.:

- a). podnoszenie poduszki dachowej
Ilustracja za [136]
b). widok obiektu po zakończeniu montażu poduszki dachowej
Ilustracja za [136]
c). widok ogólny po zakończeniu budowy
Ilustracja za [20]

Początki rozwoju w Europie | Europa została w tyle za Stanami Zjednoczonymi w dziedzinie budownictwa pneumatycznego i pierwszym budynkiem pneumatycznym który tu powstał był wykonany w 1958 r. przez amerykańską firmę Irving pawilon wystawowy towarzystwa lotniczego PANAM na brukselskiej Wystawie Światowej 1958 r., rys. 2.105.

W latach 50-tych wzniesiono pierwsze konstrukcje z miękkich powłok stabilizowanych powietrzem w RFN. Były to konstrukcje tymczasowe, przypominające zwykłe namioty targowe. W 1962 r. Frei Otto opublikował pierwszy tom swojej książki o konstrukcjach pneumatycznych [158], w którym przeanalizował możliwości wznoszenia budynków ze stabilizowanych powietrzem miękkich powłok, wychodząc od takich form naturalnych jak bańki mydlane. Jego idee były podchwyczone przez wielu w latach 60-tych i przyczyniły się do ogromnego sukcesu konstrukcji pneumatycznych w późniejszych latach.

W ślad za tym, w wielu krajach europejskich, a także w Japonii rozpoczęło się intensywne „oswajanie” budowli pneumatycznych. Specjalistyczne firmy powstały praktycznie we wszystkich rozwiniętych technicznie krajach.

W konkursie SARP z 1956 r., na projekt polskiego pawilonu na wystawę światową w Brukseli, drugie miejsce zajął projekt Z. i T. Janowskich oraz A. Tarczewskiego, przewidujący wybudowanie kilku dużych obiektów o konstrukcji pneumatycznej, zarówno otwartej jak i zamkniętej. Gdyby został zrealizowany, były by to pierwsze europejskie konstrukcje pneumatyczne [208].



Rys. 2.105 – pawilon linii lotniczych PANAM, na Wystawie Światowej w Brukseli, w 1958 r. Powłoka pneumatyczna została wykonana w formie globusa, z zaznaczonymi połączeniami obsługiwanymi przez linie PANAM.

Ilustracja za [233]

2.2.2.4. Rozwój konstrukcji pneumatycznych do połowy lat 70. XX w.

Targi światowe w Nowym Jorku, 1963-64 | Targi w Nowym Jorku stały się okazją do pokazania konstrukcji pneumatycznych w niespotykanym wcześniej zagęszczeniu. Sama firma Birdair wykonała na tych targach aż czternaście obiektów. Stały się one też okazją do zaprezentowania właściwej konstrukcji pneumatycznej możliwości uzyskiwania niezwykle kształtów, które trudno byłoby uzyskać w innych rodzajach konstrukcji. Przykładem takiego obiektu jest restauracja Brass Rail, której dach tworzył pęk kulistych powłok, ułożonych w kształcie odwróconej kiści winogron. Dach ten był podnoszony i opuszczany, a w nocy – iluminowany, rys. 2.106.



Rys. 2.106 – restauracja Brass Rail, na Targach Światowych 1963-64, w Nowym Jorku.

Ilustracja za [59].

Expo 70 w Osace | Kiedy na EXPO 70, w Osace, przedstawiono wielką ilość najróżniejszych konstrukcji pneumatycznych otwartych i zamkniętych, rys. 2.107, świat był już gotowy na ich przyjęcie. Już od kilku lat panowała moda na stosowanie „pneumatyków” wszędzie, gdzie tylko jest to możliwe: w meblach, dekoracjach, a nawet strojach [222]. Stąd nowe możliwości otwierające się w budownictwie powitano z entuzjazmem i wielkim optymizmem.

Szczególny sukces odniósł pawilon amerykański, którego konstrukcję zaprojektował David Geiger. Było to pierwsze niskoprofilowe, tzn. bardzo płaskie, przekrycie pneumatyczne, wzmocnione krzyżowo umieszczonymi linami, rys. 2.107.b). Rozwiązanie to zwróciło ogromną uwagę na całym świecie, demonstrując zdolność powłok pneumatycznych do przekrywania dużych rozpiętości. Powodzenie pawilonu doprowadziło do opracowania nowych materiałów tekstylnych i rozwiązań projektowych obiektów membranowych, pozwalających wykonywać stałe budowle tego typu na całym świecie ¹⁾.



Rys. 2.107 – obiekty pneumatyczne na Wystawie EXPO 70, w Osace, w 1970 r.
a). pawilon grupy Fuji
b). pawilon amerykański
c). podnoszone balony w kształcie grzybów – osłony przeciwsłoneczne

Ilustracje za [23].

¹⁾ Sfera zastosowań konstrukcji pneumatycznych została jednak zawężona przede wszystkim do obiektów użyteczności publicznej. Thomas Herzog zauważył przy tej okazji, że architektura, jak już nie raz bywało w okresie po pierwszej rewolucji przemysłowej, znów na jakiś czas została w tyle za rozwojem nowych idei technicznych [112].

Konferencje naukowe | W połowie lat sześćdziesiątych XX w., ilość osób zainteresowanych i zaangażowanych w rozwój budownictwa pneumatycznego była już tak duża, a ilość zgromadzonych doświadczeń tak narosła, że pojawiła się potrzeba stworzenia forum wymiany wiedzy. Pierwsza duża konferencja naukowa na temat konstrukcji pneumatycznych została zorganizowana w 1967 r. w Stuttgarcie. Kolejne odbywały się cyklicznie, pod auspicjami IASS¹⁾.

Po konferencji w Delft, w Holandii, w 1972 r., która zgromadziła wielką ilość specjalistów i pokazała wielkie zainteresowanie całego świata konstrukcjami pneumatycznymi, w krajach niemieckojęzycznych powstała idea aby uogólnić całą dotychczas zgromadzoną wiedzę w tym zakresie, tak by wprowadzić konstrukcje – wcześniej uważane za unikalne – do grona „zwykłych” obiektów. Jednym ze środków prowadzących do tego było opracowanie akceptowanych standardów projektowania i wykonywania konstrukcji pneumatycznych

Pierwsze uregulowania normalizacyjne | Z chwilą, kiedy pierwsze konstrukcje pneumatyczne zyskały szeroki rozgłos, zwróciło to uwagę firm zajmujących się dotychczas tkaninami i produkujących głównie namioty, markizy itp. Jednakże, z braku doświadczenia i wykwalifikowanego personelu inżynierskiego, wiele z wykonanych przez te firmy obiektów było źle zaprojektowanych i wykonanych oraz niedogodnych w eksploatacji. W tym okresie nie istniały normy dotyczące takich konstrukcji.

W celu ustanowienia minimalnych choćby standardów wykonywania konstrukcji pneumatycznych, powołano stowarzyszenie Air Structures Manufacturing and Suppliers Association (ASMSA), która opracowała i wydała zalecane minimalne standardy wymagań projektowych i eksploatacyjnych dla tych konstrukcji. Standardy te były wykorzystywane jako podstawa dla przepisów budowlanych w wielu stanach USA. W związku z niewielką skalą rodzącego się dopiero przemysłu, stowarzyszenie zostało później rozwiązane i zastąpione przez Air Structures Institute.

W 1974 r., IASS powołało grupę roboczą nr 7, pod przewodnictwem wybitnego japońskiego projektanta, Yoshikatsu Tsuboi, w celu opracowania wszechstronnych zaleceń dla konstrukcji pneumatycznych. Po wielu latach pracy, w 1985 r., zalecenia te wydano pod tytułem „Recommendations for air-supported structures” [223]. Równolegle, w niektórych krajach wydawano krajowe przepisy normalizacyjne (Wielka Brytania, RFN, NRD, Włochy, ZSRR, Kanada, USA, Japonia).

Pierwszy kryzys | „Huragan stulecia”²⁾, który przeszedł w 1972 r. nad Europą Zachodnią, powodując wiele zniszczeń również wśród obiektów pneumatycznych, nie wpłynął na zapal entuzjastów tych konstrukcji. Po jego przejściu liczba zamówień na powłoki pneumatyczne nie tylko nie zmniejszyła się ale być może nawet wzrosła. Dokładna ocena ilościowa nie jest możliwa, gdyż trudno określić jaka część nowych zamówień przeznaczona była na odbudowę zniszczonych obiektów, a jaka na wykonanie nowych [67].

Wiele z występujących w początkowym okresie rozwoju konstrukcji pneumatycznych awarii powłok było spowodowanych istotnym naruszeniem zasad eksploatacji. Było to zwłaszcza utrzymywanie zbyt małego ciśnienia wewnętrznego, nieprawidłowe składowanie materiałów (np. umieszczenia ich zbyt blisko powłoki) lub brak rezerwowych wentylatorów, przy niedostatecznej kontroli pracy wentylatorów podstawowych.

Jednakże ocenia się, że nawet pomimo tego, iż obecnie konstrukcje pneumatyczne są bardziej umiejętnie projektowane i eksploatowane, niż 20 – 30 lat temu, to ich popularność nie osiągnie już wysokiego poziomu z lat 60-tych i początku lat 70-tych, kiedy moda na nie osiągnęła swój szczyt, i były one wyznacznikiem nowoczesności, nie tylko w budownictwie [67] [222].

¹⁾ International Association for Shell and Spatial Structures - międzynarodowe stowarzyszenie inżynierów, z siedzibą w Madrycie, założone przez E. Torroję

²⁾ Chodzi o wyjątkowo silny i tragiczny w skutkach huragan, który nawiedził Europę Zachodnią w dniu 13 listopada 1972 r.

Relacje polskiej prasy na temat „huraganu stulecia” w 1972 r.:

„Życie Warszawy” 14 listopada 1972 (wtorek), nr 272 (9044), str. 1

„Niespotykana w sile wichura nawiedziła 13 bm. w godzinach popołudniowych Europę. [...] Od pół wieku stary kontynent nie przeżył takiego kataklizmu, jak wczorajszy huragan. Szybkość wiatru w porywach dochodziła do 200 km/h. Szalejąca przez kilkanaście godzin wichura powaliła w Europie zachodniej i północnej setki domów. Śmierć w powalonych domach znalazło ponad 50 osób. Huragan przewracał samochody, wyrwał drzewa i słupy telegraficzne, zrywał cumy statków zakotwiczonych u nabrzeży portowych, łamał dźwigi portowe, zatapiał mniejsze jednostki [...].”

„Życie Warszawy” 15 listopada 1972 (środa), nr 273 (9045), str. 1

„Huragan ucichł. Europa zachodnia i północna dokonała pierwszych podsumowań klęski żywiołowej. Statystyka jest tragiczna: blisko 100 zabitych i kilkaset ciężko rannych. Straty materialne szacuje się na kilkaset milionów dolarów. Najbardziej ucierpiało NRF: 29 zabitych, ponad 500 rannych. Kilkanaście budynków zawaliło się nawet w takich miastach jak Hanower, Brem, Kolonia [...]”

W dniu 13.11.1972. na stacji Wrocław Strachowice (lotnisko) zanotowano (dane uzyskane w IMGW Wrocław 24.03.2003):

- średnia prędkość wiatru 19 m/s, kierunek półn.-zach. + zach.
- prędkość wiatru w porywach:

16:25 GMT – 31 m/s,

16:49 GMT – 31 m/s,

17:20 GMT – 30 m/s,

18:00 GMT – 30 m/s,

18:45 GMT – 30 m/s,

19:12 GMT – 30 m/s,

- wzmożone porywy wiatru rozpoczęły się od ok. godz. 10 rano 13.11.1972., a zakończyły nad ranem 14.11.1972.

Podstawowej przyczyny takiej zmiany koniunktury należy szukać we wzroście ceny energii¹⁾. Chodzi tu nie tyle o zapewnienie ciśnienia wewnętrznego, co o jej zapotrzebowanie do zapewnienia określonej temperatury w pomieszczeniach, niezbędnej np. w basenach i salach sportowych. Znaczenie tego problemu doprowadziło już w końcu lat 70-tych do pojawienia się powłok wielowarstwowych i zastosowania w powłokach jednowarstwowych specjalnych warstw ocieplających, podwieszanych do powłok lub układanych na nich od góry. Taki wzrost dbałości o zużycie energii dotyczył to zresztą nie tylko konstrukcji pneumatycznych. Jednakże, jeśli mówić tylko o powłokach pneumatycznych, to dla nich oprócz kosztów wniesienia istotne znaczenie mają również ponoszone corocznie koszty eksploatacji. Dlatego wzrost cen energii często niesie ze sobą zmiany w rozwiązaniach konstrukcyjnych powłok.

Z drugiej strony, obecnie na rynku pojawiają się najróżnorodniejsze materiały do wykonywania miękkich powłok. Jednocześnie usuwane są rozpoznane wady, właściwe tkaninom, poszukuje się ich optymalnych kombinacji oraz znacznie rozszerza się zakres zastosowań materiałów.

Liczne małogabarytowe obiekty, które kiedyś były wykonywane na indywidualne zamówienie, obecnie są standaryzowane i seryjnie produkowane „na skład”. Równocześnie zachodzą zmiany w strukturze firm produkujących konstrukcje pneumatyczne: zaczynają się one specjalizować w produkcji określonego rodzaju wyrobów albo stają się wieloprofilowe. Z punktu widzenia produkcji konstrukcje pneumatyczne mają wiele wspólnego z konstrukcjami namiotowymi. Dlatego trudno ocenić obecną sytuację w dziedzinie konstrukcji pneumatycznych we wszystkich jej aspektach, w oderwaniu od ogólnej problematyki rozwijania miękkich powłok [67].

¹⁾ W latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, miały miejsce dwa duże kryzysy energetyczne. Pierwszy nastąpił w 1973 r., gdy kraje należące do OPEC, ogłosiły embargo na dostawy ropy naftowej, a drugi – w pięć lat później, po wybuchu rewolucji islamskiej w Iranie. Obydwa spowodowały ogromny wzrost cen energii i – co za tym idzie – kosztów ogrzewania. W znaczący sposób wpłynęło to na ocenę efektywności stosowania konstrukcji pneumatycznych.

2.2.3. Współzależność rozwoju konstrukcji namiotowych i pneumatycznych

Uwagi ogólne | Rozdzielenie historii rozwoju konstrukcji namiotowych oraz pneumatycznych nie powinno stwarzać wrażenia, że rozwijały się one w pełni niezależnie od siebie. W istocie rzeczy obydwa rodzaje konstrukcji rozwijały się jednocześnie, równolegle i bardzo często te same instytucje badawcze, biura projektowe i firmy specjalistyczne zajmowały się obydwooma rodzajami konstrukcji. Jest to bardzo istotne, przy rozpatrywaniu współzależności ich rozwoju. Pomijając podstawowe różnice w sposobie podparcia membrany, można stwierdzić, że ogólne zasady, stosowane materiały oraz problemy teoretyczno-obliczeniowe są bardzo często wspólne dla obu rodzajów konstrukcji. Pomysły konstrukcyjne, czy sposoby obliczeń opracowane dla jednej z nich, bardzo szybko były przenoszone na drugą. Podobnie było z pojawiającymi się nowymi materiałami. W licznych zrealizowanych obiektach obydwa rodzaje konstrukcji występowały łącznie.

Tablica rozwoju konstrukcji membranowych | Dla zilustrowania historii rozwoju konstrukcji membranowych, na rysunku 2.108 przedstawiono zbiorcze zestawienie najważniejszych wydarzeń z tego zakresu. Ponadto przedstawiono niektóre inne, wybrane wydarzenia, które miały istotny wpływ na rozwój konstrukcji membranowych.

Podstawowym zagadnieniem, któremu podporządkowano pozostałe, jest rozwój współczesnych konstrukcji membranowych. Podzielono je na dwie grupy:

- konstrukcje namiotowe
- konstrukcje pneumatyczne

W okresie poprzedzającym rozwój współczesnych konstrukcji membranowych wyróżniono trzy wątki tematyczne:

- namioty koczowników – obejmujący namioty codziennego użytku, od pierwszych konstrukcji z okresu paleoiltu, aż po namioty współczesnych plemion koczowniczych
- namioty reprezentacyjne – obejmujący namioty wykonywane na potrzeby władców, często pełne przepychu i bardzo duże oraz konstrukcje dla obiektów użyteczności publicznej
- namioty cyrkowe – obejmujący wielkie namioty wykonywane dla potrzeb objazdowych zespołów cyrkowych w XIX i XX w.

Wśród zagadnień uzupełniających, dotyczących problemów rozwijających się odrębnie, ale mających wpływ na rozwój konstrukcji membranowych, wydzielono:

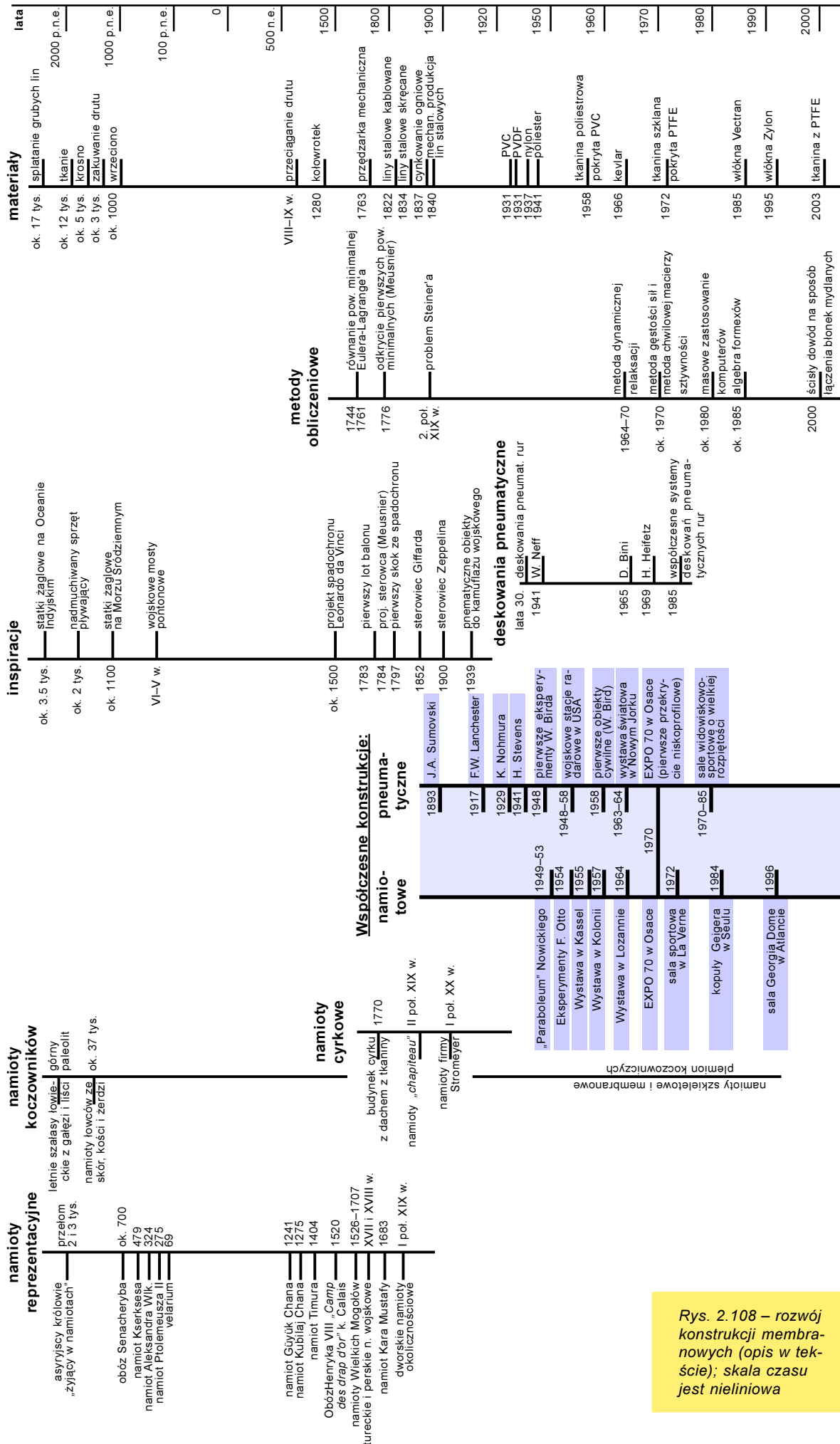
- rozwój materiałów – obejmujący rozwój produkcji podstawowych wyrobów służących do wykonywania konstrukcji membranowych i specyficznych dla tych konstrukcji
- rozwój metod obliczeniowych – w zakresie metod specyficznie związanych z konstrukcjami membranowymi
- rozwój obiektów technicznych będących źródłem inspiracji dla rozwoju konstrukcji pneumatycznych
- rozwój techniki deskowań pneumatycznych dla konstrukcji żelbetowych

Przedstawione zestawienie jest – z konieczności – nieco uproszczone i zostało ograniczone do najważniejszych pozycji. Nie ujęto w nim niektórych innych zagadnień mających wpływ na rozwój konstrukcji membranowych, np. rozwoju konstrukcji składalnych i przenośnych, konstrukcji *toldos*¹⁾ itp. osłon przeciwsłonecznych z tkaniny, rozwieszanych nad ulicami i placami w krajach iberyjskich. Nie zamieszczono też odniesień do ogólnego rozwoju techniki.

Wszystkie pozycje, ujęte na rys. 2.108 są omówione w rozdziałach 2.1 i 2.2 niniejszej pracy, a w zakresie materiałów i metod obliczeniowych – również w suplementcie.

¹⁾ „Toldos” są to osłony przeciwsłoneczne z tkanin, rozwieszane nad ulicami i placami w krajach iberyjskich

ROZWÓJ KONSTRUKCJI MEMBRANOWYCH



Rys. 2.108 – rozwój konstrukcji membranowych (opis w tekście); skala czasu jest nieliniowa

2.3. Zarys historii rozwoju konstrukcji prętowych kształtowanych przez sprężanie

2.3.1. Uwagi wstępne

Sprężanie, jako metoda zwiększania nośności elementów konstrukcyjnych, było stosowane od bardzo dawna w różnych dziedzinach techniki. Przykładami mogą być metalowe obręcze zakładane na drewniane beczki wykonywane z klepek drewnianych. W budownictwie, już Rzymianie stosowali dodatkowe obciążenie pionowe słupów, które zabezpieczało je przed działaniem sił poziomych pochodzących od opartych na nich łuków [54].

W zastosowaniu do konstrukcji żelbetowych i stalowych, sprężanie zaczęto szerzej stosować w pierwszej połowie XX w. [54] [122] [125]. Nastąpiło to po pewnym okresie rozwoju tych konstrukcji, kiedy podstawowe zasady ich projektowania były już ustalone. Obecnie zaś, stosowanie sprężania jest oczywiste i powszechne.

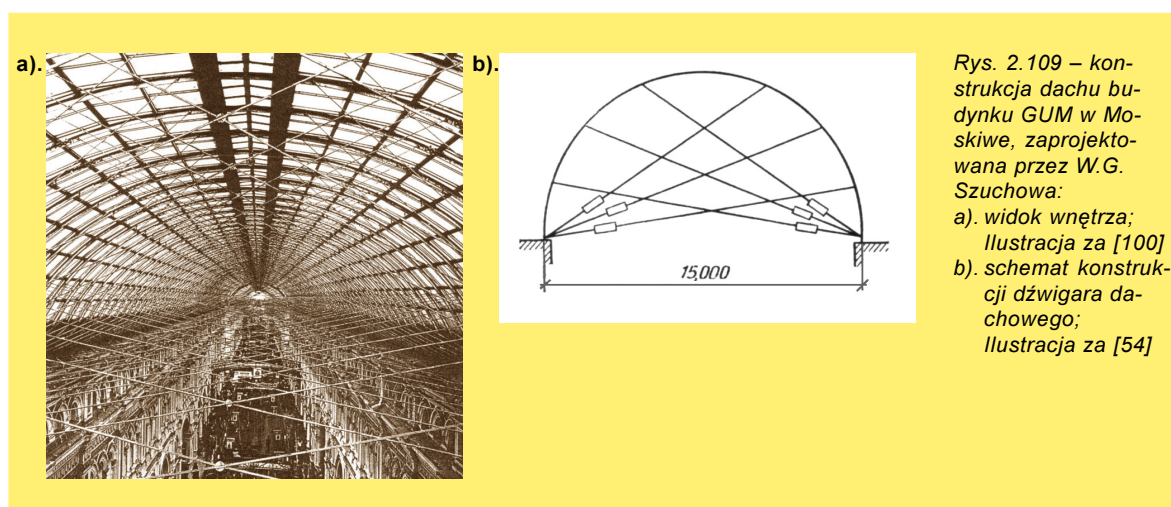
Podstawowe cele, dla których zastosowano technikę sprężania, to zwiększenie nośności elementów oraz ich stabilizacja.

Pomysł kształtowania konstrukcji poprzez wymuszenie jej odkształceń o bardzo dużych wartościach, znacznie przekraczających zakres przyjmowany w mechanice budowli za tzw. „małe odkształcenia”, pojawił się w drugiej połowie XX w.

2.3.2. Pierwsze zastosowania

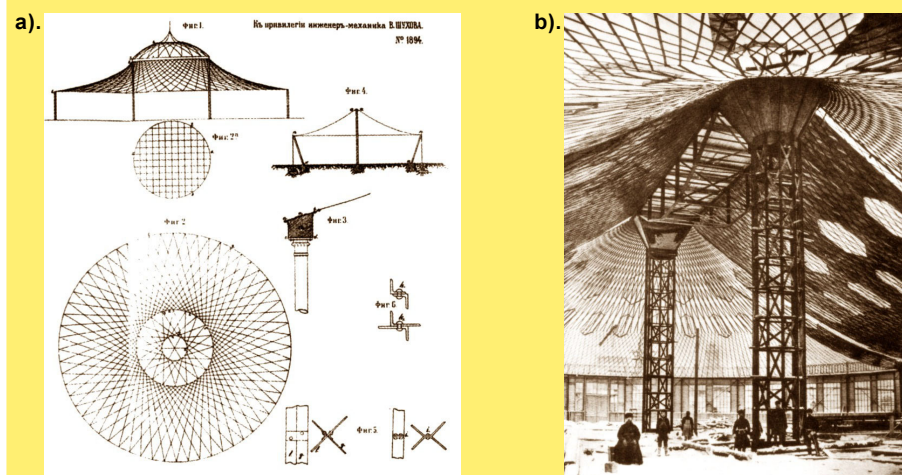
Sprężanie konstrukcji metalowych zostało stosunkowo wcześniej zastosowane w mostach kolejowych, w pierwszej połowie XIX w. Wykonano wtedy pewną ilość mostów, w których żeliwne belki pomostowe były wzmocnione poprzez podwieszenie do naprężonych cięgien. W 1847 r., most tego typu, nad rzeką Dee, w Chester (Wielka Brytania), uległ katastrofie¹⁾ [171]. Spowodowało to zahamowanie zastosowań i rozwoju metalowych konstrukcji sprężonych. Pojawiły się one ponownie w konstrukcjach przekryć budynków o dużej rozpiętości.

Konstrukcje W. G. Szuchowa | Jedno z pierwszych, współczesnych zastosowań sprężania w lekkich stalowych konstrukcjach prętowych, pochodzi od rosyjskiego inżyniera – Władimira G. Szuchowa. Był on ponadto jednym z pionierów konstrukcji dachów wiszących²⁾.



¹⁾ Most był zaprojektowany przez znanego inżyniera, Roberta Stephenson. Przyczyną katastrofy była zbyt mała sztywność belek żeliwnych. Dodatkowo, były one łączone w dwóch punktach na długości przęsła [171].

²⁾ Na temat innych wczesnych, dziewiętnastowiecznych konstrukcji dachów wiszących – patrz [98].

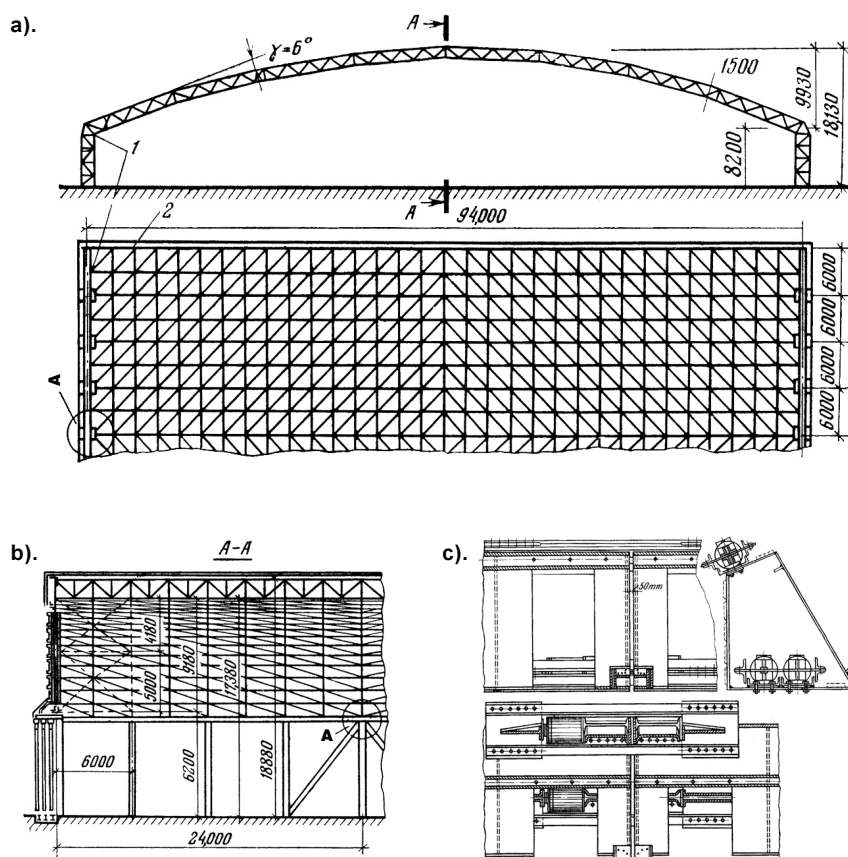


Rys. 2.110 – konstrukcje „Dachów siatkowych” Szuchowa:

- a). zgłoszenie patentowe z 1895 r. Ilustracja za [98]
- b). pawilon owalny na wystawie wszechrosyjskiej w Niżnym Nowogrodzie, w 1896 r. Ilustracja za [100]

W latach 1889-93, zaprojektował on przekrycie domu handlowego GUM w Moskwie ¹⁾. Lekkie, łukowe dźwigary dachowe o rozpiętości 15.0 m, zostały usztywnione za pomocą sześciu naprzężonych ściągów, rys. 2.109.

W roku 1895, Szuchow zgłosił do opatentowania swój pomysł na „Dachy siatkowe”, rys. 2.110.a). Był to pierwszy przykład zastosowania dwukierunkowo naprzężonych siatek linowych w konstrukcji przekryć obiektów budowlanych. Według tego pomysłu, zaprojektował i zrealizował rotundę oraz pawilon owalny, na Wystawie Wszechrosyjskiej w Niżnym Nowogrodzie, w 1896 r., rys. 2.110.b). Rotunda miała średnicę 68 m, przy wysokości 15 m. Budynki te można uznać za pierwsze obiekty, w których forma i występný stan naprężenia są współzależne, podobnie jak we współczesnych konstrukcjach membranowych.



Rys. 2.111 – konstrukcje dachu sprężonego, wg pomysłu B.S. Wasilkowa:

- a). przekrój poprzeczny i rzut dachu
- b). przekrój podłużny
- c). węzeł narożny słupa środkowego, z siłownikami sprężającymi

Ilustracje za [54]

¹⁾ Architektem, który projektował budynek GUM, był Pomerancew [100]

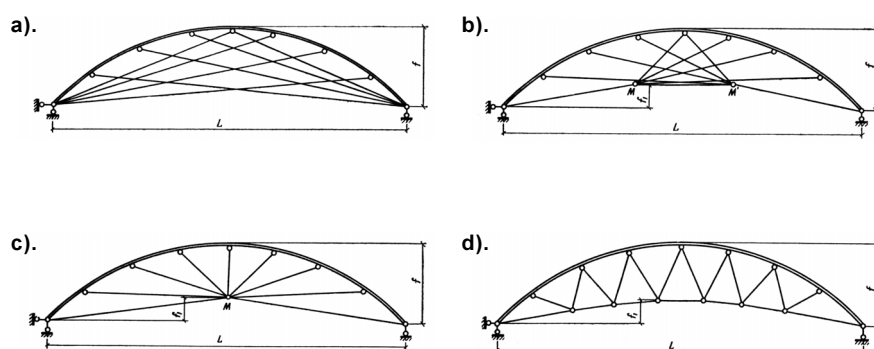
Dach sprężony B. S. Wasilkowa | Jednym z najwcześniejszych zastosowań sprężania do kształtowania konstrukcji poprzez dużą zmianę jej geometrii początkowej jest zaprojektowane przez B.S. Wasilkowa¹⁾ przekrycie, o wymiarach 96×48 m [184] [54], rys. 2.111.

System konstrukcyjny tego przekrycia stanowią podłużne i poprzeczne kratownice, połączone w poziomie pasów dolnych stężeniami kratowymi, a w poziomie pasów górnych — pokryciem z blachy falistej. Konstrukcja została sprężona za pomocą siłowników hydraulicznych, rys. 2.111.c), umieszczonych w węzłach narożnych słupów znajdujących się w środku krótszego boku — węzeł A, na rys. 2.111.

Sprężenie było częścią procedury podnoszenia dachu. Umożliwiło ono znaczną redukcję ilości niezbędnych rusztowań oraz — w pewnym stopniu — nadawało konstrukcji krzywiznę. Oprócz sprężania zastosowano też tradycyjne metody podnoszenia konstrukcji [54].

Sprężone dźwigary łukowe | Konstrukcja dachu budynku GUM, Szuchowa, okazała się na tyle atrakcyjna, że rozwijano ją później w wielu wariantach.

Na rysunku 2.112., przedstawione są schematy kilku łuków, sprężonych cięgnami o różnym układzie. Konstrukcje te zostały zaprojektowane i przebadane doświadczalnie w latach siedemdziesiątych XX w. [54]. Analiza wykazała, że najefektywniejszy, pod względem zużycia materiału, jest łuk o schemacie c).

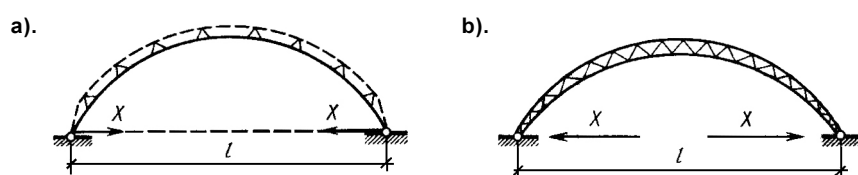


Rys. 2.112 – różne schematy konstrukcyjne łuków sprężonych cięgnami

Ilustracje za [54].

Przedmiotem badań były również konstrukcje łuków kratowych. Na rysunku 2.113.a), przedstawiony jest łuk zaproponowany przez A.A. Wojewodina [54]. Łuk ma przekrój trójkątny. Jego pas górny jest wykonany z cięgna, które w czasie montażu jest sprężane. Siła rozciągająca, powstała w cięgnie w wyniku sprężenia, jest większa niż przeciwnie działająca siła wywołana działaniem obciążenia. Konstrukcja ta była badana eksperymentalnie, na modelach, w małej skali.

Inne rozwiązanie przedstawia rys. 2.113.b). Jest to łuk kratowy, o wiotkim pasie dolnym, sprężany poprzez wymuszone przemieszczenie podpór.



Rys. 2.113 – łuki kratowe, o sprężonych pasach cięgowych:
a). łuk o cięgowym pasie górnym
b). łuk o cięgowym pasie dolnym

Ilustracje za [54].

¹⁾ Б.С. Васильков, *Пространственное покрытие с предварительным напряжением*. Инженерный сборник, т. VIII, Москва 1950.

²⁾ Szczególnie dużo prac badawczych w tym zakresie wykonano w d. Związku Radzieckim.

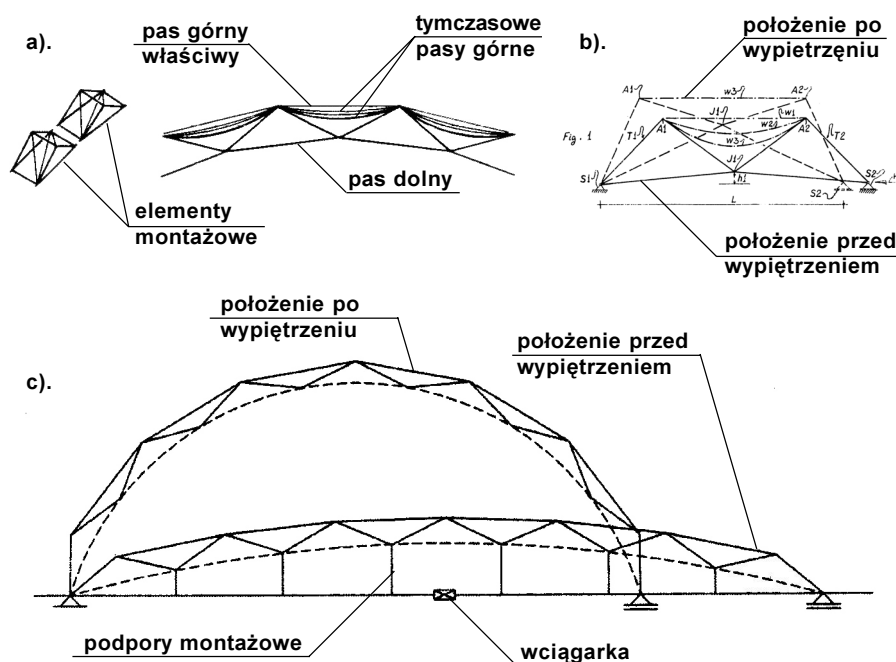
2.3.3. Dźwigar samowypiętrzalny O. Sircovicha

Izraelski inżynier Oscar Sircovich Saar, zaproponował w latach 80. XX w., rozwiązanie konstrukcyjne dźwigara wypiętrzanego poprzez sprężanie, z ciągnowym pasem górnym, nieco podobne do rozwiązania A.A. Wojewodina, z rys. 2.113.a).

W rozwiązaniu Sircovicha Saara, dźwigar łukowy ma przekrój prostokątny, o dwóch pasach dolnych i dwóch pasach górnych, rys. 2.114.a). Pas dolny, jest wykonany z prętów mogących przenosić siły rozciągające. Węzły w pasie dolnym są przegubowe, umożliwiają pełny obrót poszczególnych odcinków pasa. Pas górny jest wykonany z cięgien. Zastosowano kilka cięgien tworzących tzw. pasy tymczasowe oraz ciągną tworzące właściwy pas górny.

Podstawowym założeniem przyjętym w tym rozwiązaniu jest utrzymywanie, podczas całego procesu wypiętrzania, naprężonego pasa górnego oraz osi pasa dolnego o kształcie krzywej łańcuchowej. Dzięki temu pas dolny jest przez cały czas ściskany i nie następuje przemieszczenie węzłów poza tę linię. Konstrukcja jest scalana na podporach montażowych, zapewniających utrzymanie łańcuchowej linii pasa dolnego już w położeniu wyjściowym.

Dla utrzymywania pasa górnego stale naprężonego, zastosowano cały szereg cięgien tymczasowych, o różnej długości, rys. 2.114.a). Ciężna te są wykonane z drutów ze stali budowlanej zwykłej jakości, o dużym zakresie odkształceń plastycznych. Poszczególne ciężna tymczasowe mają coraz mniejszą długość. Po rozpoczęciu wypiętrzania, ciężno o najmniejszej długości zostaje naciągnięte aż do osiągnięcia granicy plastyczności. Wtedy zaczyna się naciąganie kolejnego ciężna, podczas gdy poprzednie odkształca się plastycznie, utrzymując jednocześnie odpowiednią siłę naciągu w pasie. Operacja ta jest powtarzana aż do osiągnięcia przez konstrukcję założonej konfiguracji. Wtedy pracuje wyłącznie najkrótsze ciężno pasa górnego – pas górny właściwy [197]. Podczas procesu sprężania następuje jednocześnie wypiętrzenie konstrukcji z położenia wyjściowego, do położenia docelowego, rys. 2.114.b). i c).

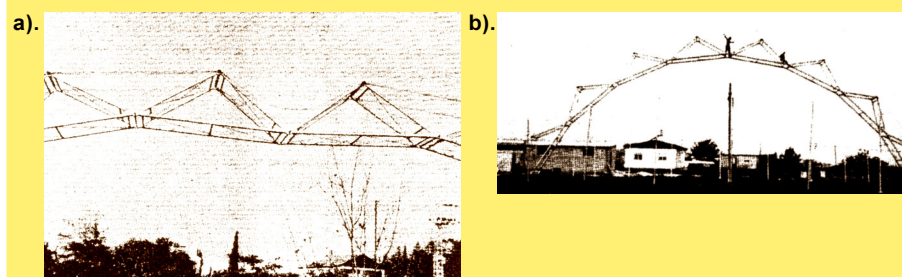


Rys. 2.114 – schemat dźwigara samowypiętrzanego, zaproponowanego przez O. Sircovicha Saara:

- a) elementy montażowe i układ cięgien w pasie górnym
Ilustracja za [197]
- b) zmiana geometrii podczas wypiętrzania
Ilustracja wg opisu patentowego
- c) schemat wypiętrzania dźwigara
Ilustracja za [197]

Opisywane rozwiązanie zostało opatentowane¹⁾ i zrealizowany został jeden obiekt doświadczalny, o rozpiętości 35 m, rys. 2.115.

¹⁾ patent amerykański nr 4 619 099, z 28 października 1986 r.



Rys. 2.115 – realizacja doświadczalnego dźwigara wg schematu z rys. 2.94:

a). widok pasa górnego podczas demontażu konstrukcji

b). widok dźwigara w położeniu docelowym

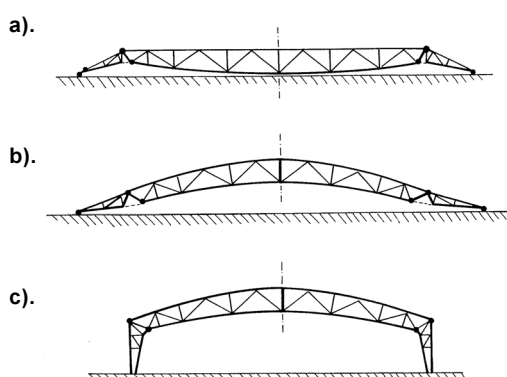
Ilustracje za [197]

2.3.4. System Strarch

W drugiej połowie lat siedemdziesiątych, Australijczyk Peter Edington Ellen, zaproponował rozwiązanie konstrukcyjno-montażowe, w którym ciągną sprężające jest przeciągnięte w pasie dolnym ramy kratowej. Rygiel tej ramy jest połączony przegubowo ze słupami. Konstrukcja jest scalana w taki sposób, że słupy są ułożone poziomo. Na skutek sprężenia, następuje podniesienie konstrukcji i ustawienie słupów w pozycji pionowej¹⁾²⁾.

Rozwiązanie to zostało udoskonalone i – w połowie lat osiemdziesiątych XX w. – wprowadzone na rynek jako system Strarch³⁾, pierwszy komercyjny system konstrukcji samowypiętrzalnych⁴⁾. System ten jest przeznaczony przede wszystkim do wykonywania takich obiektów jak: hangary, magazyny, obiekty handlowe itp. Obiekty kształtowane w systemie Strarch charakteryzują się najczęściej cylindrycznym, łukowo zakrzywionym dachem.

Zasadniczy schemat systemu konstrukcyjnego jest analogiczny jak w wielu tradycyjnych obiektach o konstrukcji stalowej. Konstrukcję tworzy szereg płaskich ram kratowych, połączonych za pomocą stężeń. W zależności od zastosowania, ramy mogą mieć różną geometrię. Mogą tworzyć przekrycie jednokrzywiznowe, bez części bocznych (ścian) lub mieć wyraźnie wydzielone odcinki słupowe, tworzące konstrukcję ścian bocznych. Cechą wyróżniającą ten system jest to, że konstrukcja uzyskuje swój ostateczny kształt w wyniku sprężenia, prowadzącego do bardzo dużej zmiany geometrii. Proces sprężania, jest jednocześnie procesem montażowym, w którym konstrukcja jest wypiętrzana z pozycji scalania, do położenia eksploatacyjnego. Schemat kształtowania konstrukcji w tym systemie, wg opisu patentowego, przedstawia rys. 2.116.



Rys. 2.116 – fazy kształtowania konstrukcji w systemie Strarch

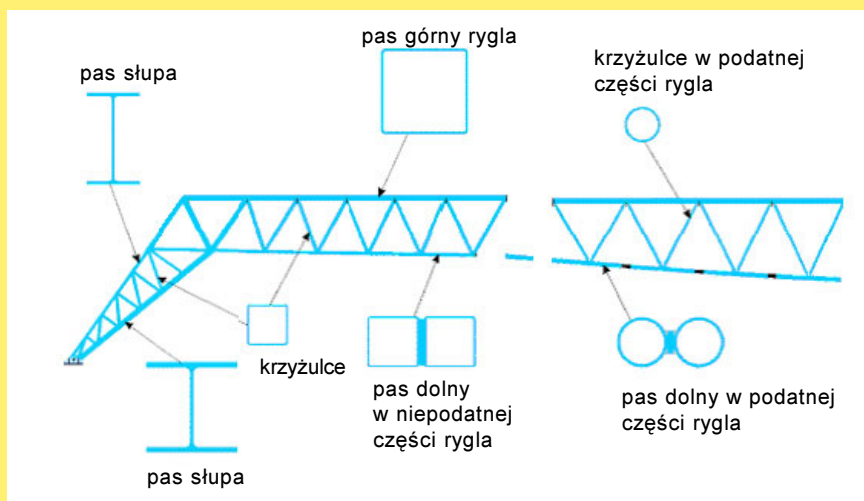
Ilustracje wg opisu patentowego

¹⁾ Anglik H.N. Wylie, już w 1925 roku zaproponował rozwiązanie, w którym słupy ram są połączone z ryglem przegubami, a montaż konstrukcji następuje poprzez zbliżenie podpór (patent amerykański nr 1 554 061), jednak bez sprężania ciągną.

²⁾ Rozwiązanie uzyskało w 1977 r. patent amerykański nr 4 052 834.

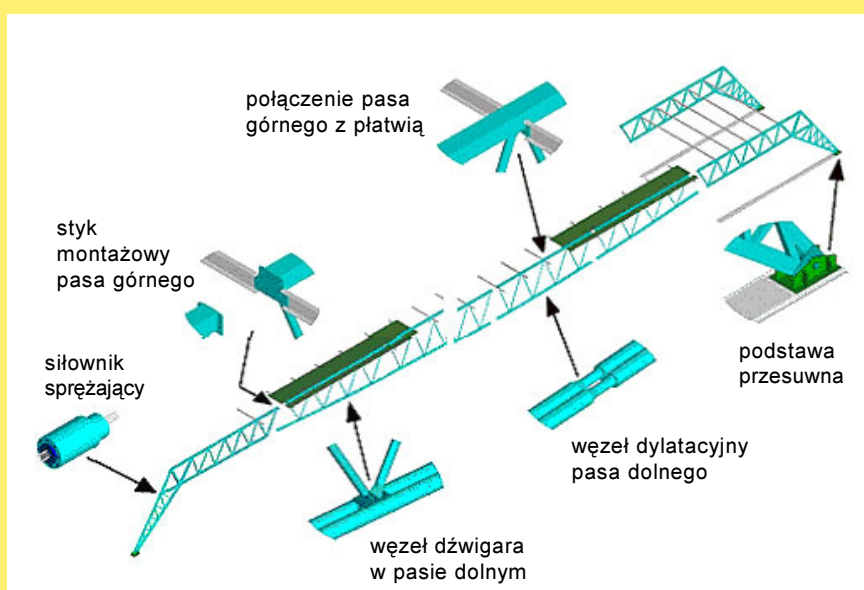
³⁾ Skrót od ang. określenia „Stressed Arch”.

⁴⁾ System uzyskał w 1987 r. patent amerykański nr 4 676 045.



Rys. 2.117 – elementy systemu Strarch

Ilustracje za [233]



Rys. 2.98 – węzły łączące elementy w systemie Strarch

Ilustracje za [233]

W systemie Strarch, sprężanie może być stosowane w dwóch miejscach ramy kratowej, rys. 2.116:

- w węzłach narożnych, gdzie służy scaleniu słupów z ryglami oraz podniesieniu słupów do pozycji pionowej
- w pasie dolnym rygla ramy, któremu nadaje odpowiednią krzywiznę

W ramach wypiętrzalnych, będących podstawowymi składnikami systemu konstrukcyjnego Strarch, można wyróżnić trzy podstawowe części, rys. 2.117:

- słupy, które podczas wypiętrzania nie ulegają deformacji
- rygle – część niepodatna, która podczas wypiętrzania nie ulega deformacji
- rygle – część podatna, która podczas wypiętrzania ulega deformacji

Części te składają się z następujących elementów:

- pas górny rygli: zarówno w części podatnej, jak i w części sztywnej, wykonany jest z rur kwadratowych, ze stali o podwyższonej wytrzymałości ($R_e = 320 \div 350 \text{ MPa}$)
- pasy słupów: mają przekrój dwuteowy, wykonane są ze stali zwykłej jakości; w niektórych rozwiązaniach słupy są wykonywane jako pełnościenne, dwuteowe
- krzyżulce w słupach i w ryglach części niepodatnej: wykonane są z rur kwadratowych, ze stali zwykłej jakości
- krzyżulce w części podatnej: rura okrągła ze stali zwykłej jakości, o spłaszczonych końcach, przyspawana w węzłach do pasów górnego i dolnego

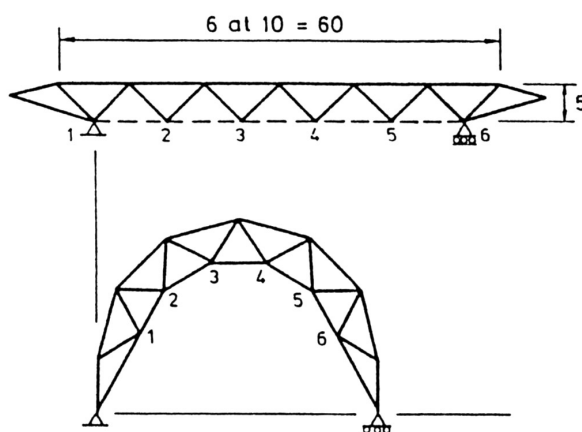
- pasy dolne w części niepodatnej: wykonane są z dwóch rur kwadratowych, ze stali o podwyższonej wytrzymałości ($R_e = 320 \div 350 \text{ MPa}$); rury są połączone ze sobą w węzłach ramy oraz w połowie odległości pomiędzy węzłami
- pasy dolne w części podatnej: wykonane są z dwóch rur okrągłych, ze stali zwykłej jakości; rury są ze sobą połączone w węzłach ramy oraz po obu stronach szczeliny dylatacyjnej

Szczegóły wykonania ramy wypiętrzalnej, rys. 2.118:

- połączenie montażowe pasa górnego: ramy są wykonywane w segmentach o długości $10 \div 12 \text{ m}$ (ze względów transportowych) i łączone śrubami w węzłach montażowych; połączenie montażowe pasa dolnego jest po prostu węzłem dylatacyjnym
- połączenie pasa górnego z płatwią: płatwie są mocowane do bocznych krawędzi pasa górnego łącznikami dyblowymi; górna powierzchnia płatwi jest wyrównana z osią pasa górnego, aby pokrycie podczas wypiętrzania było jedynie zginane, bez dodatkowego rozciągania
- węzeł dźwigara w pasie dolnym: blacha węzłowa o przekroju teowym jest przyspawana do rur tworzących pas dolny, a do niej są z kolei przyspawane krzyżulce, o specjalnie spłaszczonych końcach
- węzeł dylatacyjny pasa dolnego: z jednej strony węzła, do rur tworzących pas są przyspawane trzpień, które przesuwają się wewnątrz pasa po drugiej stronie szczeliny
- podstawa przesuwana: po przesuwnej stronie ramy podstawa jest połączona z nogą ramy poprzez przegub; podstawa ta ślizga się wzdłuż stalowej płyty, umieszczonej na tymczasowym podkładzie betonowym lub na zagęszczonym gruncie
- siłownik sprężający: siłownik do naciągania lin wielosplotkowych lub odrębne siłowniki dla każdej splotki; po zakończeniu wypiętrzania ramy jest usuwany

Istota sprężania i nadawania krzywizny ryglowi ramy kratowej, lub jego części, polega na umieszczeniu w prętach pasa dolnego węzłów dylatacyjnych, które pozwalają na zmniejszenie odległości pomiędzy węzłami pasa dolnego. Węzły te, skonstruowane są w taki sposób, że pas dolny, wykonany z rur okrągłych jest rozcięty, a trzpień, umieszczone wewnątrz rur z jednej strony szczeliny, przesuwają się wewnątrz rur pasa dolnego po drugiej stronie szczeliny dylatacyjnej. Wielkość tej szczeliny zależy od założonej krzywizny konstrukcji po wypiętrzaniu. Szczeliny mogą być usytuowane we wszystkich lub w wybranych prętach pasa dolnego.

Cięgno sprężające, umieszczone wewnątrz pasa dolnego, jest naciągane aż do zamknięcia wszystkich szczelin, a następnie sprężanie jest kontynuowane, w celu uzyskania w pasie dolnym siły ściskającej o żądanej wielkości, rys. 2.119. Wielkość tej siły jest tak dobrana, aby niemożliwe było rozwarcie szczelin dylatacyjnych pod wpływem działania obciążeń eksploatacyjnych.

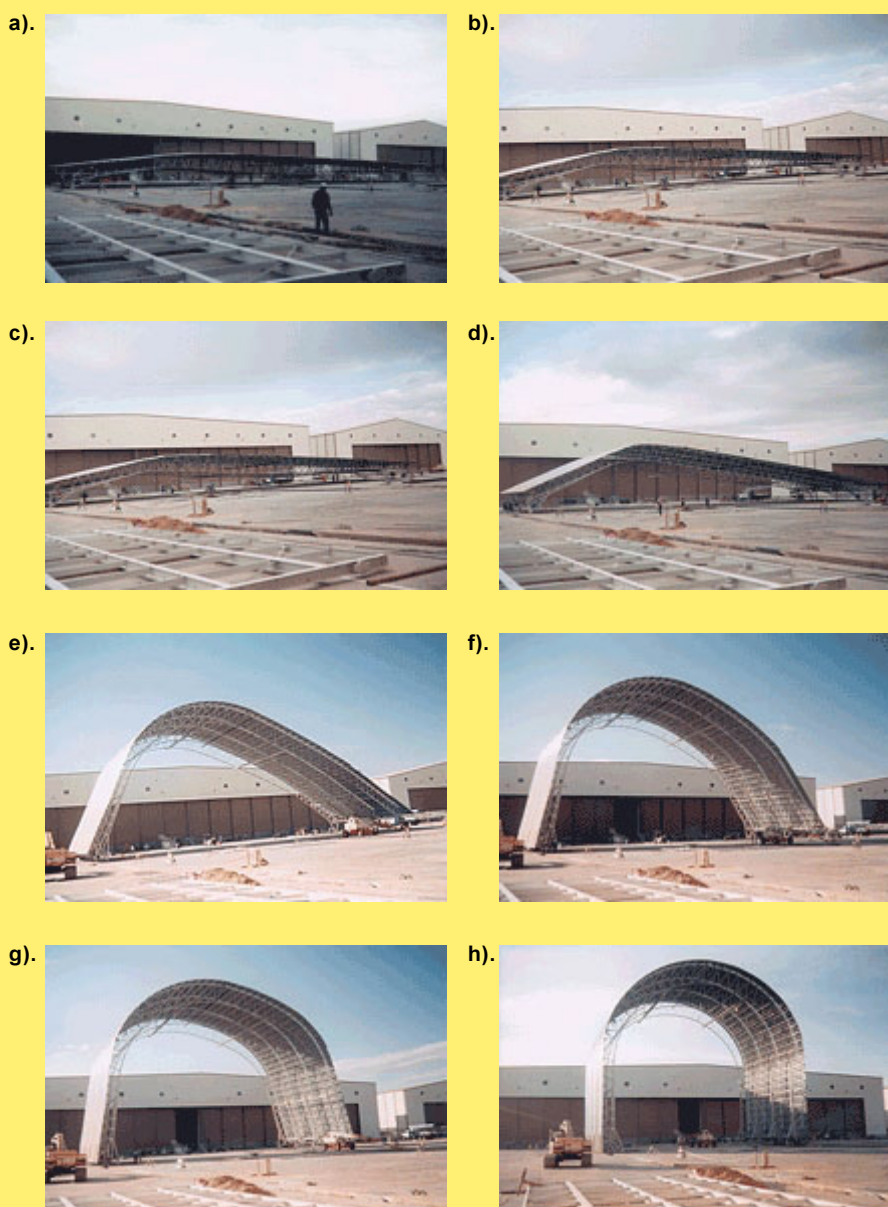


Rys. 2.119 – schemat skracania prętów pasa dolnego w ramie systemu Strach

Ilustracja za [184]

Czynności związane z montażem konstrukcji na placu budowy obejmują następujące etapy, rys. 2.120:

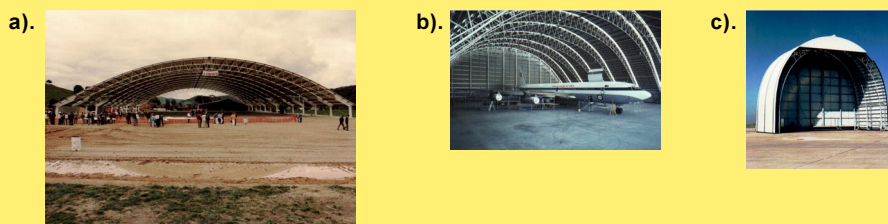
- scalenie poszczególnych segmentów wysyłkowych ramy; scalanie odbywa się na podporach montażowych, nadających konstrukcji niezbędną krzywiznę początkową
- powtórzenie tej operacji dla wszystkich ram wzdłuż budynku; po scaleniu pierwszych trzech lub czterech ram, rozpoczyna się montaż płatwi i pokrycia dachowego
- montaż wyposażenia technicznego dachu: instalacji elektrycznych i oświetleniowych, tryskaczy, szyn transportu podwieszonego itp.
- umieszczenie cięgien sprężających w rurach pasa dolnego, zakotwienie ich w podporze stałej i w siłowniku sprężającym znajdującym się po przeciwległej stronie ramy
- naciągnięcie cięgien aż do niewielkiego uniesienia się konstrukcji; w tym położeniu następuje usunięcie podpór montażowych
- stopniowe wypiętrzanie konstrukcji, aż do osiągnięcia pozycji końcowej
- zakotwienie cięgien po stronie siłowników sprężających
- dokończenie montażu ścian i wyposażenia wewnętrznego



Rys. 2.120 – fazy wypiętrzania konstrukcji hangaru w systemie Strarch

Ilustracje na podstawie materiałów firmy DM Constructors(USA), za [233]

W systemie Strarch, wykonanych zostało kilkadziesiąt dużych obiektów, przede wszystkim hangarów lotniczych, rys. 2.121. Największy z nich, przeznaczony do obsługi samolotu Boeing 747, ma rozpiętość 94 m.



Rys. 2.121 – przykłady konstrukcji hangarów lotniczych, zrealizowanych w systemie Strarch

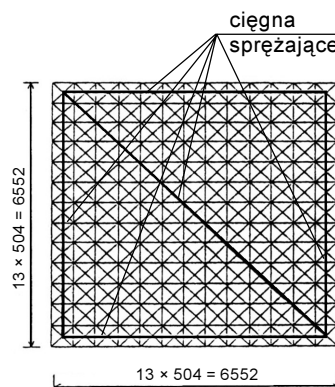
Ilustracje za [233]

2.3.5. Wypiętrzalne powierzchniowe konstrukcje prętowe

Rozwiązanie zastosowane w systemie Strarch dla płaskich konstrukcji prętowych, stało się podstawą opracowania podobnych rozwiązań dla powierzchniowych konstrukcji prętowych.

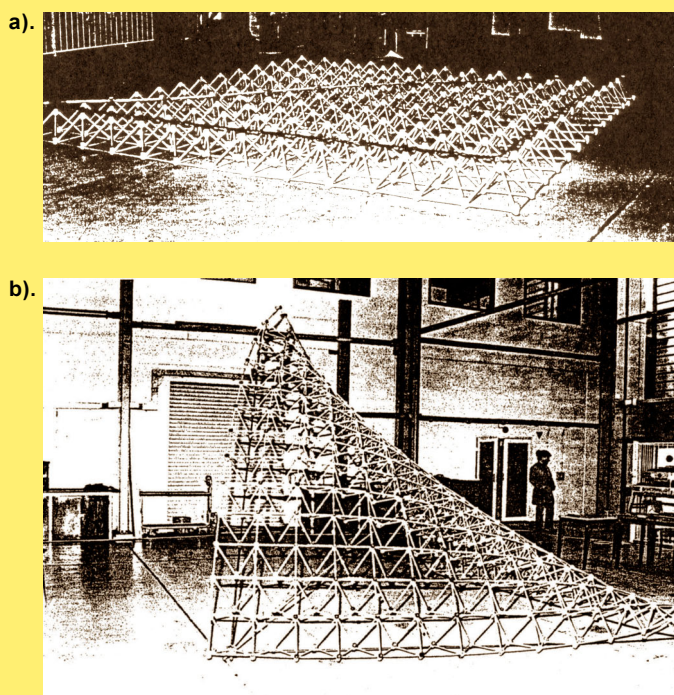
Zespół L.C. Schmidta, z uniwersytetu w Wollongong (Australia), opracował sposób wypiętrzania dwuwarstwowej struktury prętowej [184]. Początkowo płaska konstrukcja, na skutek sprężenia zostaje zakrzywiona, uzyskując kształt walcowy [186] lub paraboloidy hiperbolicznej [185].

Podstawowe zasady systemu są analogiczne, jak dla konstrukcji płaskich. W dolnej warstwie prętów zastosowane zostały węzły dylatacyjne, umożliwiające zmianę odległości pomiędzy węzłami w tej warstwie. Cięgna sprężające umieszczone są równoległe do jednej z krawędzi konstrukcji (dla kształtu walca) lub wzdłuż przekątnej (dla paraboloidy hiperbolicznej). Podczas wypiętrzania następuje zamknięcie szczelin w węzłach dylatacyjnych i wprowadzenie siły sprężającej do prętów.



Rys. 2.122 – schemat modelu doświadczalnego konstrukcji wypiętrzanej do postaci paraboloidy hiperbolicznej

Opracowano na podstawie [185]

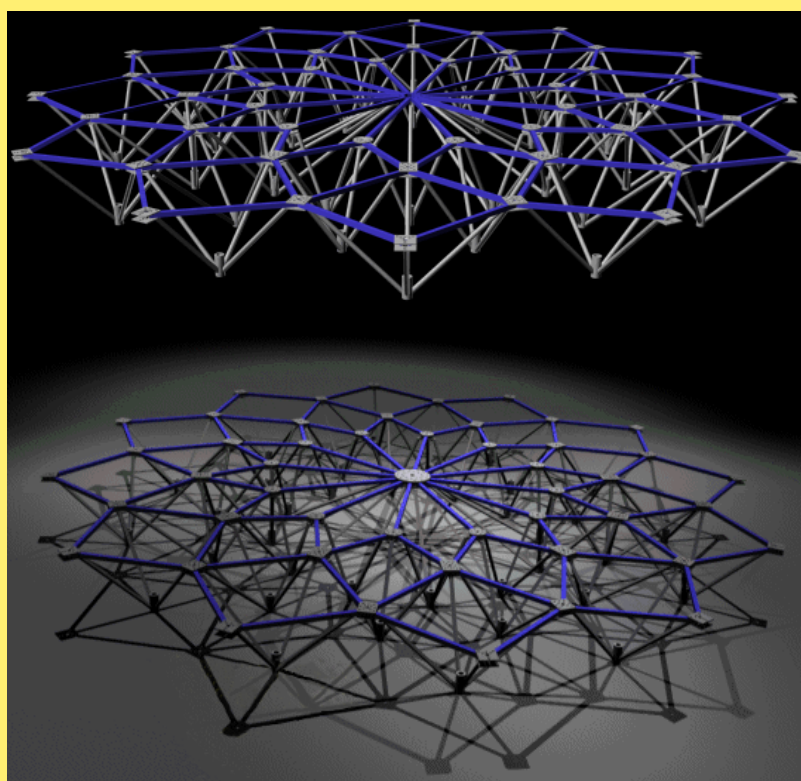


Rys. 2.123 – wypiętrzanie modelu konstrukcji, z rys. 2.122: a). konstrukcja przed wypiętrzaniem, w pozycji odwóconej; widoczne są cięgna sprężające b). widok konstrukcji po wypiętrzaniu

Ilustracje za [185]

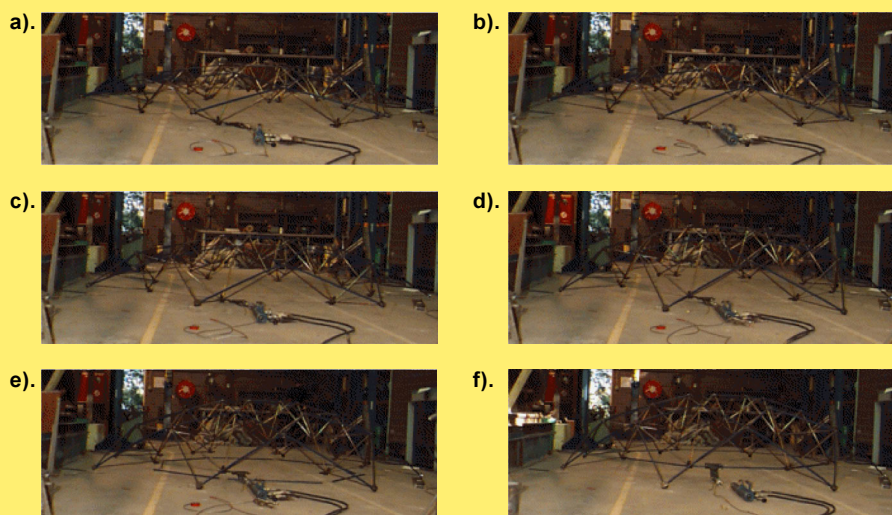
Na rys. 2.122 i 2.123, przedstawiono wykonaną doświadczalną konstrukcję prętową, która została wypiętrzona z postaci płaskiej, do paraboloidy hiperbolicznej [185]. Konstrukcja, o wymiarach w rzucie 6552×6552 mm, została wykonana z rur aluminiowych 13×2.3 mm, rys. 2.122. Wielkość szczelin dylatacyjnych w warstwie dolnej wynosiła 71 mm. Konstrukcja została najpierw sprężona za pomocą cięgien umieszczonych obwodowo, siłą 1.5 kN, w celu usunięcia wszelkich niepożądanych luzów. Następnie naciągnięto cięgno sprężające umieszczone wzdłuż przekątnej. Przy sile 8.1 kN rozpoczęło się wypiętrzanie konstrukcji, które wzrastało aż do osiągnięcia przez siłę wartości 10 kN, rys. 2.123. Dalszy wzrost siły sprężającej nie powodował przyrostu odkształcenia.

Inny rodzaj konstrukcji opracowanej przez ten sam zespół, to konstrukcje, które po wypiętrzeniu uzyskują kształt powierzchni synklastycznych [187]. W tym rozwiązaniu sprężenie następuje za pomocą cięgien umieszczonych równoleżnikowo. Przykład takiego rozwiązania przedstawia rys. 2.124, a kolejne fazy wypiętrzania konstrukcji doświadczalnej – rys. 2.125.



Rys. 2.124 – schemat konstrukcji prętowej, która po wypiętrzeniu uzyskuje kształt powierzchni synklastycznej

Ilustracja za [233]

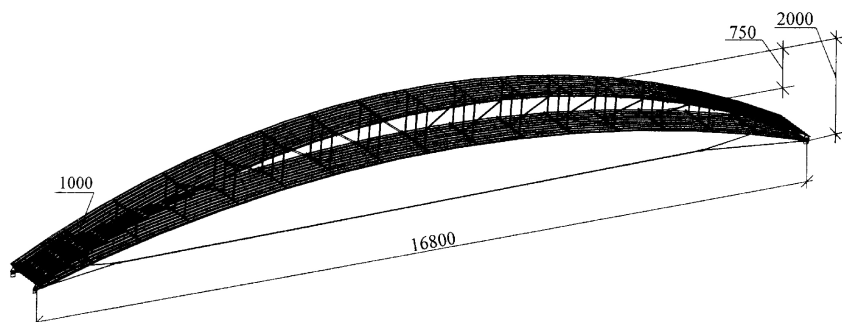


Rys. 2.125 – badanie doświadczalne modelu konstrukcji prętowej o schemacie z rys. 2.104: a). ÷ f). – kolejne fazy wypiętrzania

Ilustracja za [233]

2.3.6. Konstrukcje wypiętrzalne z blachy trapezowej

Interesujące rozwiązanie konstrukcyjne przekrycia, kształtowanego poprzez deformację geometryczną, zaproponował L.W. Jędrzejewski, z politechniki w Krasnojarsku (Rosja) [119]. Jest to system dźwigarów powierzchniowych, których pasy dolne i górne są wykonane z blachy trapezowej.



Rys. 2.126 – schemat konstrukcji kształtowanej przez deformację geometryczną, zaproponowanej przez L.W. Jędrzejewskiego

Ilustracja za [119]

Sprężenie dźwigarów następuje poprzez wygięcie blach, co nadaje dźwigarom kształt łuku, o zmiennej wysokości konstrukcyjnej, rys. 2.126.

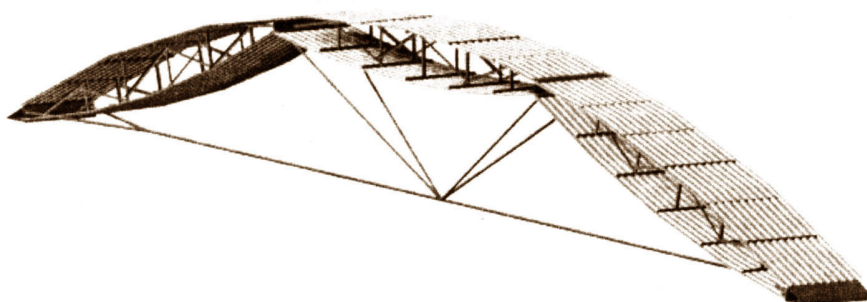
W opisywanym rozwiązaniu, deformacja geometryczna pozwala ukształtować dźwigary, wywołując w nich jednocześnie stan wstępnego naprężenia. Konstrukcja została zbadana doświadczalnie w skali naturalnej. Wykonano i obciążano model przekrycia, o rozpiętości 16.80 m, rys. 2.127.



Rys. 2.127 – model doświadczalny konstrukcji z rys. 2.105, na stanowisku badawczym

Ilustracja za [119]

Dla dźwigarów o rozpiętości powyżej 24 m, opracowana została inna wersja dźwigarów, w której zastosowano dodatkowo układ ściągow, analogicznie do rozwiązań opisanych w pktcie 2.3.2., rys. 2.128.



Rys. 2.128 – schemat konstrukcji wypiętrzalnej z blach fałdowych, dla rozpiętości powyżej 24 m

Ilustracja za [119]

3 Podstawowe zasady kształtowania konstrukcji membranowych

3.1 Uwagi wstępne

Odmienność istotnych cech konstrukcyjnych konstrukcji membranowych, w porównaniu z konstrukcjami „tradycyjnymi” powoduje, że w procesie ich kształtowania pojawiają się problemy, wymagające zupełnie odrębnego potraktowania. Dotyczy to w szczególności dwóch zagadnień:

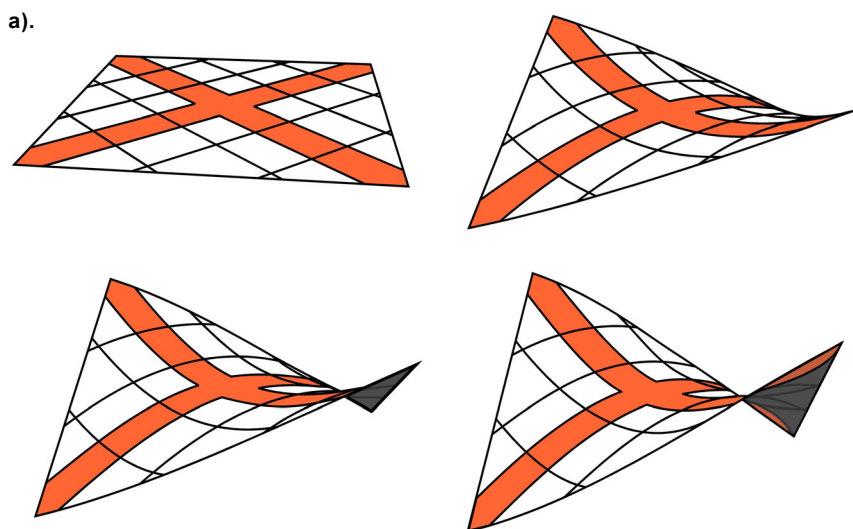
- wstępnego poszukiwania formy
- podstawowych form geometrycznych

3.2 Podstawowe cechy konstrukcji membranowych

Aby wiotka tkanina mogła pełnić rolę elementu konstrukcyjnego, konieczne jest nadanie jej odpowiedniego naciągu wstępnego a jej powierzchnia musi być zakrzywiona w dwóch kierunkach. Jeżeli krzywizny w obu kierunkach są tych samych znaków (dodatnia krzywizna Gaussa¹⁾), to powierzchnia jest synklastyczna, a jeżeli przeciwnych (ujemna krzywizna Gaussa) – antyklastyczna. W przypadku membran tekstylnych, powierzchnie synklastyczne są możliwe do uzyskania jedynie dla konstrukcji pneumatycznych.

Dwukierunkowa krzywizna umożliwia przenoszenie przez tkaninę obciążeń, działających w różnych kierunkach, takich jak np. parcie wiatru i ssanie wiatru, czy obciążenie śniegiem.

Dwukierunkowe zakrzywienie płaskiej tkaniny jest realizowane w dwóch operacjach technologicznych. Pierwsza z nich polega na podzieleniu tkaniny na bryty o odpowiednio dobranym kształcie, a następnie ich połączeniu. Dzięki temu tkanina uzyskuje kształt przybliżający założoną powierzchnię²⁾. Drugą operacją jest nadanie tkaninie odpowiedniego naciągu wstępnego. Powoduje to **duże odkształcenia tkaniny**, która przyjmuje w wyniku tej operacji swój ostateczny kształt³⁾. Sztywność powłoki jest tym większa, im większa jest jej krzywizna oraz naciąg wstępny. W wyniku odkształcenia, powierzchnia membrany uzyskuje kształt, który – z pewnym przybliżeniem – odpowiada kształtowi powierzchni dwukrzywiznowych, tradycyjnie wykorzystywanych w kształtowaniu powłok z materiałów niewiotkich, np. żelbetowych. Na rys. 3.1. przedstawiono przykładowe sposoby nadawania płaskiej tkaninie dwukierunkowej krzywizny.



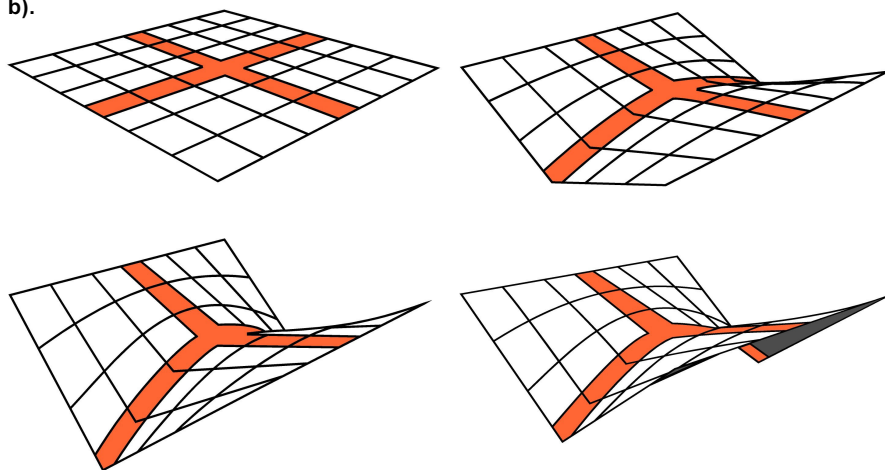
Rys. 3.1 – usztywnianie płaskiej membrany poprzez nadawanie jej dwukierunkowej krzywizny:
a). konstrukcja uzyskuje kształt zbliżony do paraboloidy hiperbolicznej

¹⁾ Patrz Suplement, rozdz. 1.1.

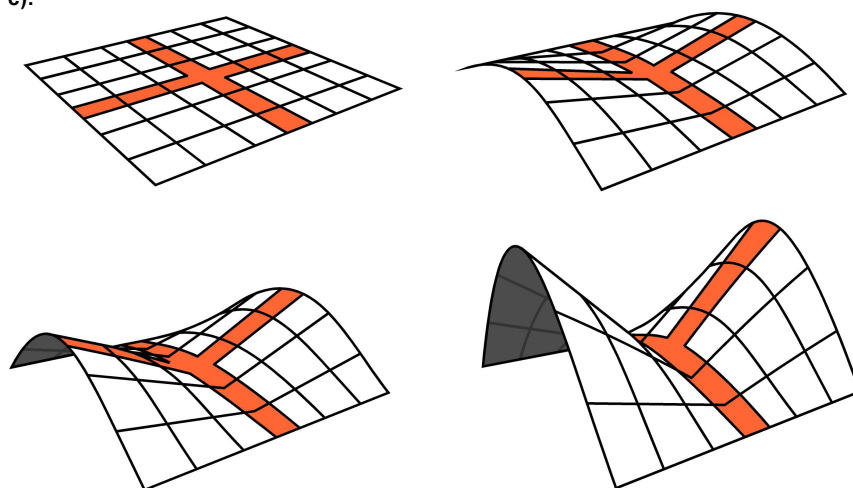
²⁾ Informacje o metodach określania kształtu wykrojów tkaniny podano w pktcie 3.3.3.

³⁾ Określenie „ostateczny” odnosi się do fazy kształtowania konstrukcji. Pod wpływem działania obciążeń zewnętrznych, tkanina ulega dalszym odkształceniom.

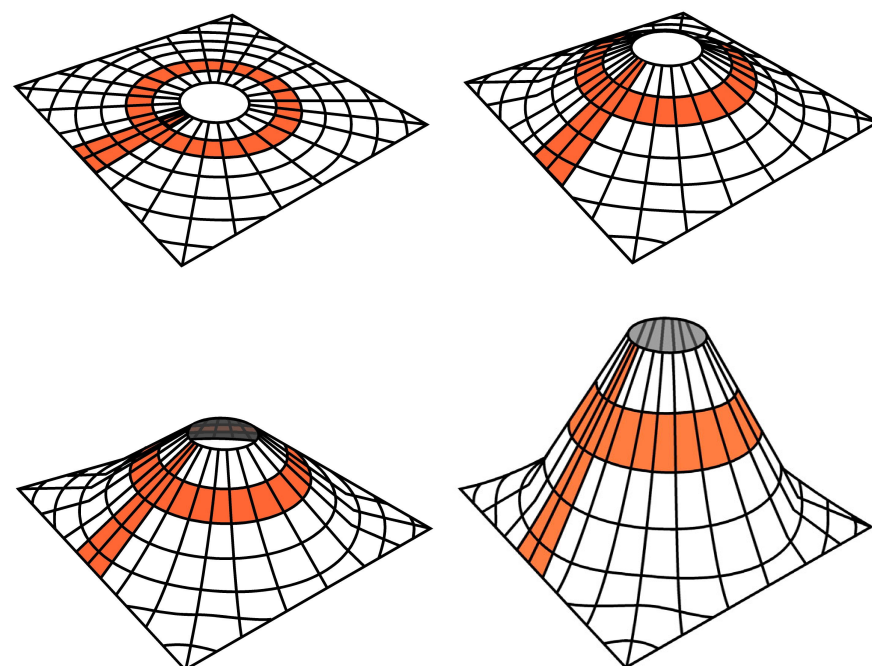
b).



c).



d).



Rys. 3.1 – c.d.:

- b). konstrukcja uży-
skuje kształt zbli-
żony do podwojo-
nej konoidy
- c). j.w. lecz obydwie
„prowadnice” są
zakrzywione
- d). konstrukcja uży-
skuje kształt zbli-
żony do stożka

Opracowano na pod-
stawie [35]

Konstrukcje namiotowe są kształtowane jako powierzchnie antyklastyczne, rozciągnięte nad obszarem, określonym przez zadane granice. Granice obszaru mogą stanowić wiotkie (ciągną) lub sztywne (prętowe, tarczowe itp.) elementy konstrukcyjne. Wewnątrz obszaru membrana przyjmuje kształt początkowy, określony przez właściwości materiałowe, kształt granic oraz stan naprężenia wstępnego. Kształt ten nie może być zdeterminowany a priori, lub „wymuszony”. **Wolność twórcza w projektowaniu nie oznacza tu zatem, dowolnego określania formy, lecz świadomy wybór i określenie warunków, w których forma jest determinowana** [109].

Procedura poszukiwania początkowego kształtu konstrukcji nazywana jest „procesem poszukiwania formy” (ang. *form-finding process*). Proces ten, omówiony poniżej, uzewnętrznia ścisły związek pomiędzy kształtowaniem architektonicznym i projektowaniem konstrukcyjnym, jaki wyróżnia konstrukcje membranowe spośród wszystkich innych rodzajów konstrukcji. **Niemożliwe jest zaprojektowanie formy konstrukcji membranowej bez określenia występujących w niej sił wewnętrznych, i odwrotnie – nie można określić sił wewnętrznych bez znajomości kształtu konstrukcji.** Poszukiwanie formy jest procesem iteracyjnym. Wykorzystuje się w nim zarówno metody modelowania fizycznego jak i modelowanie numeryczne.

Konstrukcja membranowa dostosowuje się do obciążeń, poprzez zmiany stanu naprężenia oraz duże odkształcenia, powodujące jej geometrycznie nieliniową pracę. Oznacza to, że nawet jeżeli odkształcenia wywołane przez obciążenia użytkowe mieszczą się w zakresie sprężystym, to są one tak znaczne, że powstała w ich wyniku zmiana ogólnej geometrii musi być uwzględniona w analizie (n-krotna zmiana obciążenia nie powoduje n-krotnej zmiany odkształceń) [137].

Zarówno konieczność przeprowadzania procesu poszukiwania kształtu, jak i geometryczna nieliniowość, powodują, że koszt analizy obliczeniowej konstrukcji membranowych, inaczej niż w konstrukcjach konwencjonalnych, stanowi istotną część całkowitego kosztu projektowania.

Najczęściej występujące nieporozumienia w odniesieniu do konstrukcji membranowych są następujące [137]:

- zwykle nie docenia się znaczenia faktu, że końcowa konfiguracja napiętej membrany pod obciążeniem nie jest znana na początku projektowania. To prowadzi do kolejnego nieporozumienia, że forma konstrukcji tekstylnej może spełnić każdą wizję architektoniczną.
- konstrukcje membranowe są często negatywnie określane jako tanie lub tymczasowe. To przekonanie ma swoje źródło w stwierdzeniu, że konstrukcje tekstylne nie są tak trwałe i solidne, jak konstrukcje tradycyjne, wykonane z betonu, stali lub cegły. Wiele zrealizowanych obecnie, ogromnych obiektów, eksploatowanych bezpiecznie i bez problemów przez długi czas, zaprzecza tej powierzchownej opinii.

3.3 Określanie formy konstrukcji membranowych

3.3.1 Zasady ogólne

Jak wspomniano powyżej, forma konstrukcji membranowych oraz występujący w nich stan naprężenia, są ze sobą ściśle związane. Aby możliwe było przeprowadzenie obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, konieczne jest określenie kształtu początkowego konstrukcji, tzn. kształtu, jaki przyjmie dla zadanych warunków brzegowych, pod wpływem jedynie naciągu wstępnego. Wprowadzenie naciągu wstępnego jest niezbędne, dla nadania konstrukcji dwukierunkowej krzywizny oraz dla zabezpieczenia przed możliwością powstawania „zmarszczek”, pojawiających się przy zerowej wartości naprężeń rozciągających.

Możliwe są różne sposoby podejścia do określenia początkowego kształtu konstrukcji. Poszukiwanie formy może więc oznaczać [137]:

- poszukiwanie optymalnego kształtu rozciąganej membrany (tj. stabilnej powierzchni minimalnej)
- poszukiwanie kształtu powierzchni rozciąganej, który znajduje się w stanie równowagi statycznej, ale niekoniecznie ma stałą wartość naprężeń powierzchniowych
- poszukiwanie kształtu, który przybliży stan pełnej równowagi statycznej (powszechne w niektórych metodologiach łączących poszukiwanie formy i opracowywanie wykrojów)

Membrana przyjmie kształt powierzchni minimalnej, rozpiętej na zadanym konturze, jeżeli naciąg wstępny będzie jednakowy we wszystkich kierunkach. Możliwe jest uzyskanie równowagi statycznej dla innego kształtu powierzchni niż powierzchnia minimalna, jeżeli wartość naciąg wstępnego będzie różna dla dwóch prostopadłych kierunków (kierunek osnowy i wątku w tkaninie).

Wartość naciągu wstępnego jest zwykle ustalana na stosunkowo niskim poziomie, aby zapobiec zniszczeniu tkaniny pod wpływem obciążeń użytkowych.

Istnieje obecnie pewnego rodzaju kontrowersja, pomiędzy zwolennikami obydwu tych strategii projektowych. W dyskusjach podkreśla się zalety i możliwości kształtowania formy stwarzane przez każdą z nich.

Jako negatywny przykład zastosowania kształtu „wymuszonego”, który miał zrealizować założony pomysł architektoniczny, podawany jest często znany obiekt – Millenium Dome w Londynie, rys. 3.2.



Rys. 3.2 – Millenium Dome w Londynie ¹⁾

Podczas jego projektowania przyjęto założenia, że powierzchnia membrany, rozpiętej na układzie cięgien, będzie stanowiła wycinek sfery. Naturalna tendencja do przyjmowania przez membranę kształtu powierzchni antyklastycznych spowodowała, że pomiędzy podtrzymującymi cięgnami tkanina tworzyła niewielkie powierzchnie siodłowe. Stwarzało to ryzyko gromadzenia się śniegu i wody deszczowej w tych miejscach. Aby wymusić kształt jak najbliższy założonej powierzchni sferycznej, konieczne było zastosowanie dodatkowych masztów i odciągów. Niezbędne okazało się również zwiększenie wartości naciągu wstępnego w tkaninie do bardzo wysokiego poziomu – ok. 2/3 wytrzymałości tkaniny [137].

Przeciwnicy wykorzystywania powierzchni minimalnych w procesie poszukiwania formy podkreślają, że podstawowa zaleta tych powierzchni – stała wartość naprężeń rozciągających w membranie może być zachowana jedynie dla jednego konkretnego przypadku obciążenia ²⁾. Gdyby to obciążenie dominowało nad pozostałymi przypadkami obciążeń (jak np. ciężar własny w konstrukcjach żelbetowych), to projektowanie membran jako powierzchni minimalnych, byłoby uzasadnione. Jednakże w konstrukcjach membranowych, dominujący wpływ mają obciążenia zmienne:

¹⁾ Fotografia R. Tarczewski

²⁾ Patrz suplement, rozdz. 1.1

śnieg i wiatr. Dlatego, konstrukcje zaprojektowane „na stałe naprężenie”, zachowują tę właściwość jedynie dla stanu naciągu wstępnego, a przy działaniu obciążeń zewnętrznych mogą w nich występować bardzo niekorzystne rozkłady naprężeń.

Najbardziej oczywistym przykładem niekorzystnej pracy konstrukcji, której forma wstępna została określona jako powierzchnia minimalna, są powierzchnie stożkowe, np. takie jak na rys. 3.1.d). Istotnym problemem w tak ukształtowanych membranach są rozległe płaskie obszary w pobliżu wierzchołka¹⁾. Są one bardzo podatne na dynamiczne działanie wiatru i łatwo wpadają w trzepotanie. W takich sytuacjach najwłaściwsze jest zaprojektowanie konstrukcji w taki sposób, aby naprężenia wstępne w kierunku równoleżnikowym były wyraźnie większe niż naprężenia wstępne w kierunku południkowym membrany (różnica jest nawet kilkakrotna). Uzyskana powierzchnia wstępna membrany nie jest wprawdzie powierzchnią minimalną ale jest to powierzchnia będąca w równowadze statycznej, a sztywność membrany jest znacznie większa [102].

W procesie kształtowania formy stosowane są, jak wspomniano powyżej, zarówno modele numeryczne, jak i modele fizyczne. Te ostatnie są przydatne zwłaszcza w początkowej fazie projektowania, gdyż pozwalają na szybkie „uchwycenie” formy obiektu oraz wielokrotne jej korygowanie, przy stosunkowo niedużym nakładzie pracy. Stosowane są modele wykorzystujące błonki mydlane lub elastyczne, bardzo rozciągliwe tkaniny albo folie (jak kapton), rozpięte na szkielecie drucianym. W początkowych latach rozwoju konstrukcji membranowych, w oparciu o modele fizyczne określano nawet ostateczne wykroje tkaniny do wykonania konstrukcji. Błonki mydlane były stabilizowane (np. poprzez dodanie żelatyny) a następnie utwardzane przez pokrycie żywicą syntetyczną. Tak wykonane modele precyzyjnie mierzono, np. fotogrametrycznie, uzyskując dane geometryczne o kształcie projektowanej konstrukcji.

Obecnie modelowanie fizyczne służy niemal wyłącznie do projektowania koncepcyjnego. Początkowa geometria konstrukcji jest natomiast określana za pomocą komputera w oparciu o model numeryczny. Jest to proces iteracyjny, wykorzystujący te same metody obliczeniowe, które są stosowane do ostatecznych obliczeń konstrukcji.

3.3.2 Metody modelowania numerycznego

Zanim rozwinęły się metody modelowania numerycznego, konstrukcje tekstylne były wstępnie kształtowane za pomocą modeli fizycznych, a analiza obliczeniowa była wykonywana ręcznie, w sposób uproszczony. Pojawienie się programów do liniowej analizy obliczeniowej konstrukcji miało niewielki wpływ na projektowanie konstrukcji membranowych, ze względu na ich silną geometryczną nieliniowość. Nieliniowe systemy obliczeniowe są rozwijane od lat siedemdziesiątych XX w. i obecnie rutynowo stosowane.

Rozwój metod numerycznych nastąpił w związku z projektowaniem wielkiego dachu wiszącego dla stadionu olimpijskiego w Monachium²⁾.

Obecnie wykorzystywane w praktyce systemy bazują przede wszystkim na trzech podstawowych algorytmach³⁾:

- metoda gęstości sił (wraz z metodą sprzężonych gradientów)
- metoda dynamicznej relaksacji
- metoda chwilowej macierzy sztywności

W Europie kontynentalnej używana jest głównie metoda gęstości sił, podczas gdy w Wlk. Brytanii – metoda dynamicznej relaksacji, a w USA i Japonii – metoda chwilowej macierzy sztywności [137] [148].

¹⁾ Problem ten jest tym większy, im mniejsza jest średnica masztu lub górnego koła w szczycie membrany.

²⁾ Opracowano wtedy dwie z obecnie stosowanych numerycznych metod obliczeniowych: metodę chwilowej macierzy sztywności (Argyris, Siev, Haug i inni) oraz metodę gęstości sił (Linkwitz i Schek).

³⁾ Opracowano również metody energetyczne, wykorzystujące nieliniowe, gradientowe procedury minimalizacyjne (Buchholdt).

W metodach tych stosowane są dwa sposoby modelowania membran tekstylnych. W metodzie gęstości sił stosowany jest model dyskretny – siatki cięgnowej. W pozostałych dwóch metodach stosowane są modele ciągłe z trójkątnymi elementami powierzchniowymi¹⁾.

Podobnie jak w przypadku stosowania powierzchni minimalnych, występuje kontrowersja pomiędzy zwolennikami obu sposobów modelowania. Zwolennicy modelowania powierzchniowego podkreślają większą dokładność tej metody, podczas gdy zwolennicy modelu dyskretnego – niemożność precyzyjnego określenia niezbędnych danych początkowych dla modeli ciągłych, a zwłaszcza współczynnika Poissona dla materiałów tekstylnych.

Każdy z trzech, wymienionych wyżej algorytmów, bazuje na specyficznym pomysśle, ułatwiającym obliczenia numeryczne. W metodzie gęstości sił jest to założenie, że stosunek siły rozciągającej do długości każdego elementu cięgnowego jest stały. Pozwala to na sprowadzenie układu równań nieliniowych, do układu równań liniowych. Układ ten mógłby być w zasadzie rozwiązany bezpośrednio, jednakże ze względu na wielkość powstających macierzy oraz ich rozproszenie, stosowane są iteracyjne metody rozwiązywania, a zwłaszcza metoda sprzężonych gradientów²⁾ [148].

W metodzie relaksacji dynamicznej, równowaga statyczna systemu jest osiągana poprzez symulację pseudodynamicznego procesu tłumienia w czasie drgań, wywołanych oscylacją mas reprezentujących obiekt, pod wpływem niezerównoważonych sił [137].

W metodzie chwilowej macierzy sztywności, występowanie w konstrukcji sił naciągu wstępnego jest modelowane za pomocą tzw. sztywności geometrycznej elementów [137].

3.3.3 Wykroje

Zaprojektowana powierzchnia membrany jest dzielona na części montażowe – bryty, które podczas montażu są łączone pomiędzy sobą lub z konstrukcją wsporczą. Każda z takich części jest wykonywana z mniejszych arkuszy, wycinanych z tkaniny, dostarczanej w postaci rolek o szerokości od 2.5 do ok. 4 m.

Wykonanie z płaskiej tkaniny membrany, wymaga odwzorowania jej zakrzywionej przestrzennie powierzchni na płaszczyznę. Dawniej, wykonywano w tym celu precyzyjne modele w dużej skali, na które naklejano paski papieru. Po ich docięciu uzyskiwano wykroje tkaniny. Obecnie używane są do tego celu metody matematyczne stosowane w kartografii³⁾. Na rys. 3.3 i 3.4, przedstawiono kolejne fazy tego procesu.

Najważniejszym koncepcyjnie etapem tego procesu, jest ustalenie na powierzchni membrany linii połączeń pomiędzy poszczególnymi brytami tkaniny. Najkorzystniejsze jest projektowanie połączeń wzdłuż linii geodezyjnych⁴⁾ na powierzchni membrany. Dzięki temu, możliwe jest uzyskanie regularnych wykrojów, których jedna krawędź jest prosta. Ułatwia to w znacznym stopniu ich produkcję oraz pozwala zaoszczędzić tkaninę, w porównaniu do wykrojów wyznaczanych liniami niegeodezyjnymi, które mają charakterystyczny, „bananowo” wygięty kształt [147].

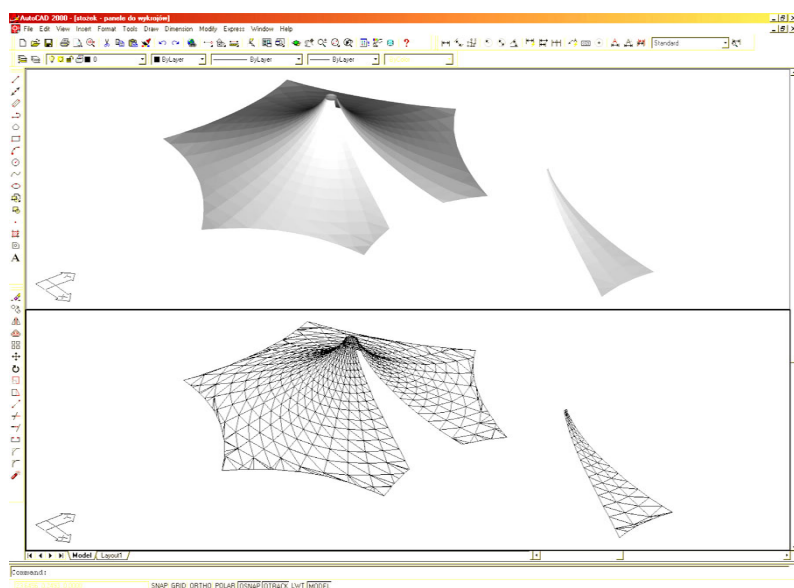
Przyjęcie układu linii geodezyjnych, określających linie połączeń brytów tkaniny, ma duże znaczenie dla kształtu i wielkości sił w membranie oraz wielkości jej odkształceń. Jest to istotny czynnik, który należy uwzględnić w projektowaniu membran tekstylnych [148].

¹⁾ Preferencja w stosowaniu elementów określonego rodzaju w danej metodzie nie ma uzasadnienia teoretycznego lub obliczeniowego. Możliwe jest stosowanie elementów powierzchniowych w metodzie gradientów sprzężonych, a elementów cięgnowych – w pozostałych metodach [148].

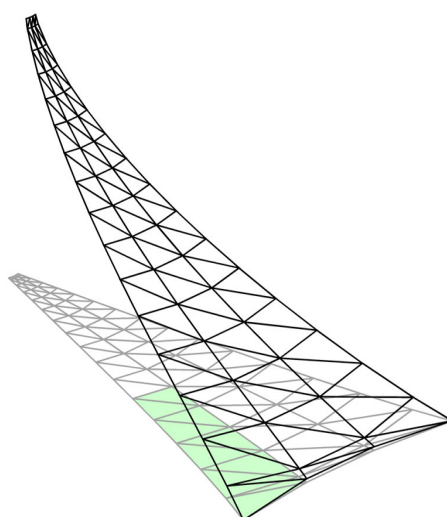
²⁾ Patrz [168].

³⁾ Najczęściej stosowane jest odwzorowanie Merkatora [102].

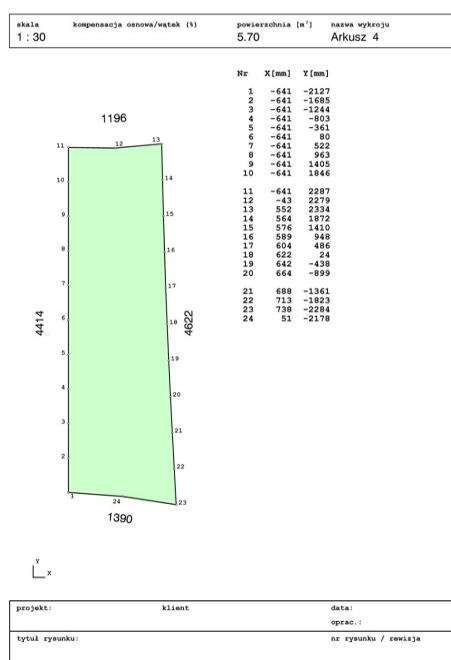
⁴⁾ Linie geodezyjne są definiowane jako linie o zerowej krzywiznie w płaszczyźnie. Ich właściwością jest, że po rozwinięciu na płaszczyźnie są proste [148].



Rys. 3.3 – podział powierzchni membrany na elementy, o odpowiednio zorientowanym układzie włókien



Rys. 3.4 – odwzorowanie zakrzywionej powierzchni elementu membrany na płaszczyźnie

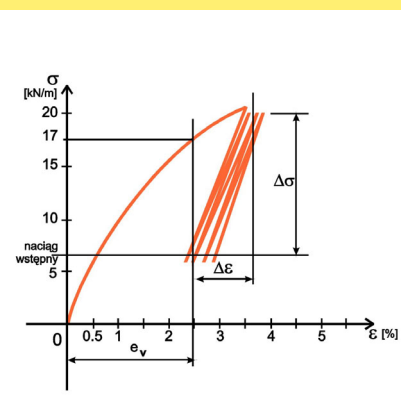


Rys. 3.5 – rysunek wykonawczy jednego arkusza wykroju tkaniny, zaznaczonego na rys. 3.4., przygotowany do produkcji

Rysunek opracowano za pomocą pakietu oprogramowania Easy, v 7.6, firmy Technet GmbH [10]

W wyniku odwzorowania na płaszczyznę, można przygotować wykroje tkaniny, tj. rysunki poszczególnych arkuszy, które będą wycinane. Uwzględnia się przy tym wyznaczoną wcześniej kompensację, zmniejszając odpowiednio wymiary wykroju. Kompensacja ma na celu zapobieżenie zmniejszeniu wielkości sił naciągu wstępnego, na skutek plastycznych odkształceń tkaniny. Ogólna zasada wyznaczania kompensacji jest przedstawiona na rys. 3.6. Przykład rysunku, stanowiącego fragment dokumentacji wykonawczej membrany przedstawia rys. 3.5.

Rys. 3.6 przedstawia przykładową zależność naprężenie-odkształcenie dla kierunku osnowy pewnej tkaniny, wyznaczoną w próbie dwuosiowego rozciągania. Próba ta została przeprowadzona dla zakresu naprężeń wyznaczonego przez: maksymalne dopuszczalne naprężenie (20 kN/m) oraz przyjętą wielkość naciągu wstępnego (7 kN/m). W zakresie tym obciążenie było wielokrotnie przykładane i usuwane. Uzyskany wykres pozwala ustalić wartość modułu sprężystości podłużnej tkaniny dla kierunku osnowy, jako: $E_o = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon = 13 / 0.01 = 1\,300$ kN/m. Ponadto, z wykresu widać, że aby wyeliminować wpływ plastycznego wydłużenia tkaniny, należy ją początkowo naciągnąć aż do uzyskania trwałego odkształcenia o wartości $\varepsilon_v = 2.5\%$. Konieczne jest do tego zastosowanie naciągu o wartości 17 kN/m. W przeciwnym wypadku, przy pierwszym wystąpieniu obciążeń użytkowych wywołujących maksymalne naprężenie, tkanina utraciłaby całkowicie naciąg wstępny.



Rys. 3.6 – sposób wyznaczania kompensacji membrany

Opracowano na podstawie [202]

Tkanina może być cięta ręcznie, po naniesieniu wymiarów poszczególnych arkuszy na jej powierzchnię. Taka technologia, stosowana tradycyjnie przy produkcji namiotów, wymaga znacznych powierzchni produkcyjnych i wielkiej staranności wykonania. Jest też bardzo pracochłonna. Obecnie najczęściej stosuje się wycinanie tkanin za pomocą automatycznych urządzeń, sterowanych komputerem, do którego wprowadza się opracowane rysunki wykrojów. Samo cięcie odbywa się mechanicznie, ostrzem tnącym lub palnikiem laserowym [23] [28].

3.3.4 Przykład wstępnego doboru formy konstrukcji membranowej

W celu porównania formy membrany, uzyskanej w dwóch procesach kształtowania:

- jako powierzchni minimalnej
 - jako innej powierzchni statycznie dopuszczalnej
- przeprowadzono porównanie tych procesów dla przykładowej konstrukcji.

Założono, że porównanie dotyczyć będzie konstrukcji membranowej rozpiętej na rzucie siedmiokąta, o maksymalnych wymiarach: 15.0×10.0 m. Zamocowanie wzdłuż jednej krawędzi – do ściany istniejącego, sąsiedniego budynku. Wzdłuż pozostałych krawędzi membrana jest rozpięta na linach, podpartych w wierzchołkach siedmiokąta na słupach o jednakowej wysokości – 2.20 m. Przyjęto, że membrana będzie ukształtowana jako powierzchnia zbliżona do stożkowej, z punktem górnym wyniesionym do wysokości 6.40 m. W tym miejscu przewidziany jest otwór okrągły, o średnicy 2.0 m. Szczegółowe wymiary konstrukcji przedstawia rys. 3.8.

Aby otrzymać powierzchnię minimalną, wykonano model konstrukcji z drutu, a następnie zanurzono w przygotowanym roztworze, dla uzyskania na nim błonki mydlanej. Powierzchnia była kształtowana poprzez stopniowe „wypychanie” słupa środkowego, aż do pozycji poprzedzającej bezpośrednie zniszczenie błonki. Poszczególne fazy tego procesu przedstawia rys. 3.7. Operację powtórzono wielokrotnie, uzyskując za każdym razem identyczne rezultaty.

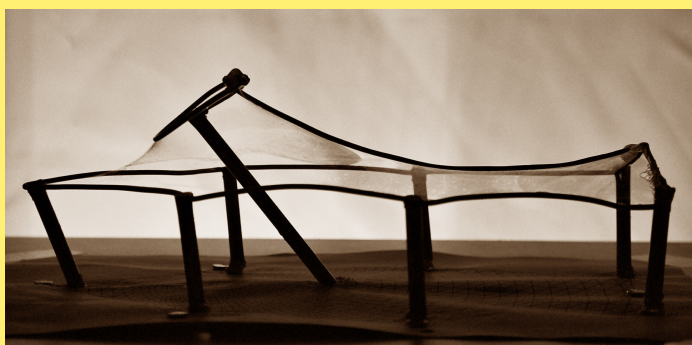
a).



b).



c).



d).



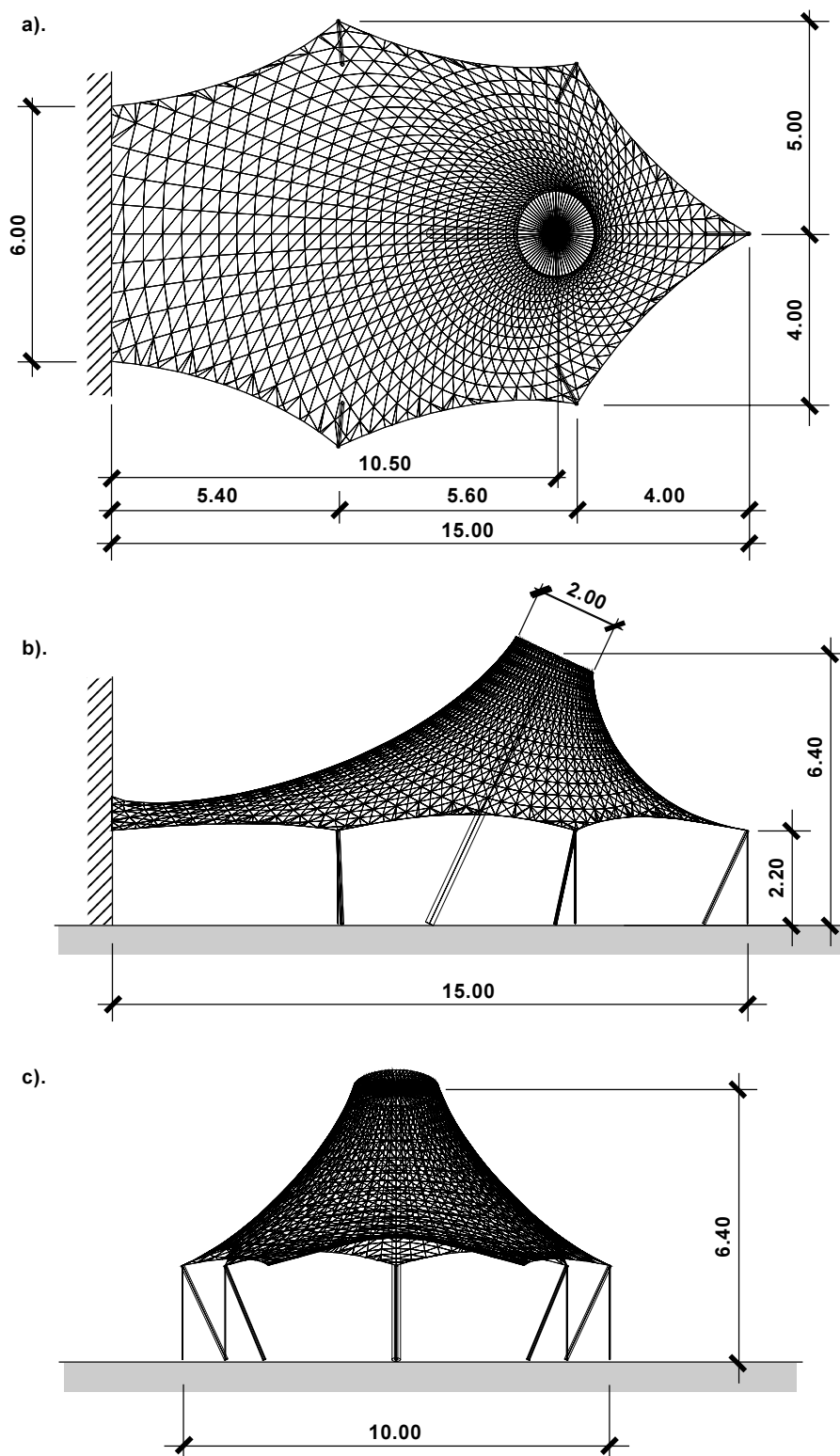
e).



Rys. 3.7 – kształtowanie powierzchni membrany jako powierzchni minimalnej, za pomocą błonki mydlanej:
 a). ÷ d). – kolejne fazy „wypychania” pierścienia górnego; widok boczny
 e). widok frontowy modelu, w położeniu końcowym

Drugi wariant powierzchni membrany otrzymano, za pomocą analizy modelu numerycznego. Wykorzystano w tym celu pakiet oprogramowania EASY (wersja 7.2), niemieckiej firmy Technet GmbH [10]. Jest to oprogramowanie wykorzystujące metodę gęstości sił i modelowanie dyskretne, analogicznie jak dla siatek cięgnowych. Przy doborze parametrów początkowych przyjęto:

- tkaninę Naizil Lite ADR (1100 dtex, 650 g/m²), dla której przyjęto moduł sprężystości w kierunku osnowy $E_o = 800$ kN/m, oraz w kierunku wątku $E_w = 800$ kN/m [24]
- naciąg wstępny w kierunku południkowym: 0.5 kN/m
- naciąg wstępny w kierunku równoleżnikowym: 5.0 kN/m

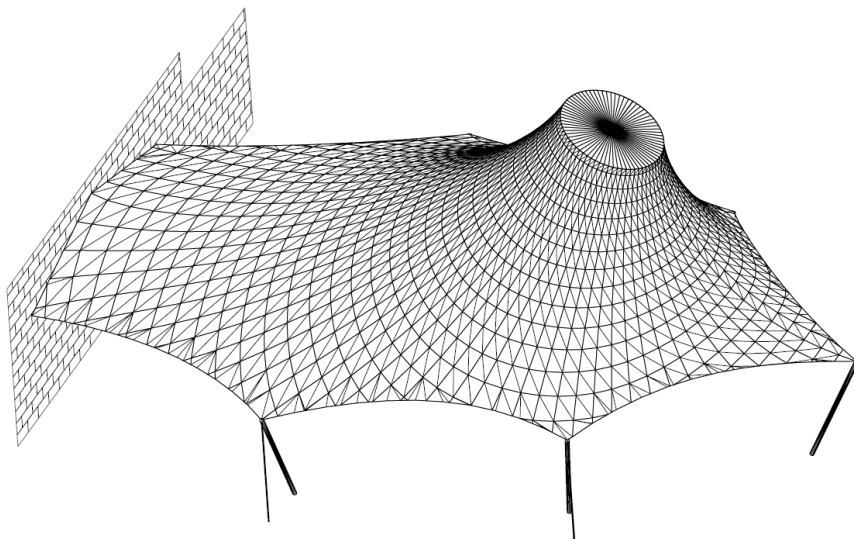


Rys. 3.8 – numeryczne kształtowanie powierzchni membrany, za pomocą oprogramowania wykorzystującego metodę gęstości sił – widok po zakończeniu procesu wstępnego kształtowania formy:

- a). rzut poziomy
b). widok boczny
c). widok frontowy

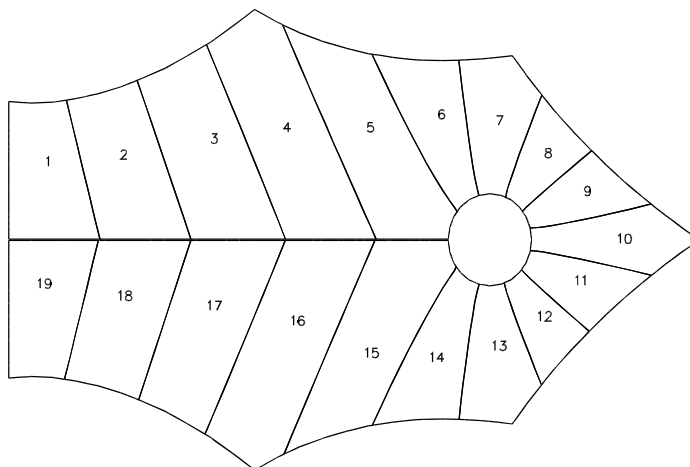
Wyniki kształtowania formy przedstawiają w drugim wariacie przedstawiają rysunki 3.8 i 3.9. Ponadto, dla tego wariantu, przedstawiono na rys.3.10, podział powierzchni membrany na bryty za pomocą linii geodezyjnych oraz uzyskane na tej podstawie wykroje.

Podstawową różnicą, widoczną przy porównaniu obu uzyskanych powierzchni, jest wyraźnie widoczny, wklęsły kształt błonki mydlanej na powierzchni frontowej w pobliżu wierzchołka oraz bardziej „płaskie” obszary powierzchni błonki w pobliżu cięgien bocznych. Obszary te, jak wspomniano w pktcie 3.3.1, są szczególnie wrażliwe na dynamiczne działanie porywów wiatru.

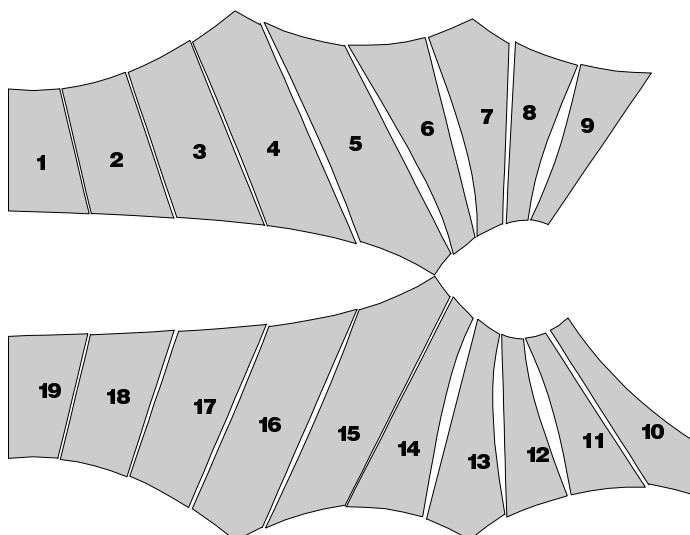


Rys. 3.9 – widok izometryczny powierzchni membrany uzyskanej w procesie kształtowania formy

a).



b).



Rys. 3.10 – przygotowanie wykrojów dla powierzchni membrany uzyskanej w procesie kształtowania formy:

- a). przyjęty układ linii geodezyjnych na powierzchni membrany, dzielący ją na poszczególne bryty
- b). wykroje tkaniny wygenerowane na podstawie podziału powierzchni membrany liniami geodezyjnymi z rys. 3.10.a).

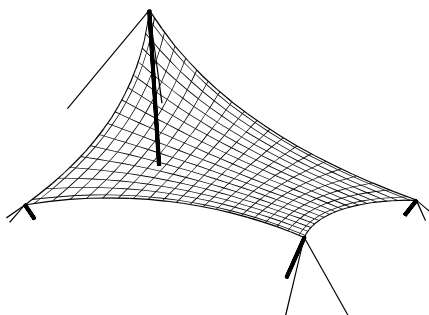
3.4 Podstawowe formy geometryczne konstrukcji membranowych

Wyróżnia się następujące, podstawowe formy geometryczne powierzchni konstrukcji membranowych oraz ich kombinacje:

Powierzchnie siodłowe | Są to powierzchnie zapewne najczęściej kojarzone z konstrukcjami wykorzystującymi tkaniny. Na powierzchniach tego typu występują dwie rodziny krzywych:

- skierowane wypukłością do dołu, które określają kierunek sił powstających od obciążeń skierowanych do dołu, oraz
- skierowane wypukłością do góry, określające kierunek sił powstających od obciążeń skierowanych do góry

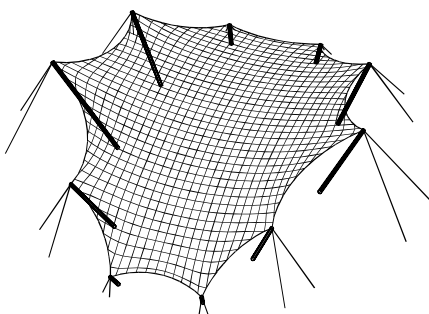
Poniżej przedstawiony jest przykład powierzchni siodłowej rozpiętej na pomiędzy czterema punktami nie leżącymi w jednej płaszczyźnie, rys. 3.11. Słupy-wahacze, połączone są cięgnami brzegowymi, do których zamocowana jest tkanina. To rozwiązanie bardzo przypomina żelbetowe powłoki w kształcie paraboloidy hiperbolicznej. Przykładem konstrukcji tego typu jest znany „żagiel” – przekrycie dla orkiestry, na wystawie ogrodniczej w Kassel, zaprojektowane przez Freia Otto, rys. 3.12.



Rys. 3.11 – powłoka siodłowa, o czterech punktach podparcia

Rys. 3.12 – zadaszenie dla orkiestry na wystawie federalnej w Kassel w 1955 r. Ilustracja za [76]

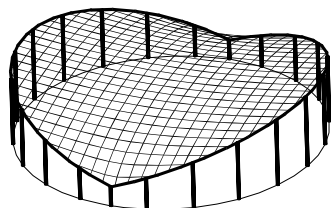
Powierzchnia siodłowa oparta na wielu punktach brzegowych połączonych cięgnami brzegowymi zachowuje układ podobny do powierzchni czteropunktowej, rys. 3.13. Może ona służyć np. jako rodzaj dużej „wiaty” umożliwiającej zadaszenie dużej powierzchni bez ścian bocznych. Rozwiązanie takie zastosowano jako przekrycie teatru letniego, rys. 3.14.



Rys. 3.13 – powierzchnia siodłowa o wielu punktach podparcia

Rys. 3.14 – powierzchnia siodłowa o wielu punktach podparcia zastosowana jako przekrycie teatru letniego Ilustracja za [233]

Powierzchnia siodłowa rozpięta pomiędzy dwoma stykającymi się, pochyłymi łukami, rys. 3.15, została zastosowana w konstrukcji pionierskiego obiektu – Paraboleum w Raleigh, zbudowanego wg pionierskiej koncepcji Macieja Nowickiego, rys. 3.16.

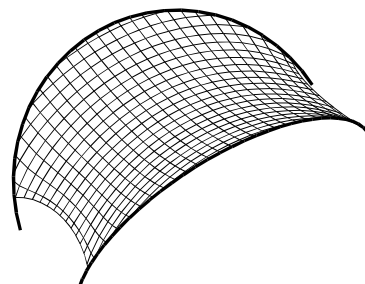
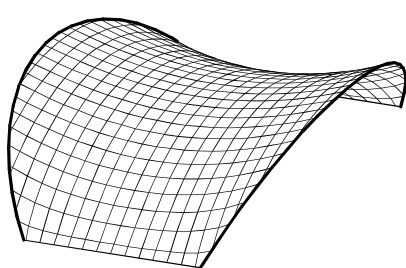


Rys. 3.15 – powierzchnia siodłowa rozpięta pomiędzy dwoma stykającymi się łukami

Rys. 3.16 – Paraboleum w Raleigh
Ilustracja za [53]

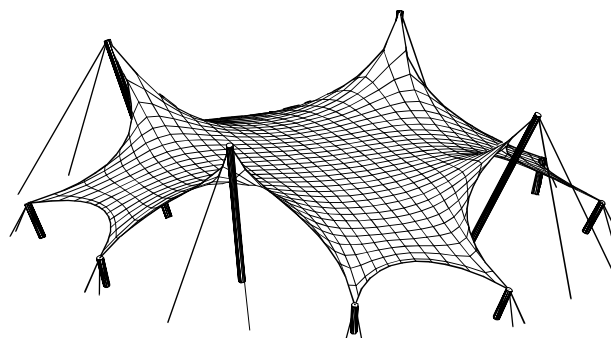
Inne ciekawe rozwiązanie powierzchni siodłowej można uzyskać przy rozsuniętych łukach i dodatkowej sztywnej krawędzi dolnej, rys. 3.17.

Zastąpienie sztywnej krawędzi pomiędzy łukami ciągnem zmienia formę przekrycia, rys. 3.18.



Rys. 3.17 – powierzchnia siodłowa rozpięta pomiędzy dwoma rozsuniętymi łukami i sztywną krawędzią dolną

Rys. 3.18 – powierzchnia siodłowa rozpięta pomiędzy dwoma rozsuniętymi łukami i ciągnami dolnymi



Rys. 3.19 – złożona powierzchnia siodłowa o punktach podparcia leżących na przemienne na różnych wysokościach

Najbardziej złożone formy powierzchni siodłowych można uzyskać poprzez zastosowanie na obwodzie szeregu wysokich i niskich punktów podparcia, rys. 3.19. Przykładem bardzo udanego rozwiązania tego rodzaju jest namiot okolicznościowy, zrealizowany w Malezji przez Bodo Rascha, rys. 3.20.



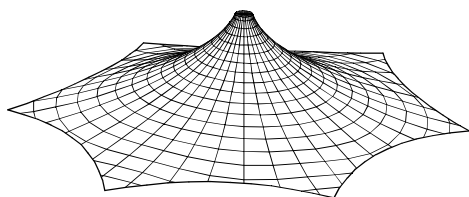
Rys. 3.20 – namiot okolicznościowy w Malezji
Ilustracja za [145]

Powierzchnie stożkowe | Kolejną, podstawową formą membran tekstylnych są powierzchnie stożkowe. Powstają one poprzez przemieszczenie punktu środkowego poza płaszczyznę, w której leżą punkty brzegowe. Punkt środkowy może być podparty od wewnątrz (przez słup stały lub pływający – podwieszony na cięgnach) lub od zewnątrz, poprzez podwieszenie do innych elementów konstrukcyjnych (np. do łuku stalowego lub do sąsiedniego budynku).

W pojedynczych powierzchniach stożkowych, punkt środkowy jest najczęściej podpierany przez centralnie umieszczony słup, rys. 3.21.

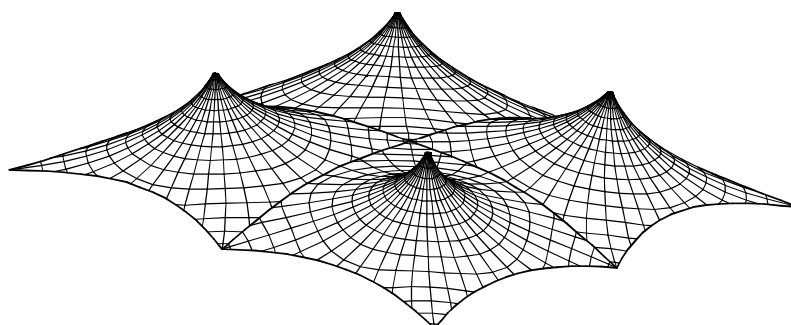
Przykładem zastosowania pojedynczej powierzchni stożkowej może być budynek Channel Terminal, w Folkestone, w Anglii, rys. 3.22.

Na przejściu granicznym w Calexico, w Kalifornii, zastosowano powierzchnie stożkowe podparte na słupie „pływającym”, rys. 3.24.



Rys. 3.21 – pojedyncza powierzchnia siodłowa

Rys. 3.22 – stożkowe zadaszenie terminalu w Folkestone
Ilustracja za [30]



Rys. 3.23 – powierzchnia stanowiąca kombinację czterech pojedynczych powierzchni siodłowych

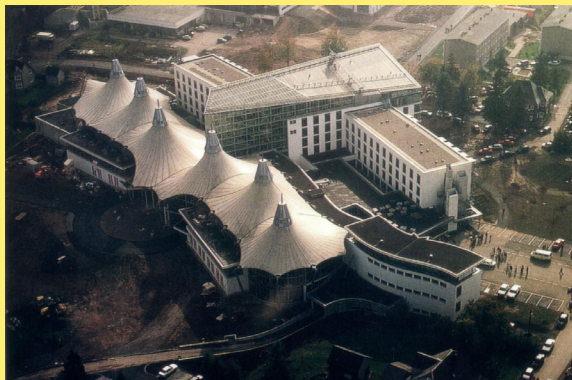
Kombinacja kilku powierzchni stożkowych pozwala uzyskać powierzchnie o charakterystycznym, „pagórkowatym” kształcie, rys. 3.23. W takim układzie zaprojektowana została sala sportowa dla La Verne College, w Kalifornii – pierwszy obiekt, w którym zastosowano tkaninę z włókna szklanego pokrytego teflonem, rys. 3.25.



Rys. 3.24 – membrany stożkowe podparte „pływającymi” słupami na przejściu granicznym w Calexico
Ilustracja za [30]

Rys. 3.25 – hala sportowa La Verne College w Kalifornii
Ilustracja za [30]

Inny ciekawy przykład stanowi klinika w Masserbergu, w Niemczech (rys. 3.26).

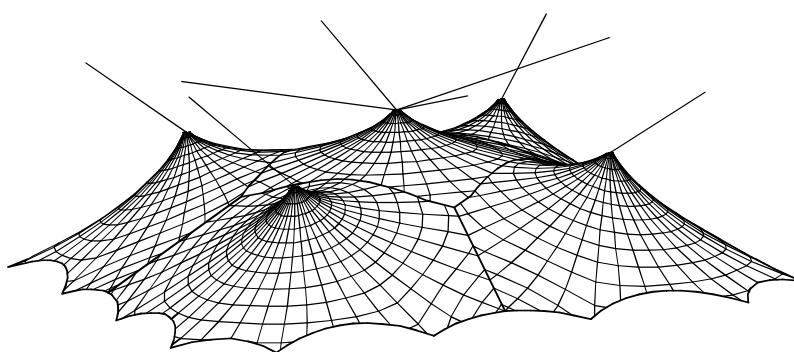


Rys. 3.26 – widok lotniczy kliniki w Masserbergu
Ilustracja za [189]

Zastosowanie zewnętrznego podwieszenia powierzchni stożkowych jest często stosowane w sytuacjach, kiedy wewnętrzna przestrzeń musi być wolna od podpór.

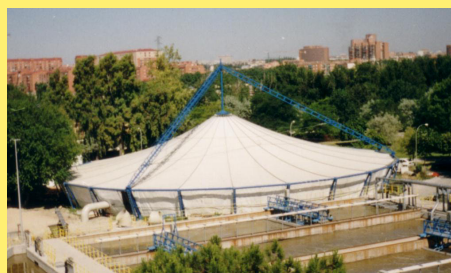
Schemat powierzchni stożkowej o wielu wierzchołkach, które są podwieszone za pomocą lin do punktów zewnętrznych, np. masywnych budynków w sąsiedztwie, rys. 3.27. Takie rozwiązanie zastosowano przy zadaszeniu dziedzińca w budynku Markies, w Brukseli.

Pięknym przykładem takiej konstrukcji jest dworzec lotniczy w Dżiddah (Haj Terminal) w Arabii Saudyjskiej, rys. 3.28.



Rys. 3.27 – kombinację kilku powierzchni siodłowych, których punkty środkowe są podwieszone do zewnętrznej konstrukcji

Powierzchnie stożkowe są również często stosowane w obiektach przemysłowych. Przykładem może być zadaszenie zbiorników w oczyszczalni ścieków w Madrycie, rys. 3.29.

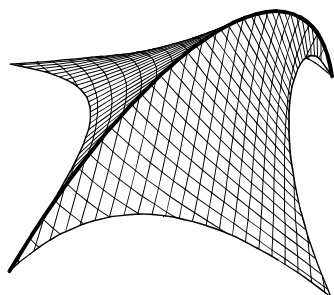


Rys. 3.28 – widok terminalu lotniczego w Dżiddah
Ilustracja za [173]

Rys. 3.29 – przekrycie membranowe jednego ze zbiorników oczyszczalni ścieków w Madrycie
Fot. autora

Powierzchnie oparte na łukach | Zastosowanie łuków pozwala na wprowadzenie do konstrukcji linii o wypukłości skierowanej ku górze, rys. 3.30. Łuki mogą stanowić samodzielne podparcie membrany lub, zawieszone na linach jako pływające, zmieniać lokalnie jej geometrię, rys. 3.31.

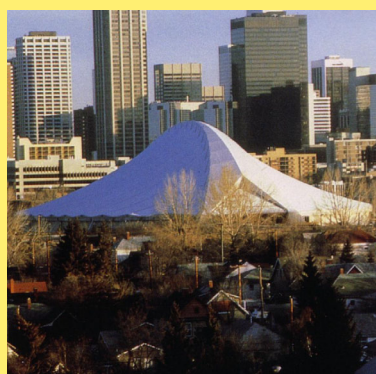
Przykładem konstrukcji wykorzystującej łuk, jako podparcie tkaniny jest obiekt wybudowany na wystawie ogrodniczej w Kolonii, w Niemczech, w 1957 r., rys. 3.31.



Rys. 3.30 – schemat powierzchni membranowej podparciej łukiem

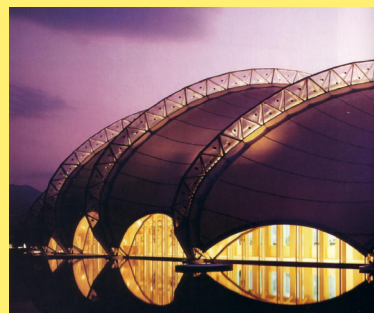
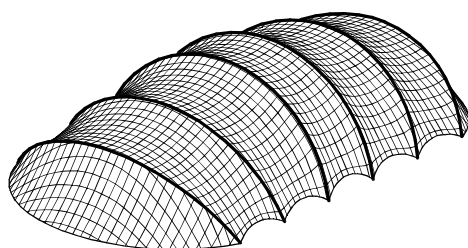
Rys. 3.31 – zadaszenie na wystawie ogrodniczej w Kolonii, 1957 r.
Ilustracja za [76]

Rozwiązanie z Kolonii, ale w znacznie większej skali powtarza budynek Lindsey Park Aquatic Centre, w Calgary, w Kanadzie, rys. 3.32.



Rys. 3.32 – Lindsay Park Aquatic Centre, w Calgary
Ilustracja za [23]

Zastosowanie szeregu łuków jako podparcia, pozwala na uzyskanie powierzchni przypominającej powierzchnię synklastyczną, rys. 3.33. Przykładem obiektu o takiej konstrukcji jest laboratorium badawcze Venafrò, w Pozzilli, we Włoszech, rys. 3.34.



Rys. 3.33 – przykład przekrycia membranowego rozciągniętego na szeregu równoległych i pochylonych łuków

Rys. 3.34 – budynek laboratorium badawczego Venafrò w Pozzilli
Ilustracja za [189]

Inny, dobry przykład konstrukcji opartej na kilku łukach, to zadaszenie stacji benzynowej sieci FINA, w Wanlin, w Belgii, rys. 3.35.

Również obiekt wystawowy, Il Bigo, w porcie w Genui, we Włoszech wykorzystuje łuki jako elementy podpierające, rys. 3.36.



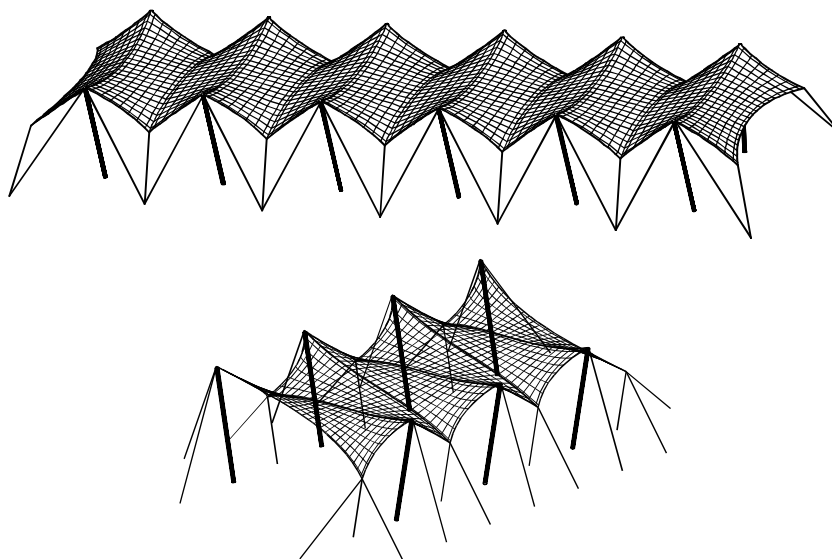
Rys. 3.35 – zadaszenie stacji benzynowej FINA w Wanlin, w Belgii
Ilustracja za [189]

Rys. 3.36 – Il Bigo, w porcie w Genui
Ilustracja za [233]

Powierzchnie faliste | Powierzchnie faliste są zasadniczo oparte na układzie dwóch, płaskich cięgien: nośnego (skierowanego wypukłością do dołu) i napinającego (wypukłością do góry).

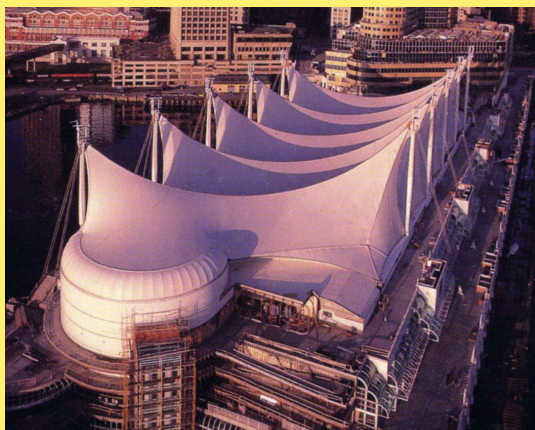
Jeżeli cięgna nośne i napinające są umieszczone na przemian, równoległe do siebie, to powstaje klasyczna forma powierzchni falistej, rys. 3.37.

Przykładem konstrukcji tego typu jest budynek wystawowy na targi światowe w 1985 r. – Canada Harbour Place, w Vancouver, rys. 3.39.



Rys. 3.37 – przykład powierzchni falistej

Rys. 3.38 – przykład powierzchni falistej o formie łamanej



Rys. 3.39 – widok budynku Canada Harbour Place w Vancouver
Ilustracja za [55]

Odmiany form falistych powstają, jeżeli cięgna nośne i napinające nie są do siebie równoległe. Rysunek 3.38 przedstawia konstrukcję, w której wszystkie cięgna pełnią rolę zarówno cięgien nośnych jak i napinających.

Powierzchnie faliste mogą również występować w układzie promienistym. Przykładem może być stadion King Fahd International Stadium, w Rijadzie, rys. 3.40 oraz obiekty na Wystawie Światowej w Brisbane, w 1988 r., rys. 3.41.



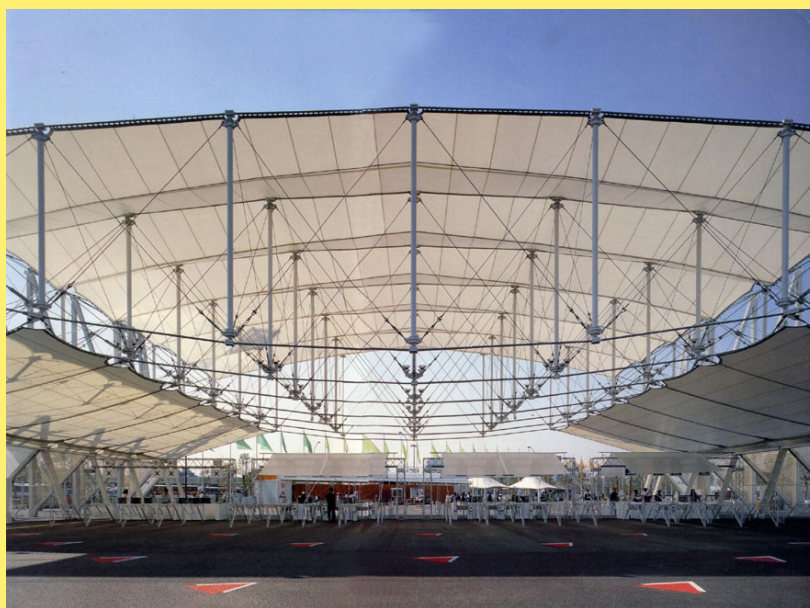
Rys. 3.40 – widok stadionu im. Króla Fahda, w Rijadzie
Ilustracja za [55]



Rys. 3.41 – obiekty na Wystawie Światowej w Brisbane, w 1988 r.
Ilustracja za [154]

Inne formy | Wymienione, podstawowe rodzaje powierzchni, na jakich kształtowane są konstrukcje namiotowe, nie wyczerpują oczywiście wszystkich możliwości. W zrealizowanych projektach bardzo często spotyka się połączenia kilku z nich, zwykle twórczo wykorzystujące możliwości kształtowania membran.

Odrębnego wspomnienia wymagają konstrukcje typu tensegrity¹⁾. W konstrukcjach tych pręty ściskane występują wyłącznie jako oddzielne, nie łączące się bezpośrednio ze sobą elementy. Są one umieszczone pomiędzy naprężonymi cięgnami. Poszczególne moduły tensegrity, budowane w oparciu o wielościany foremne, są wewnętrznie zrównoważone i nie wymagają dodatkowej konstrukcji przejmującej siły naciągu cięgien. Z konstrukcjami tensegrity najczęściej współpracują membrany tekstylne, stanowiąc jednocześnie ich pokrycie. Jedną z odmian tego typu konstrukcji są kopuły kablowe. Kilka spośród największych obiektów sportowych na świecie zostało wykonanych w oparciu o tę zasadę. Przykładem może być hala olimpijska z 1994 r. Georgia Dome, w Atlancie, w USA. Innym, bardzo ciekawym przykładem konstrukcji tensegrity jest brama Takashima-cho Gate, na wystawie w Jokohamie (Yokohama Exotic Showcase), w 1989 r., rys. 3.42.



Rys. 3.42 – widok bramy wejściowej Takashima-ch, na targi w Jokohamie
Ilustracja za [23]

¹⁾ Konstrukcje te powstały na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX w., dzięki pracom Kennetha Snelsona i Richarda B. Fullera. Słowo tensegrity powstało jako skrót wyrażenia „*tensile integrity*”, co Fuller obrazowo przedstawił jako pręty stanowiące „wyspy ściskania w morzu rozciągania”.

4 Klasyfikacja konstrukcji membranowych

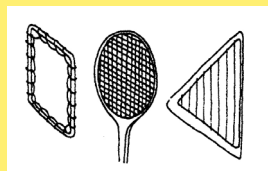
4.1 Uwagi wstępne

Z punktu widzenia systematyki rozpatrywanych konstrukcji, zastosowanie spójnej klasyfikacji jest istotnym narzędziem ich uporządkowania. Ułatwia to analizę występujących rozwiązań i ustalenie zasadniczych tendencji rozwojowych.

Obiekty o konstrukcji membranowej są klasyfikowane przez różnych autorów według różnych kryteriów i stąd poszczególne rodzaje klasyfikacji mają ściśle określony zakres zastosowania. Najczęstszym rozróżnieniem jest podział konstrukcji membranowych na namiotowe i pneumatyczne. Dalsze zróżnicowanie proponowanych systemów klasyfikacyjnych polega na przyjęciu różnych kryteriów podziału. Najczęściej przyjmowane są kryteria funkcjonalne, morfologiczne i konstrukcyjne.

Poniżej przedstawiono wybrane, najbardziej charakterystyczne stosowane systemy klasyfikacyjne, odrębnie dla konstrukcji namiotowych i dla konstrukcji pneumatycznych.

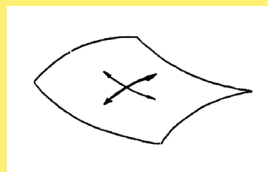
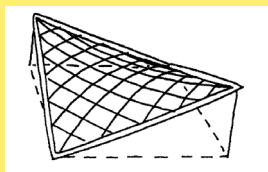
płaska powłoka rozpięta na ramie



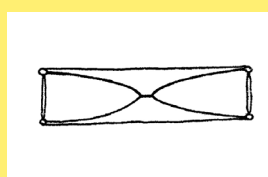
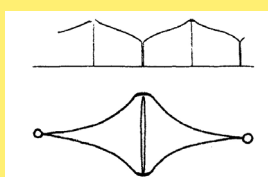
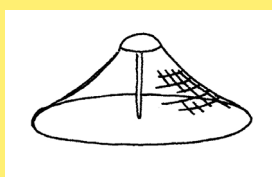
Rys. 4.1 – klasyfikacja konstrukcji membranowych wg Freia Otto i Petera Stromeyera

Ilustracje za [160]

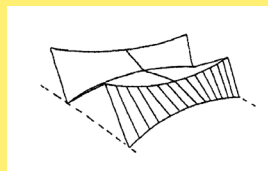
membrany wygięte siodłowo



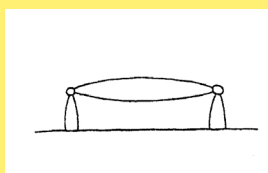
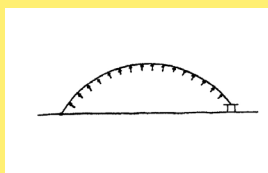
membrany z podporą wewnętrzną



powłoki faliste i siatki linowe



konstrukcje pneumatyczne



4.2 Klasyfikacja konstrukcji namiotowych

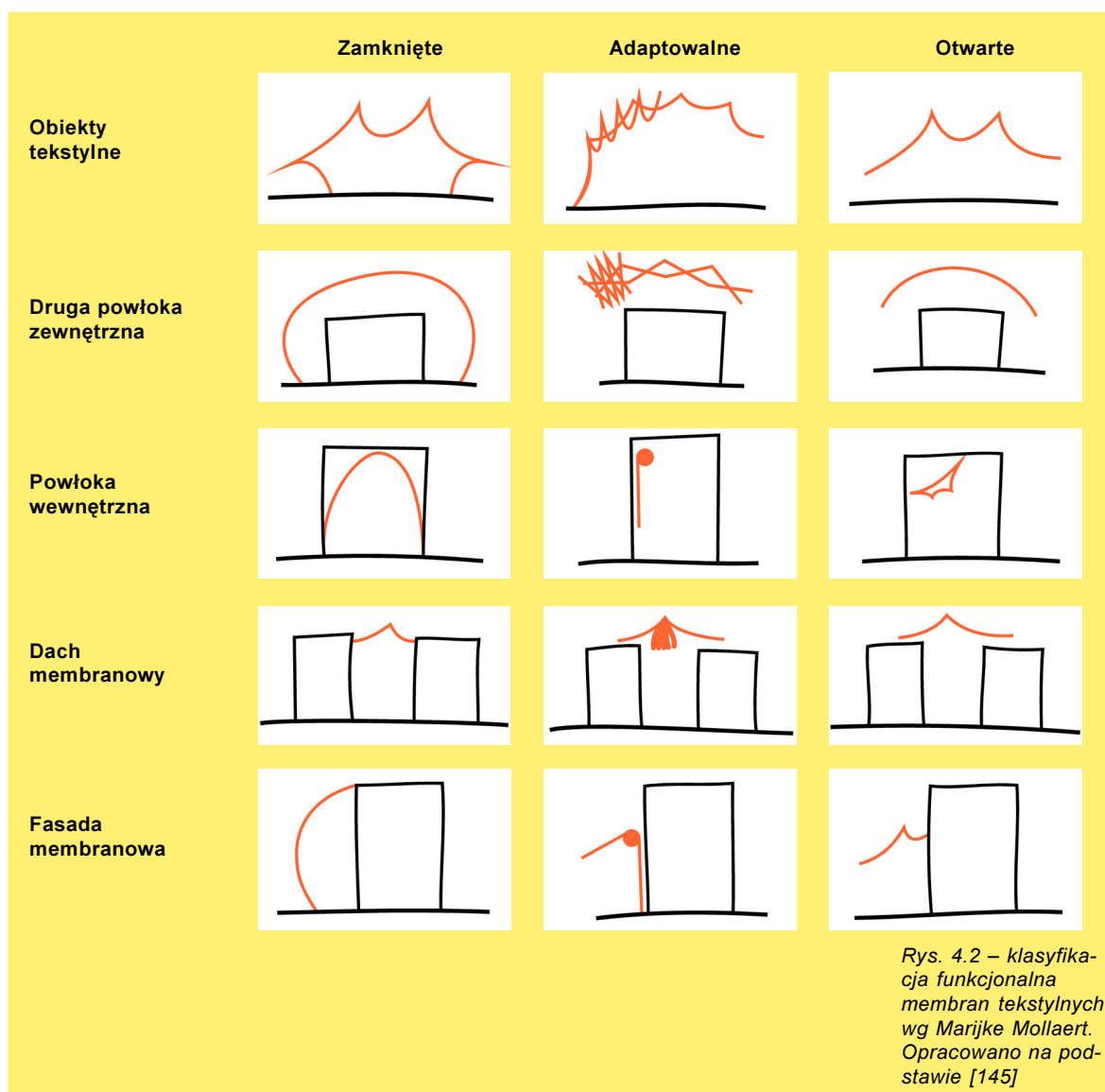
4.2.1 Klasyfikacja wg Wł. Borusiewicza

Władysław Borusiewicz przedstawił, w pracy [65], ogólny podział przekryć wiszących, do których zaliczył również przekrycia membranowe. Wyróżnił on przekrycia:

- **linowe**, w których cięga nośna pracują niezależnie od warstwy pokrycia lub stropu
- **powłokowe**, składające się z cięgien nośnych w postaci siatki ortogonalnej lub trójkątnej oraz z pokrycia lub wypełnienia
- **blonowe**, w których bardzo cienka, jednorodna powłoka spełnia jednocześnie funkcję ustroju nośnego i pokrycia. W zależności od przebiegu naprężeń w błonie, wyróżnia się błony: swobodne, napięte płaskie, napięte wygięte oraz wyrzuszone

4.2.2 Klasyfikacja wg F. Otto i P. Stromeyera

Jedna z najwcześniejszych prób sklasyfikowania konstrukcji membranowych została podjęta przez pionierów tego typu konstrukcji: Freia Otto i Petera Stromeyera, w pracy [160]. Ta, stosunkowo prosta klasyfikacja, jest oparta na kryterium kształtu powłoki i wyróżnia podstawowe formy konstrukcyjne. Podział konstrukcji membranowych wg tej klasyfikacji przedstawiono na rys. 4.1.



4.2.3 Klasyfikacja funkcjonalna

Klasyfikację membran tekstylnych, jako elementów składowych budynków, zaproponowała Marijke Mollaert, w pracy [145]. W klasyfikacji tej przyjęto dwa kryteria podziału:

- część budynku, którą stanowi membrana: przekrycie zewnętrzne, druga powłoka zewnętrzna, powłoka wewnętrzna, dach membranowy, fasada membranowa
- rodzaj konstrukcji: zamknięta powłoka, powłoka adaptowalna (składalna) i powłoka otwarta

Schematy membran usystematyzowanych według klasyfikacji funkcjonalnej, przedstawia rys. 4.2.

4.2.4 Propozycja klasyfikacji morfologicznej

Ważna, z punktu widzenia kształtowania oraz konstruowania membran, jest klasyfikacja oparta o kryteria geometryczne. Poniżej zaproponowano, w oparciu o ogólną koncepcję, przedstawioną w pracy [87], klasyfikację morfologiczną konstrukcji membranowych namiotowych.

W klasyfikacji tej przyjęto trzy podstawowe kryteria geometryczne, determinujące formę membrany:

- kształt rzutu poziomego
- rodzaj podparcia brzegowego
- rodzaj podparcia pośredniego

Ze względu na ogromną ilość możliwych wariantów, zakres rozpatrywanych przypadków został ograniczony:

- w zakresie kształtu rzutu poziomego, do powierzchni wielokątów foremnych; nie rozpatrywano rzutów złożonych z kilku figur
- w zakresie rodzaju podparcia brzegowego, przyjęto możliwość podparcia łukiem, słupem, odciegami, belką brzegową i punktem stałym (tj. punktem leżącym poza rozpatrywaną membraną, do którego może ona być podwieszona)
- w zakresie podparcia pośredniego, przyjęto możliwość zastosowania słupów, łuków i cięgien

Tablica klasyfikacyjna tworzy trójwymiarową macierz, której składowe reprezentują odpowiednio poszczególne kryteria klasyfikacyjne. Ogólny schemat tej macierzy przedstawiono na rys. 4.3.

Poszczególne „przekroje” macierzy klasyfikacyjnej płaszczyznami prostopadłymi do osi reprezentującej rodzaj podparcia brzegowego, przedstawiają dwuwymiarowe tablice klasyfikacyjne, odpowiadające danemu rodzajowi podparcia. Na rys. 4.3. przedstawiono przykład takiej tablicy, dla podparcia brzegowego za pomocą odciegów. Położenie tej tablicy w ogólnej macierzy trójwymiarowej, zaznaczono na rys. 4.3. poprzez wyróżnienie.

Dla przedstawionego układu macierzy klasyfikacyjnej, proponuje się wprowadzenie symbolicznego zapisu, określającego poszczególne przypadki. Budowa oznaczenia jest następująca:

$$n[Xk — Ym] \quad (4.1)$$

gdzie: n – liczba określająca kształt rzutu poziomego, np. 3 – dla trójkąta, 12 – dla dwunastokąta itd.

X – litera, określająca rodzaj podparcia pośredniego:

k – liczba określająca ilość pośrednich elementów podpierających

Y – litera, określająca rodzaj podparcia brzegowego

m – liczba określająca ilość brzegowych elementów podpierających

Dla symboli X i Y , przyjęto następujące znaczenie liter:

A – łuk

B – belka

C – ciągnio

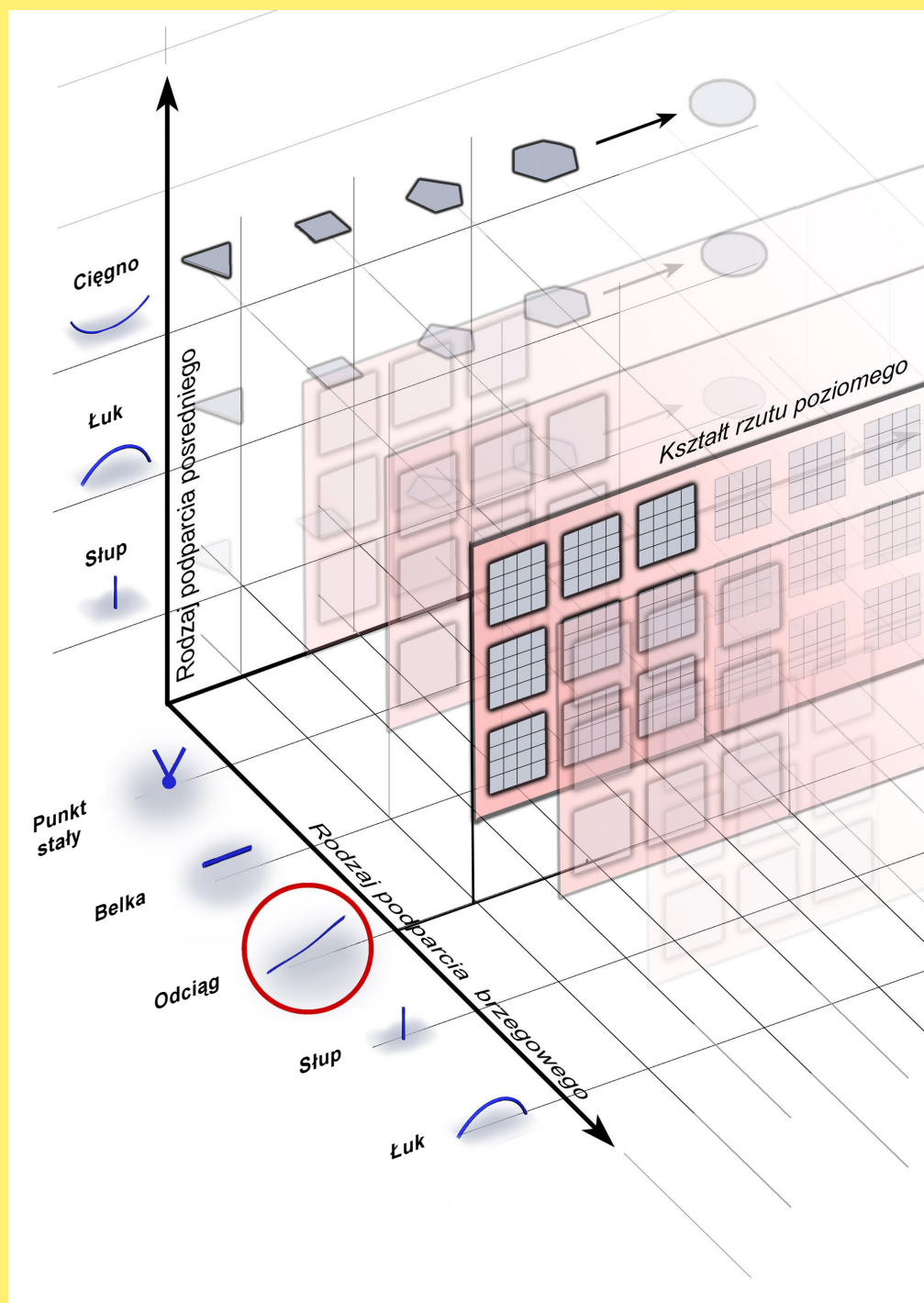
E – punkt stały

S – słup

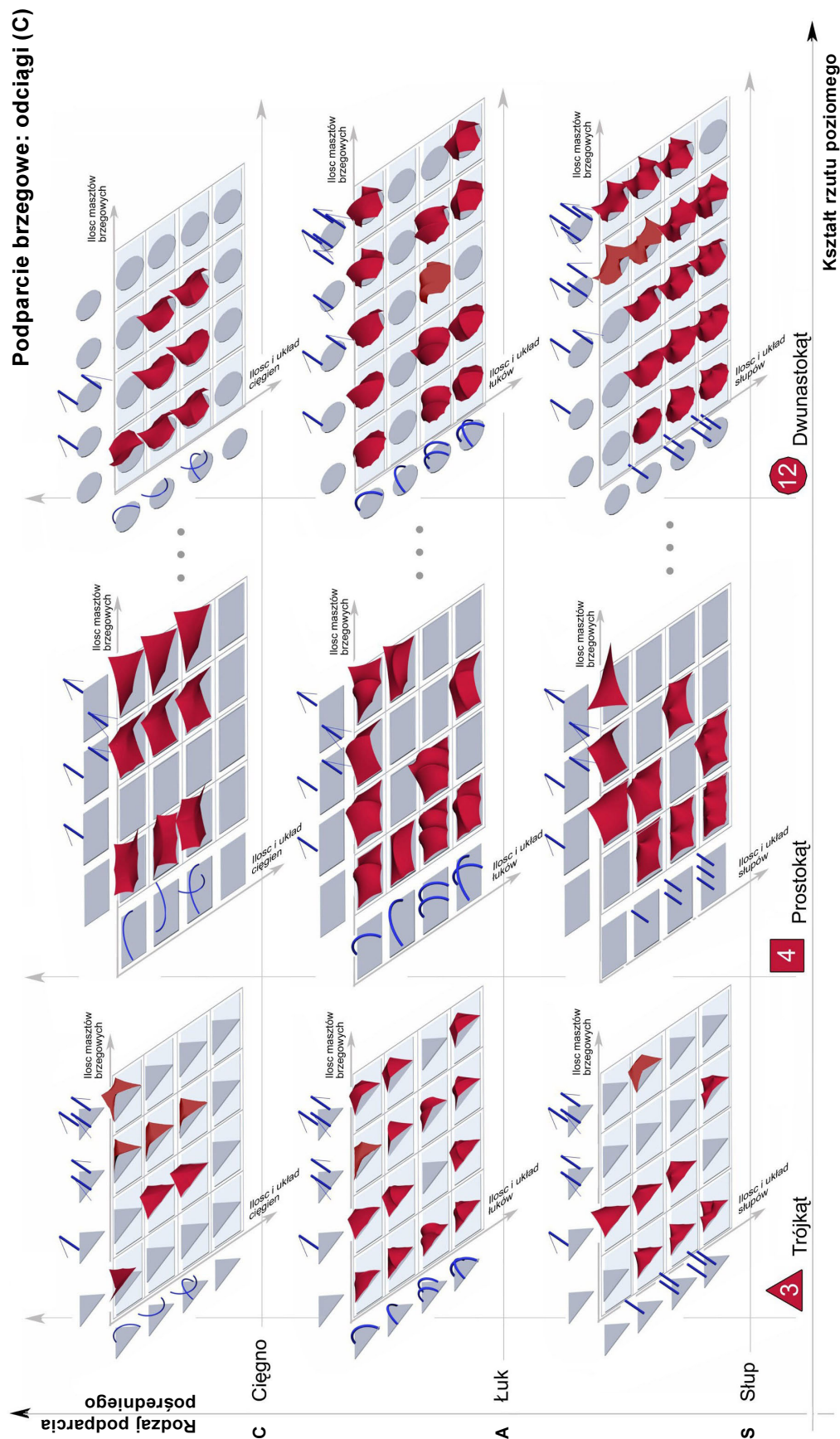
Przykładowe oznaczenie membrany na rzucie prostokąta, z podparciem brzegowym na dwóch słupach oraz z jednym ciągnem pośrednim, ma postać:

$$4[C1 - S2] \quad (4.2)$$

Wykorzystanie zaproponowanych tablic klasyfikacyjnych może ułatwić dobór formy konstrukcji dla konkretnego zadania projektowego, a także ułatwić budowę modelu analitycznego tej konstrukcji.



Rys. 4.3 – główna macierz klasyfikacji morfologicznej konstrukcji namiotowych (opis w tekście)



Rys. 4.4 – tabela dla podparcia brzegowego: odciagi

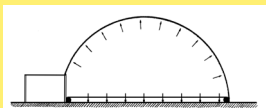
4.3 Klasyfikacja konstrukcji pneumatycznych

4.3.1 Klasyfikacja wg A. Tarczewskiego

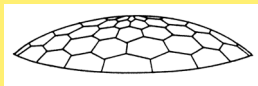
Pierwszą, polską propozycję podziału konstrukcji pneumatycznych sformułował Antoni Tarczewski, w pracy [208]. Klasyfikacja ta, opracowana w początkowej fazie rozwoju konstrukcji pneumatycznych, odzwierciedlała ówczesne poglądy na ich przyszły rozwój, antycypując ewolucję niektórych odmian, czasami przeceniając ich przyszłe znaczenie. Podział konstrukcji pneumatycznych wg tej klasyfikacji przedstawiono na rys. 4.5.

Typ I – konstrukcje o pneumatycznym wnętrzu użytkowym

– obrotowe



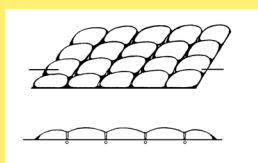
– wzmocnione siatką linową



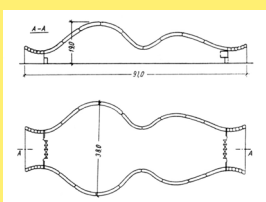
– złożone z kilku powierzchni obrotowych



– wieloprzęsłowe w obu kierunkach



– nieregularne

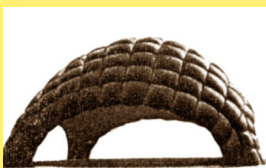


Rys. 4.5 – klasyfikacja konstrukcji pneumatycznych wg Antoniego Tarczewskiego

Opracowano na podstawie [208]

Typ II – przekrycia pneumatyczne

– materacowe



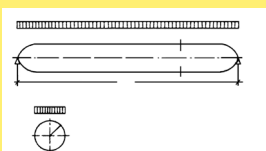
– soczewki dwupowłokowe
– zespoły worków pneumatycznych, dwu- i więcej powłokowych
– zespoły dętek pneumatycznych

– wielokomorowe

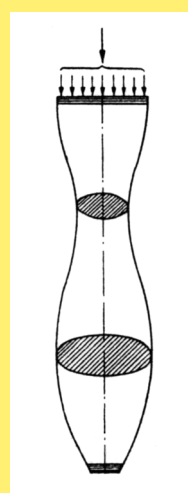


Typ III – żebrowe ustroje pneumatyczne

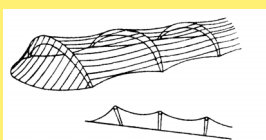
– żebra pneumatyczne



– słup pneumatyczny



– żebra łukowe połączone linami lub membraną



– kopuła z żeber pneumatycznych



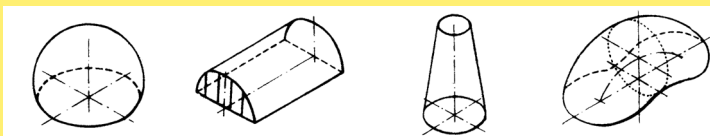
4.3.2 Klasyfikacja wg W. Jeremołowa

Wadim Jeremołow, w pracy [120], zaproponował bardzo interesującą klasyfikację konstrukcji pneumatycznych, opartą na ich cechach geometrycznych i konstrukcyjnych. Podstawowy podział konstrukcji pneumatycznych według tej klasyfikacji przedstawiono na rys. 4.6.

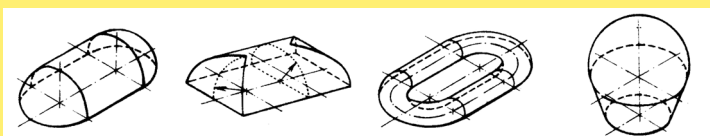
Pewną wadą tej klasyfikacji wydaje się zaliczenie konstrukcji o kształcie soczewkowym (poduszek) do konstrukcji typu otwartego

Systemy pneumatyczne otwarte

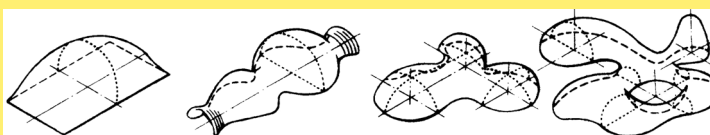
formy geometryczne:
– proste



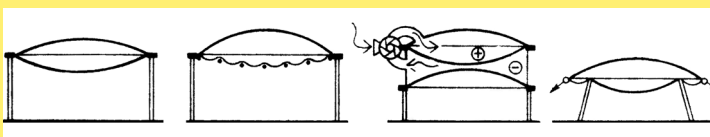
– zestawne



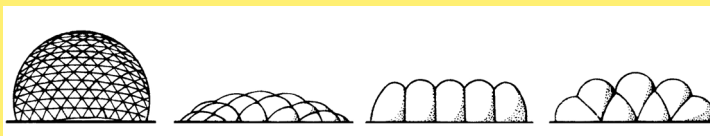
– złożone



soczewki (poduszki)



wzmocnione linami lub siatkami:
– jednoprzęsłowe

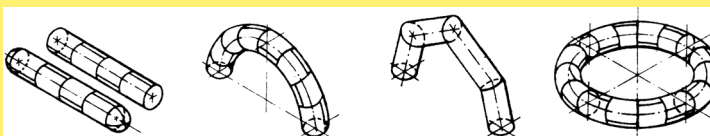


– wieloprzęsłowe

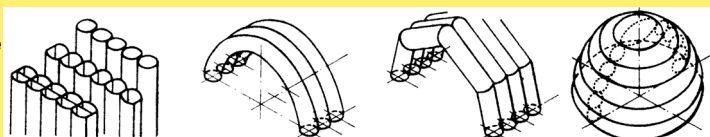


Systemy pneumatyczne zamknięte

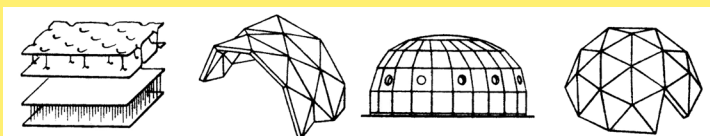
pręty



panele:
– ortotropowe



– izotropowe

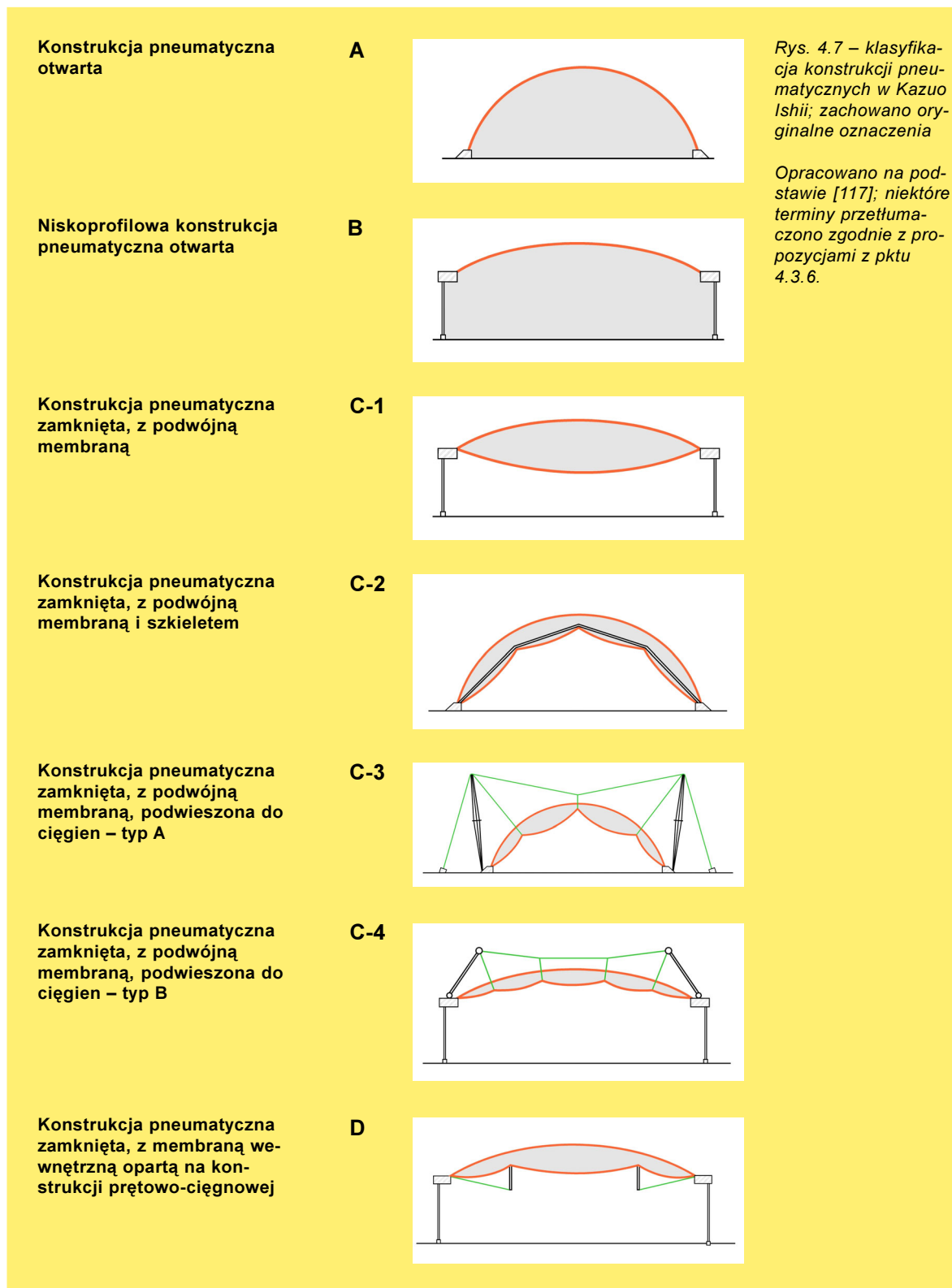


Rys. 4.6 – klasyfikacja konstrukcji pneumatycznych wg Wadima Jeremołowa

Opracowano na podstawie [120]; niektóre terminy przetłumaczono zgodnie z propozycjami z pktu 4.3.6.

4.3.3 Klasyfikacja wg K. Ishii

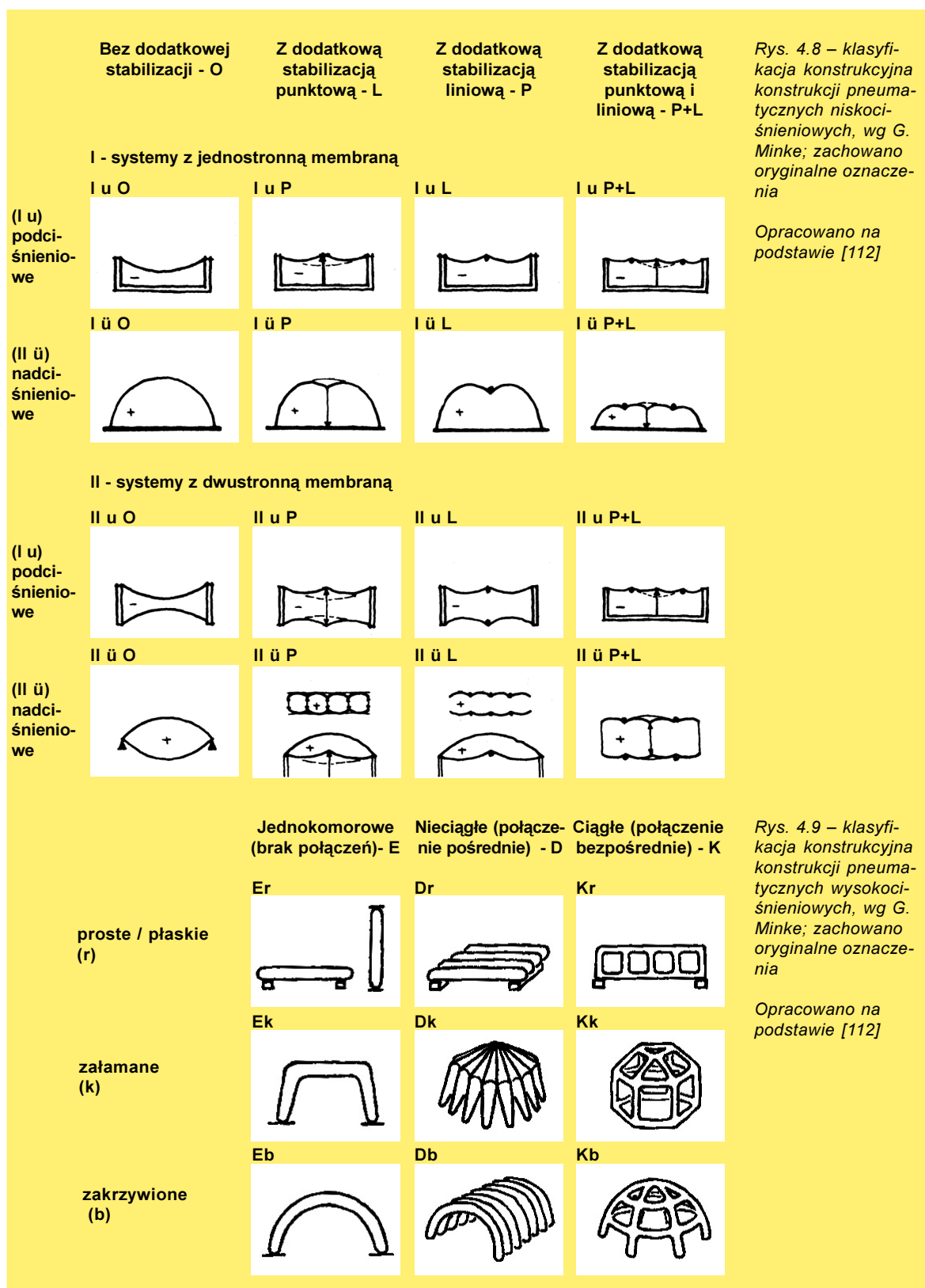
Klasyfikacja zaproponowana przez Kazuo Ishii, w pracy [117], jest oparta o kształt membrany i rodzaj zastosowanej dodatkowej konstrukcji wsporczej. Jest ona czytelnym odbiciem poglądów z okresu lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w.: sukcesu konstrukcji niskoprofilowych, których rozwój zapoczątkował pawilon amerykański na EXPO 70 w Osace oraz fascynacji konstrukcjami typu tensegrity. Podział konstrukcji pneumatycznych według tej klasyfikacji przedstawiono na rys. 4.7.



4.3.4 Klasyfikacja konstrukcyjna, wg G. Minke

Klasyfikację opartą o kryteria czysto konstrukcyjne, zaproponował Gernot Minke, w pracy [112]. Wyróżnia on systemy wysoko i niskociśnieniowe. Pierwszą z tych grup dzieli dalej na systemy z jednostronną i z dwustronną membraną, różnicując je w zależności od dodatkowych form stabilizacji oraz różnicy ciśnień działających na membranę, rys. 4.8.

Podział systemów wysokociśnieniowych oparty jest o ich kształt oraz budowę wewnętrzną (ilość i sposób połączenia komór), rys. 4.9.



Rys. 4.9 – klasyfikacja konstrukcyjna konstrukcji pneumatycznych wysokociśnieniowych, wg G. Minke; zachowano oryginalne oznaczenia

Opracowano na podstawie [112]

Rodzaj membrany / Rodzaj obiektu (6 wariantów)	Membrana otwarta / Obiekt zamknięty	Membrana zamknięta / Obiekt zamknięty	Membrana otwarta i membrana zamknięta / Obiekt otwarty i obiekt zamknięty	Membrana otwarta i membrana zamknięta / Obiekt otwarty i obiekt zamknięty	Membrana otwarta i membrana zamknięta / Obiekt otwarty i obiekt zamknięty

4.3.5 Klasyfikacja morfologiczna, wg T. Herzoga

Rozbudowaną klasyfikację morfologiczną konstrukcji pneumatycznych przedstawił Thomas Herzog, w pracy [112]. Stosuje on cztery kryteria klasyfikacyjne: rodzaj membrany i obiektu, proporcje obiektu, rodzaj powierzchni i rodzaj połączenia. Systematykę według tej klasyfikacji przedstawiono na rys. 4.10.

Pewna wadą tej klasyfikacji jest jej bardzo ogólny charakter. Operuje ona dość abstrakcyjnymi układami powierzchni, nieco oderwanymi od realiów budowlanych. Jej zaletą jest natomiast pokazanie bogactwa form, które można uzyskać przy kształtowaniu konstrukcji pneumatycznych.

4.3.6 Propozycja klasyfikacji konstrukcji pneumatycznych

Niezależnie od stosowanych, szczegółowych podziałów klasyfikujących konstrukcje pneumatyczne, powszechnie stosowany jest podział, na dwie główne grupy:

- konstrukcje, w których membrana nie tworzy ciągłego konturu, a podwyższone ciśnienie występuje w przestrzeni użytkowej obiektu (przestrzeń ta musi być zamknięta)
- konstrukcje, w których membrana wydziela zamkniętą przestrzeń, wewnątrz której występuje podwyższone (lub obniżone) ciśnienie, a w przestrzeni użytkowej obiektu panuje normalne ciśnienie (przestrzeń ta może być otwarta)

Podział ten znajduje swoje odbicie w wielu językach. W języku angielskim stosowane są odpowiednio określenia:

- *air-supported structure*
- *air-inflated structure*

W języku niemieckim używa się określeń:

- *offen (pneumatische) Membrane*
- *geschlossen (pneumatische) Membrane*

W języku rosyjskim:

- *воздухоопорные конструкции*
- *воздухонесомые конструкции*

W języku polskim, inaczej niż w innych językach, nie ustaliła się jeszcze jednoznaczna terminologia w tym zakresie. W pracy niniejszej proponuje się stosowanie odpowiednio określeń:

- **konstrukcje pneumatyczne otwarte**
- **konstrukcje pneumatyczne zamknięte**

Poniżej zaproponowano klasyfikację konstrukcji pneumatycznych, która uwzględnia powyższy podział, nawiązując jednocześnie do klasyfikacji, przedstawionych wcześniej w pktach 4.3.2 i 4.3.3.

Konstrukcje pneumatyczne otwarte

- 1). ze względu na formę:
 - proste (pojedyncza powierzchnia obrotowa)
 - zestawne (układ kilku powierzchni obrotowych, o gładkich stykach)
 - złożone (składające się z jednej lub kilku powierzchni, obrotowych lub nie, o stykach gładkich lub ostrych)
- 2). ze względu na profil:
 - wysokoprofilowe
 - niskoprofilowe
- 3). ze względu na dodatkową współpracującą konstrukcję:
 - bez dodatkowej konstrukcji
 - wzmocnione cięgnami
 - wzmocnione konstrukcją cięgnowo-prętową
- 4). ze względu na ilość przęseł:
 - jednoprzęsłowe
 - wieloprzęsłowe

Konstrukcje pneumatyczne zamknięte

- 1). ze względu na kształt:
 - liniowe („pręty”)
 - powierzchniowe („panele”)
 - przestrzenne („poduszki”)
- 2). ze względu na ciśnienie wewnętrzne:
 - niskociśnieniowe
 - wysokociśnieniowe
- 3). ze względu na kształt:
 - pojedyncze
 - złożone
 - modułarne
- 4). ze względu na dodatkową współpracującą konstrukcję:
 - bez dodatkowej konstrukcji
 - wzmocnione cięgnami
 - wzmocnione konstrukcją cięgnowo-prętową

5 Kształtowanie konstrukcji metodą deformacji geometrycznej

5.1 Podstawy metody deformacji geometrycznej

Uwagi wstępne | Sprężanie konstrukcji stalowych, w celu zwiększenia ich nośności oraz zapewnienia stateczności, jest stosowane od dawna [54] [125]. Inaczej niż to zwykle ma miejsce w konstrukcjach żelbetowych, w przypadku konstrukcji stalowych operacja ta umożliwia nie tylko zmianę rozkładu sił wewnętrznych w przekroju elementu [103], ale również zmianę sposobu pracy całej konstrukcji [54].

Pierwsze próby wykorzystania sprężania również do kształtowania konstrukcji stalowych, miały miejsce w połowie XX w. [185] [54]. Od tego czasu pojawiło się niezależnie kilka różnych propozycji rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych¹⁾, wykorzystujących ten pomysł. Ich wspólną cechą jest to, że konstrukcja prętowa, początkowo płaska, zostaje w trakcie procesu montażowego, na skutek sprężenia, wypiętrzona i uzyskuje formę łuku kratowego lub – w przypadku układów przestrzennych – kopuły prętowej. Z tego powodu, konstrukcje tego rodzaju mogą być zaliczone do grupy konstrukcji samowznoszących²⁾. Ze względu na specyfikę procesu montażowego, dalej będzie stosowane określenie „konstrukcje samowypiętrzalne³⁾”.

W omawianych rozwiązaniach, w pasie dolnym konstrukcji umieszczane są punkty dylatacyjne, które umożliwiają skrócenie prętów w trakcie sprężania. Siła sprężająca, wprowadzona poprzez ciągną, zabezpiecza styki dylatacyjne przed rozwarciem i zapewnia utrzymanie stałego znaku siły w prętach pasa dolnego. Z tego względu, ciągną i pręty muszą zawsze występować w pasie dolnym konstrukcji łącznie.

5.1.1. Koncepcja metody

Metoda deformacji geometrycznej jest to sposób kształtowania konstrukcji poprzez wstępne sprężenie, prowadzące do jej bardzo dużych odkształceń. Zmiana początkowej konfiguracji konstrukcji jest tak znaczna, że uzyskuje ona w trakcie tej operacji swój końcowy kształt. Zbędne są wobec tego dalsze czynności montażowe, związane z jej podnoszeniem do ostatecznego położenia – konstrukcja jest samowznosząca. Operacje kształtowania i montażu nie mogą być rozdzielone, stanowią one w istocie jeden proces technologiczny [211] [218].

Metoda deformacji geometrycznej może być zastosowana do konstrukcji o różnej budowie. Mogą to być zarówno dźwigary płaskie, jak i powierzchniowe. Składają się one zawsze z następujących, podstawowych elementów składowych:

- warstwa górna, zdolna przenosić ściskanie oraz, w niewielkim zakresie, zginanie
- warstwa dolna, składająca się z jednego lub więcej ciągn
- warstwa środkowa, występująca opcjonalnie, która umożliwia zmianę wysokości konstrukcyjnej
- podpory przegubowe: przesuwne, o dużym zakresie możliwego przemieszczenia (podpora ruchoma) oraz podpora nieprzesuwna

W szczególnym przypadku dźwigarów płaskich, warstwa górna oraz dolna redukują się odpowiednio do pasów: górnego i dolnego.

¹⁾ Rozwiązania te zostały przedstawione w rozdziale 2.3

²⁾ Określenie „konstrukcje samowznoszące”, jest stosowane ogólnie, w odniesieniu do konstrukcji, które są scalane na poziomie terenu, a następnie wypiętrzane do przewidzianego położenia poprzez przyłożenie w odpowiednio dobranych miejscach konstrukcji sił ściskających lub rozciągających. Dzięki temu, ich montaż nie wymaga stosowania urządzeń do transportu pionowego, takich jak żurawie budowlane. Oprócz konstrukcji wypiętrzanych poprzez sprężanie, które omówiono w rozdz. 2.3, znanym rozwiązaniem konstrukcji samowznoszących jest system montażu konstrukcji przestrzennych – Pantadome, opracowany przez M. Kawaguchi.

³⁾ odpowiednik ang. „self-erecting structures”

Przykładowe rozwiązania warstwy górnej, to: ciągły pręt, powłoka prętowa, cienka płyta warstwowa itp. [211] [218].

Warstwa dolna obejmuje ciągną, które pełnią podwójną rolę: są elementem umożliwiającym sprężenie i wypiętrzanie konstrukcji, a po zakończeniu tej fazy, stanowią (bez dodatkowych prętów) pas dolny.

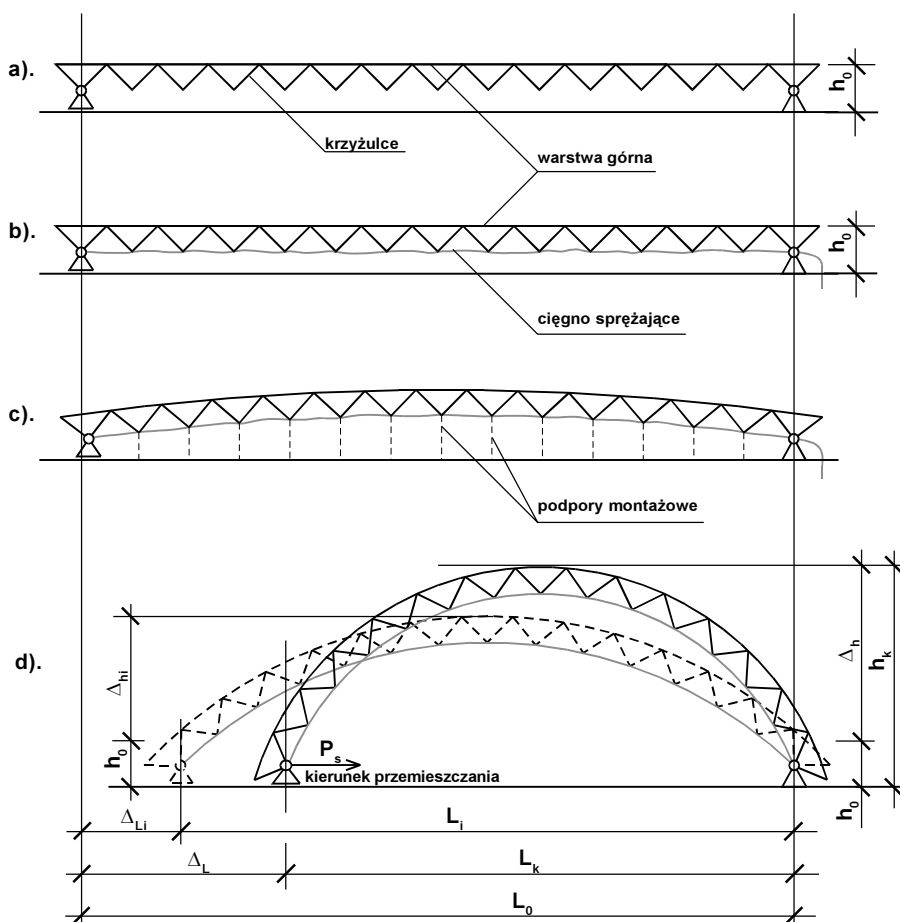
Warstwa środkowa jest zbudowana z prętów (krzyżulców), o stałej lub zmiennej długości. W niektórych rozwiązaniach warstwa ta nie musi występować, wtedy ciągną są umieszczone bezpośrednio poniżej warstwy górnej. Węzły łączące pręty tej warstwy z warstwą górną są przegubowe, nie przerywające ciągłości warstwy górnej. Węzły dolne są również przegubowe, ale muszą umożliwiać swobodny przesuw ciągną podczas wypiętrzania, i jego ewentualne zablokowanie w żądanej pozycji. W odniesieniu do tych węzłów będzie dalej używana nazwa „węzły przelotowe”.

5.1.2. Fazy kształtowania konstrukcji

Konstrukcja kształtowana metodą deformacji geometrycznej jest scalana na poziomie terenu i zamocowana w węzłach podporowych, z których jeden ma możliwość przemieszczania się w dużym zakresie. W tym położeniu jest ona niemal mechanizmem, i zachowuje geometryczną niezmienność jedynie dzięki sztywności giętnej warstwy górnej, rys. 5.1.a). Po założeniu ciągn i przeciągnięciu ich przez węzły przelotowe, konstrukcja jest gotowa do rozpoczęcia procesu wypiętrzania, rys. 5.1.b).

Proces wypiętrzania rozpoczyna się, od napięcia ciągn warstwy dolnej. Dla ułatwienia wypiętrzania, wskazane jest zastosowanie niewielkich podparć montażowych, które wymuszą przyjęcie przez konstrukcję łukowego kształtu, rys. 5.1.c).

Ciągną dolne są następnie dalej skracane. Powoduje to zbliżanie się podpory ruchomej do podpory nieprzesuwnej oraz stopniowe wypiętrzanie konstrukcji. Czynności te są kontynuowane aż do chwili osiągnięcia przez konstrukcję założonego kształtu, rys. 5.1.d).



Rys. 5.1 – fazy kształtowania konstrukcji metodą deformacji geometrycznej:

- wstępne scalenie konstrukcji
- przeciągnięcie ciągn sprężających przez węzły przelotowe
- konstrukcja ułożona na podparciach montażowych, nadających jej wstępne wygięcie
- sukcesywne sprężanie-wypiętrzanie konstrukcji

Oznaczenia:

- L_0 – długość początkowa konstrukcji
- L_i – długość chwilowa
- L_k – długość końcowa
- Δ_{L_i} – chwilowa zmiana długości
- Δ_L – końcowa zmiana długości
- h_0 – wysokość początkowa konstrukcji
- h_k – wysokość końcowa konstrukcji
- Δ_{h_i} – chwilowa zmiana wysokości
- Δ_h – końcowa zmiana wysokości
- P_s – siła sprężająca

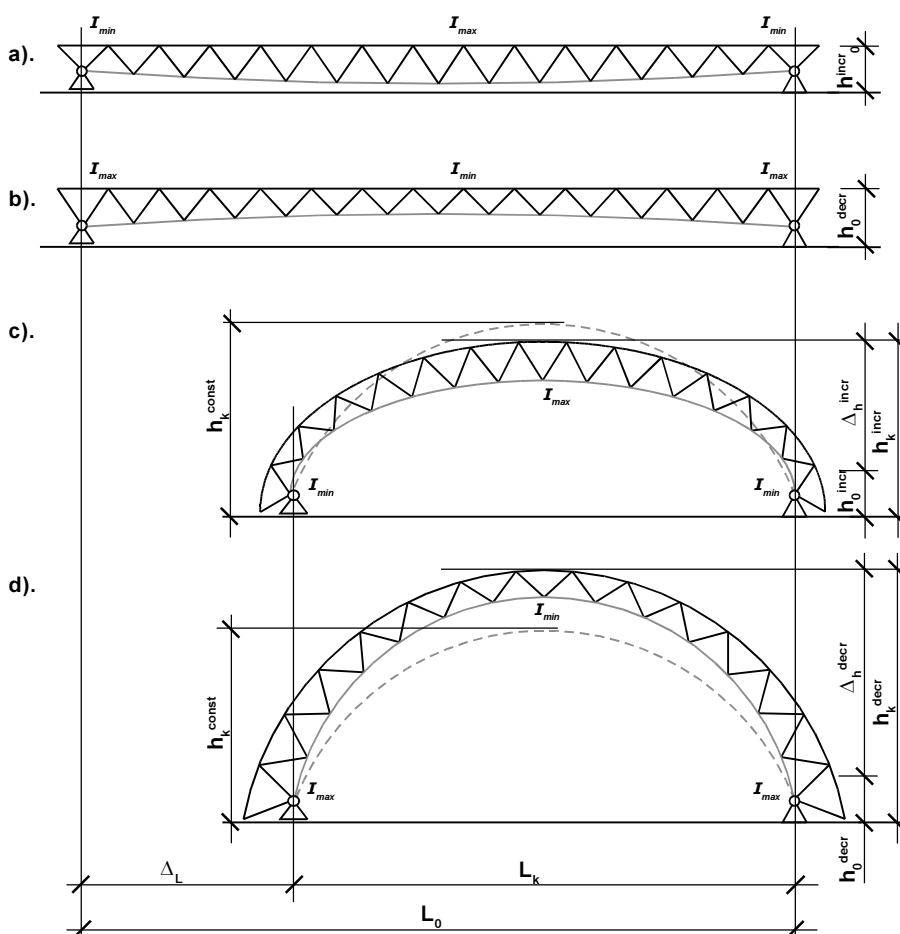
Początkowa rozpiętość konstrukcji L_0 , rys. 5.1, ulega skróceniu o chwilową wartość Δ_{L_i} . Odpowiada temu zmiana początkowej wysokości konstrukcji h_0 , o wartość Δ_{h_i} . Chwilowa długość konstrukcji wynosi w tym stanie L_i , a jej chwilowa wysokość: $h_i = \Delta_{h_i} + h_0$. Zmiana długości konstrukcji i jej wysokości następują w sposób ciągły.

Po przemieszczeniu podpory ruchomej o zadaną wielkość Δ_L i uzyskaniu przez konstrukcję założonego wypiętrzenia Δ_h , podpora jest unieruchamiana, a ciągną sprężające kotwione. Dodatkowo możliwe jest zablokowanie przesuwu ciągu w węzłach przelotowych¹⁾. Końcowa rozpiętość konstrukcji wynosi L_k , a jej wysokość: h_k , rys. 5.1.

5.1.3. Wykorzystanie zmiennej sztywności do kształtowania konstrukcji

Dla konstrukcji, o zadanej długości początkowej L_0 i przemieszczenia podpory przesuwnej Δ_L , wielkość wypiętrzenia konstrukcji jest jednoznacznie określona. Wielkość siły, z jaką należy sprężyć ciągną, aby wywołać zadane przemieszczenie, zależy od sztywności konstrukcji, reprezentowanej tutaj przez wielkość ramienia sił wewnętrznych, a więc przez jej wysokość konstrukcyjną.

W przypadku konstrukcji przedstawionej na rys. 5.1, jej sztywność miała stałą wartość na całej długości. Możliwe jest jednak również wykonanie konstrukcji o sztywności zmieniającej się parametrycznie wzdłuż rozpiętości. W takim przypadku, zarówno końcowa wielkość wypiętrzenia, jak i kształt krzywej opisującej położenie węzłów warstwy górnej po wypiętrzeniu, będą inne, niż dla konstrukcji o stałej sztywności. Na rys. 5.2 przedstawiono porównanie wypiętrzenia konstrukcji o sztywności zwiększającej się symetrycznie w kierunku środka rozpiętości oraz konstrukcji o sztywności zwiększającej się symetrycznie w kierunku podpór, z wypiętrzeniem konstrukcji o stałej sztywności.



Rys. 5.2 – wypiętrzenie konstrukcji o zmiennej sztywności (I):
– stan początkowy konstrukcji o sztywności:

- a). zwiększonej w części środkowej
- b). zmniejszonej w części środkowej
- stan końcowy konstrukcji o sztywności:
- c). zwiększonej w części środkowej
- d). zmniejszonej w części środkowej

Oznaczenia:

$h_{k\text{const}}$ – wysokość końcowa konstrukcji o stałej sztywności
 $h_0^{\text{incr}}, h_k^{\text{incr}}, \Delta_h^{\text{incr}}$ – wysokość początkowa i końcowa, przyrost wysokości konstrukcji o sztywności zwiększonej w części środkowej
 $h_0^{\text{decr}}, h_k^{\text{decr}}, \Delta_h^{\text{decr}}$ – wysokość początkowa i końcowa, przyrost wysokości konstrukcji o sztywności zmniejszonej w części środkowej
 pozostałe oznaczenia – jak na rys. 5.1

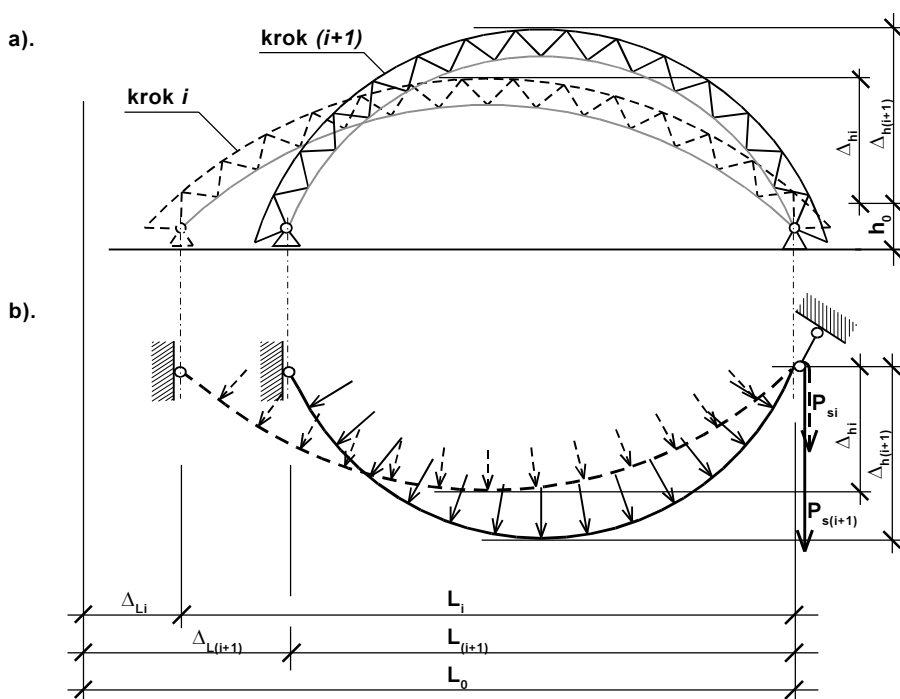
¹⁾ Przykład węzła umożliwiającego zablokowanie ciągu po wypiętrzeniu omówiono w rozdziale 5.3

Konstrukcja samowypiętrzalna, której sztywność jest większa w części środkowej, a mniejsza w częściach skrajnych, ma – po wypiętrzeniu – mniejszą wysokość niż konstrukcja o stałej sztywności, a krzywa opisująca położenie węzłów warstwy górnej jest bardziej „płaska”. Konstrukcja, której sztywność zwiększa się w częściach skrajnych, a zmniejsza w części środkowej, wysokość po wypiętrzeniu jest większa niż dla konstrukcji o stałej sztywności, a opisująca ją krzywa jest bardziej „wyniosła” [219].

W przypadku, gdy zmiana sztywności konstrukcji jest opisywana bardziej złożoną zależnością, a w szczególności, gdy nie jest ona symetryczna względem środka konstrukcji, kształt krzywej, opisującej konstrukcję po wypiętrzeniu, jest również bardziej złożony. Stwarza to dodatkowe możliwości kształtowania konstrukcji metodą deformacji geometrycznej.

5.1.4. Podstawowe zależności opisujące wypiętrzanie konstrukcji

Dla opisu konstrukcji kształtowanych metodą deformacji geometrycznej w fazie wypiętrzania, można posłużyć się schematem zastępczym, przedstawionym na rys. 5.3.



Rys. 5.3 – schematy do obliczania wypiętrzenia konstrukcji, dla kolejnych kroków i oraz $(i+1)$, odpowiadających przyrostom siły sprężającej P_s :
a). układ rzeczywisty
b). układ zastępczy

Oznaczenia – jak na rys. 5.1

W schemacie tym, rzeczywista konstrukcja jest zastąpiona układem składającym się z cięgna wiotkiego, zamocowanego w dwóch węzłach przegubowych, z których jeden umożliwia jego swobodny przesuw. Cięgno w układzie zastępczym odpowiada cięgnu w układzie rzeczywistym. Podpora umożliwiająca przesuw cięgna w układzie zastępczym jest odpowiednikiem podpory ruchomej w układzie rzeczywistym. Oddziaływanie części prętowej zostało zastąpione działaniem szeregu sił przyłożonych w węzłach warstwy dolnej i jest dalej traktowane jako „obciążenie” cięgna. Cięgno w układzie zastępczym znajduje się w równowadze pod wpływem działania tych sił oraz siły sprężającej P_s , wzrastającej w kolejnych krokach od zera do wartości końcowej.

Dla systemu prętowo-cięgnowego, który jest statycznie wyznaczalny względem naciągów¹⁾, możliwe jest otrzymanie zależności, stanowiącej odpowiednik wzoru Maxwella-Mohra na przemieszczenia.

¹⁾ Ponieważ wiotkie cięgno jest ustrojem nieskończenie wiele razy geometrycznie zmiennym, pojęcie statycznej wyznaczalności w systemach prętowo-cięgnowych ma sens jedynie po zastąpieniu cięgna (do celów analizy) prętem z fikcyjnego, nieliniowo-sprężystego materiału, o odpowiednio dobranej zależności naprężenie — odkształcenie. W takich systemach z warunków statyki wyznaczane są jedynie siły naciągu [167]. W schemacie z rys. 5.3, siły naciągów w kolejnych krokach są zadane a priori.

W konstrukcji wyróżnia się trzy grupy elementów, oznaczane odpowiednio indeksami:

indeks c – oznacza wszystkie elementy systemu (pręty), w których uwzględnia się jedynie sprężyste i termiczne odkształcenia podłużne

indeks y – oznacza wszystkie elementy systemu (pręty zginane), w których uwzględnia się jedynie sprężyste kąty obrotu przekrojów

indeks b – oznacza wszystkie elementy systemu (ciągną), w których uwzględnia się jedynie wydłużenia geometryczne

Zależność opisująca przemieszczenia w statycznie wyznaczalnym systemie prętowo-ciężnowym ma postać [167]:

$$\Delta_n = \sum_c \int \frac{n_{nc}(N_c - N_c^0)}{EF_c} dl_c + \sum_c n_{nc} \alpha_c l_c (T_c - T_c^0) + \sum_y \int \frac{m_{ny}(M_y - M_y^0)}{EI_y} ds_y - \frac{1}{2} \sum_b \int h_n^b \left[\left(\frac{Q_b}{H_b} \right)^2 - \left(\frac{Q_b^0}{H_b^0} \right)^2 \right] dl_b \quad (5.1)$$

gdzie: Δ_n – rzut rzeczywistego przemieszczenia punktu zaczepienia siły jednostkowej na kierunek n

n_{nc} – siła w pręcie c , od siły jednostkowej działającej w kierunku n
 $(N_c - N_c^0)$ – zmiana siły podłużnej w pręcie c , odpowiadająca przejściu systemu ze stanu wyjściowego (krok i) do stanu badanego (krok $i+1$)

$(T_c - T_c^0)$ – zmiana temperatury w pręcie c , odpowiadająca przejściu systemu ze stanu wyjściowego do badanego

dl_c – elementarny odcinek pręta z grupy c

m_{ny} – moment zginający w pręcie y , od siły jednostkowej działającej w kierunku n

$(M_y - M_y^0)$ – zmiana momentu zginającego w pręcie y , odpowiadająca przejściu systemu ze stanu wyjściowego do badanego

ds_y – elementarny odcinek pręta z grupy y

h_{nb} – naciąg elementu ciężnowego b , od siły jednostkowej działającej w kierunku n

$(Q_b - Q_b^0)$ – zmiana poprzecznej składowej siły w ciężnie b , odpowiadająca przejściu systemu ze stanu wyjściowego do badanego

$(H_b - H_b^0)$ – zmiana naciągu w ciężnie b , odpowiadająca przejściu systemu ze stanu wyjściowego do badanego

dl_b – elementarny odcinek ciężna z grupy b

We wzorze (5.1) uwzględniono następujące wyrażenia na jednostkowe odkształcenia elementów systemu prętowo-ciężnowego [167]:

$$\frac{N_c - N_c^0}{EF_c} + \alpha_c l_c (T_c - T_c^0) = \varepsilon_c \quad \text{– jednostkowe odkształcenia podłużne prętów, w których uwzględnia się jedynie sprężyste i termiczne odkształcenia podłużne, odpowiadające przejściu systemu ze stanu wyjściowego do badanego} \quad (5.2)$$

$$\frac{M_y - M_y^0}{EI_y} = \varepsilon_y \quad \text{– j.w. lecz jednostkowe wzajemne kąty obrotu w prętach zginanych} \quad (5.3)$$

$$\frac{H_b - H_b^0}{EF_b} + \alpha(T_b - T_b^0) - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{Q_b}{H_b} \right)^2 - \left(\frac{Q_b^0}{H_b^0} \right)^2 \right] = \varepsilon_b \quad \text{– j.w. lecz jednostkowe wydłużenia elementów ciężnowych} \quad (5.4)$$

Jeżeli w dowolnym elemencie konstrukcji należy uwzględnić odkształcenia różnego rodzaju, to jest on uwzględniany w wyrażeniu (5.1) dwukrotnie, np. z indeksem c oraz z indeksem y . Dla ciężna, składowe odkształcenia, pochodzące od zmiany naciągu oraz odkształcenia termiczne uwzględnia się w wyrażeniach z indeksem c . Brak tego składnika dla elementów ciężnowych oznacza, że są one nierozciągliwe.

Dla konstrukcji statycznie niewyznaczalnych, wyprowadza się, w oparciu o wyrażenie (5.1), równania kanoniczne metody sił, wyrażające warunki ciągłości odkształceń w przekrojach. W ujęciu energetycznym, równania te można zapisać jako warunki niezmienności funkcji pracy uzupełniającej¹⁾ [167].

Na podstawie zależności (5.1) można wyznaczyć przemieszczenia węzłów konstrukcji kształtowanych metodą deformacji geometrycznej, dla wszystkich, kolejnych wartości siły sprężającej P_s . Pozwala to na wyznaczenie kształtu konstrukcji w kolejnych fazach wypiętrzania, oraz na wyznaczenie powstających sił wewnętrznych.

W dalszej części niniejszego rozdziału przedstawiono zastosowanie metody deformacji geometrycznej do stalowych konstrukcji prętowych oraz do konstrukcji pneumatycznych.

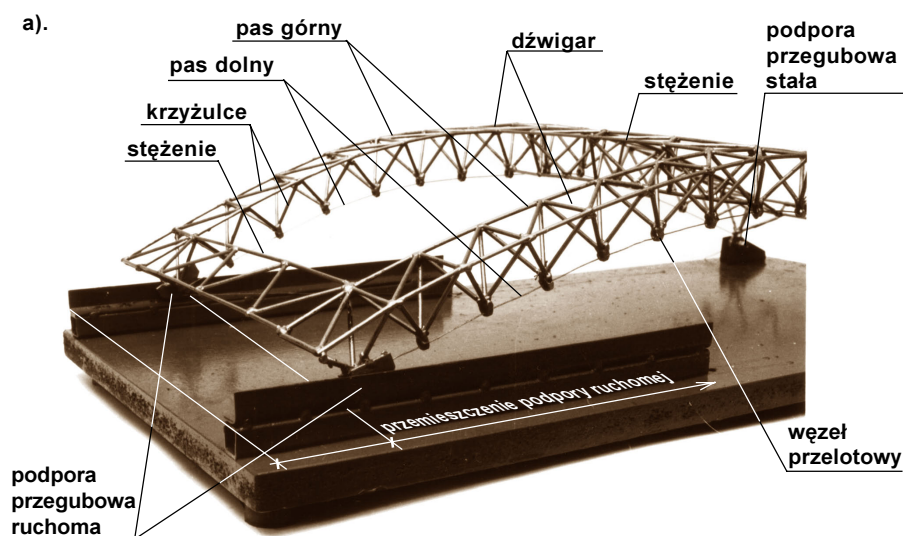
5.2 Stalowe konstrukcje prętowe

5.2.1 Schemat ogólny

Najbardziej odpowiednie do kształtowania metodą deformacji geometrycznej, rodzaje konstrukcji stalowych, to przestrzenne konstrukcje prętowe: dźwigary kratownicowe trójkątne lub dwuwarstwowe kratowe ruszty przestrzenne. W przypadku zastosowania płaskich dźwigarów kratowych, mogą wystąpić problemy z zapewnieniem ich stateczności podczas wypiętrzania. Ogólny schemat tej grupy konstrukcji jest identyczny ze schematem przedstawionym w rozdz. 5.1.

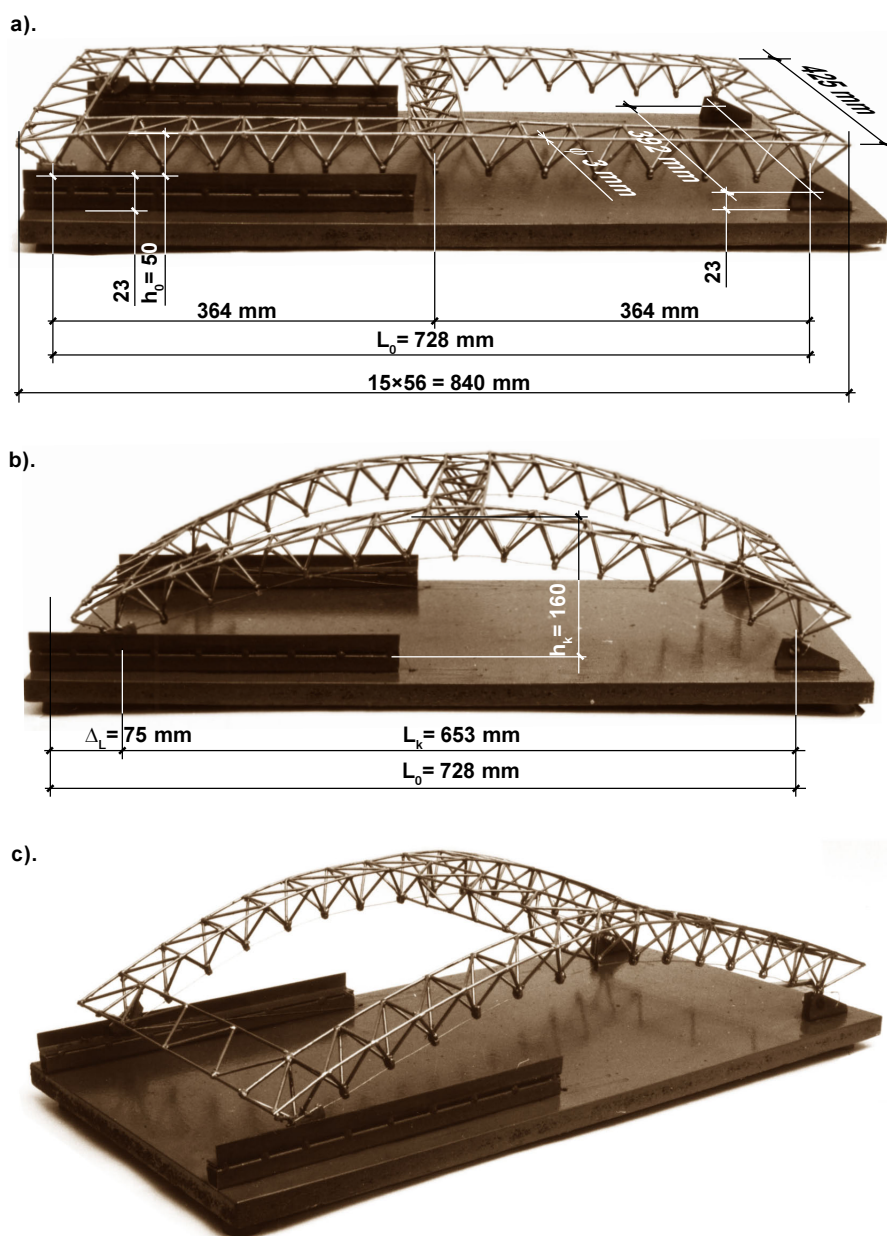
Na rys. 5.4 przedstawiono przykład konstrukcji stalowej kształtowanej metodą deformacji geometrycznej. Jest to model, w skali 1:30, konstrukcji składającej się z dwóch dźwigarów przestrzennych o przekroju trójkątnym, połączonych stężeniami o takim samym przekroju. Na rysunku oznaczono główne elementy składowe systemu.

Konstrukcja, przedstawiona na rys. 5.4, została poddana próbnemu wypiętrzeniu, w celu zweryfikowania ogólnego przebiegu tego procesu. Na rys. 5.5.a). przedstawiono widok i wymiary modelu przed wypiętrzeniem, na rys. 5.5.b). – widok modelu po wypiętrzeniu oraz wielkości przemieszczeń, a na rys. 5.5.c). – ogólny widok modelu po wypiętrzeniu. Ponieważ wykonany model nie pozwalał na pomiar wielkości siły sprężającej, próba miała charakter jakościowy. Jej przebieg był zgodny z podstawowymi założeniami metody deformacji geometrycznej.



Rys. 5.4 – model stalowej konstrukcji kształtowanej metodą deformacji geometrycznej, składającej się z dwóch dźwigarów przestrzennych o przekroju trójkątnym, połączonych stężeniami o takim samym przekroju. Skala modelu 1:30.

¹⁾ Ponieważ przedstawione w niniejszej pracy konstrukcje kształtowane metodą deformacji geometrycznej, są statycznie niewyznaczalne, nie przytaczano tych zależności.



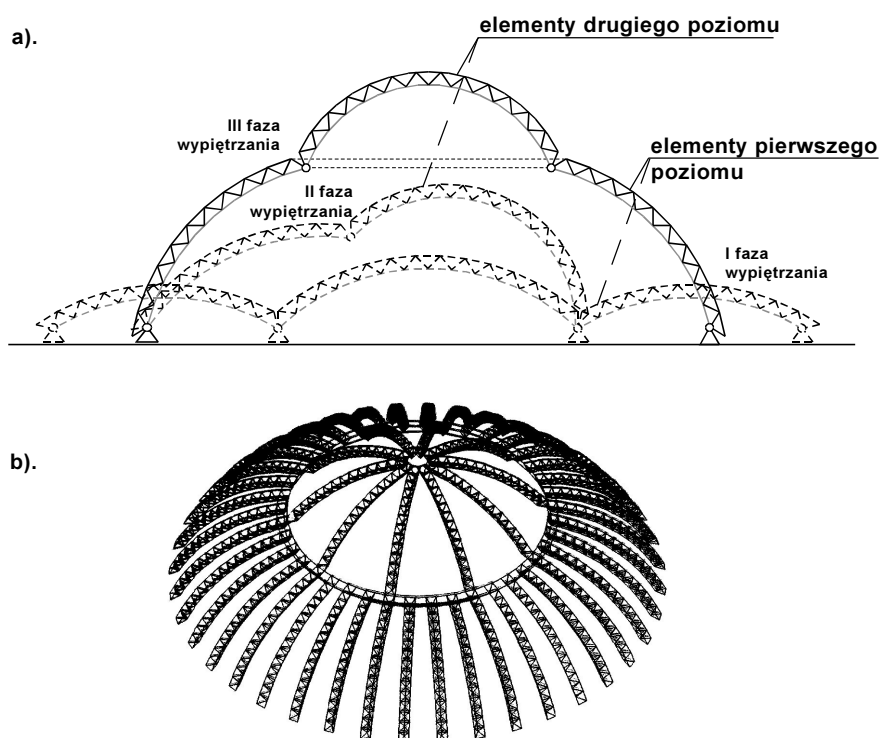
Rys. 5.5 – przebieg próbnego wypiętrzania modelu konstrukcji z rys. 5.4:
 a). widok i wymiary modelu przed wypiętrzaniem
 b). widok modelu po wypiętrzaniu oraz wielkości przemieszczeń
 c). widok ogólny modelu po odkształceniu
 Oznaczenia – jak na rys. 5.1

5.2.2 Konstrukcje wielopoziomowe

Elementy konstrukcyjne (dźwigary, ruszty) kształtowane metodą deformacji geometrycznej, mogą być zestawiane w taki sposób, aby tworzyły konstrukcję wielopoziomową.

Na rys. 5.6 przedstawiono przykład takiej konstrukcji. Jest to układ dwóch kopuł żebrowych, wykonanych z dźwigarów o przekroju trójkątnym, rozmieszczonych promieniście i połączonych pierścieniami obwodowymi. Wszystkie dźwigary są ukształtowane metodą deformacji geometrycznej. Elementy drugiego poziomu opierają się na elementach pierwszego poziomu.

Konstrukcja przedstawiona na rys. 5.6 może być zmontowana w całości na poziomie terenu, a następnie wypiętrzana w kilku fazach. Najpierw wypiętrzane są dźwigary tworzące górny poziom konstrukcji, a następnie – dźwigary dolnego poziomu. Możliwe jest sukcesywne wypiętrzanie dźwigarów dolnych, tak jak przedstawiono to na rys. 5.6.a), lub jednocześnie, symetryczne wypiętrzanie ich wszystkich. W efekcie tej operacji, wcześniej wypiętrzona część górna konstrukcji zostaje podniesiona do ostatecznego położenia, a konstrukcja uzyskuje przewidziany kształt.



Rys. 5.6 – dwupoziomowa konstrukcja o rzucie kołowym, kształtowana metodą deformacji geometrycznej:
 a). schemat konstrukcji i kolejne fazy wypiętrzania
 b). widok ogólny po wypiętrzeniu

5.2.3 Badania modelu konstrukcji prętowej

Wstępną, ilościową analizę przebiegu procesu wypiętrzania stalowej konstrukcji prętowej, oraz jej zachowania pod wpływem przyłożonego obciążenia zewnętrznego, przeprowadzono badając model takiej konstrukcji, wykonany w skali 1:30. Celem eksperymentu było ustalenie szacunkowych zależności pomiędzy wielkością siły napinającej P_s , przemieszczenia podpory ruchomej Δ_L i wysokością konstrukcji po wypiętrzeniu h_k , oraz wpływu zmiany sztywności konstrukcji wzdłuż jej rozpiętości [212].

5.2.3.1. Charakterystyka modeli do badań

Założono, że badany model konstrukcji będzie odpowiadał płaskiemu dźwigarowi kratowemu o ciągłym pasie górnym. Do badania przygotowano trzy modele, odpowiadające konstrukcji o stałej sztywności oraz o sztywności zmniejszającej się i zwiększającej w kierunku środka rozpiętości.

Elementy modułarne | Pojedyncze pole kratownicy, ograniczone odcinkiem pasa górnego oraz dwoma krzyżulcami, zastąpiono w modelu modułarnym elementem trójkątnym, wykonanym z blachy, o gr. 0.50 mm. Wykonano dwa typy elementów:

- elementy typu I, do budowy modelu konstrukcji o stałej sztywności
- elementy typu II, do budowy modeli konstrukcji o zmieniającej się sztywności

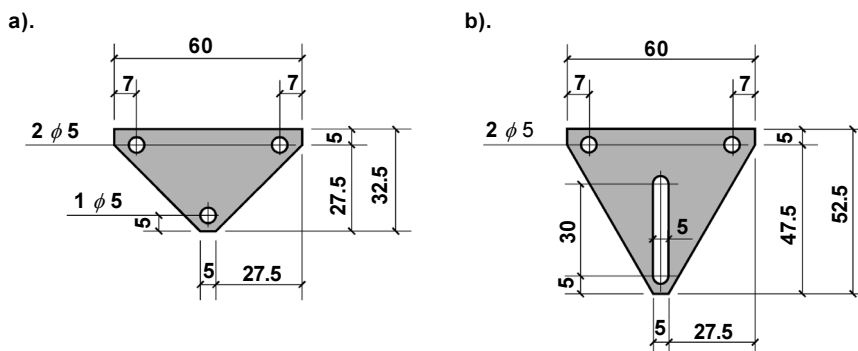
Elementy modułarne mają kształt trójkątów równoramiennych, o ściętych wierzchołkach. Ich schemat przedstawiono na rys. 5.7.

Szerokość całkowita wszystkich elementów wynosi 60 mm, a ich wysokość wynosi: dla elementów modelu o stałej sztywności – 32.5 mm, dla elementów modeli o zmiennej wysokości – 52.5 mm.

We wszystkich elementach wykonano po trzy otwory połączeniowe: dwa w pasie górnym i jeden w pasie dolnym. Otwory w pasie górnym mają kształt koła o średnicy 5 mm. Ich rozstaw, określający rozstaw węzłów wynosi 46 mm.

Otwory w pasie dolnym są zróżnicowane. W elementach typu I, otwór jest identyczny jak w pasie górnym, umieszczony w odległości osiowej 27.5 mm od otworów w pasie górnym.

W elementach typu II, otwór w pasie dolnym ma kształt owalny, o szerokości 5 mm i długości osiowej 30 mm. Umożliwia to zmianę położenia węzłów pasa dolnego, w celu regulacji sztywności. Zakres rozstawu osiowego otworów w pasie górnym i w pasie dolnym, dla skrajnych położeń, wynosi w tych elementach $12.5 \div 42.5$ mm.

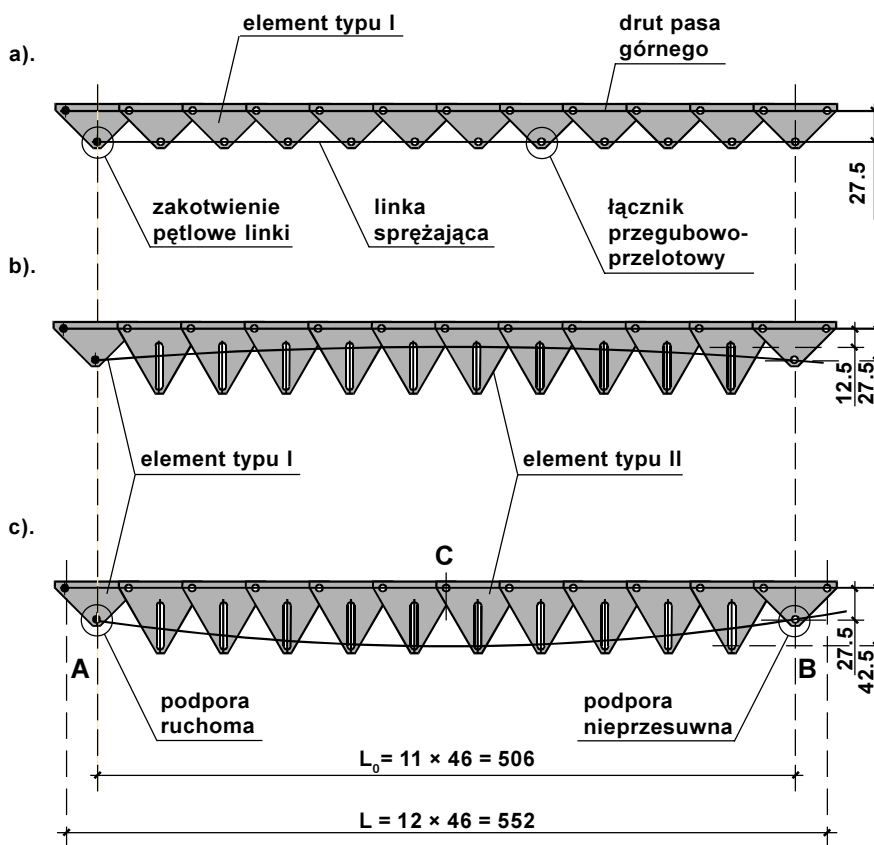


Rys. 5.7 – podstawowe elementy modułowe modelu do badania konstrukcji prętowych kształtownych metodą deformacji geometrycznej:
a). element typu I, dla konstrukcji o stałej wysokości konstrukcyjnej
b). element typu II, dla konstrukcji o zmiennej wysokości konstrukcyjnej
Wymiary w [mm].

Budowa modeli do badań | Do badania przygotowano trzy modele, z których każdy składał się z 12 elementów modułowych:

- dźwigar o stałej sztywności; osiowy rozstaw pasów wynosił 27.5 mm, rys. 5.8.a).
- dźwigar o sztywności zmniejszającej się w części środkowej; osiowy rozstaw pasów wynosił w elementach skrajnych 27.5 mm, a w elemencie środkowym 12.5 mm, rys. 5.8.b).
- dźwigar o sztywności zwiększającej się w części środkowej; osiowy rozstaw pasów wynosił w elementach skrajnych 27.5 mm, a w elemencie środkowym 42.5 mm, rys. 5.8.b).

Długość początkowa wszystkich modeli wynosiła $L_0 = 506$ mm, a ich długość całkowita 552 mm.



Rys. 5.8 – podstawowe elementy modułowe modelu do badania konstrukcji prętowych kształtownych metodą samowypiętrzania
a). dźwigar o stałej wysokości konstrukcyjnej
b). dźwigar o wysokości konstrukcyjnej zwiększonej w środku rozpiętości
c). dźwigar o wysokości konstrukcyjnej zmniejszonej w środku rozpiętości
Wymiary w [mm].
Punkt A – podpora ruchoma
Punkt B – podpora nieprzesuwana
Punkt C – środek rozpiętości dźwigara; miejsce przykładania obciążeń oraz pomiaru wypiętrzania konstrukcji h_k .

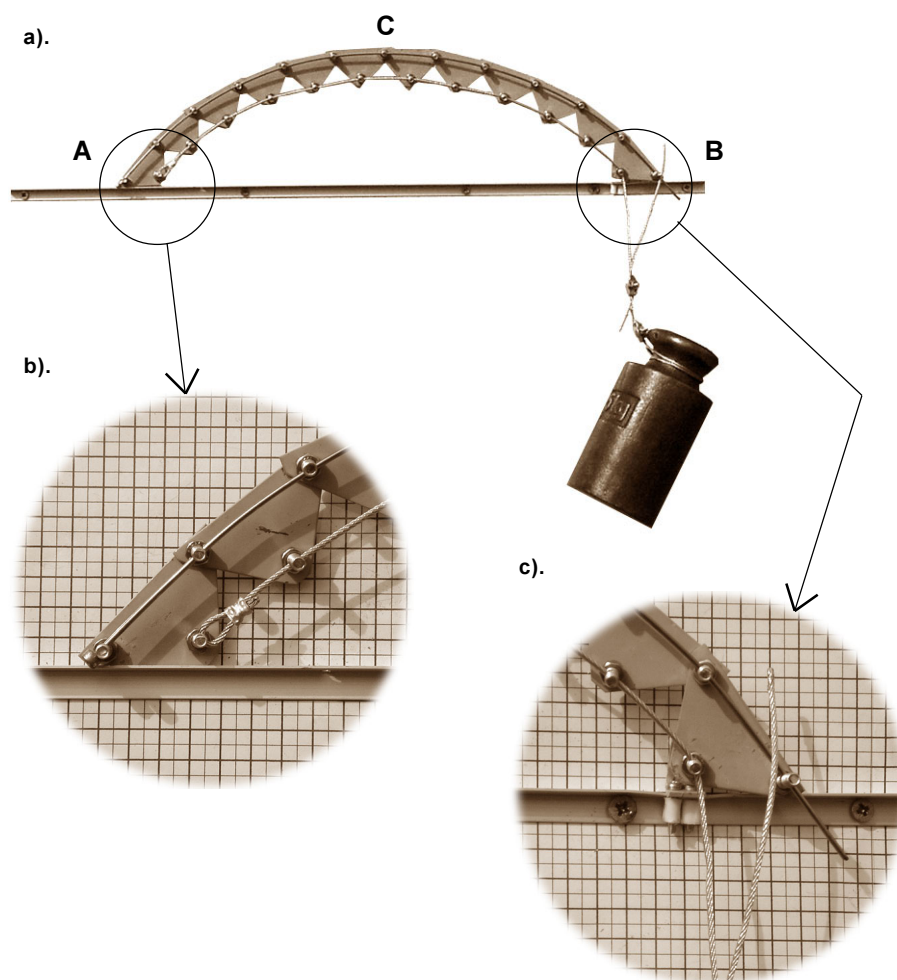
Opisane powyżej elementy modułarne połączono, wykonując modele do badań. Połączenia wykonano za pomocą śrub M4, długości 15 mm, których trzpień został w końcowej części przewiercony otworem o średnicy 2 mm.

Dla zapewnienia ciągłości pasa górnego, przez otwory w śrubach łączących został przeciągnięty drut ze stali sprężynowej, o średnicy 1.5 mm, zakończony łbem z odcinka rurki mosiężnej wypełnionej żywicą epoksydową.

W węzłach pasa dolnego – dolnych otworach elementów modułarnych – umieszczone zostały śruby, analogiczne jak w otworach górnych. Przez otwory w śrubach przeciągnięto linkę stalową o średnicy 2.0 mm. Linkę zakończono w podporze ruchomej pętlą z zaciskiem plastycznym. Przez podporę nieprzesuwną linka przechodzi bez kotwienia i zakończona jest poniżej tej podpory zaciskiem umożliwiającym zamocowanie obciążnika. W elementach typu II, położenie śrub w otworze owalnym było dostosowane do założonego sposobu zmiany sztywności w modelach: węzły leżą na łuku kołowym, wyznaczonym przez położenie węzłów brzegowych oraz węzła w elemencie środkowym, w którym śrubę umieszczano w skrajnym położeniu górnym lub dolnym.

Rolę podłoża pełniła prowadnica z kątownika aluminiowego 10×10 mm, do którego zamocowano łącznik pełniący rolę podpory nieprzesuwniej. Ruchomy węzeł podporowy miał swobodę przesuwu po prowadnicy.

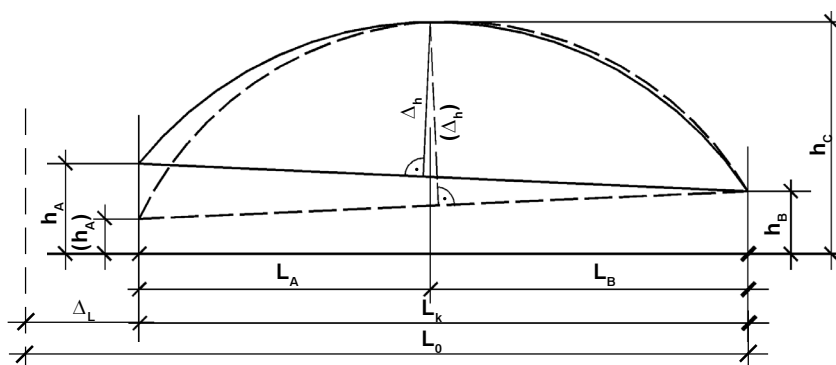
Siłę napinającą P_s przykładano w postaci obciążników metalowych zamocowanych do cięgna pasa dolnego. Analogicznie przykładano obciążenie zewnętrzne do środkowego węzła w pasie górnym, stosując dodatkową pętlę z linki stalowej, umożliwiającą zamocowanie obciążnika. Na rys. 5.9 przedstawiono widok ogólny i szczegóły węzłów podporowych modelu konstrukcji o stałej sztywności. Dla pozostałych dwóch modeli budowa ogólna i szczegóły oparcia są identyczne.



Rys. 5.9 – widok badanego modelu doświadczalnego:

- a). widok ogólny
- b). węzeł podporowy przesuwny (A); widoczne jest zakotwienie pętlowe linki sprężającej oraz zakończenie pręta pasa górnego
- c). węzeł podporowy nieprzesuwny (B); widoczne jest przedłużenie linki sprężającej do zamocowania obciążnika, odpowiadającego sile naciągu cięgna w pasie dolnym – P_s

Pomiar odkształceń konstrukcji | Przeszacowania konstrukcji mierzo-
no z dokłądnością do 0.1 mm. Ponieważ wysokość początkowa konstrukcji
 h_0 , była podczas pomiarów różna dla punktów A i B, strzałkę wypiętrzenia
dźwiga, wyznaczano według schematu na rys. 5.10:



Rys. 5.10 – schemat
wyznaczania strzałki
wypiętrzenia dźwiga-
ra:

– opisy bez nawiasów
dla $h_A > h_B$
– opisy w nawiasach
dla $h_A < h_B$

gdzie: h_A, h_B, h_C – odległości punktów A, B i C od prowadnicy
 L_A, L_B – rzut odległości punktu C od punktów A i B na
kierunek prowadnicy
pozostałe oznaczenia – jak na rys. 5.1 i 5.2.

Dodatkowo stosowano indeksy górne, oznaczające:

const – konstrukcja o stałej sztywności
decr – konstrukcja o sztywności zmniejszającej się w części
środkowej
incr – konstrukcja o sztywności zwiększającej się w części
środkowej
0.02 – wartość siły napinającej $P_s = 0.02$ kN, itd.
0.05/0.02 – wartość siły napinającej $P_s = 0.05$ kN, itd.
wartość obciążenia zewnętrznego $Q = 0.02$ kN

5.2.3.2. Konstrukcja o sztywności stałej na długości

Wykonano pomiary dla trzech stanów konstrukcji:

- dla $P_s = 0$; stan *const,0.00*
- dla $P_s = 0.02$ kN; stan *const,0.02*
- dla $P_s = 0.05$ kN; stan *const,0.05*

Nie przykładano obciążenia zewnętrznego. Przebieg i wyniki pomiarów
przedstawia rys. 5.11.

5.2.3.3. Konstrukcja o sztywności zmniejszonej w części środkowej

Wykonano pomiary dla trzech stanów konstrukcji:

- dla $P_s = 0$; stan *decr,0.00*
- dla $P_s = 0.02$ kN; stan *decr,0.02*
- dla $P_s = 0.05$ kN; stan *decr,0.05*

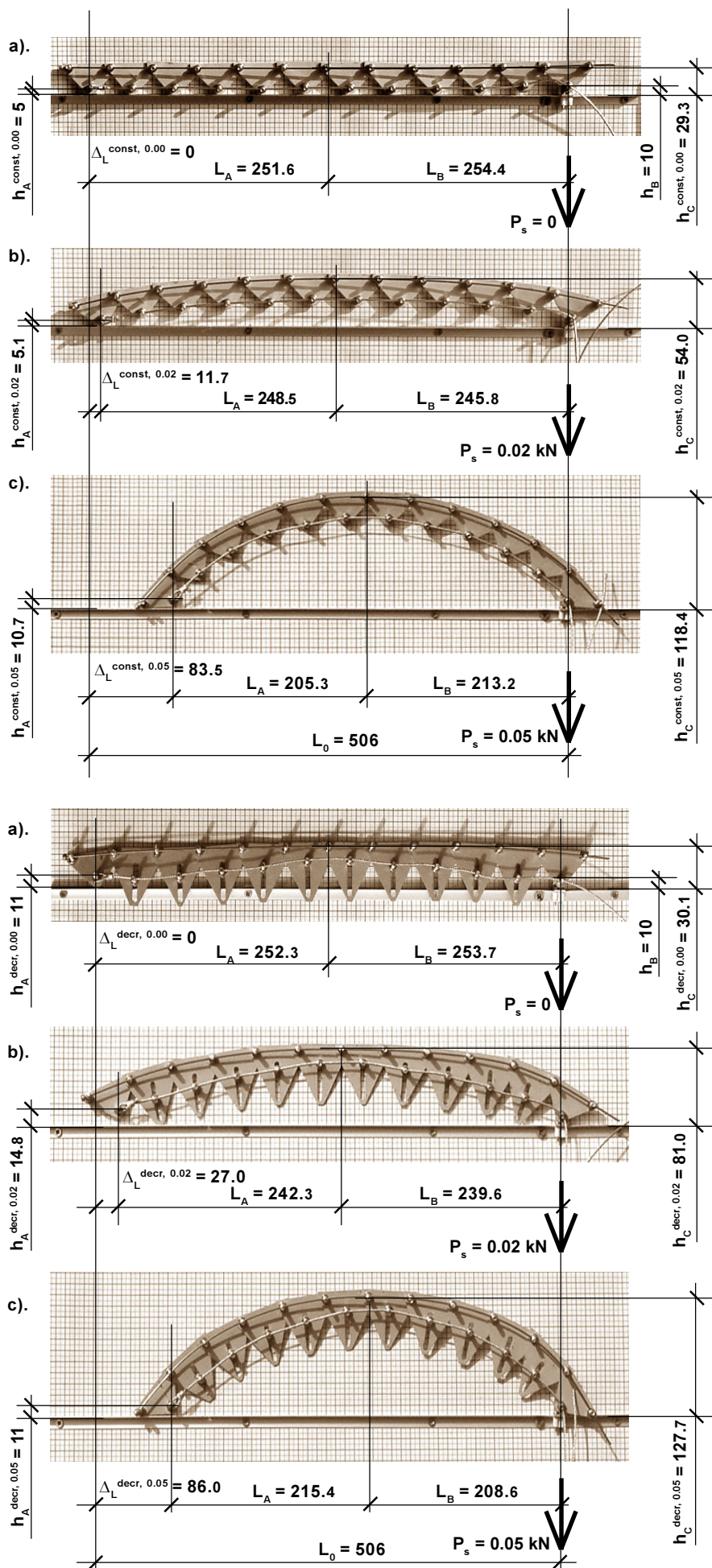
Nie przykładano obciążenia zewnętrznego. Przebieg i wyniki pomiarów
przedstawia rys. 5.12.

5.2.3.4. Konstrukcja o sztywności zwiększonej w części środkowej

Wykonano pomiary dla trzech stanów konstrukcji:

- dla $P_s = 0$; stan *incr,0.00*
- dla $P_s = 0.02$ kN; stan *incr,0.02*
- dla $P_s = 0.05$ kN; stan *incr,0.05*

Nie przykładano obciążenia zewnętrznego. Przebieg i wyniki pomiarów
przedstawia rys. 5.13.



Rys. 5.11 – pomiar wypiętrzania modelu konstrukcji o stałej sztywności (opis w tekście):

a). stan: const, 0.00
 $P_s = 0$

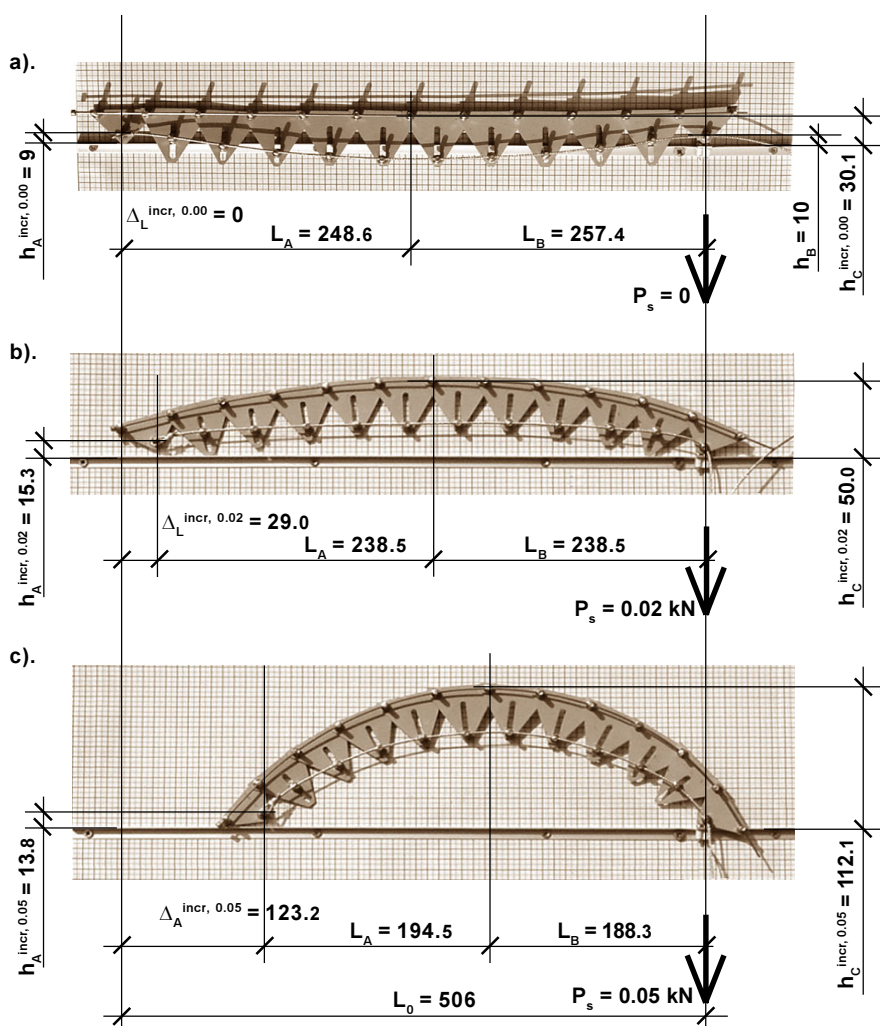
b). stan: const, 0.02
 $P_s = 0.02 \text{ kN}$

Rys. 5.12 – pomiar wypiętrzania modelu konstrukcji o sztywności zmniejszonej w środku rozpiętości (opis w tekście):

a). stan: decr, 0.00
 $P_s = 0$

b). stan: decr, 0.02
 $P_s = 0.02 \text{ kN}$

c). stan: decr, 0.05
 $P_s = 0.05 \text{ kN}$



Rys. 5.13 – pomiar wypiętrzania modelu konstrukcji o sztywności zmniejszonej w środku rozpiętości (opis w tekście):

a). stan: *incr, 0.00*
 $P_s = 0$

b). stan: *incr, 0.02*
 $P_s = 0.02 \text{ kN}$

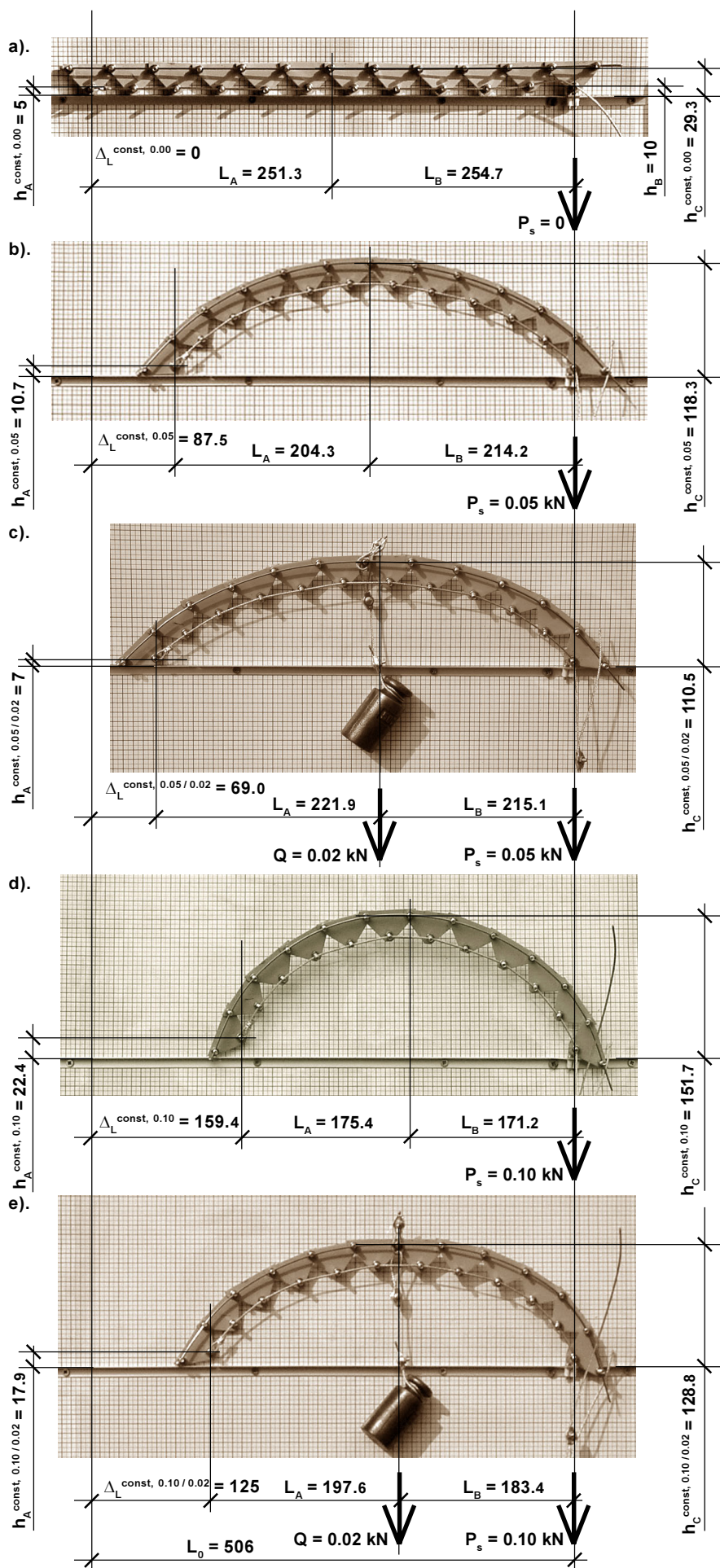
c). stan: *incr, 0.05*
 $P_s = 0.05 \text{ kN}$

5.2.3.5. Konstrukcja o stałej sztywności, z obciążeniem zewnętrznym

Wykonano pomiary dla trzech stanów konstrukcji:

- dla $P_s = 0$; stan *const, 0.00*
- dla $P_s = 0.05 \text{ kN}$; stan *const, 0.05*
- dla $P_s = 0.05 \text{ kN}$ i $Q = 0.02 \text{ kN}$; stan *const, 0.05 / 0.02*
- dla $P_s = 0.10 \text{ kN}$; stan *const, 0.10*
- dla $P_s = 0.10 \text{ kN}$ i $Q = 0.02 \text{ kN}$; stan *const, 0.10 / 0.02*

Obciążenie zewnętrzne, Q , przykładano w środku rozpiętości dźwigara, w punkcie C (rys. 5.8 i rys. 5.9). Przebieg i wyniki pomiarów przedstawia rys. 5.14.



Rys. 5.14 – pomiar obciążania modelu konstrukcji o stałej sztywności zmniejszonej w (opis w tekście):

- a). stan: const, 0.00
 $P_s = 0$
b). stan: const, 0.05
 $P_s = 0.05 \text{ kN}$
c). stan: const, 0.05/0.02
 $P_s = 0.05 \text{ kN}$
 $Q = 0.02 \text{ kN}$
d). stan: const, 0.10
 $P_s = 0.10 \text{ kN}$
e). stan: const, 0.10/0.02
 $P_s = 0.05 \text{ kN}$
 $Q = 0.02 \text{ kN}$

5.2.3.6. Wyniki pomiarów

Przebieg pomiarów | Przygotowane modele konstrukcji zostały ustawione na tablicy z naniesioną siatką o oczku 5 mm, w pozycji pionowej. Wypiętrzanie następowało poprzez przyłożenie do ciągu określonej siły naciągu. Realizowano to poprzez zawieszenie na ciągu obciążnika o określonej masie. Pomiaru wielkości skrócenia konstrukcji oraz wielkości wypiętrzenia dokonywano suwmiarką o długości 200 mm.

Podczas wypiętrzania, podpora nieruchoma obracała się swobodnie wokół osi, a podpora ruchoma – przesuwała po prowadnicy.

Dla pomiaru z obciążeniem zewnętrznym, wykonano dodatkowe zawiesie w połowie rozpiętości modelu, na którym zawieszano obciążniki o określonej masie.

Wyniki | W oparciu o pomierzone wielkości odkształceń sporządzono wykresy zależności wielkości skrócenia modeli oraz wielkości ich wypiętrzenia, w zależności od przyłożonej siły naciągu P_s . Zależności te przedstawiono na rys. 5.15 i 5.16.

Porównanie krzywizny pasa górnego danego modelu, przy różnych wartościach siły naciągu P_s , przedstawiono na rys. 5.17.

Na rys. 5.18 przedstawiono porównanie krzywizny pasa górnego po wypiętrzeniu, dla modelu o zmiennej sztywności, w odniesieniu do modelu o stałej sztywności, dla poszczególnych wartości siły naciągu.

Dla modelu konstrukcji o stałej sztywności, obciążonego po wypiętrzeniu siłą zewnętrzną Q , porównano końcowe wielkość skrócenia i wypiętrzenia, rys. 5.19. Dla tego samego modelu, porównano krzywizny pasa górnego konstrukcji, dla różnych wielkości siły naciągu i obciążenia zewnętrznego, rys. 5.20.

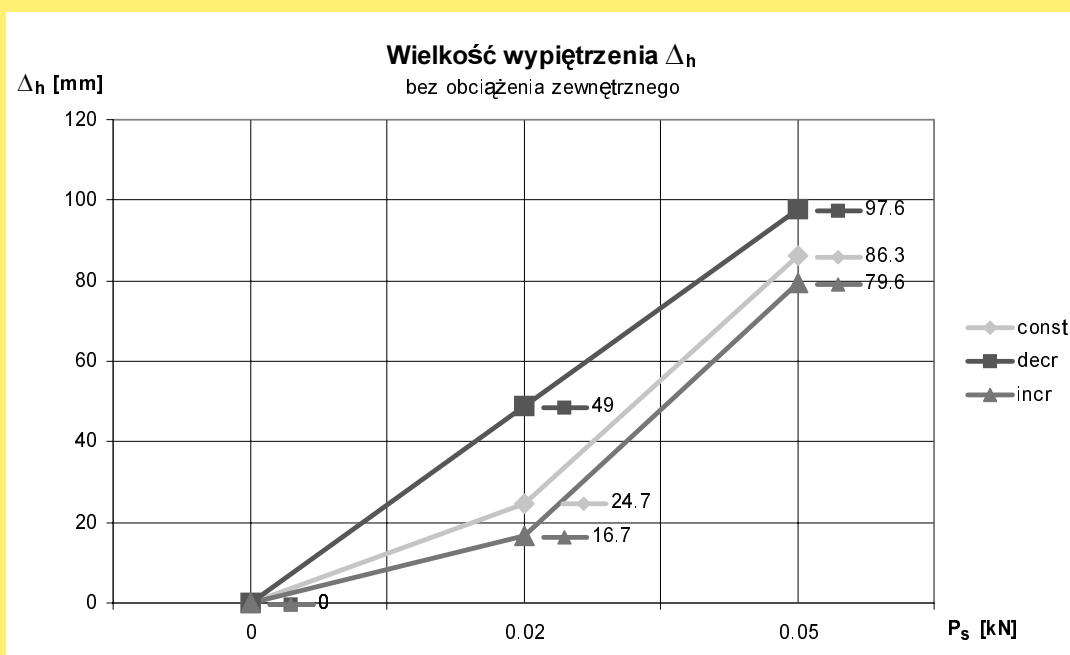
Źródła błędów | Podstawowym źródłem błędów były niedokładności wykonania modeli:

- niedokładność ustawienia węzłów przelotowych pasa dolnego, dla konstrukcji o zmiennej sztywności
- efekt „opierania się” wyższych elementów, w konstrukcjach o zmiennej sztywności, co powodowało unoszenie się skrajnych, niższych elementów podporowych i w efekcie zniekształcało w pewnym stopniu pomiar; widoczne to jest na rys. 5.12.b) oraz 5.13.b).

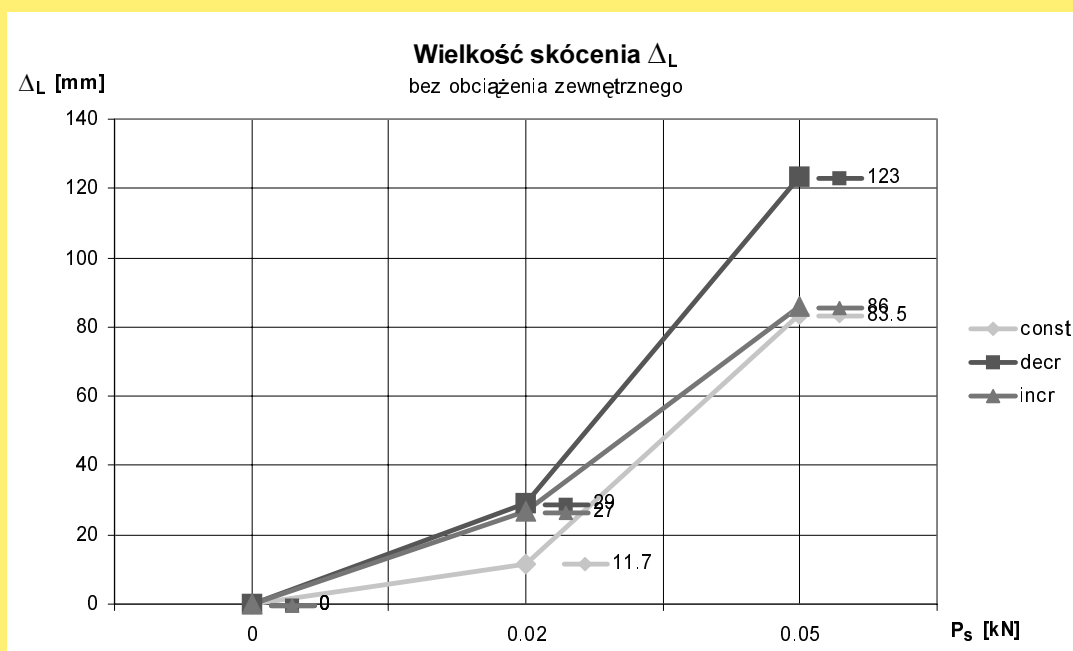
Kolejnym źródłem błędów był sposób pomiaru odkształceń – ręczny pomiar za pomocą suwmiarki.

Wnioski | W wyniku analiza wyników przeprowadzonych pomiarów, można sformułować następujące wnioski:

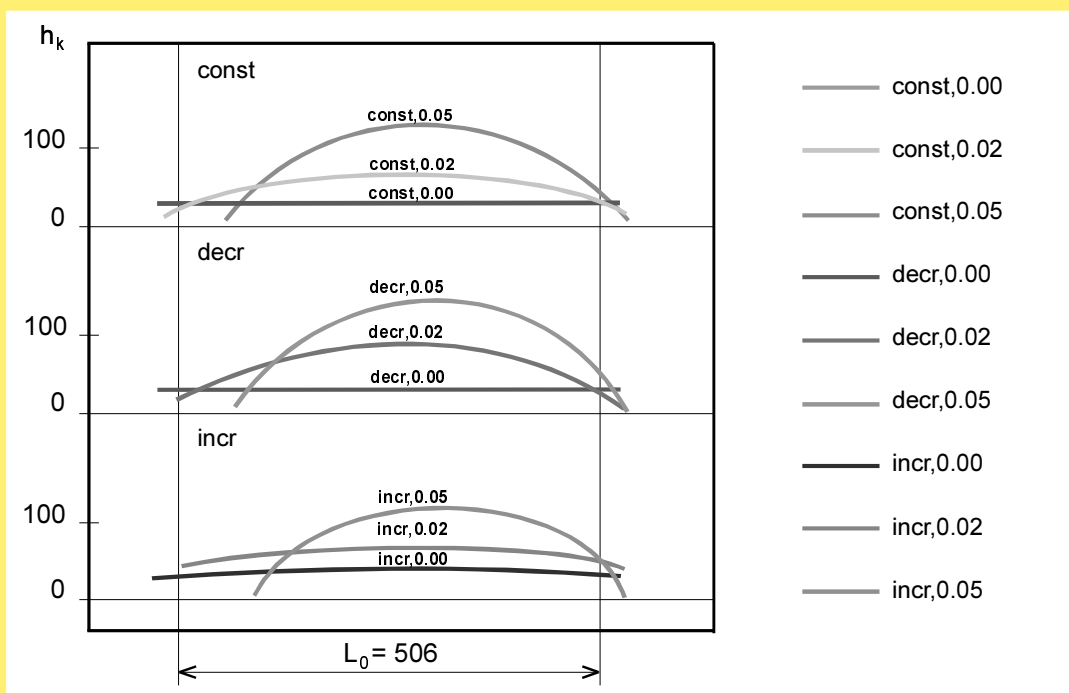
- przeprowadzone pomiary pozwalają jedynie na jakościową ocenę przebiegu procesu wypiętrzania i nie mogą stanowić podstawy do sformułowania zależności ilościowych
- przebieg procesu wypiętrzania jest zgodny z założeniami metody deformacji geometrycznej
- kształt konstrukcji po wypiętrzeniu odpowiada kształtowi przewidywanemu teoretycznie
- kształt końcowy konstrukcji o sztywności zmieniającej się na długości, zależy od sposobu tej zmiany
- parametryczna zmiana wysokości konstrukcyjnej pozwala na uzyskiwanie konstrukcji o różnych krzywiznach
- metoda deformacji geometrycznej jest realnym narzędziem kształtowania konstrukcji stalowej w obiektach budowlanych



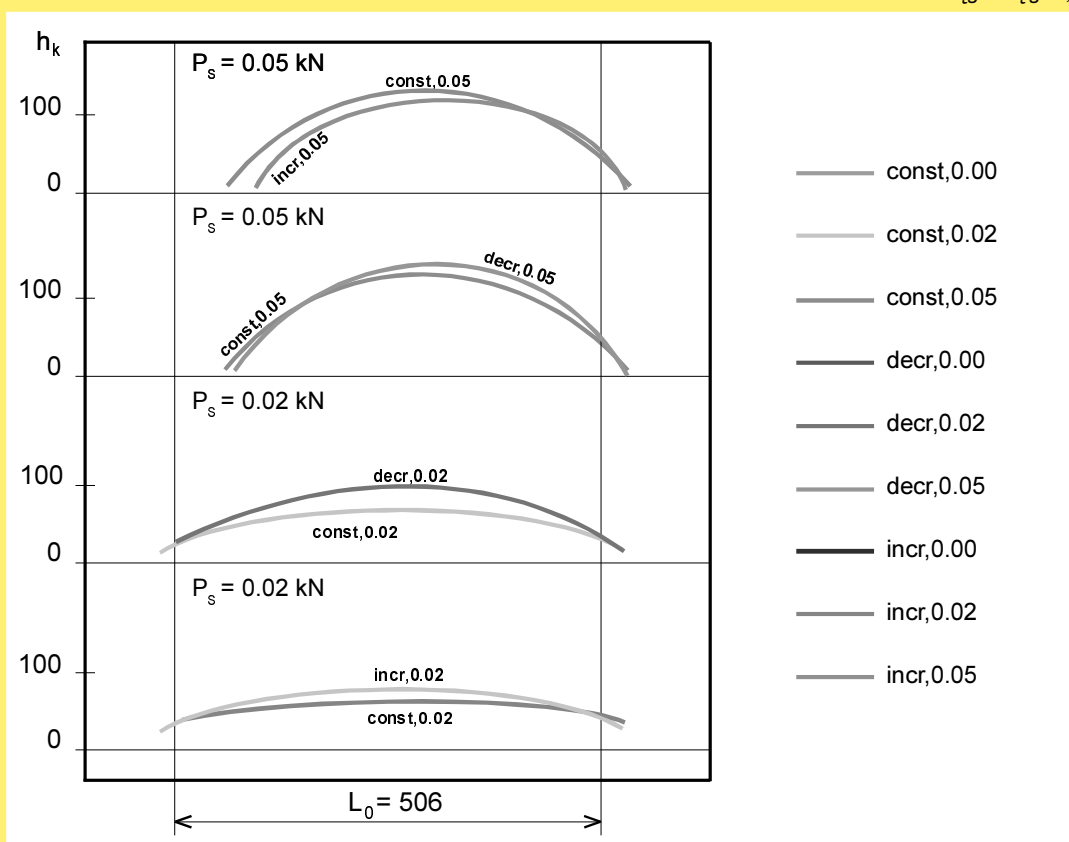
Rys. 5.15 – porównanie wielkości skrócenia badanych modeli, Δ_L , dla poszczególnych wartości siły naciągu ciągła, P_s , bez obciążenia zewnętrznego, Q



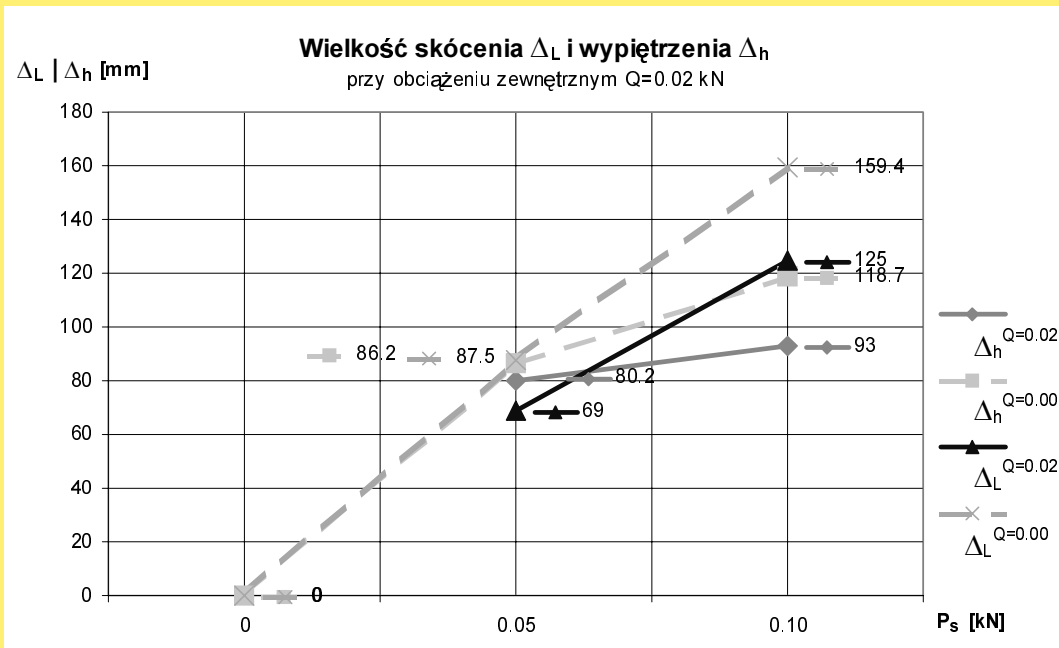
Rys. 5.16 – porównanie wielkości wypiętrzenia badanych modeli, Δ_h , dla poszczególnych wartości siły naciągu ciągła, P_s , bez obciążenia zewnętrznego, Q



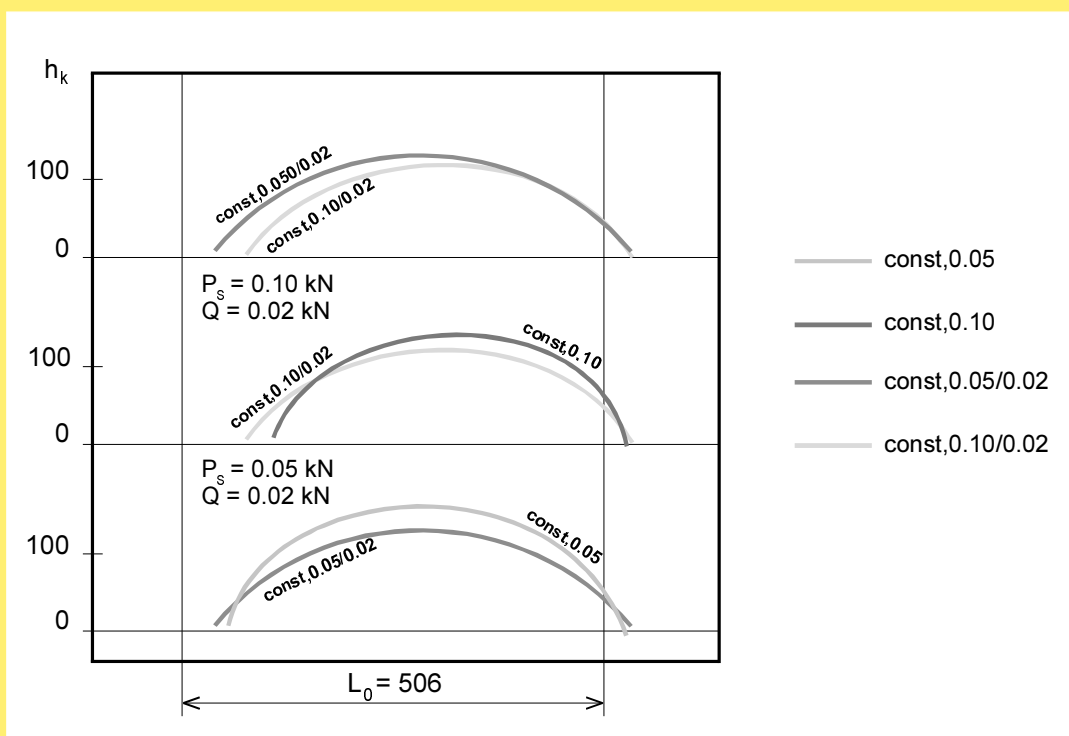
Rys. 5.17 – porównanie krzywizny pasa górnego badanych modeli, dla poszczególnych wartości siły naciągu cięgna, P_s



Rys. 5.18 – porównanie krzywizny pasa górnego modeli o różnie zmieniających się sztywnościach, dla poszczególnych wartości siły naciągu cięgna, P_s



Rys. 5.19 – porównanie wielkości skrócenia, Δ_L i wypiętrzenia, Δ_h , dla modelu o stałej sztywności, dla poszczególnych wartości siły naciągu ciągną, P_s , nieobciążonego oraz z obciążeniem zewn. Q



Rys. 5.20 – porównanie krzywych pasa górnego modelu o stałej sztywności, dla poszczególnych wartości siły naciągu ciągną, P_s , oraz obciążenia zewn. Q

5.3 Konstrukcje pneumatyczne

O ile w odniesieniu do konstrukcji stalowych, sprężanie zaczęło stosować dopiero na pewnym etapie ich rozwoju, to w przypadku konstrukcji pneumatycznych, pomysł sprężania towarzyszył już pierwszej propozycji ich zastosowania.

Pierwszy udokumentowany pomysł zastosowania pneumatycznych elementów konstrukcyjnych w budownictwie pochodzi od Rosjanina, Joachima Adolfowicza Sumowskiego, który w 1893 r. uzyskał amerykański patent na konstrukcje pneumatyczne. Na jednym z załączonych do specyfikacji patentowej rysunków przedstawiony jest sposób wykonywania konstrukcji, w którym uzyskuje ona swój kształt oraz zdolność przenoszenia obciążeń dzięki sprężeniu połączonych elementów¹⁾.

O ile w konstrukcjach pneumatycznych otwartych, zwłaszcza o dużej rozpiętości, ciągną wzmacniające są obecnie często stosowane [95], to w konstrukcjach zamkniętych, zastosowanie sprężania nie jest jeszcze oczywiste i powszechne.

Innym, znanym i szeroko stosowanym w budownictwie rozwiązaniem, które pozwala uzyskać wiele korzyści w kształtowaniu i realizacji konstrukcji, jest zastosowanie powtarzalnych, modułarnych elementów. Po scaleniu tworzą one kompletną konstrukcję. Zalety konstrukcji modułarnych ujawniają się szczególnie przy zastosowaniu elementów o stosunkowo niewielkich wymiarach. Umożliwia to wykonywanie konstrukcji o różnym kształcie, przy użyciu ograniczonej ilości różnych elementów oraz – w przypadku konstrukcji tymczasowych – wielokrotne wykorzystywanie tych samych elementów. Kształt obiektów realizowanych w ten sposób jest ograniczony jedynie topologicznymi uwarunkowaniami podziału powierzchni.

Konstrukcje pneumatyczne zamknięte były wykonywane z powtarzalnych elementów modułarnych jedynie sporadycznie. Spektakularnym przykładem tego typu konstrukcji był pawilon grupy Fuji, na Expo 70 w Osace²⁾ [123].

Połączenie zalet obu wymienionych technik pozwoliło sformułować koncepcję **sprężonych modułarnych powłok pneumatycznych**. Koncepcja ta została przedstawiona poniżej [210][211][217][218].

5.3.1. Zastosowanie modułarnych elementów pneumatycznych w konstrukcjach powłokowych

Wykonywanie dźwigarów powierzchniowych o zakrzywionej powierzchni środkowej, jakimi są powłoki, z modułarnych elementów pneumatycznych o niewielkich wymiarach jest możliwe dzięki zastosowaniu sprężania. Jest ono w tym rozwiązaniu zarówno sposobem scalania elementów jak i metodą kształtowania konstrukcji, dzięki zastosowaniu opisanej wyżej metody samowypiętrzania.

Dodatkowo, proponuje się zastosowanie (opcjonalne) krzyżulców, pozwalających na zmianę charakterystyki przekroju poprzecznego konstrukcji. Pozwala to znacznie rozszerzyć możliwości ich kształtowania oraz zakres zastosowań.

Kombinacja elementów pneumatycznych, ciągnowych i prętowych nie była wcześniej stosowana jako system konstrukcyjny w powłokach [214]. Rozwiązanie to można zaklasyfikować jako pośrednie pomiędzy klasycznymi powłokami sprężystymi, a membranowymi kopułami ciągnowo-prętowymi.

Specyfika konstrukcji pneumatycznych powoduje, że aby było możliwe użycie drobnowymiarowych elementów, niezbędne jest zastosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych, zwłaszcza w zakresie dostarczania powietrza do elementów, stabilizacji ich kształtu oraz sposobu połączenia. Rozwiązania te warunkują praktyczną możliwość realizacji systemu i są jego istotną częścią.

W pawilonie Fuji na wystawie EXPO 70 w Osace zastosowano 16 jednakowych łuków, każdy o długości osiowej 72 m. Łuki mają przekrój kołowy, o średnicy 4 m. Zostały one rozmieszczone na obwodzie pawilonu o rzucie kołowym, średnicy 50 m. Dwa łuki środkowe mają kształt kołowy. Pozostałe, na skutek zbliżenia punktów podparcia na obwodzie kołowym, mają kształt bardziej wysmukły i są tym wyższe, im dalej od środka są usytuowane [123].

Dla konstrukcji sformułowano układ równań nieliniowych, otrzymanych w parciu o założeniu, że:

– każde dwa sąsiadujące łuki mają ciągłą linię styku powierzchni

– każdy łuk zachowuje się sprężysto w płaszczyźnie pionowej i ma jednakowy moduł sprężystości na całej długości.

Rozwiązanie tego układu równań pozwoliło wyznaczyć dokładnie charakterystyki geometryczne konstrukcji. Łuki zostały połączone za pomocą pasów z tkaniny, umieszczonych wzdłuż linii geodezyjnych na powierzchni przekrycia.

¹⁾ Faksymile patentu J.A. Sumowskiego zamieszczono w rozdz. 2.2

²⁾ Pawilon Fuji na wystawie EXPO 70 przedstawiono na rys.2.105.a)

5.3.1.1. Budowa modułowych powłok pneumatycznych

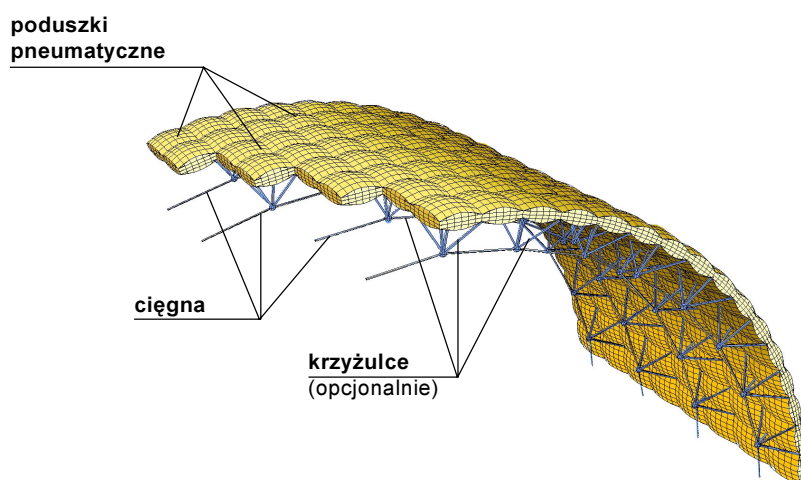
Modularne powłoki pneumatyczne charakteryzują się specyficzną budową, odróżniającą je od innych konstrukcji pneumatycznych typu zamkniętego oraz od innych konstrukcji powłokowych.

Można wyróżnić następujące podstawowe elementy modułowych powłok pneumatycznych:

- poduszki pneumatyczne (główne elementy modułarne)
- pręty – krzyżulce (opcjonalnie)
- cięgna sprężające

Poduszki pneumatyczne i cięgna sprężające występują we wszystkich rodzajach powłok, a dodatkowe pręty – jedynie w powłokach o zwiększonej wysokości konstrukcyjnej [211]. Po scaleniu, konstrukcja tworzy kompletne przekrycie i nie wymaga stosowania dodatkowych pokryć.

Ogólny widok oraz elementy składowe przykładowej modułowej powłoki pneumatycznej pokazano na rys. 5.21.



Rys. 5.21 – budowa modułowej powłoki pneumatycznej

5.3.1.2. Elementy składowe

Poduszki pneumatyczne | Modularne elementy pneumatyczne mają formę poduszek. Są to elementy płaskie, a ich kształt jest uwarunkowany jedynie geometrycznym podziałem powierzchni, którą mają tworzyć po scaleniu. Podstawowymi kształtami są czworokąty: prostokąt, kwadrat i romb oraz sześciokąt i trójkąt.

Aby możliwe było wykonanie z takich elementów ciągłej powłoki, muszą one spełniać kilka podstawowych warunków:

- kształt poduszek musi odpowiadać podziałowi projektowanej powierzchni; z oczywistych powodów korzystne jest stosowanie jak najmniejszej liczby różnych elementów
- wymiary poduszek muszą być dostatecznie małe w porównaniu z wymiarami powłoki, którą mają utworzyć, aby uzyskana powierzchnia była dostatecznie gładka i aby można ją było poddawać znacznym deformacjom; dodatkowym kryterium wielkości może być łatwość operowania nimi podczas montażu, np. możliwość przenoszenia przez jednego pracownika
- sposób łączenia poduszek musi umożliwiać zapewnienie ciągłości powierzchni powłoki
- poduszki pneumatyczne muszą być wyposażone w elementy umożliwiające zastosowanie w powłoce cięgien sprężających

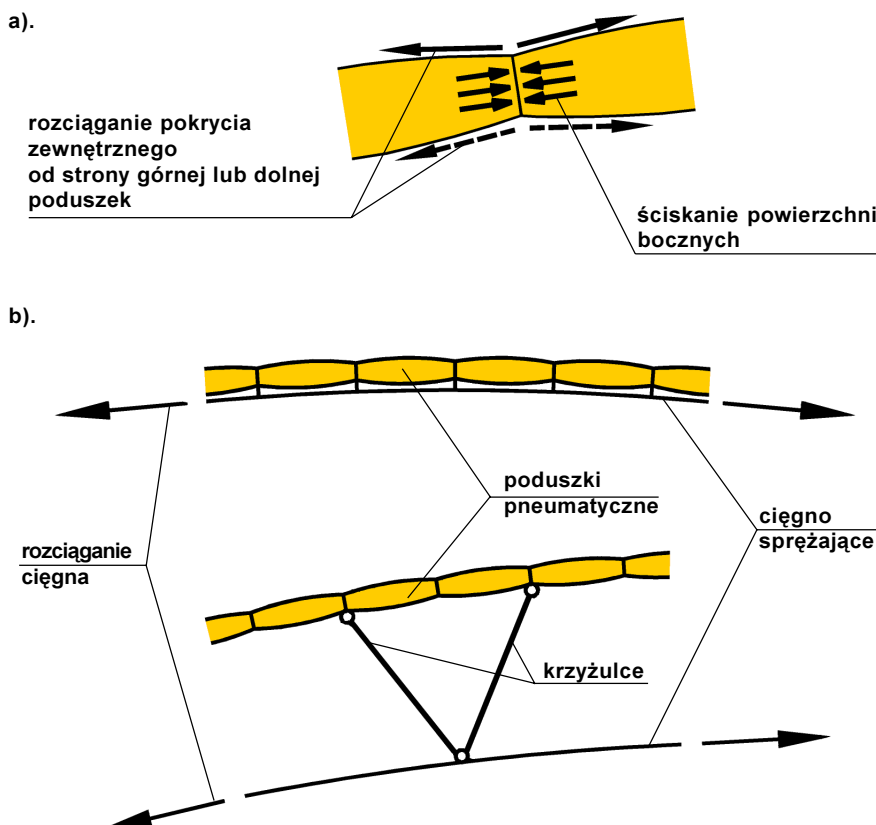
Pręty | Elementy prętowe – krzyżulce, są opcjonalne i występują jedynie w niektórych rodzajach powłoki. Stosowane są w celu zwiększenia wysokości konstrukcyjnej powłoki. Pręty mogą być wykonywane z każdego lekkiego materiału, zdolnego do przenoszenia ściskania. Może to być stal, aluminium, drewno lub kompozyty. W naturalny sposób korzystniejsze od innych są przekroje zamknięte, np. rurowe. Sposób połączenia prętów z poduszkami musi wykluczać możliwość ich uszkodzenia (odpowiednio wzmocnione kieszenie, brak ostrych krawędzi itp.).

Cięgna sprężające | Cięgna sprężające są umieszczane zawsze po wewnętrznej stronie krzywizny powłoki. W powłokach antyklastycznych cięgna są umieszczane w dwóch warstwach – na przeciwnych powierzchniach powłoki. Kierunek cięgien w każdej warstwie odpowiada przewidywanej krzywiznie powłoki, rys. 5.25. Cięgna są umieszczane bezpośrednio pod poduszkami lub odsunięte od nich poprzez krzyżulce. W obu przypadkach, muszą one mieć możliwość swobodnego przesuwania się w węzłach.

Na cięgna sprężające mogą być stosowane zarówno liny włókienne (z włókien naturalnych lub chemicznych) jak i stalowe. Istotne jest zabezpieczenie poduszek przed uszkodzeniem przez liny (zwłaszcza stalowe), np. poprzez stosowanie koszulki ochronnej.

5.3.1.3. Przenoszenie sił wewnętrznych

Po scaleniu, elementy powłoki muszą przenosić powstające w niej siły. Jest to możliwe poprzez ściskanie stykających się bocznych powierzchni poduszek oraz rozciąganie ich zewnętrznego pokrycia. Z tego względu, sposób połączenia poduszek musi zapewniać ich pełny kontakt na bocznych powierzchniach oraz ciągłość tkaniny pokrycia zewnętrznego. System połączonych w ten sposób poduszek, stanowi odpowiednik pręta pasa górnego o niezerowej sztywności giętnej, w konstrukcjach stalowych. Na rys. 5.22 przedstawiony został schematycznie sposób, w jaki powłoki o różnej konfiguracji przenoszą siły wewnętrzne.

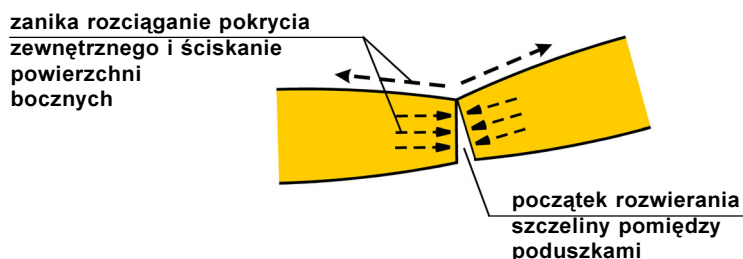


Rys. 5.22 – schemat przenoszenia sił wewnętrznych przez modułową powłokę pneumatyczną:
a). przekazywanie sił pomiędzy poduszkami
b). powłoki o różnym ramieniu sił wewnętrznych

5.3.2. Zastosowanie sprężania i samowypiętrzania do kształtowania modułarnych powłok pneumatycznych

Podane powyżej, podstawowe zasady, pozwalają na uzyskanie powłok o różnych kształtach, wielkości i konfiguracji geometrycznej, przeznaczonych do różnych zastosowań.

Konstrukcja jest stabilizowana poprzez sprężenie. Operacja ta powoduje powstanie sił wewnętrznych, pokazanych na rys. 5.22. Rozkład sił nie ulega zmianie pod wpływem obciążeń, zmieniają się jedynie ich wartości. Efektem zmiany znaku sił wewnętrznych jest zniszczenie konstrukcji w wyniku rozwarcia szczelin pomiędzy poduszkami lub „ściskania”, tj. marszczenia się wiotkiego pokrycia zewnętrznego, rys. 5.23.



Rys. 5.23 – schemat sposobu utraty nośności przez powłokę

Możliwe są dwa sposoby realizacji sprężenia konstrukcji:

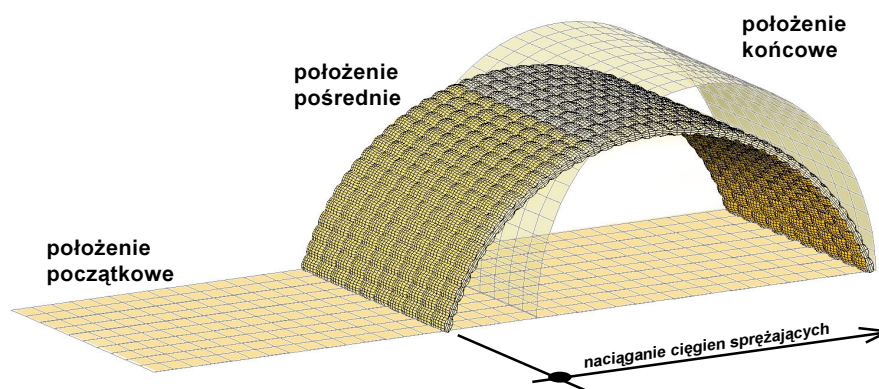
- konstrukcja jest sprężana i wypiętrzana jednocześnie (samowypiętrzanie)
- sprężana jest konstrukcja uprzednio scalona w przewidywanym kształcie

5.3.2.1. Proces samowypiętrzania

W pierwszym, z w/w przypadków, elementy powłoki po połączeniu na poziomie terenu tworzą układ bardzo wiotki, znacznie bliższy mechanizmowi, niż to ma miejsce w przypadku samowypiętrzalnych konstrukcji prętowych, gdyż nie występuje tu odpowiednik sztywności giętej pasa górnego. Przed rozpoczęciem sprężania poduszki są połączone między sobą jedynie za pomocą wiotkiej tkaniny tworzącej pokrycie zewnętrzne.

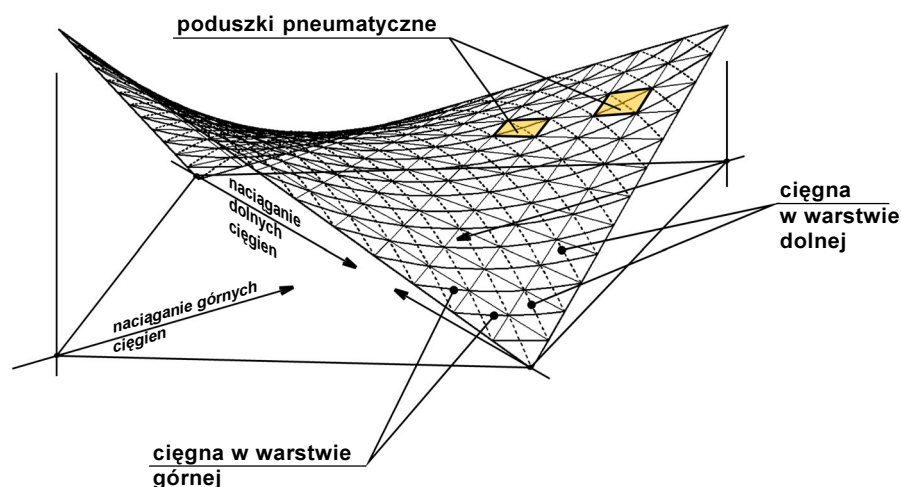
Konstrukcja uzyskuje sztywność i zdolność do przenoszenia obciążeń dopiero wtedy, gdy wskutek sprężenia nastąpi jej wypiętrzenie, aż do osiągnięcia odpowiedniej krzywizny. Towarzyszy temu dociśnięcie bocznych powierzchni poduszek oraz naciągnięcie pokrycia zewnętrznego.

Przebieg procesu samowypiętrzania jest dla powłok pneumatycznych analogiczny jak dla konstrukcji prętowych. Praktycznie, polega on na zamocowaniu jednego końca cięgna sprężającego w nieprzesuwnej podporze, a następnie wyciąganiu drugiego końca, w sposób powodujący zbliżenie przeciwległej, przesuwnej podpory. Schematycznie przedstawia to rys. 5.24.



Rys. 5.24 – schemat procesu samowypiętrzania modułarnej powłoki pneumatycznej

Powłoka pneumatyczna może być sprężana w jednym lub w dwóch kierunkach. W pierwszym przypadku powstają konstrukcje o zerowej krzywiznie Gaussa (powłoki walcowe), a w drugim – dwukrzywiznowe, o ujemnej krzywiznie Gaussa (antyklastyczne), np. paraboloida hiperboliczna. Przykładowy schemat antyklastycznej powłoki pneumatycznej przedstawia rys. 5.25.



Rys. 5.25 – dwukierunkowe sprężanie modularnej powłoki pneumatycznej

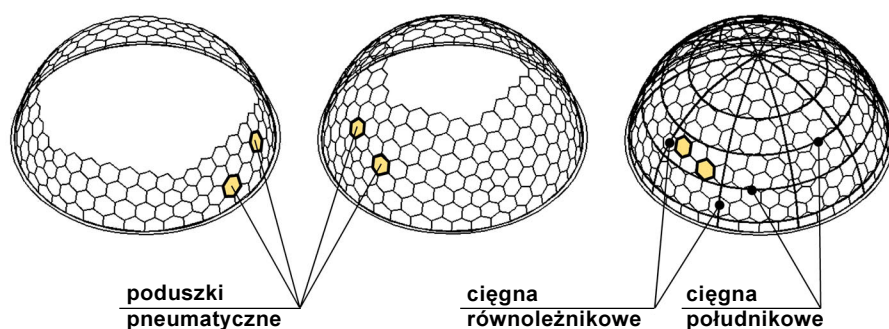
W przypadku powłok dwukierunkowo sprężanych sprężanie odbywa się sukcesywnie. Najpierw naciągane są cięgna jednego kierunku do wartości ok. 50 ÷ 60 % przewidywanej całkowitej siły sprężającej. Następnie naciągane są cięgna drugiego kierunku, do analogicznej wartości. W końcowym etapie następuje rektyfikacja naciągu, na przemian w obu kierunkach. Za każdy z kierunków zakrzywienia odpowiada jeden układ cięgien sprężających, umieszczony na odpowiedniej (górnej lub dolnej) powierzchni poduszek.

W celu jakościowej oceny koncepcji dwukierunkowego sprężania pneumatycznych powłok modularnych, wykonany został w małej skali model powłoki przedstawionej na rys. 5.25, który następnie sprężono w dwóch kierunkach. Przebieg eksperymentu i wnioski przedstawiono w rozdz. 5.3.6.1.

5.3.2.2. Zastosowanie sprężania do konstrukcji uprzednio scalonych

Drugim sposobem realizacji powłok pneumatycznych jest scalanie ich z poduszek modularnych *in situ*, w układzie odpowiadającym ich projektowanemu położeniu. Przy takim sposobie montażu konstrukcja nie jest poddawana deformacji dla uzyskania ostatecznego kształtu i nie następuje jej samowypiętrzenie. Sprężanie jest stosowane po zamontowaniu wszystkich elementów i służy do zapewnienia konstrukcji ciągłości i spójności oraz odpowiedniej nośności.

Ten sposób montażu pozwala uzyskiwać konstrukcje o dodatniej krzywiznie Gaussa (synklastyczne), zwłaszcza powierzchnie obrotowe. Na rys. 5.26 przedstawiono przykład kolejności montażu powłoki sferycznej, wykonanej z poduszek sześciokątnych.



Rys. 5.26 – montaż synklastycznej modularnej powłoki pneumatycznej

5.3.3. Regulacja sztywności i twardnienie

Proces samowypiętrzania powłok pneumatycznych pozwala na jednoczesne kształtowanie ich formy. Jest to możliwe poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu, takich jak:

- długość początkowa powłoki
- zbliżenie podpór podczas wypiętrzania
- wielkość sił wciągających sprężających
- sztywność powłoki

Szczególnie przydatnym w kształtowaniu powłok pneumatycznych narzędziem jest regulacja ich sztywności. Jej zmiana bezpośrednio wpływa na końcową krzywiznę powłoki, określając zarówno walory estetyczne konstrukcji jak i jej charakterystykę statyczno-wyrzymałościową

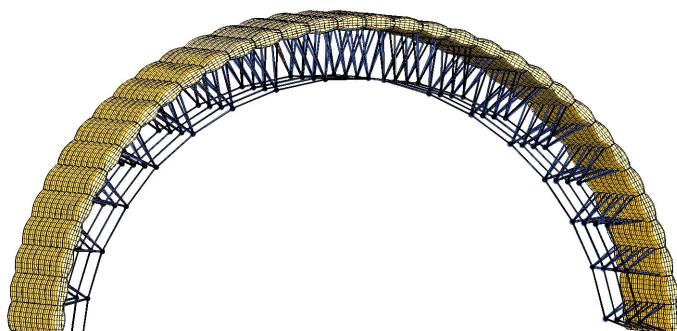
5.3.3.1. Konstrukcje o zmiennej sztywności

Krzywizna powłoki pneumatycznych formowanych w procesie samowypiętrzania może być regulowana poprzez zmianę ich sztywności na zginanie. Sztywność powłoki może być zmieniana jednolicie dla całej powłoki lub zmieniać się wzdłuż jej rozpiętości [219]. Jest to efektywny sposób kształtowania powłok pneumatycznych, pozwalający na dostosowanie ich kształtu do potrzeb użytkowych [209][212]. Sztywność powłoki na zginanie jest określana przede wszystkim przez jej wysokość konstrukcyjną, tj. ramię sił wewnętrznych pomiędzy poduszkami pneumatycznymi a cięgnami sprężającymi. Zmiana wysokości powoduje zmianę sztywności powłoki. Można to uzyskać dwoma podstawowymi sposobami:

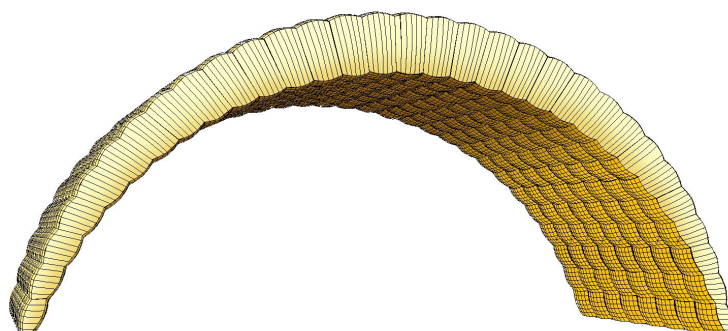
- przez zastosowanie dodatkowych elementów prętowych, tj. krzyżulców, odsuwających cięgno sprężające od powierzchni poduszek pneumatycznych; krzyżulce mogą mieć zmienną długość
- przez zmianę grubości samych poduszek

Na rys. 5.27 przedstawione zostały te dwa podstawowe sposoby zmiany sztywności powłoki.

a).



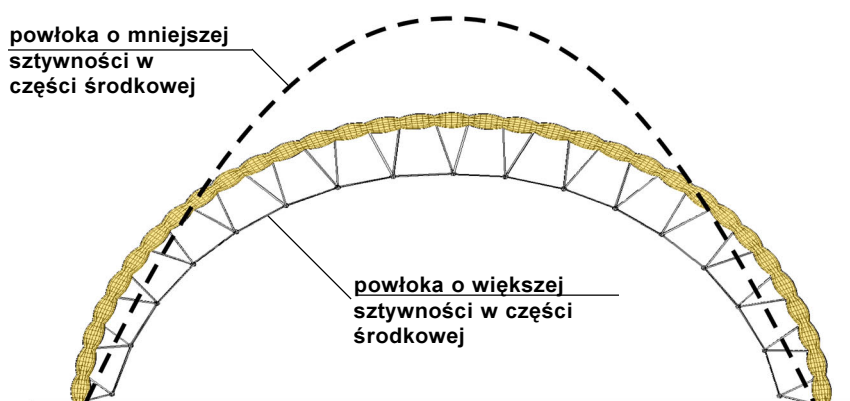
b).



Rys. 5.27 – sposoby zmiany sztywności giętej powłok pneumatycznych wzdłuż ich rozpiętości:

- a) zastosowanie krzyżulców o zmiennej długości
- b) zastosowanie poduszek o zmiennej grubości

Jeżeli porównamy dwie powłoki o takiej samej długości początkowej i poddane takiemu samemu wypiętrzeniu, tj. zbliżeniu podpór, ale o różnie zmieniających się sztywnościach, to widoczne będą wyraźne różnice uzyskanej w obu przypadkach geometrii końcowej. Powłoka, której sztywność jest większa w środkowej części, a mniejsza w częściach bocznych, charakteryzuje się małym zakrzywieniem powierzchni w części środkowej (jest „płaska”), a znacznym na bokach. I odwrotnie – powłoka o sztywności zmniejszającej się ku środkowi jest w tej części bardziej wyniosła niż na bokach.

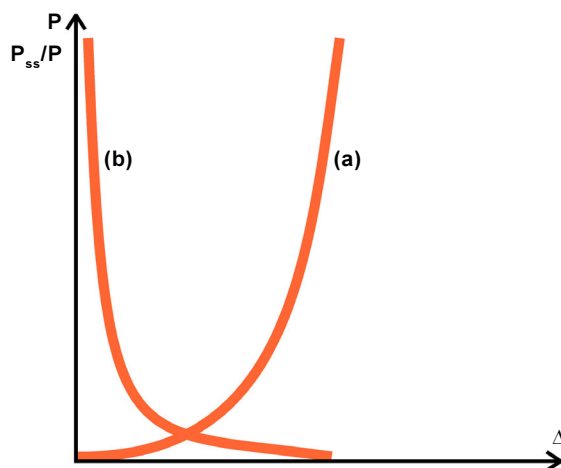


Rys. 5.28 – porównanie kształtu powłok o sztywności zmniejszającej się i zwiększającej w środkowej części, po wypiętrzeniu przez jednakowe skrócenie

Na rys. 5.28 przedstawiono porównanie kształtów powłoki walcowej o sztywności zmieniającej się w różny sposób. Jeżeli zmiana sztywności następuje wg innej, parametrycznej zależności, możliwe jest uzyskanie bardziej złożonych kształtów.

5.3.3.2. Konstrukcje dostosowujące się – samosztynniejące¹⁾

Zmiana sztywności może być wykorzystana do wykonania konstrukcji, która aktywnie dostosowuje się do obciążeń zewnętrznych. Jeżeli ramię sił wewnętrznych zwiększa się wraz ze wzrostem momentu od obciążeń, zmniejszają się odkształcenia konstrukcji wywołane tymi obciążeniami. Zależność obciążenie-odkształcenie ma wtedy postać krzywej rosnącej wykładniczo – krzywa (a) na rys. 5.29. Wraz z przyrostem obciążenia zewnętrznego zmniejsza się odpowiadający mu przyrost odkształcenia. Konstrukcje, które wykazują taką taką charakterystykę noszą nazwę systemów samosztynniejących.

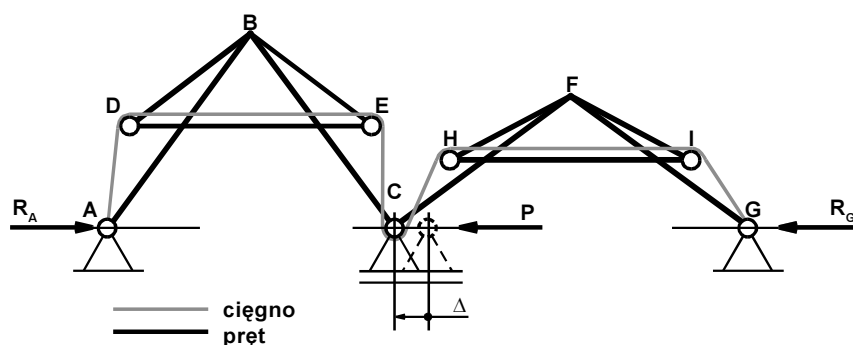


Rys. 5.29 – typowa dla systemów twardniejących zależność „obciążenie-odkształcenie” dla elementarnego modułu sprężynującego:
a). $P = f(\Delta)$
b). $P_{ss}/P = f(\Delta)$
(opis w tekście).
Opracowano na podstawie [196]

¹⁾ Określenie „konstrukcje samosztynniejące” jest odpowiednikiem ang. „self-herdening systems” [196]. Określenie to jest wyjaśnione w tekście.

Wzrastająca odpowiedź konstrukcji jest wynikiem akumulacji energii potencjalnej odkształcenia sprężystego. Akumulacja taka jest możliwa dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu konstrukcji. Bardzo interesujący przykład konstrukcji samosztynniającej zaproponował O. Sircovich Saar [196].

Konstrukcja ta składa się z szeregu elementarnych „modułów sprężynujących” (ang. *basic spring structure*). Na rys. 5.30. przedstawiono schemat takiego modułu.



Rys. 5.30 – elementarny moduł sprężynujący.

Oznaczenia:

R_A, R_G – reakcje zewnętrzne
 P – siła zewnętrzna
 Δ – przemieszczenie

Opracowano na podstawie [196]

Jest to symetryczny układ składający się z dwóch zestawów prętów. Pręty AB i BC, oparte są na podporach i połączone w wierzchołku, natomiast trzy inne pręty tworzą trójkąt DBE, zawieszony w wierzchołku B. Wszystkie węzły są przegubowe. Analogiczny układ prętów znajduje się po drugiej stronie podpory C. Podpory A i G są nieprzesuwne, a podpora C – przesuwna. Cięgno zakotwione w podporach A i G jest przeciągnięte w sposób ciągły pomiędzy węzłami D, E, C, H, I. Sposób zamocowania cięgna w węzłach przelotowych umożliwia jego swobodny przesuw.

Jeżeli w konstrukcji prętowej punkty wierzchołkowe trójkątów: B, F itd będą stanowiły węzły pasa górnego kratownicy, to pręty AB, BC, CF, FG itd będą jej krzyżulcami. W takiej konstrukcji pozostałe komponenty elementarnego modułu sprężynującego będą odpowiednikami prętów pasa dolnego. Każdy zestaw dwóch wirtualnych prętów wynikający z jednego modułu będzie stanowił układ o charakterystyce twardniejącej.

Pod wpływem działania obciążenia zewnętrznego P , powstają reakcje R_A i R_G , natomiast węzeł doznaje przemieszczenia Δ . Przemieszczenie to jest przemieszczeniem sprężystym, o wartości większej niż wynikająca jedynie z sumy sprężystych odkształceń elementów modułu. W pracy [196] wykazano, że:

$$R_A = P + P_{ss}, \quad R_G = P_{ss} \quad (5.5)$$

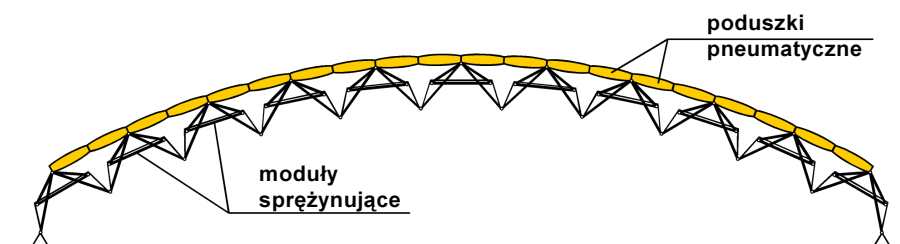
gdzie P_{ss} jest siłą samonaciągu.

Stosunek siły samonaciągu do siły zewnętrznej, P_{ss}/P , wyrażony w zależności od przemieszczenia Δ , jest funkcją bardzo szybko malejącą [196]. Przykładową zależność przedstawia krzywa (b) na rys. 5.29.

Przedstawiony sposób realizacji systemu samosztynniającego nadaje się bardzo dobrze do zastosowania w konstrukcjach przewidzianych do wielokrotnego montażu i demontażu, również w połączeniu metodą z samowypiętrzania. O.S. Saar zaproponował w pracy [197] jeden ze sposobów realizacji takiej procedury.

Konstrukcje o takiej charakterystyce mogą w wielu sytuacjach być bardziej przydatne niż konstrukcje o liniowej zależności obciążenie-odkształcenie. Szczególnie obiecujące wydają się być zastosowania w konstrukcjach narażonych na oddziaływanie trzęsień ziemi [196].

Przedstawione powyżej rozwiązanie systemu samosztywniejącego może być z powodzeniem zastosowane do modularnych powłok pneumatycznych. Przykładowe rozwiązanie takiej konstrukcji zostało zaproponowane przez autora w pracy [209]. Jej schemat przedstawia rys. 5.31.



Rys. 5.31 – przykład konstrukcji samotwardniejącej, w której zastosowano modułarne poduszki pneumatyczne oraz prętowo-ciężnowe moduły sprężynujące

5.3.4. Szczegóły techniczne

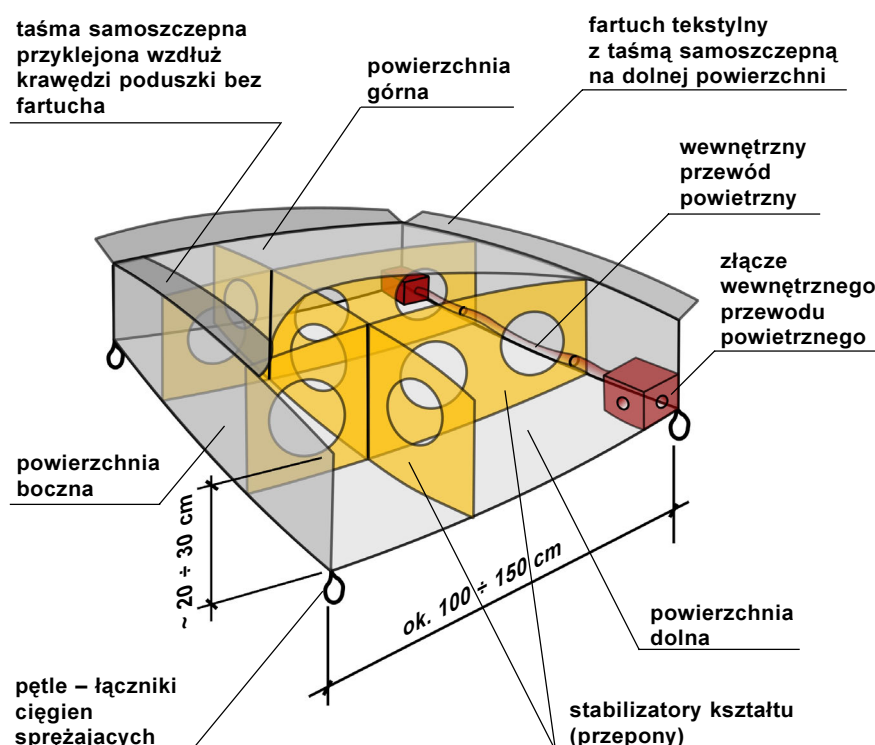
5.3.4.1. Modularne poduszki pneumatyczne

Poduszki powietrzne są podstawowym elementem powłoki. Są to zazwyczaj elementy płaskie, których grubość jest mniejsza od wymiarów w rzucie. W poduszce można wyróżnić dwie powierzchnie podstawowe (górną i dolną) oraz powierzchnie boczne.

Ze względu na rodzaj materiału, z którego są wykonane powierzchnie podstawowe poduszki, wyróżniamy:

- poduszki miękkie (powierzchnie podstawowe wykonane z tkaniny)
- poduszki półsztywne (powierzchnie podstawowe wykonane z paneli)

Poduszki typu miękkiego | Podstawowym materiałem, służącym do wykonania poduszki jest wiotka tkanina, odpowiednia dla konstrukcji pneumatycznych. Ponieważ podczas wielokrotnego montażu i demontażu konstrukcji oraz w trakcie transportu i przechowywania, poduszki podlegają zaginaniu, zgniataniu itp., materiał musi być dostatecznie elastyczny i



Rys. 5.32 – przykład budowy wewnętrznej modularnej poduszki pneumatycznej typu miękkiego

odporny na uszkodzenia zmęczeniowe. Z tego względu nie można stosować tkaniny szklanej niezależnie od rodzaju powłoki. Najkorzystniejsze są tkaniny poliestrowe, powlekane PCV. W przyszłości zapewne będzie możliwe zastosowanie tkaniny z włókien PTFE, która obecnie jest znacznie droższa niż tkanina poliestrowa.

Powierzchnie boczne poduszek zawsze są wykonywane z tkaniny, gdyż zapewnia to ich właściwy kontakt po scaleniu konstrukcji. W poduszkach typu miękkiego również powierzchnie podstawowe są wykonane z tkaniny. Na rys. 5.32 przedstawiono schemat budowy wewnętrznej poduszki miękkiej.

Poduszki typu półsztywnego | W niektórych obiektach konieczne jest zastosowanie poduszek półsztywnych. Są to poduszki, których jedna lub obydwie powierzchnie podstawowe są wykonane ze sztywnych paneli (z metalu, sklejki lub tworzywa sztucznego). Panele takie mogą być zastosowane z dwóch powodów:

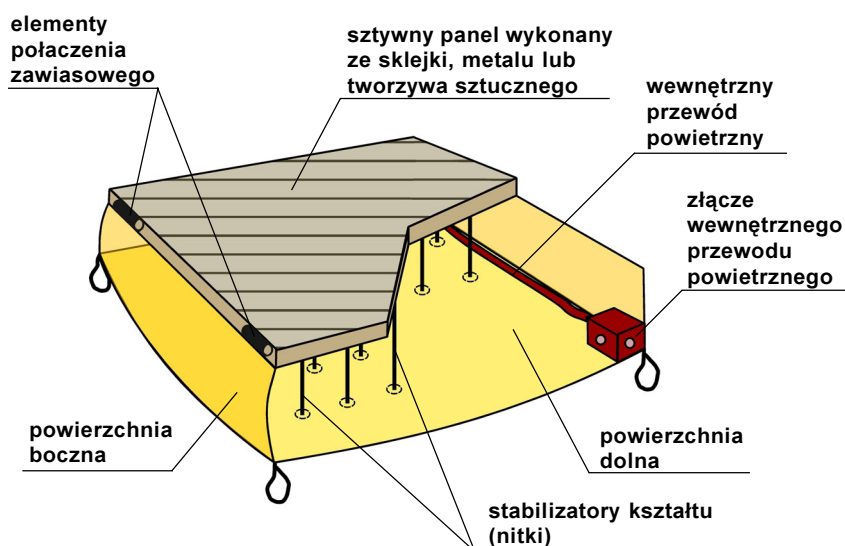
- dla umożliwienia bezpośredniego przyłożenia do powierzchni poduszki obciążeń skupionych, np. w zastosowaniach do obiektów komunikacyjnych
- dla uzyskania poduszek o wysokiej estetyce powierzchni zewnętrznej i ewentualnie o dużej przepuszczalności światła, w przypadku zastosowania paneli przezroczystych

Pozostałe elementy tworzące poduszkę są jednakowe dla poduszek typu miękkiego i typu półsztywnego. Na rys. 5.33 przedstawiono schemat budowy wewnętrznej poduszki półsztywnej.

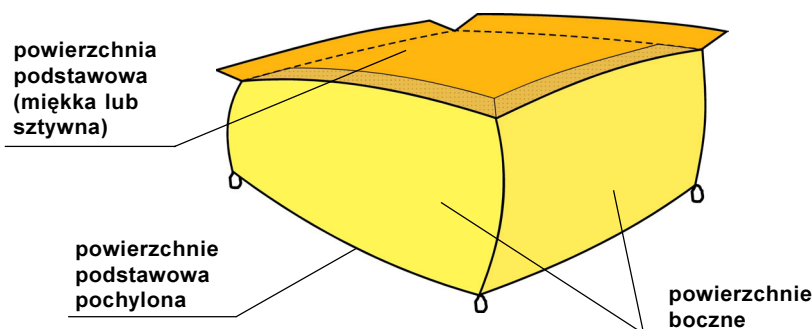
Poduszki o zmiennej grubości | Dla konstrukcji o zmiennej sztywności, możliwe jest zastosowanie poduszek o zmieniającej się grubości, rys. 5.27.b). W takim przypadku, powierzchnie podstawowe poduszki nie są równoległe, a powierzchnie boczne mają różną szerokość. Poduszki o zmiennej grubości mogą być wykonywane zarówno jako miękkie jak i jako półsztywne. Przykład poduszki o zmiennej grubości przedstawia rys. 5.34.

Inne elementy budowy poduszek | Poduszki, w których jedna z powierzchni podstawowych lub obie są wiotkie, muszą posiadać wewnętrzne elementy zapewniające zachowanie po napełnieniu płaskiego kształtu. Elementy te muszą być wiotkie, aby możliwe było składanie poduszek po usunięciu powietrza. Możliwe jest zastosowanie dwóch rodzajów stabilizatorów kształtu:

- płaskie przepony z otworami, rys. 5.32
- szereg nitek, łączących obie powierzchnie, rys. 5.33



Rys. 5.33 – budowa wewnętrzna modularnej poduszki pneumatycznej typu półsztywnej



Rys. 5.34 – poduszka pneumatycznej o zmiennej grubości

Obydwa rodzaje stabilizatorów są obecnie znane i opracowane pod względem technologii produkcji. Pierwszy z nich jest powszechnie wykorzystywany w popularnym, nadmuchiwanym sprzęcie turystycznym. Drugi rodzaj odpowiada rozwiązaniom stosowanym w płaskich elementach, tzw. „deskach pneumatycznych”. Ilość i sposób rozmieszczenia stabilizatorów kształtu zależą od wymiarów i kształtu poduszek.

Poduszki są ponadto wyposażone w łączniki pozwalające na umieszczenie w nich cięgien sprężających. Są to przelotowe pętle, umieszczone w narożach poduszki, w jednej lub w obu powierzchniach podstawowych (w przypadku sprężania w dwóch kierunkach). Ciężno jest przewlekane przez te pętle podczas montażu powłoki.

Jeżeli poduszki mają być stosowane w konstrukcjach o zwiększonej wysokości konstrukcyjnej, w których występują krzyżulce, to umieszczone są w nich wzmocnione kieszenie na te pręty. Wzmocnienie ma na celu ochronę tkaniny, z której są wykonane poduszki przed uszkodzeniem przez krawędzie prętów.

Płaskie panele pneumatyczne, tzw. „deski”, zazwyczaj charakteryzują się one ogromnym zagęszczeniem nitek, dochodzącym do setek sztuk na 1 cm². W opisywanym rozwiązaniu ilość ta jest znacznie mniejsza, gdyż nie jest wymagana tak płaska powierzchnia.

5.3.4.2. Połączenia poduszek

Występują dwa miejsca połączenia poduszek pneumatycznych między sobą:

- połączenie powierzchni bocznych
- połączenie powierzchni podstawowych

Połączenie powierzchni bocznych następuje bezpośrednio poprzez ich docisk, jak to przedstawia rys. 5.22. Aby połączenie to było prawidłowe, kontakt powierzchni bocznych nie może być ograniczony np. przez wysunięte sztywne powierzchnie podstawowe, zamocowania krzyżulców lub złączki systemu dostawy powietrza.

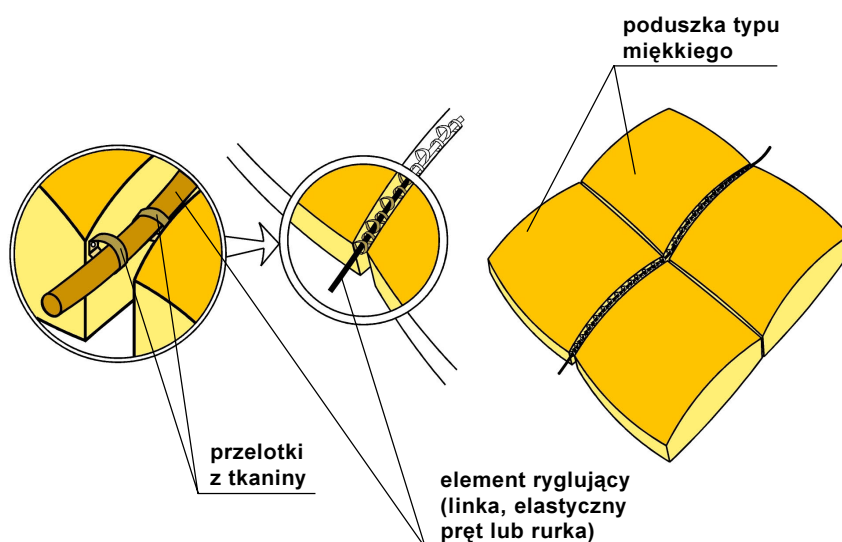


Rys. 5.35 – połączenie powierzchni podstawowych poduszek pneumatycznych miękkich z zastosowaniem taśm samoszczepnych

Połączenie powierzchni podstawowych musi zapewniać ciągłość przenoszenia sił rozciągających w powłoce, w każdym kierunku. Dodatkowo, jeżeli powłoka pełni funkcję ochrony przed warunkami atmosferycznymi, połączenie to musi zapewniać szczelność powłoki.

W przypadku powłok o wiotkich powierzchniach podstawowych, wygodnym sposobem połączenia jest zastosowanie wzdłuż krawędzi poduszek fartuchów, nakładających się po scaleniu na poduszki sąsiednie. Na wewnętrznej powierzchni fartuchów oraz zewnętrznej powierzchni krawędzi przykrywanych przez nie, znajduje się taśma samoszczepna¹⁾ (np. Velcro). Takie połączenie jest bardzo łatwe w montażu i demontażu, szczelne i umożliwia przenoszenie sił rozciągających. Rys. 5.35 przedstawia sposób połączenia wiotkich powierzchni podstawowych poduszek za pomocą fartuchów z taśmą samoszczepną.

Innym rodzajem połączenia jest zastosowanie dodatkowych łączników mechanicznych, tworzących rodzaj „zamka błyskawicznego”. Połączenie takie składa się z pętli lub cylindrycznych przelotek z tkaniny, przymocowanych do bocznych powierzchni poduszek oraz elementów ryglujących, przewlekanych przez nie w trakcie scalania. Mogą to być linki, pręty lub rurki z metalu lub tworzyw sztucznych. Ich średnica musi być dobrana do średnicy przelotek tak, aby po przeciągnięciu następowało dociśnięcie bocznych powierzchni poduszek. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 5.36.



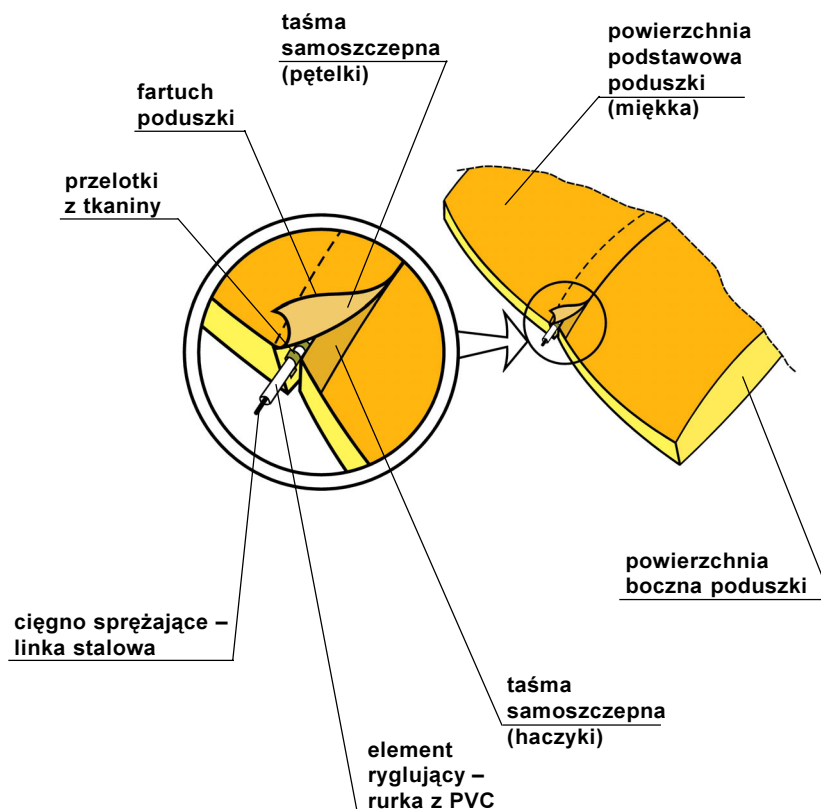
Rys. 5.36 – połączenie poduszek pneumatycznych miękkich typu „zamek błyskawiczny”

Dodatkowe możliwości stwarza jednocześnie zastosowanie obydwu opisanych powyżej rozwiązań. W takim połączeniu siły są przenoszone przede wszystkim przez „zamek błyskawiczny”, natomiast fartuchy z taśmą uszczelniającą zapewniają szczelność pokrycia.

Zastosowanie jako elementu ryglującego w „zamku błyskawicznym” rurki z tworzywa sztucznego pozwala na uproszczenie budowy poduszek przeznaczonych do wykonywania powłok dwukierunkowo sprężanych. W takim rozwiązaniu, rurki służą nie tylko do połączenia poduszek ale jednocześnie jako prowadnice dla cięgien sprężających, które są umieszczane w ich wnętrzu. Dzięki temu zbędne jest wykonywanie dodatkowych pętli do połączenia poduszek z cięgnami. Jednocześnie rurki zapewniają łatwość przesuwania się cięgien i chronią poduszki przed uszkodzeniami.

Na rys. 5.37 przedstawiono przykładowe połączenie poduszek typu miękkiego. Przedstawione połączenie jest kombinacją fartuchów z taśmą samoszczepną i „zamka błyskawicznego”, z rurką jako elementem ryglującym. W rurce umieszczone jest cięgno sprężające.

¹⁾ W Polsce przyjęta jest popularna nazwa taśm samoszczepnych „rzep”. W Europie Zachodniej i w USA, stosowana jest nazwa „velcro”, od nazwy ich głównego producenta.



Rys. 5.37 – połączenie poduszek pneumatycznych miękkich z jednoczesnym zastosowaniem fartuchów z taśmą samoszczepną oraz „zamka błyskawicznego” z rurką z PVC jako elementem ryglującym. W rurce umieszczone jest ciężko sprężające.

Połączenie poduszek typu półsztywnego wykonuje się w postaci dwuczęściowego zawiasu scalanego na montażu. Elementem ryglującym może być – podobnie jak w przypadku poduszek miękkich – pręt lub rurka.

Na rys. 5.38 przedstawiono schemat połączenia zawiasowego półsztywnych poduszek pneumatycznych.

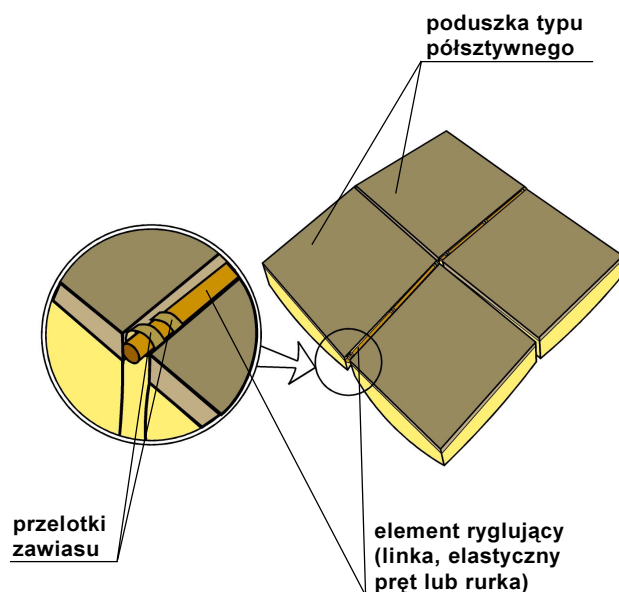
5.3.4.3. Węzły przelotowe

Węzły przelotowe są ważnym elementem składowym modułarnych powłok pneumatycznych. Węzły te występują we wszystkich rodzajach powłok, zarówno z krzyżulcami, jak i bez krzyżulców. Łączą one ciężko sprężające z pozostałymi elementami powłoki. Budowa węzła przelotowego musi umożliwiać jego swobodny przesuw podczas sprężania, przy jednoczesnym przekazywaniu siły naciągu wstępnego.

Najprostszym rozwiązaniem węzła przelotowego, nadającym się do powłok bez krzyżulców, jest pętla z liny włókiennej lub stalowej, umieszczona w narożach poduszki modułarnej, jak to pokazano na rys. 5.32 i 5.33, albo taśma z tkaniny z otworem zabezpieczonym nitem oczkowym, rys. 5.66.d).

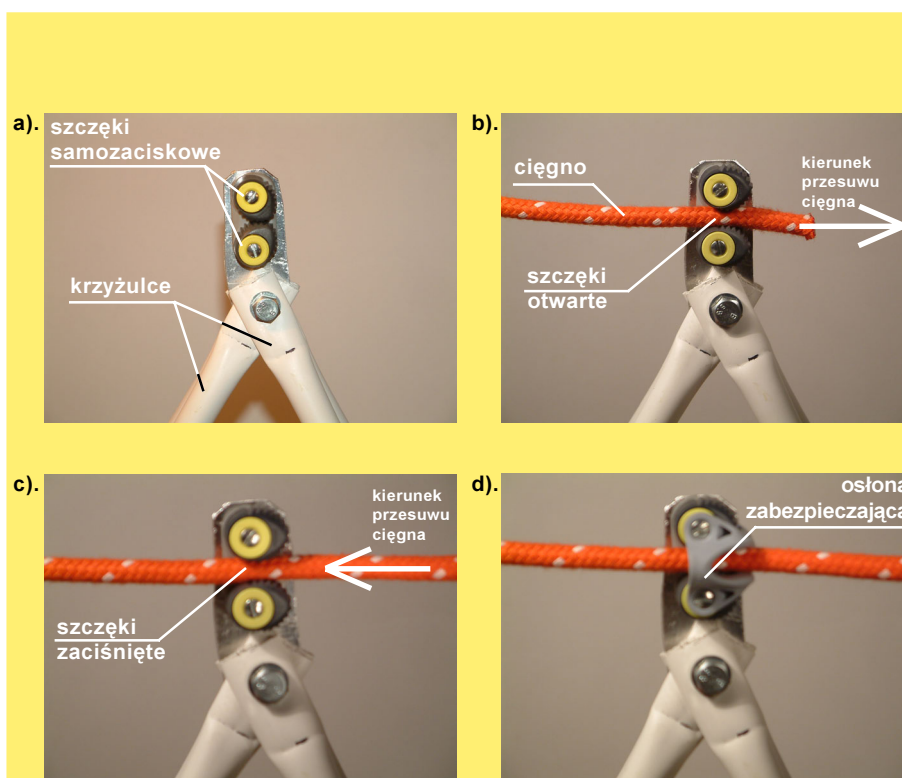
Inne rozwiązanie, odpowiednie dla powłok z krzyżulcami, przedstawia rys. 5.66.g). Jest to pierścień stalowy, zamocowany do węzła, w którym łączą się krzyżulce.

Obydwa, wymienione powyżej rozwiązania, nie pozwalają na zablokowanie ciężka w węzłach po zakończeniu procesu sprężania. Blokada taka jest w wielu przypadkach korzystna, gdyż pozwala na zmniejszenie odkształceń konstrukcji pod wpływem obciążeń użytkowych. Przykład rozwiązania, które pozwala na zablokowanie ciężka w węźle przelotowym przedstawia rys. 5.39.



Rys. 5.38 – połączenie zawiasowe poduszek pneumatycznych typu półsprężynowego

Węzeł ten jest wzorowany na budowie stosowanej powszechnie w żeglarskim knagi zaciskowej krzywkowej. Ciężno sprężające przechodzi pomiędzy dwoma owalnymi, karbowanymi elementami – szczękami samozaciskowymi, umieszczonymi na osiach obrotowych zaopatrzonych w sprężyny. Ze względu na kształt tych elementów, przesuw ciężna jest możliwy tylko w jednym kierunku. Przy niewielkim nawet przesunięciu ciężna w kierunku przeciwnym, szczęki te zaciskają się, blokując ciężno. Jego zwolnienie następuje poprzez wysunięcie ciężna w kierunku prostopadłym do płaszczyzny zacisku lub przez rozchylenie szczęk. Dodatkowa osłona zapobiega przypadkowemu wysunięciu się ciężna.



Rys. 5.39 – model przykładowego węzła przelotowego, umożliwiającego zablokowanie ciężna po zakończeniu sprężania powłoki:

- budowa wewnętrzna węzła – widoczne są szczęki samozaciskowe
- węzeł podczas napinania ciężna – szczęki samozaciskowe są rozchylone
- węzeł podczas blokowania ciężna – szczęki samozaciskowe są zaciśnięte
- węzeł z osłoną zapobiegającą wysunięciu się ciężna

(Do wykonania modelu wykorzystano elementy knagi zaciskowej, o symbolach: RF5001Y i RF5005, firmy Ronstan Int., Australia)

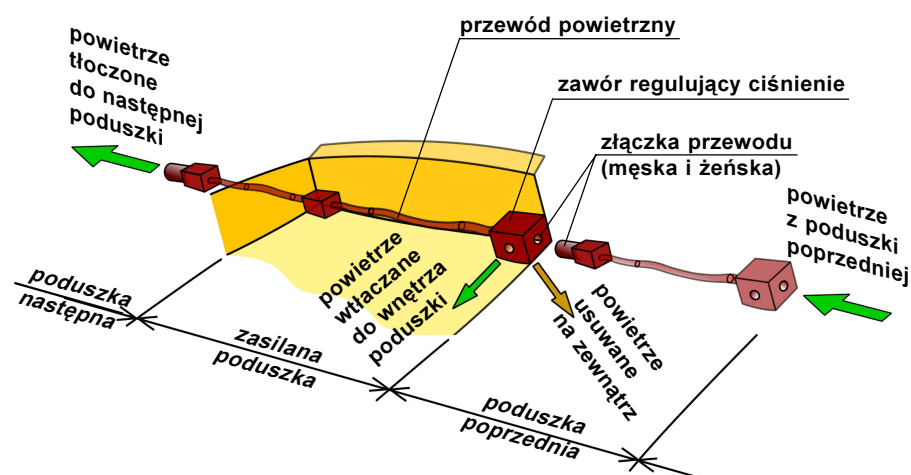
5.3.4.4. System dostarczania powietrza

Warunkiem przydatności modularnej powłoki pneumatycznej jest sprawne napełnianie i opróżnianie poduszek podczas montażu i demontażu oraz zapewnienie w ich wnętrzu odpowiedniego ciśnienia powietrza podczas eksploatacji.

Problemu ten został rozwiązany przez zastosowanie wewnętrznego, zintegrowanego systemu dostarczania powietrza. Składa się on z układu elastycznych, odcinkowych przewodów ciśnieniowych, umieszczonych we wnętrzu poduszek. Przewody to łączą się ze sobą w węzłach połączeniowych umieszczonych w bocznych powierzchniach poduszek, zapewniając ciągłość przepływu powietrza na całej długości przewodu.

Węzły połączeniowe przewodu są zintegrowane – znajdują się w nich zarówno samouszczelniające złączki (męska i żeńska), umożliwiające połączenie odcinków przewodu w całość, jak i zawory regulujące wielkość ciśnienia we wnętrzu poduszek.

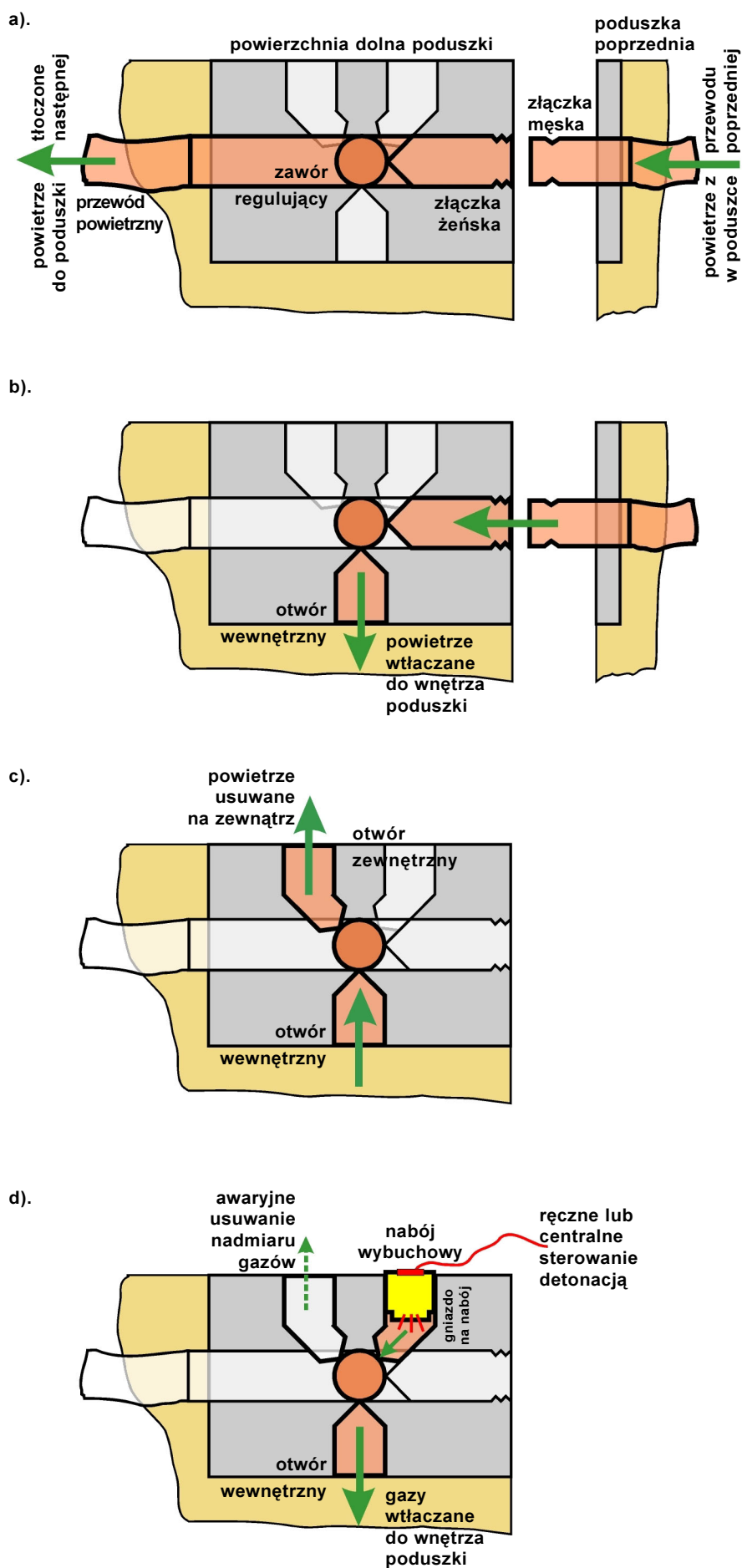
W przewodzie utrzymywane jest stale ciśnienie znacznie wyższe niż we wnętrzu poduszek. W przypadku jego obniżenia, zawór otwiera się, pozwalając, aby powietrze z przewodu ciśnieniowego dostało się do wnętrza poduszki. Jeżeli ciśnienie nadmiernie wzrośnie, np. na skutek podwyższenia temperatury zewnętrznej, to zawór pozwala, aby powietrze wydostało się na zewnątrz. Ten sam zawór jest wykorzystywany również do opróżniania poduszek podczas demontażu.



Rys. 5.40 – schemat i elementy składowe wewnętrznego systemu dostarczania powietrza i kontroli ciśnienia w poduszkach

Na rysunku 5.40 przedstawiono w rozwinięciu podstawowe składniki wewnętrznego systemu dostawy powietrza i regulacji ciśnienia w poduszkach.

System dostarczania powietrza może również być wykonany w wersji pozwalającej na bardzo szybkie napełnianie poduszek. Jest to możliwe poprzez zastosowanie specjalnych nabojuw wybuchowych. W takim przypadku w węzłach połączeniowych znajdują się odpowiednie gniazda, w którym umieszczane są naboje. Mogą one być detonowane pojedynczo, oddzielnie dla każdej poduszki, przed sprężeniem powłoki lub centralnie, za pomocą sieci przewodów podłączonych do jednego urządzenia sterującego. W przypadku centralnego sterowania, możliwe jest ustalenie odpowiedniej, pożądanej sekwencji detonacji nabojuw, co stwarza dodatkową możliwość sterowania wypiętrzaniem konstrukcji. Jest to przydatne w niektórych zastosowaniach opisanych w dalszej części tego rozdziału. Powstające podczas wybuchu naboju gazy, wypełniają poduszkę, a ich ciśnienie jest regulowane poprzez opisany powyżej zawór, umieszczony w węźle przewodu. Na rys. 5.41 przedstawiony jest ogólny schemat funkcjonalny węzła połączeniowego wewnętrznego systemu dostarczania powietrza do poduszek.



Rys. 5.41 – schemat funkcjonalny zintegrowanego węzła połączeniowego przewodu powietrznego:

- a). przekazywanie powietrza pomiędzy poduszkami
- b). napełnianie poduszki
- c). opróżnianie poduszki lub usuwanie nadmiaru powietrza
- d). detonacyjne (natchmiastowe) napełnianie poduszki

5.3.5. Przykłady zastosowań modułarnych powłok pneumatycznych

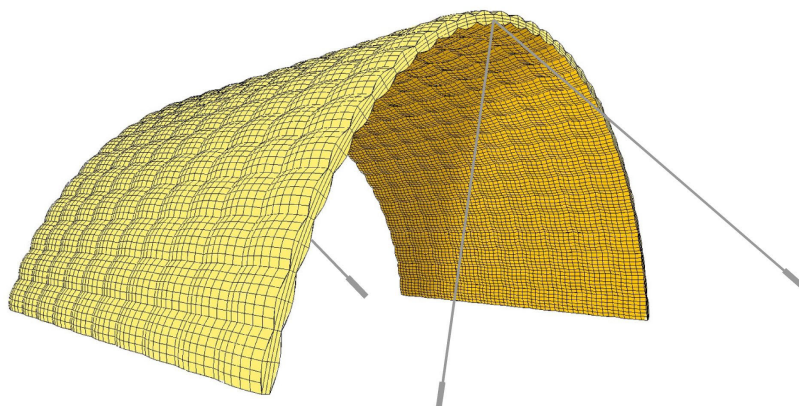
Zakres zastosowań modułarnych powłok walcowych jest niezwykle szeroki. Kilka najbardziej charakterystycznych przykładów przedstawiono poniżej. Obrazują one raczej ogólne koncepcje zastosowań niż konkretne przykłady. Dodatkowo możliwości stwarza łączenie powłok pneumatycznych z innymi rodzajami konstrukcji.

5.3.5.1. Proste powłoki walcowe

Podstawową formą modułarnych powłok pneumatycznych są powłoki walcowe. Ich geometria jest bardzo łatwa do ustalenia i mogą być wykonane przy zastosowaniu zaledwie jednego rodzaju elementu powtarzalnego (zwykle prostokątnego). Powłoki walcowe mogą być wykorzystywane w wielu zastosowaniach bezpośrednio, mogą też stanowić część większych układów, składających się np. z kilku takich powłok.

Nawet powłoki walcowe proste mogą być wykonywane w wielu różnych konfiguracjach, w zależności ich przewidywanego zastosowania.

Prosta powłoka walcowa bez krzyżulców | Powłoka wykonana z poduszek prostokątnych o stałej grubości, bez krzyżulców, jest najprostszą z powłok pneumatycznych. Charakteryzuje ją ogromna łatwość wykonania. Ograniczenia rozpiętości takiej powłoki wynikają z jej wysokości konstrukcyjnej możliwej do uzyskania przy braku krzyżulców. Niemniej jednak, powłoka taka nadaje się bardzo dobrze do wykonywania obiektów tymczasowych o małej i średniej rozpiętości. Na rys. 5.42 przedstawiono przykład tego typu powłoki.

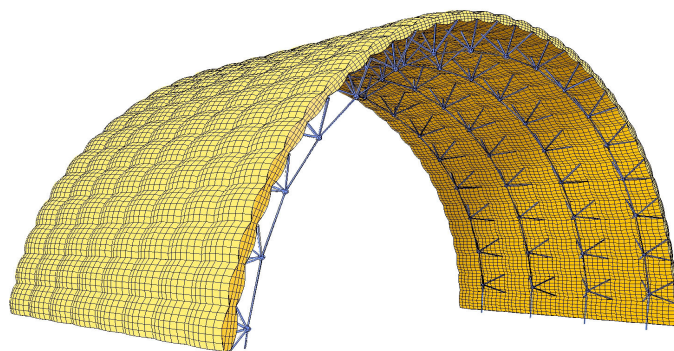


Rys. 5.42 – prosta powłoka walcowa, bez krzyżulców, zbudowana jedynie z poduszek prostokątnych i cięgien sprężających

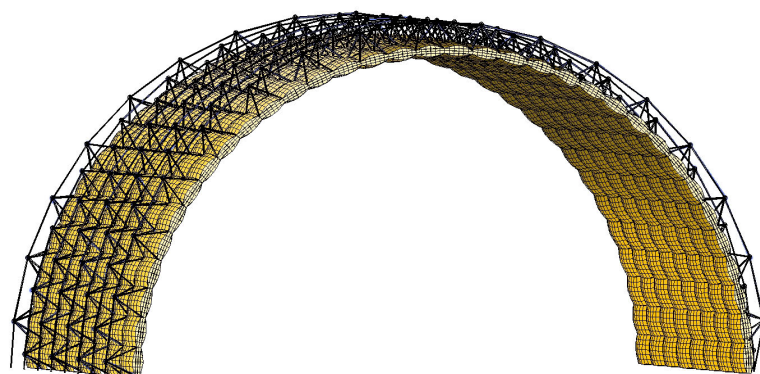
Powłoka walcowa z krzyżulcami po stronie wewnętrznej | Zastosowanie krzyżulców do zwiększenia wysokości konstrukcyjnej powłoki walcowej pozwala zwiększyć jej rozpiętość a także dopuszczalne obciążenia. Dzięki temu możliwe jest stosowanie ich w strefach klimatycznych o większym obciążeniu wiatrem lub śniegiem, a także przenoszenie na powłokę obciążeń użytkowych, np. podwieszonego oświetlenia itp.

Krzyżulce pozwalają też w łatwe różnicowanie sztywności powłoki, a przez to – ich kształtowanie podczas wypiętrzania. Przykład powłoki walcowej z krzyżulcami po stronie wewnętrznej przedstawia rys. 5.43.

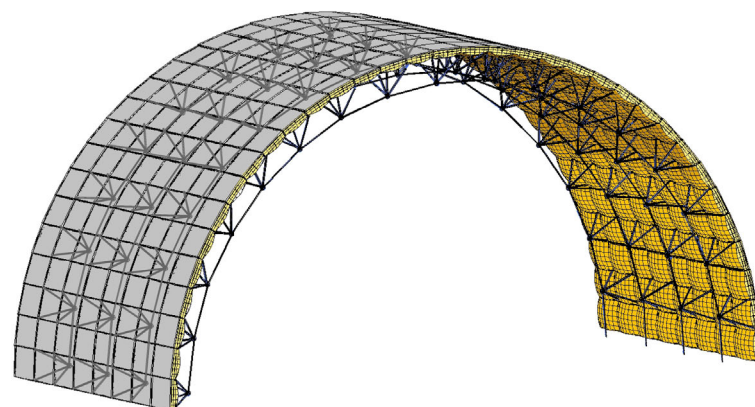
Powłoka walcowa z krzyżulcami po stronie zewnętrznej | Wariantem opisanej powyżej powłoki walcowej z krzyżulcami jest rozwiązanie, w którym krzyżulce są umieszczone po jej stronie zewnętrznej. Może to być przydatne dla zastosowań, które wykluczają umieszczanie we wnętrzu tego typu elementów konstrukcyjnych ze względów funkcjonalnych, np. w szpitalach polowych, ze względów higienicznych. Rys. 5.44 przedstawia przykład tego typu powłoki.



Rys. 5.43 – prosta powłoka walcowa, z krzyżulcami po stronie wewnętrznej



Rys. 5.44 – prosta powłoka walcowa, z krzyżulcami po stronie zewnętrznej



Rys. 5.45 – prosta powłoka walcowa, z krzyżulcami po stronie wewnętrznej, zbudowana z poduszek półsztywnych, o panelach przezroczystych

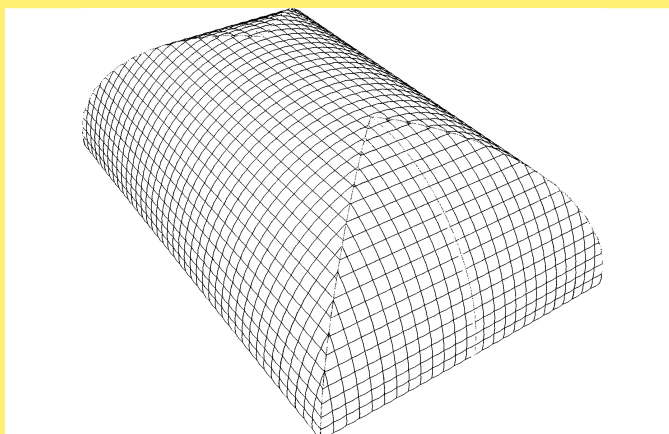
Prosta powłoka walcowa z poduszek półsztywnych | Powłoki walcowe wykonane z poduszek półsztywnych wydają się mieć w przyszłości wiele interesujących zastosowań. Panele tworzące powierzchnię główną mogą być wykonane z materiału o wysokiej przepuszczalności światła, lub wręcz przezroczystego (przykładem jest polimetakrylan metylu – np. Perspex). Powłoka może wtedy uzyskać standard zbliżony do standardu uzyskiwanego przez konstrukcje prętowe pokryte szkłem, zachowując wszystkie zalety konstrukcji wielokrotnego użycia, łatwej w montażu i demontażu oraz relatywnie taniej.

Na rys. 5.45 przedstawiony jest przykład fragmentu walcowej powłoki pneumatycznej z krzyżulcami, wykonanej z poduszek półsztywnych.

5.3.5.2. Zestawy prostych powłok walcowych

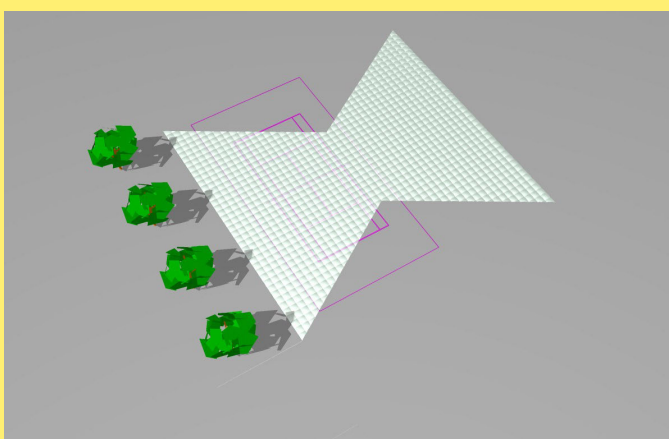
Połączenie kilku wycinków prostych powłok walcowych pozwala uzyskiwać konstrukcje o bardziej złożonej geometrii i ciekawszej formie niż powłoki pojedyncze.

Zadaszenie kortu tenisowego | Przykładem zastosowania powłoki składającej się z trzech wycinków powierzchni walcowych prostych jest przekrycie kortu tenisowego, o geometrii przedstawionej na rys. 5.46. Kolejne fazy montażu tego obiektu przedstawia rys. 5.47, a widok końcowy – rys. 5.48.

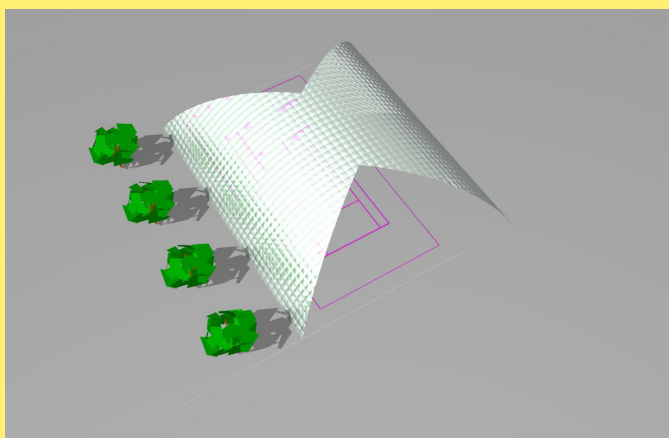


Rys. 5.46 – schemat geometryczny zadaszenia kortu tenisowego. Przekrycie składa się z trzech wycinków powłok walcowych, wykonanych z poduszek prostokątnych. Wzdłuż krawędzi połączeń poszczególnych wycinków zastosowano dodatkowo poduszki trójkątne.

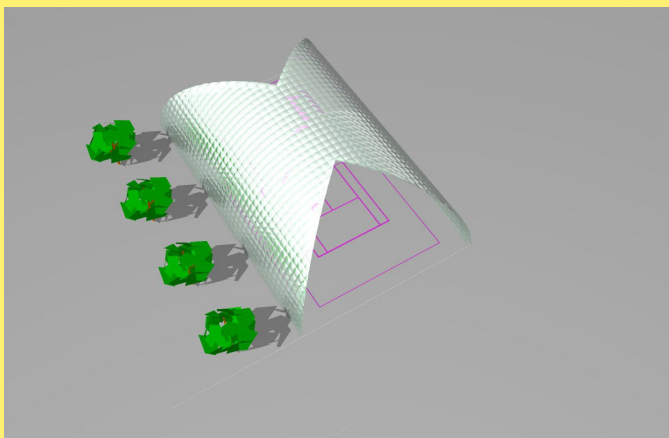
a).



b).



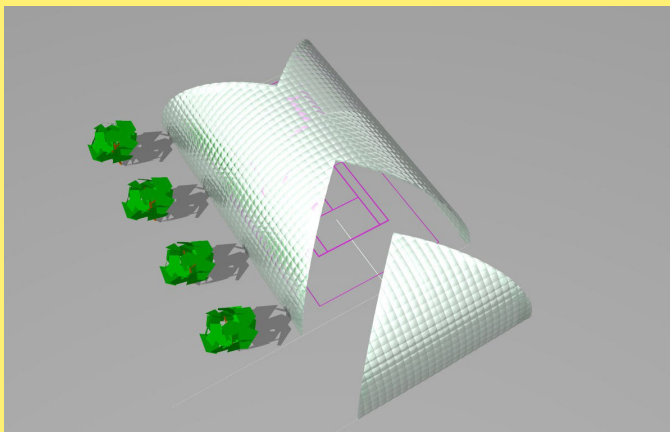
c).



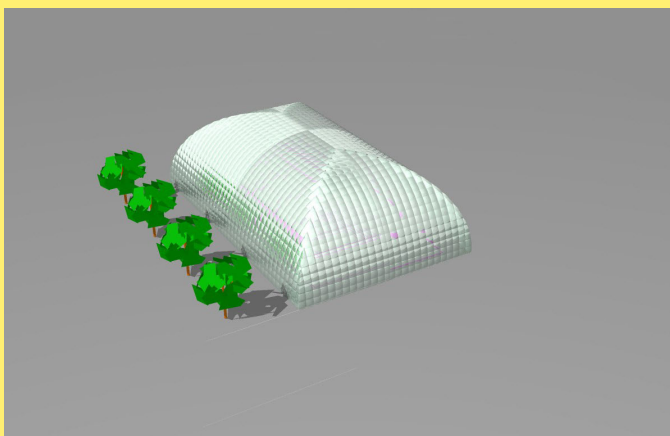
Rys. 5.47 – fazy montażu zadaszenia kortu tenisowego:

- a). montaż środkowej powłoki na poziomie terenu
- b). początek wypiętrzania powłoki środkowej
- c). powłoka środkowa w położeniu końcowym

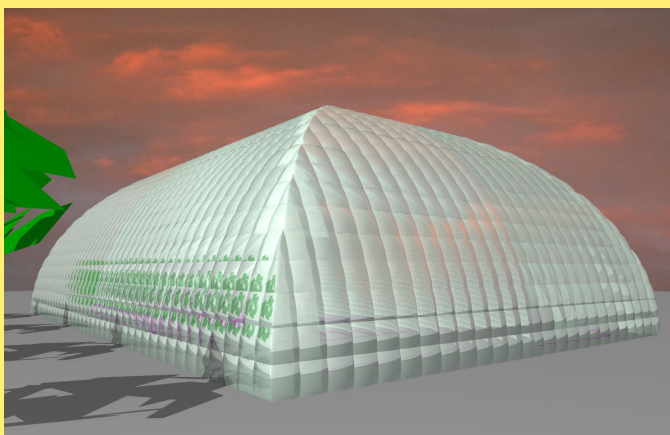
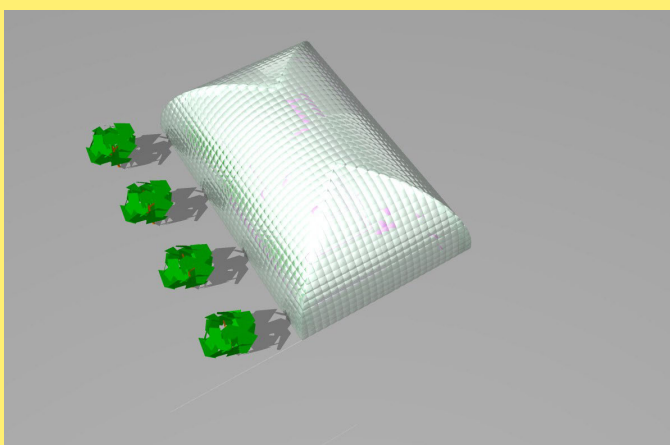
d).



e).



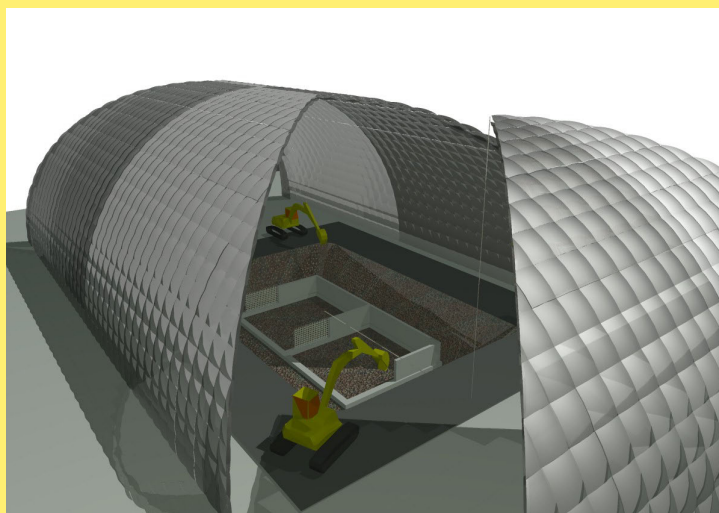
f).



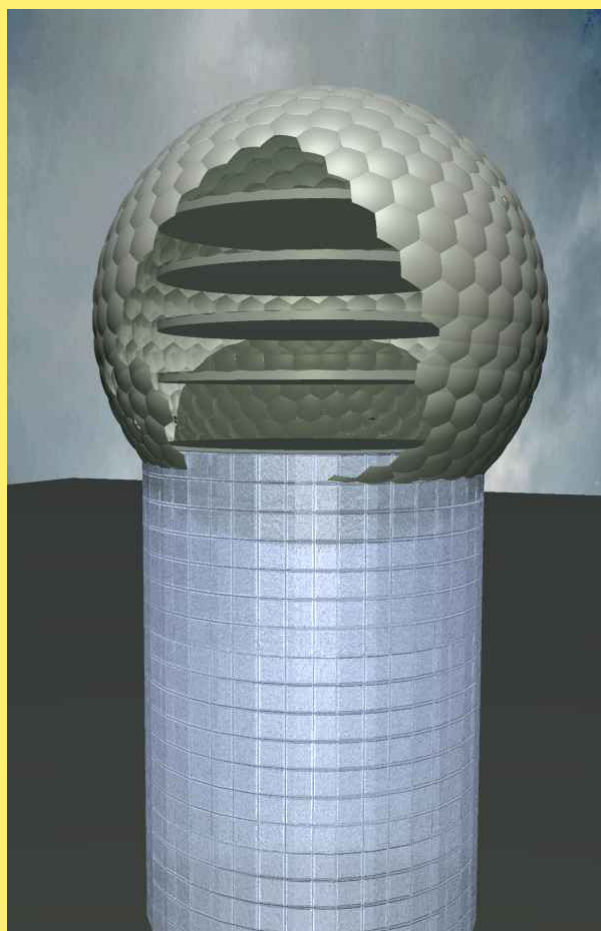
- Rys. 5.47 – c.d.:
 e). montaż i wypiętrzenie pierwszej powłoki skrajnej
 f). połączenie pierwszej powłoki skrajnej z powłoką środkową
 g). wypiętrzenie drugiej powłoki skrajnej i połączenie jej z powłoką środkową

Rys. 5.48 – widok zadaszenia kortu tenisowego po scałeniu

Tymczasowe przykrycie placu budowy | Konstrukcja analogiczna do opisanej powyżej konstrukcji przekrycia kortu tenisowego, może być zastosowana jako tymczasowa osłona placu budowy, rys. 5.49. Ochrona taka umożliwia prowadzenie robót wymagających ochrony przed wpływami atmosferycznymi. Istotną przewagą tego rozwiązania w stosunku do stosowanych wcześniej jako osłony przekryć pneumatycznych typu otwartego jest brak śluz, które bardzo ograniczają ich funkcjonalność. Ponadto nie jest konieczne dokładne uszczelnienie obwodu przekrycia, co w warunkach placu budowy bywa trudne do zrealizowania.



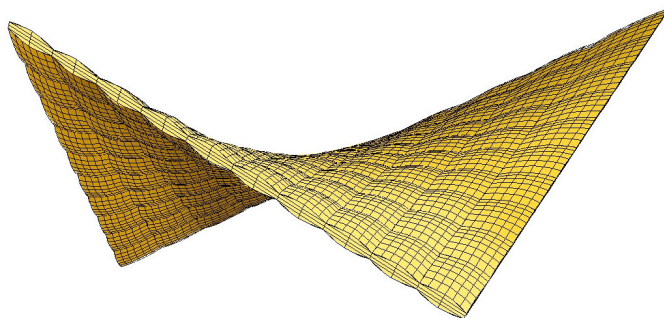
Rys. 5.49 – widok konstrukcji i wnętrza tymczasowego przykrycia placu budowy, wykonane go z trzech wycinków powłok walcowych



Rys. 5.50 – zastosowanie pneumatycznej powłoki sferycznej jako osłony górnych kondygnacji budynku wysokiego w czasie wznoszenia

5.3.5.3. Przekrycia o kształcie paraboloidy hiperbolicznej

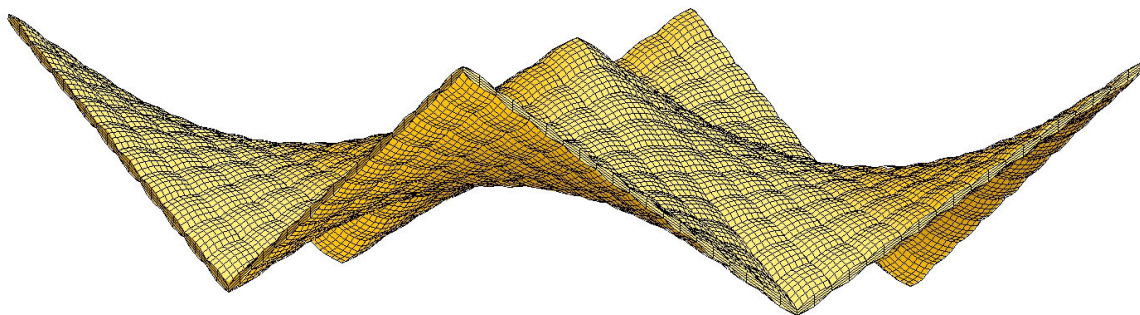
Dwukierunkowe sprężenie prostokątnej powłoki pneumatycznej pozwala nadać jej kształt paraboloidy hiperbolicznej. Jest to atrakcyjna forma architektoniczna, mogąca stanowić samodzielny obiekt, rys. 5.51. Przykłady zastosowań takiej powłoki obejmują np. sceny, letnie ogródki restauracji, miejsca spotkań w parkach itp.



Rys. 5.51 – powłoka pneumatyczna ukształtowana jako parabolida hiperboliczna

Połączenie kilku powłok takich jak przedstawiona powyżej, pozwala uzyskać przekrycie o większej rozpiętości, na rzucie wielokąta foremnego, rys. 5.52.

Powłoki o kształtach przedstawionych na rys. 5.51 i 5.52 były w przeszłości, i są obecnie, realizowane również jako obiekty o konstrukcji żelbetowej¹⁾. Jednakże zastosowanie technologii modularnych obiektów pneumatycznych pozwala na ich znacznie bardziej powszechne – dostosowane do sezonowego zapotrzebowania – zastosowanie.



Rys. 5.52 – przykład przekrycia złożonego z płatów powłok o kształcie paraboloidy hiperbolicznej

5.3.5.4. Powłoki osiowo symetryczne, typu igloo

Konstrukcje sprężane po scaleniu wszystkich elementów, metodą budowy „igloo”, pozwalają uzyskiwać powłoki o kształcie sferycznym.

Tymczasowe przykrycie realizowanego budynku wysokiego | Przykład zastosowania powłoki o kształcie niepełnej sfery stanowi osłona górnych kondygnacji realizowanego budynku wysokiego, rys. 5.50.

¹⁾ Przykładem mogą być znane dzieła Felixa Candeli i Heinza Islera.

Zadaszenie basenu kąpielowego w kształcie połowy sfery | Innym przykładem zastosowania powłoki sferycznej jest zadaszenie basenu kąpielowego, o kształcie zbliżonym do okrągłego. Przekrycie takie może być wykorzystywane nawet w małych, przydomowych obiektach.

Na rys. 5.53. przedstawiono kolejne fazy montażu pneumatycznej powłoki sferycznej.

a).



b).



c).



Rys. 5.53 – etapy wykonywania sferycznej powłoki pneumatycznej :

- a). wykonanie przykrywanego obiektu
- b). początek montażu poduszek
- c). montaż poduszek w dolnej części powłoki

a).



b).



c).



Rys. 5.53 – c.d.:
d). montaż poduszek
w górnej części
powłoki
e). końcowy montaż
poduszek – za-
mknięcie powłoki
f). sprężanie zmonto-
wanej powłoki

5.3.5.5. Składany most pneumatyczny

Łatwe w montażu i szybko montowalne konstrukcje, takie jak opisane powyżej, nadają się szczególnie dobrze do zastosowania w konstrukcjach składanych mostów wojskowych. Obiekty takie muszą być rozkładane w bardzo krótkim czasie, przy minimalnej ilości operacji. Również przestrzeń potrzebna do przechowywania i transportu takiego mostu powinna być jak najmniejsza.

Pomysł zastosowania zamkniętych elementów pneumatycznych do wykonywania konstrukcji przenośnych mostów pojawił się już we wczesnej fazie rozwoju konstrukcji pneumatycznych, w latach sześćdziesiątych. Testowano wówczas elementy typu belkowego, pokryte lekkim pomostem z desek¹⁾. W zastosowanych elementach belkowych utrata nośności następowała na skutek nagłego załamania się elementów, które miało charakter zmarszczkowy (*ang. wrinkling collapse*). Spowodowało to ostatecznie rezygnację z tego typu konstrukcji.

Inną niedogodnością konstrukcji wykonywanych z elementów belkowych jest ich ściśle określona rozpiętość, której nie można zmienić w trakcie eksploatacji. Co za tym idzie, w zastosowaniach praktycznych konieczne było posiadanie całego zestawu elementów o różnej długości lub też ograniczenie zakresu stosowania mostów.

Opisanych wad nie posiadają konstrukcje mostowe wykonywane według przedstawionych powyżej zasad kształtowania modułarnych powłok pneumatycznych [213] [216].

Zastosowanie poduszek pneumatycznych | Most składany może być wykonany jako wąski odcinek samowypiętrzalnej modułarnej powłoki pneumatycznej. W tego rodzaju zastosowaniach niezbędne jest użycie poduszek półsztynnych, których panele tworzą powierzchnię jezdni mostu. Aktualne są wszystkie, podane wcześniej reguły wykonywania powłok stosowanych jako przekrycia. Można wyróżnić trzy podstawowe konfiguracje pneumatycznych mostów składanych:

- **typ 1**, wykonywany z poduszek o stałej grubości, z zastosowaniem krzyżulców
- **typ 2**, wykonywany z poduszek o zmiennej grubości
- **typ 3**, który jest zasadniczo identyczny jak typ 1, ale ze zmienionym sposobem rozkładania

Wszystkie, wymienione powyżej typy mostów mają wspólne niektóre podstawowe cechy. Konstrukcje są wykonywane ze zmienną, zwiększającą się w środkowej części sztywnością. Sztywne panele, tworzące górną powierzchnię podstawową poduszek są połączone zawiasowo wzdłuż wszystkich krawędzi. Powierzchnia paneli jest odpowiednio uszorstniona, aby zapewnić łatwość poruszania się pojazdów. W dolnych węzłach, przez które przechodzą ciągną sprężające, możliwy jest ich swobodny przesuw. Poduszki skrajne są połączone z poprzeczną rurą stalową, która zapewnia ich współpracę, umożliwia oparcie mostu na gruncie oraz stanowi zakotwienie cięgien sprężających. Moduł sprężarkowy, dostarczający powietrze do napełniania poduszek jest zainstalowany na jednostce transportującej most. W zastosowaniach wojskowych szczególnie przydatne może być napełnianie poduszek za pomocą naboju wybuchowych.

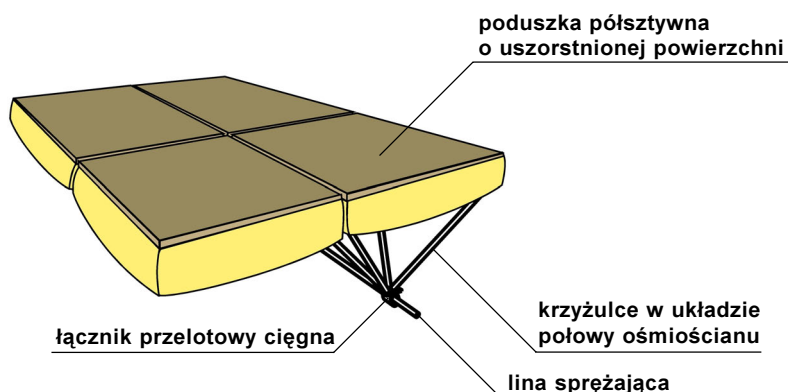
Nawet po scaleniu, modułarny most pneumatyczny nie jest konstrukcją niezmienną. Jego rozpiętość może być łatwo zmieniona i dostosowana do wymiarów przeszkody, poprzez wstawienie lub usunięcie dodatkowych elementów. Może się to odbywać bez demontażu pozostałych elementów, jedynie przy zluźnianiu cięgien sprężających, rys. 5.57. Wymaga to jednak pewnej modyfikacji łączników przelotowych, przez które przechodzą ciągną, tak aby można je było „rozpinać” bez przeciągania całej liny.

Nośność mostu może być regulowana poprzez zmianę jego wysokości (np. różne zestawy krzyżulców dla mostów o różnych obciążeniach dopuszczalnych) oraz poprzez zmianę wartości siły sprężającej.

¹⁾ Opis badań doświadczalnych pneumatycznych mostów przenośnych, przeprowadzonych na potrzeby armii brytyjskiej w latach sześćdziesiątych, przedstawiono w [69]

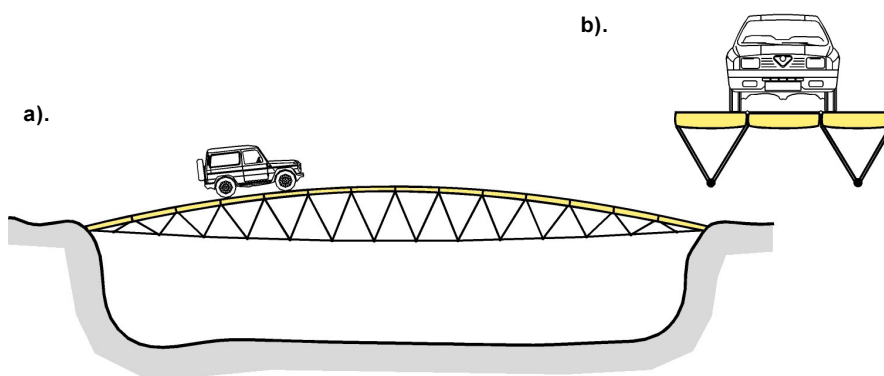
Most składany typu 1 | Most typu 1 jest odpowiednikiem powłoki walcowej z krzyżulcami. Jest on zbudowany z następujących elementów, rys. 5.54:

- prostokątne poduszki typu półsztywnego
- krzyżulce, rozmieszczone w układzie połowy ośmiościanu
- pas dolny (lina sprężająca)



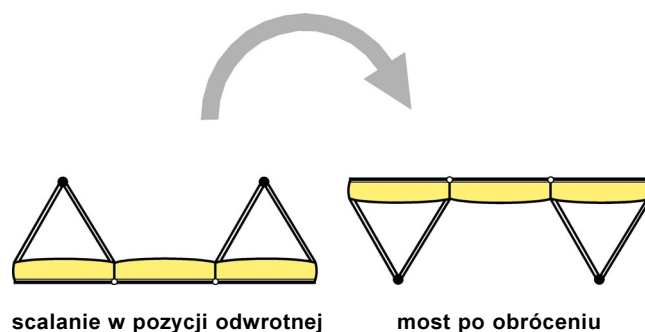
Rys. 5.54 – elementy pneumatycznego mostu składanego typu 1

Na rys. 5.55 przedstawiono schemat konstrukcji mostu typu 1. Krzyżulce w części środkowej są dłuższe niż w częściach skrajnych, dzięki czemu sztywność mostu jest dostosowana do rozpiętości. Krzyżulce mogą być umieszczone pod każdym lub pod co drugim rzędem poduszek, w zależności od potrzebnej szerokości jezdni i zakładanych obciążeń.



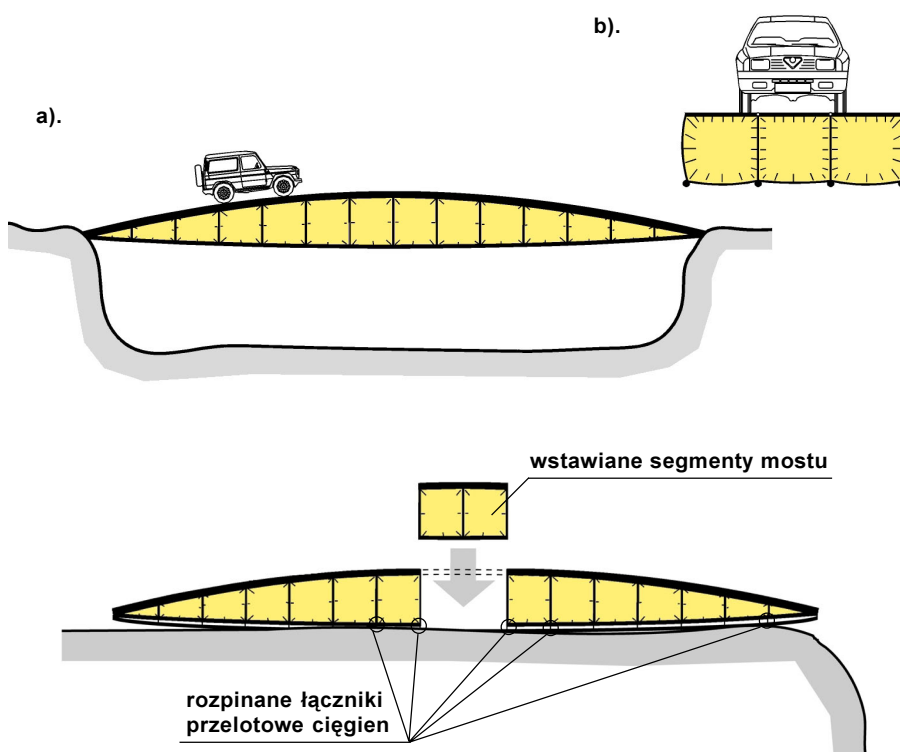
Rys. 5.55 – schemat mostu składanego typu 1:
a). widok z boku
b). przekrój

Ogólne zasady montażu są analogiczne jak dla powłok pneumatycznych. Scalanie elementów rozpoczyna się na powierzchni terenu, w pozycji odwróconej, tzn. powierzchnią paneli jezdnych do dołu. Po założeniu krzyżulców i cięgien sprężających następuje napełnienie poduszek powietrzem. Następnie konstrukcja jest odwracana o 180° i rozpoczyna się sprężanie, rys. 5.56. Po osiągnięciu założonej konfiguracji, most jest umieszczany nad przeszkodą poprzez nasunięcie lub przy zastosowaniu dźwigu samochodowego.



Rys. 5.56 – kolejność operacji przy scalaniu pneumatycznego mostu składanego typu 1

Most składany typu 2 | Budowa i sposób montażu mostu typu 2 różnią się od budowy i sposobu montażu mostu typu 1, jedynie zastosowaniem poduszek o zmiennej grubości, zamiast krzyżulców. Rysunek 5.57 przedstawia schemat tego mostu, a rys. 5.58 – zasadę zmiany jego długości przy zastosowaniu rozpinanych łączników przelotowych do cięgien.



Rys. 5.57 – schemat mostu składanego typu 2:
a). widok z boku
b). przekrój

Rys. 5.58 – sposób zmiany długości mostu bez całkowitego demontażu, przy zastosowaniu rozpinanych łączników przelotowych do cięgien

Most składany typu 3 | Most typu 3 jest zbudowany w sposób analogiczny jak most typu 2. Jednak zmieniony sposób montażu upraszcza operacje związane z jego rozkładaniem. Koncepcja ta jest inspirowana znaną dziecięcą zabawką „nadmuchiwany język”, rys. 5.59.



Rys. 5.59 – inspiracja sposobu montażu zastosowanego w pneumatycznym moście składanym typu 3 – zabawka dziecięca „nadmuchiwany język”¹⁾

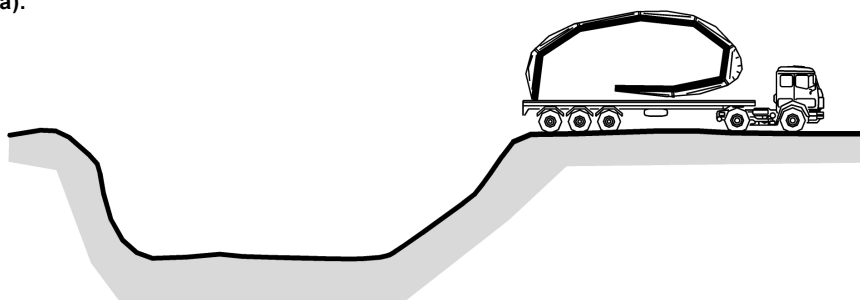
Most jest scalony, w założonej konfiguracji (długość, szerokość, wysokość elementów), zwinięty w postaci rolki i zainstalowany na odpowiednim środku transportu. Rozkładanie mostu rozpoczyna się przy poduszkach całkowicie opróżnionych i zrolowanych, rys. 5.60.a).

Wraz z napełnianiem poduszek powietrzem, most zaczyna się rozwijać. Jednocześnie cięgna sprężające poddawane są lekkiemu naciągowi, dla utrzymania i stabilizacji odpowiedniego kształtu konstrukcji. Kształt mostu w tej fazie, przypomina „odwłok skorpiona”, rys. 5.60.b).

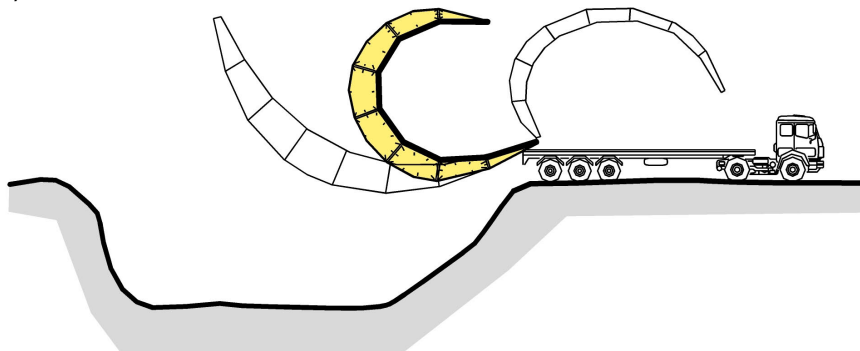
Całkowicie rozwinięta, wypełniona powietrzem i sprężona konstrukcja jest układana nad przeszkodą, a pojazd z którego nastąpił montaż jest odstawiany obok, rys. 5.60.c).

¹⁾ fotografia R. Tarczewski

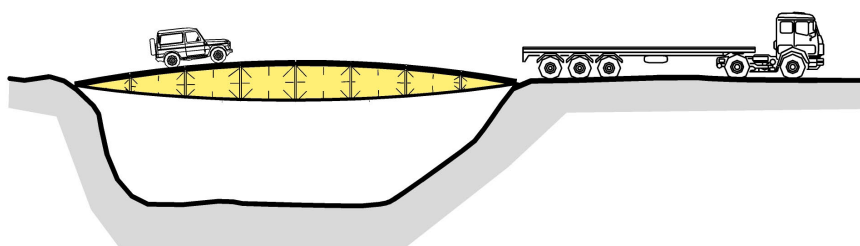
a).



b).



c).



Rys. 5.60 – kolejne fazy rozkładania mostu typu 3:

- a). most zwinięty do transportu jest do starczany w miejsce rozłożenia
- b). rozkładanie mostu poprzez napętnianie poduszek powietrzem i stopniowe zwiększanie napięgu lin sprężających (faza „odwłok skorpiona”)
- c). most w pozycji eksploatacyjnej

Uwagi ogólne | Przedstawiony system mostów składanych wykorzystuje wszystkie zalety modularnych sprężonych konstrukcji pneumatycznych, z samowypiętrzaniem jako zasadą kształtowania i montażu. Rozwiązanie to może to być przydatne zarówno w zastosowaniach militarnych jak i cywilnych, w przypadkach klęsk żywiołowych katastrof itp.

5.3.5.6. Osłony obiektów w przestrzeni kosmicznej

Konstrukcje opracowywane dla przyszłych zastosowań w przestrzeni kosmicznej, np. dla stałych baz na powierzchni Księżyca, muszą spełniać szereg specyficznych wymagań [128] [207].

Zalety modularnych konstrukcji pneumatycznych, w porównaniu do tradycyjnych, sztywnych konstrukcji pozwalają spełnić większość z tych wymagań. Najistotniejsze, z tego punktu widzenia, cechy to:

- adaptowalność
- możliwość wielokrotnego użycia
- przenośność
- mały stosunek objętości konstrukcji złożonej (spakowanej) do rozłożonej
- wysoki stosunek nośności do ciężaru własnego
- stosunkowo mała objętość gazu potrzebnego do wypełnienia
- łatwe dostosowywanie do bardzo dużych różnic temperatur
- odporność na lokalne uszkodzenia, dzięki dużej redundancji konstrukcji
- możliwość uzyskiwania różnorodnych konfiguracji geometrycznych
- możliwość łatwego wykonywania otworów w konstrukcji
- możliwość dostosowywania właściwości poduszek, poprzez stosowanie powłok wielowarstwowych
- łatwość montażu i demontażu
- mały koszt produkcji i wykonania oraz napraw i eksploatacji

Przykładowe zastosowania modularnych powłok pneumatycznych w przestrzeni kosmicznej obejmują osłony obiektów przed promieniowaniem materią kosmiczną. Obydwa wymienione czynniki stanowią poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa i zdrowia personelu stacji kosmicznych. Jednocześnie, stałe osłony stanowią często przeszkodę w ich pracy.

Przeważającą część materiałów meteorytowych spadających na Księżyc stanowią meteoroidy, tab. 5.1. Ich średnica nie przekracza 0.3 mm, a gęstość – 0.05 g/cm³. Mogą one być, podobnie jak mniejsze meteory, z skutecznie zatrzymywane przez komórkową osłonę pneumatyczną typu zamkniętego. Podobnie, konstrukcja taka może stanowić dobrą osłonę przed działaniem promieniowania słonecznego i kosmicznego, przy zastosowaniu dodatkowej powłoki absorpcyjnej (np. aluminiowej, grubości ok. 0.6 mm) [207].

Tablica 5.1 – Charakterystyka materiałów meteorytowych, wg [207]

Określenie	Przeciętna średnica d	Średnia gęstość	Budowa	Częstość występowania
	cm	g/cm ³		%
Meteoryty	10 < d	2 ÷ 8	skały i metale	1 ÷ 5
Meteory	0.03 ≤ d ≤ 10	3	skały	10 ÷ 15
Meteoroidy	d < 0.03	0.05	pył kamienny i lód	85 ÷ 95

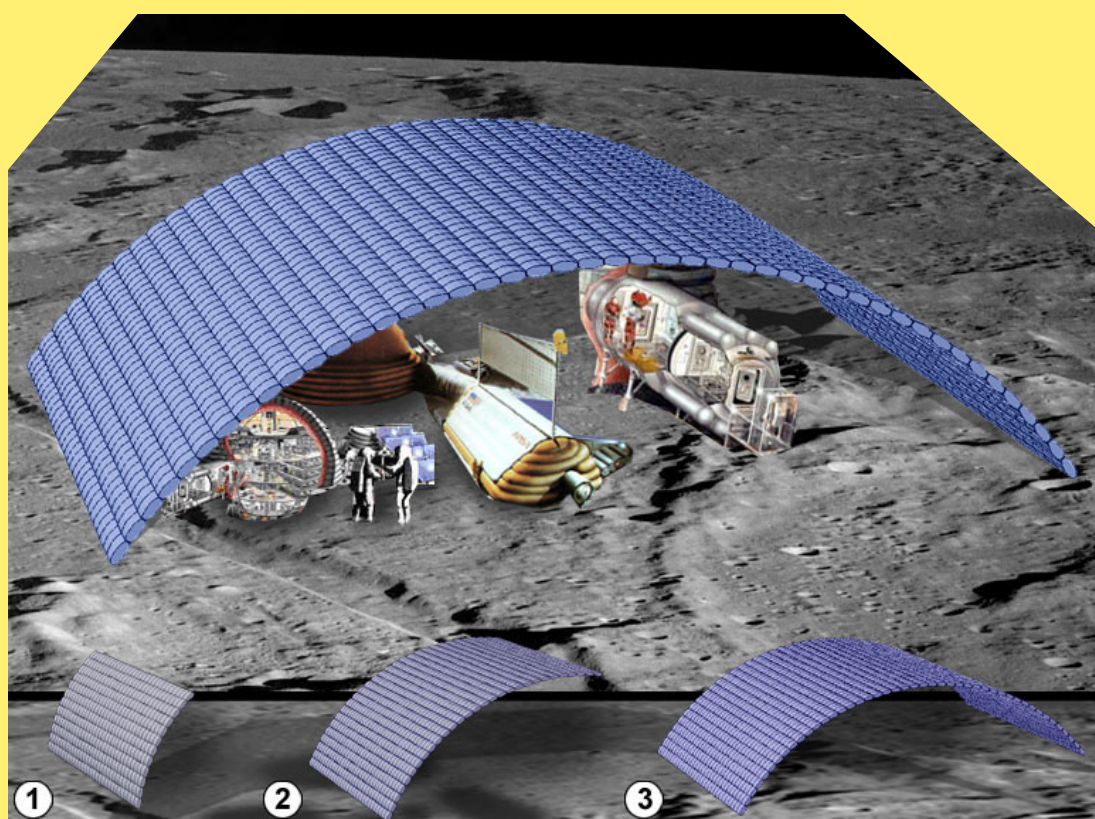
Osłona wykonana w postaci modularnej powłoki prętowej nie musi mieć charakteru stałej konstrukcji. Może być wykonana w sposób podobny jak konstrukcja mostu typu 3 (rozdz. 5.3.5.5). W postaci zrolowanej można ją przechowywać w pobliżu chronionych obiektów. W sytuacji zagrożenia, może być rozłożona w bardzo krótkim czasie, dzięki zastosowaniu do napełniania poduszek naboju wybuchowych (rys. 5.41.d). Na rys. 5.61 przedstawiono schemat i sposób rozkładania takiej osłony. Jest ona „wyciągana” z pojemnika za pomocą niewielkich silników rakietowych, a jednocześnie następuje wypełnianie poduszek gazem. Napięcie cięgna sprężającego nadaje osłonie ostateczny kształt.

Moduły połączeniowe mogą w łatwy sposób zapewnić utrzymywanie stałej wartości ciśnienia wewnątrz poduszek nawet przy ekstremalnych zmianach temperatury zewnętrznej, dzięki czemu właściwości konstrukcyjnej powłoki pozostają niezmiennicze. Do opróżniania poduszek w krótkim czasie wystarczy otworzenie zaworów w węzłach połączeniowych, a – dzięki próżni kosmicznej – gaz zostanie natychmiast „wyssany” na zewnątrz. Zastosowanie naboju pozwala napełniać poduszki gazem obojętnym, bez udziału tlenu, co zabezpiecza przed pożarem w wyniku uderzenia meteoru [207].

Dodatkową możliwość dostosowania właściwości poduszek powietrznych do wymagań dla tego typu konstrukcji, jest zastosowanie do ich wykonania powłok wielowarstwowych, z różnych materiałów. W przykładowym rozwiązaniu, wewnętrzna warstwa, wykonana np. z tkaniny powlekanej poliestrowej lub teflonowej, zapewnia szczelność powłoki oraz uczestniczy w przenoszeniu obciążeń. Następnie mogą być nałożone dodatkowe warstwy, zapewniające dodatkową ochronę, np. drobna siatka metalowa chroniąca przed meteorytami, folia odbijająca promieniowanie itp. Te dodatkowe warstwy nie muszą być gazoszczelne.

Wszystkie uszkodzenia spowodowane przez meteoryty mogą być łatwo usunięte poprzez wymianę uszkodzonych poduszek, bez demontażu całej konstrukcji.

Rys. 5.61 – osłony przeciwradiacyjne stacji na Księżycu ¹⁾:
a). przekrój
b). fazy rozkładania



1) Zdjęcie powierzchni Księżyca oraz wizualizacja stacji – wg NASA, za [233].

5.3.6. Badania modelowe modułarnych powłok pneumatycznych

W celu weryfikacji przewidywanego sposobu pracy modułarnych powłok pneumatycznych, przeprowadzone zostały badania modelowe dla dwóch grup tych konstrukcji:

- dla powłok antyklastycznych, oraz
- dla powłok synklastycznych

W pierwszej grupie wykonany został model konstrukcji o kształcie paraboloidy hiperbolicznej, wg schematu z rys. 5.25. W drugiej grupie konstrukcji, wykonany został model odcinka powłoki walcowej.

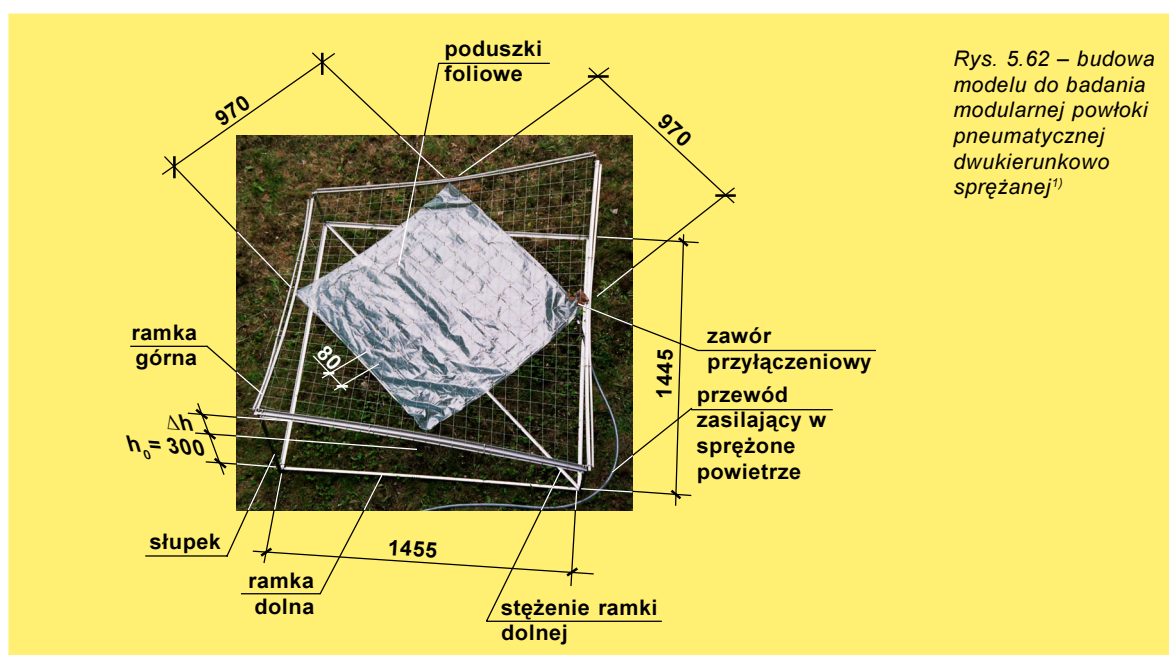
5.3.6.1. Powłoka w kształcie paraboloidy hiperbolicznej

Charakterystyka modelu | Wykonany model powłoki jest w rzucie kwadratem. Wzdłuż każdego boku umieszczonych jest 12 elementów modułarnych, ogółem 144 szt. Taki podział wynikał z konieczności zachowania odpowiedniej proporcji wymiarów elementu do wymiarów całej konstrukcji (patrz pkt. 5.3.1.2). Ze względu na ilość elementów, niemożliwe było wykonanie modelu konstrukcji w dużej skali, dlatego przygotowany został model o wymiarach 970×970 mm. Wymiar jednego elementu modułarnego wynosił 80×80 mm. Przy takich wymiarach, budowa modelu była z konieczności uproszczona, i dlatego przeprowadzony eksperyment może dawać jedynie jakościowy obraz zachowania konstrukcji.

Powłoka została wykonana z dwóch warstw folii PVC, o gr. 0.30 mm, łączonych szwem maszynowym, nićmi bawełnianymi. Na rys. 5.62 przedstawiony jest ogólny widok i elementy składowe modelu.

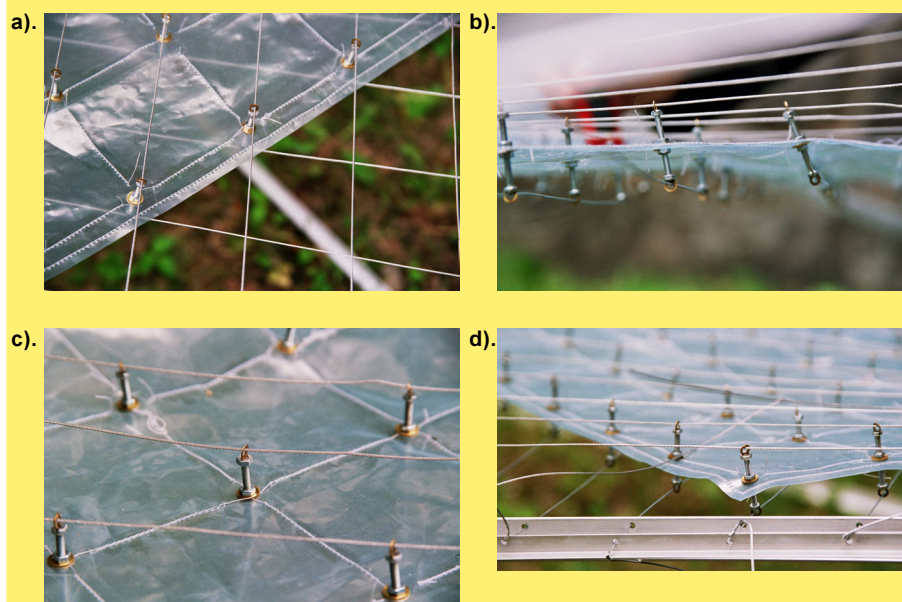
Folia została umieszczona w ramie z kątowników aluminiowych L 18×18×2 mm. Rama składa się z dwóch części: ramki dolnej i ramki górnej. Ramka dolna służy do oparcia i unieruchomienia modelu, a ramka górna stanowiła oparcie dla powłoki. Połączenie obu ramek ze słupkami w narożach zostało wykonane w sposób zapewniający podczas naciągu możliwość przesuwu w pionie dwóch, przeciwległych węzłów narożnych ramki górnej, zgodnie z odkształceniami powłoki ($\Delta h_{\max} = 400$ mm).

Ze względu na niewielkie wymiary elementów, linki naprężające $\phi 1.0$ mm zostały umieszczone w dwóch warstwach, po przeciwnych stronach powłoki i zakotwione w ramce górnej. Połączenie pomiędzy cięgnami w obu warstwach oraz powłoką z folii zrealizowano poprzez śruby M2.8×30, z przylutowanymi oczkami przelotowymi $\phi 3.0$ mm. Szczegóły wykonania modelu przedstawia rys. 5.63.



Rys. 5.62 – budowa modelu do badania modułarnej powłoki pneumatycznej sprężanej¹⁾

¹⁾ Fotografie do rozdz. 5.3.6.1. wykonał J. Hutnik



Rys. 5.63 – szczegóły wykonania modelu z rys. 9.62:

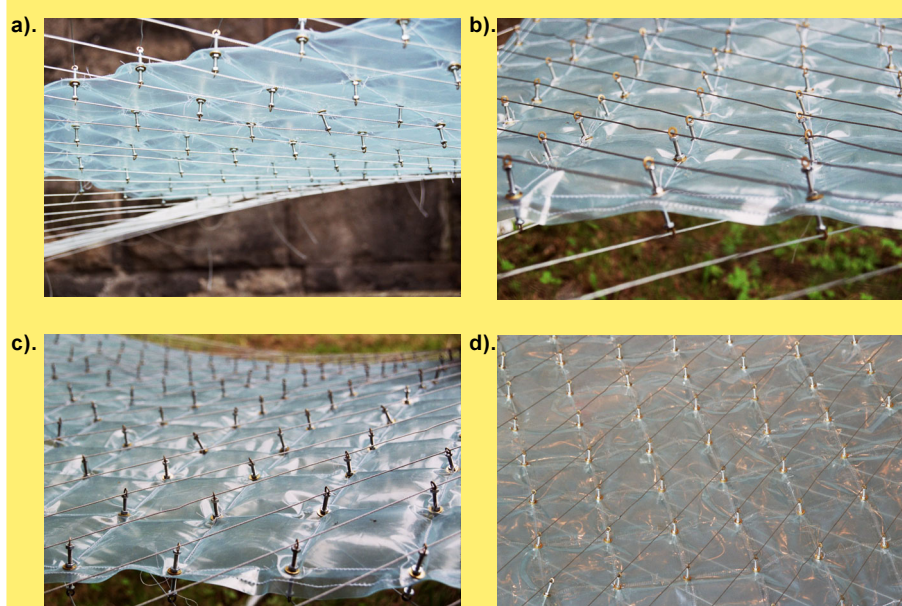
- a). dwa układy wzajemnie prostopadłych linek naprężających
- b). usytuowanie linek naprężających względem powłoki
- c). połączenie linek naprężających z powłoką
- d). połączenie linek naprężających z ramką górną

Przebieg eksperymentu | Wykonany model został napełniony powietrzem za pomocą sprężarki typu NuTool Lt24, o maksymalnym ciśnieniu roboczym 8 bar. W poduszkach uzyskano ciśnienie 7.1 mbar¹⁾.

Po napełnieniu poduszek powietrzem, naciągnięto linki naprężające w obu kierunkach. Wykonany model nie pozwalał na dokładny pomiar wielkości siły naciągu. Dla zapewnienia równomierności odkształcenia, podczas naciągania linek, zachowywano we wszystkich jednakową wartość naciągu.

W wyniku naprężenia, konstrukcja odkształciła się, przyjmując kształt paraboloidy hiperbolicznej²⁾, rys. 5.64. Pomierzone różnice wysokości pomiędzy przeciwległymi wierzchołkami modelu wyniosły 210 mm. Stanowi to 0.216 wymiaru boku powłoki.

Wnioski | Przeprowadzony eksperyment, pomimo swojego typowo jakościowego charakteru, potwierdził przewidywany sposób odkształcenia modularnej powłoki pneumatycznej poddanej dwukierunkowemu sprężeniu.



Rys. 5.64 – model powłoki z rys. 5.62, po napełnieniu poduszek powietrzem i naprężeniu linek:

- a). widok powłoki od dołu
- b). widok powłoki od góry
- c). widok wklęsłej części powłoki od góry
- d). widok ogólny powłoki z góry

¹⁾ Pomiar ciśnienia w poduszkach wykonano metodą słupa wody; wyniki przeliczono stosując przelicznik 1 mm słupa wody = 0.101325 mbar

²⁾ Powierzchnia odkształconej modularnej powłoki pneumatycznej dwukierunkowo sprężonej, jedynie w przybliżeniu odpowiada powierzchni paraboloidy hiperbolicznej, ze względu na nieprostoliniowy kształt odkształconych cięgien.

5.3.6.2. Powłoka walcowa

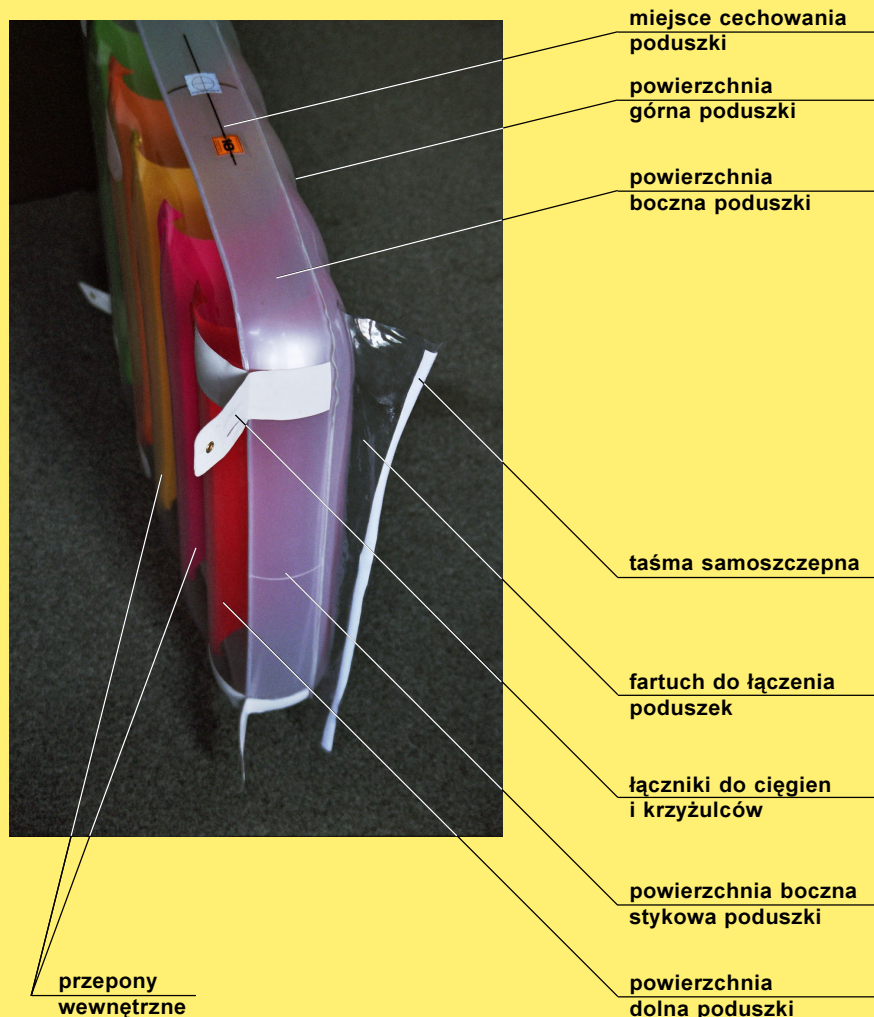
Założenia wstępne | Przyjęto, że przedmiotem badania będzie odcinek powłoki walcowej, o szerokości jednego elementu modularnego. Długość powłoki nie powinna wynosić mniej niż dziesięć elementów modularnych. Założono, że model badawczy będzie zrealizowany w dwóch wersjach:

- składającej się wyłącznie z poduszek o stałej grubości oraz cięgien
- składającej się z poduszek o stałej grubości, krzyżulców o długości zwiększającej się ku środkowi oraz cięgien

Przyjęto, że przedmiotem pomiaru będzie zależność wypiętrzenia i kształtu powłoki od skrócenia jej rozpiętości, tj. od przesunięcia podpory ruchomej.

Charakterystyka modeli do badań | Do wykonania modeli wykorzystano poduszki pneumatyczne z folii PVC o grubości 0.30 mm, stosowane w sprzęcie sportowo-turystycznym, produkcji firmy Bestway Inflatables & Material Corp. (Chiny), art. nr 43023. Nominalne wymiary poduszki wynoszą 89.5×89.5×21.5 cm. Poduszka stanowi jeden element modularny powłoki. Każda z nich, posiada pięć wewnętrznych przepon, ograniczających odkształcanie się poduszki po wypełnieniu powietrzem. Przepony nie ograniczają przepływu powietrza wewnątrz poduszek. Na bocznej powierzchni każdej z poduszek znajduje się zawór powietrzny z wentylem. Poduszki napełniono powietrzem do ciśnienia 32.4 mbar.

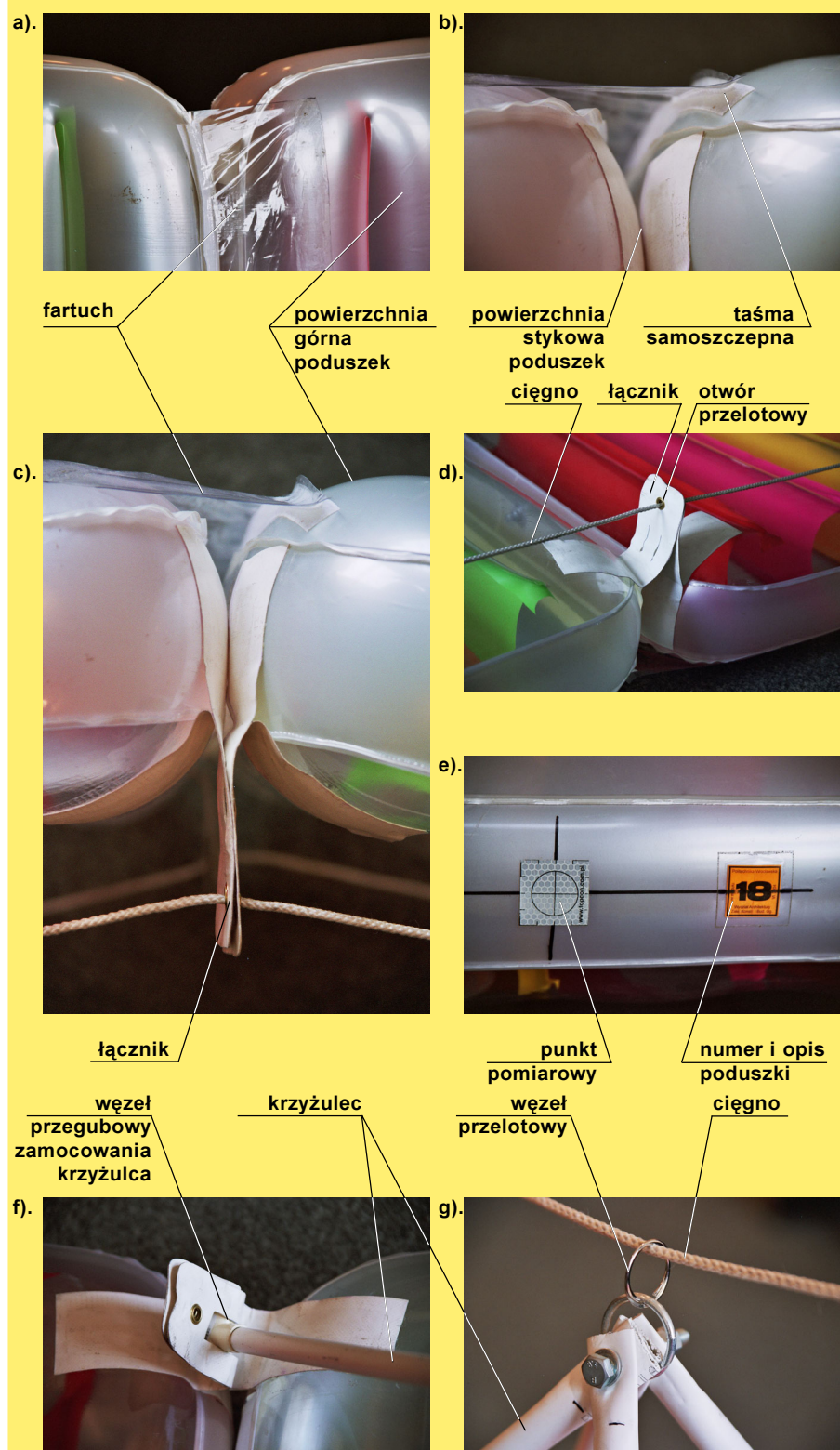
Poduszki zostały przystosowane do potrzeb eksperymentu, poprzez wyposażenie w dodatkowe elementy umożliwiające ich połączenie oraz przyłączenie krzyżulców i cięgien. Ogólny budowę poduszki, stanowiącej podstawowy moduł modelu powłoki, przedstawiony jest na rys. 5.65.



Rys. 5.65– ogólna budowa poduszki, stanowiącej podstawowy moduł modelu powłoki. Na rys. zaznaczono dodatkowe elementy, o które uzupełniono poduszkę.

Każda poduszka została uzupełniona o następujące elementy:

- cztery łączniki, umieszczone w narożach; łączniki, o wymiarach 65×230 mm, wykonane zostały z dwóch warstw tkaniny poliestrowej, powlekanej PVC (tkanina Lite ADR, firmy Naizil). Warstwy tkaniny zostały sklejone (Metriweld 15010, firmy IPS Corp., USA) na długości 115 mm, a na pozostałej długości przyklejone (tym samym klejem) do powierzchni bocznej stykowej oraz powierzchni dolnej poduszki). W łączniku wykonano otwór okuty nitem oczkowym ϕ 8 mm dla przeprowadzenia cięgna oraz dwa nacięcia długości 40 mm, w rozstawie 20 mm, dla zamocowania krzyżulców



Rys. 5.66 – szczegóły wykonania i połączeń poduszek pneumatycznych:

- połączenie powierzchni górnych, z fartuchem i taśmą samoszczepną – widok z góry
- j.w. – widok z boku
- połączenie poduszek bez krzyżulców – widok z boku
- j.w. – widok powierzchni dolnej
- miejsce cechowania poduszki
- połączenie przegubowe krzyżulców z poduszkami
- węzeł przelotowy łączący krzyżulce

– fartuchy z folii PVC, gr. 0.30 mm, o szer. 140 mm; fartuchy zostały przyklejone do powierzchni górnej poduszek, równoległe do jednej z powierzchni bocznych stykowych. Do wolnej krawędzi fartucha przyklejono taśmę samoszczepną szerokości 20 mm – warstwę haczyków. Warstwa pętelek została przyklejona przy przeciwległej krawędzi bocznej stykowej poduszki. Umożliwiło to połączenie i zapewnienie ciągłości górnej powłoki poduszek.

Na każdej poduszce, w połowie powierzchni bocznej, umieszczono miejsce cechowania. W miejscu tym umieszczony został numer (unikalny) i opis poduszki, oraz pole celowania dla przyrządu pomiarowego – punkt pomiarowy. Pole to jest wykonane z folii holograficznej (prod. firmy Topcon).

Krzyżulce zostały wykonane z rurek PVC, 20/1 mm. Rurki te zostały zakończone końcówką w kształcie litery T, o wymiarach 50×35×21/2 mm, połączoną z rurką poprzez wklejony do wnętrza odcinek elastycznej, grubościenniej, rurki PE, zbrojonej włóknem szklanym. Umożliwiło to obrót końcówki względem wszystkich trzech osi.

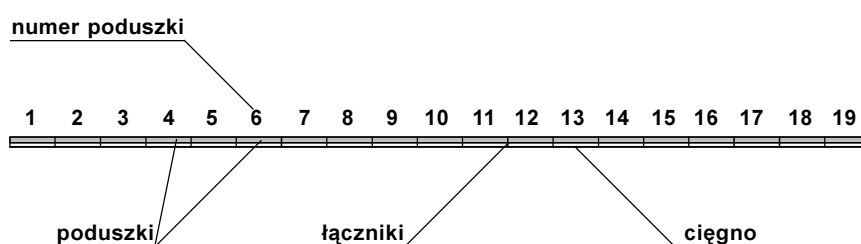
Poduszki łączono poprzez złączenie obu warstw taśmy samoszczepnej w górnej powierzchni oraz założenie cięgna lub krzyżulców. Łączniki dwóch sąsiadujących poduszek przylegały ściśle do siebie. Dla modelu, w którym nie wykorzystywano krzyżulców, cięgno było przewlekane poprzez nity oczkowe umieszczone w łącznikach. Krzyżulce łączono z poduszkami poprzez umieszczenie końcówek w kształcie litery T w nacięciach łączników. W węzłach przelotowych krzyżulce łączono śrubami M6. Na śrubie założono pierścień stalowy spawany ϕ 30 mm, grubości 3 mm, a na nim dodatkowy pierścień (niespawany), o średnicy 20 mm, stanowiący węzeł przelotowy.

Szczegóły wykonania i połączeń poduszek pneumatycznych oraz miejsca ich cechowania, przedstawiono na rys. 5.66.

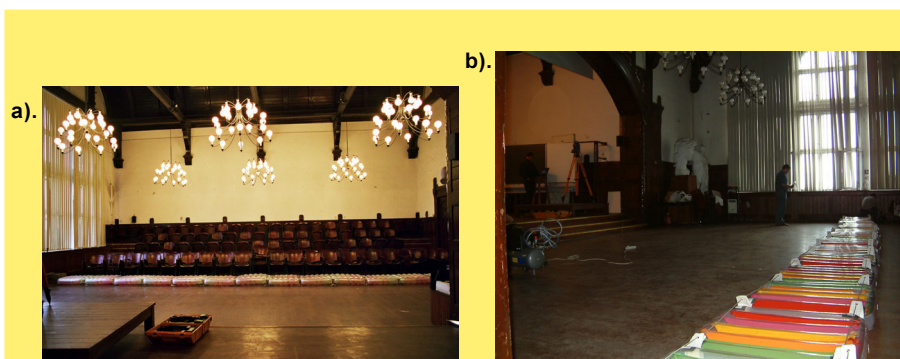
Geometria modeli | Do badania przygotowano początkowo model o długości dwiętnastu elementów modularnych. Przygotowano go w dwóch wersjach:

- model **M-1**, powłoka bez krzyżulców
- model **M-2**, powłoka z krzyżulcami

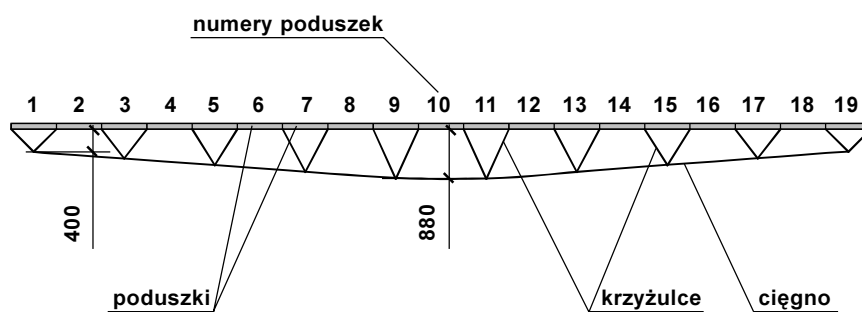
Na rys. 5.67 przedstawiono schemat, a na rys. 5.68 – widok modelu M-1. Rys. 5.69 przedstawia schemat, a rys. 5.70 – widok modelu M-2.



Rys. 5.67 – geometria modelu M-1



Rys. 5.68 – widok modelu M-1



Rys. 5.69 – geometria modelu M-2

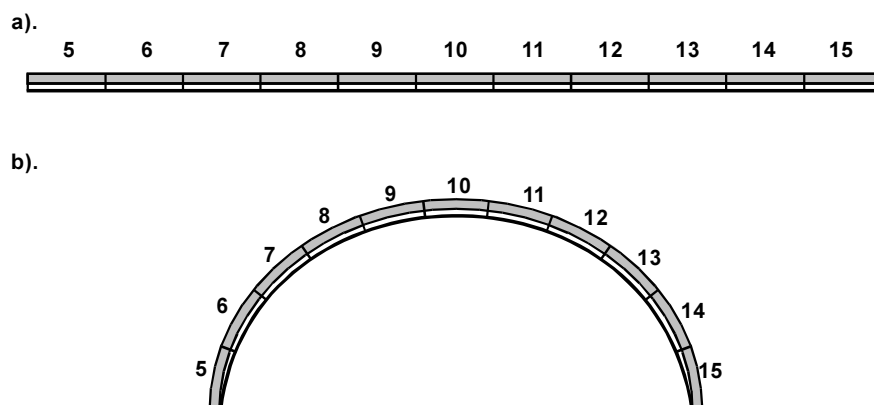


Rys. 5.70 – widok modelu M-2

Po wykonaniu obydwu modeli, okazało się, że zarówno ich długość, jak i wysokość po wypiętrzeniu, przekraczają wielkość pomieszczenia, w którym przeprowadzano eksperyment¹⁾. Z tego względu, modele te zmodyfikowano, usuwając po cztery skrajne poduszki (wraz z krzyżulcami). W modelach pozostało po jedenaście poduszek. Otrzymano w ten sposób:

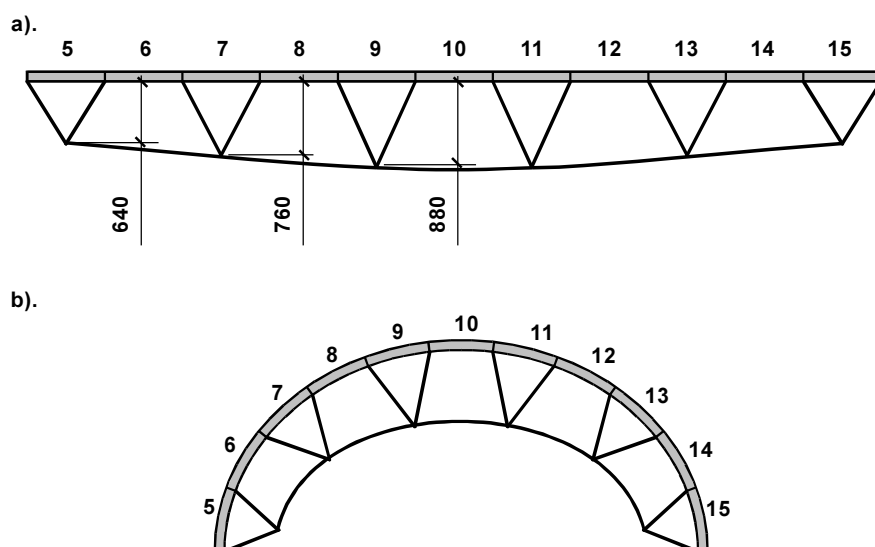
- model **M-3**, powłoka bez krzyżulców
- model **M-4**, powłoka z krzyżulcami

Na rys. 5.71 przedstawiono schemat modelu M-3. Rys. 5.72 przedstawia schemat modelu M-2.



Rys. 5.71 – geometria modelu M-3:
a). przed wypiętrzeniem
b). po wypiętrzeniu

¹⁾ Eksperyment przeprowadzano w Auli budynku Wydziału Architektury Politechniki Wrocławskiej, w dniach 26.06.2004, 21.08.2004 i 28.08.2004

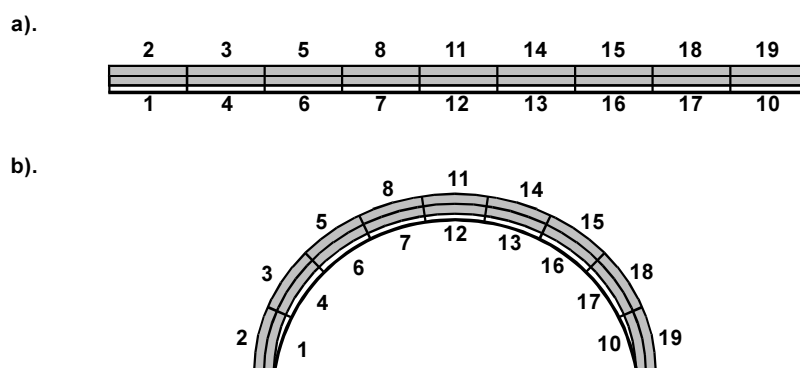


Rys. 5.72 – geometria modelu M-4:

a). przed wypiętrzeniem
b). po wypiętrzeniu

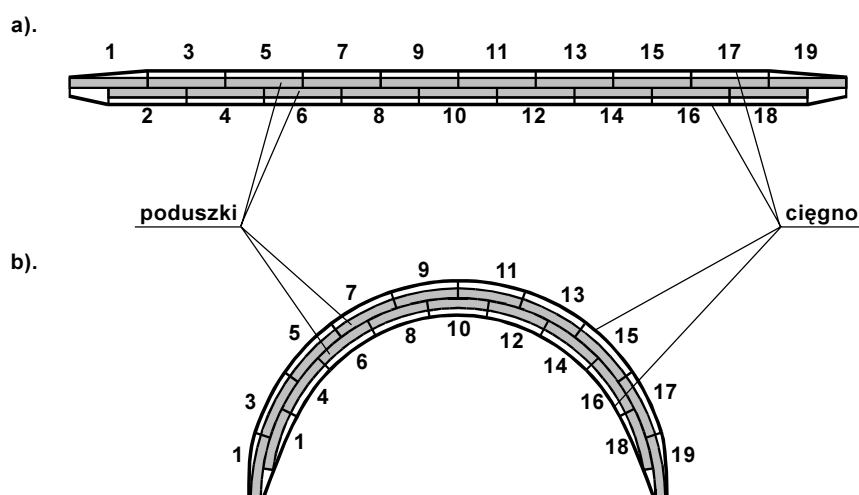
W dalszej części, wykonano jeszcze dwa dalsze modele:

- model **M-5**, powłoka bez krzyżulców, o dwóch warstwach poduszek, ułożonych bez przesunięcia, z ciągnem umieszczonym od spodu; łącznie model składał się z osiemnastu poduszek. Schemat modelu M-5 przedstawia rys. 5.73
- model **M-6**, powłoka bez krzyżulców, o dwóch warstwach poduszek, ułożonych z przesunięciem o pół długości; łącznie model składał się z dziewiętnastu poduszek. W modelu umieszczono ciągnia zarówno po dolnej, jak i po górnej stronie poduszek. Schemat modelu M-6 przedstawia rys. 5.74



Rys. 5.73 – geometria modelu M-5:

a). przed wypiętrzeniem
b). po wypiętrzeniu



Rys. 5.74 – geometria modelu M-6:

a). przed wypiętrzeniem
b). po wypiętrzeniu

Przebieg pomiarów | Eksperyment przeprowadzono w trzech etapach. Jak wspomniano wcześniej, wypiętrzenie modeli M-1 i M-2 nie było możliwe, ze względu na wielkość pomieszczenia, w którym przeprowadzano eksperyment.

W trakcie wszystkich prób, położenie poduszek określano poprzez pomiar kąta i odległości od bazy pomiarowej. Pomiar był wykonywany dalmierzem geodezyjnym na podczerwień firmy Zeiss, typu Elta S20¹⁾. Punkty pomiarowe, umieszczone w miejscu cechowania poduszek, wykonano z folii holograficznej firmy Topcon.

W pierwszej fazie wypiętrzone modele M-3 i M-4. Poduszki zostały ułożone w pozycji poziomej, w kolejności podanej na rys. 5.71. Powierzchnie górne zostały uciążone poprzez nałożenie fartuchów i złączenie taśmy samoszczepnej. Następnie poduszki zostały odwrócone o 180° i założono cięgno naprężające. Cięgno zostało wykonane z linki polietylenowej o średnicy nominalnej 6 mm. Po odwróceniu poduszek o 180° do prawidłowej pozycji i wykonano pomiar wstępny (seria 0). Następnie rozpoczęto wypiętrzenie modelu. Po jego zakończeniu wykonano pomiar geometrii modelu (seria 1). Na rys. 5.75 przedstawiono widok modelu M-3 po wypiętrzeniu, w pozycji, w której wykonany został pomiar.



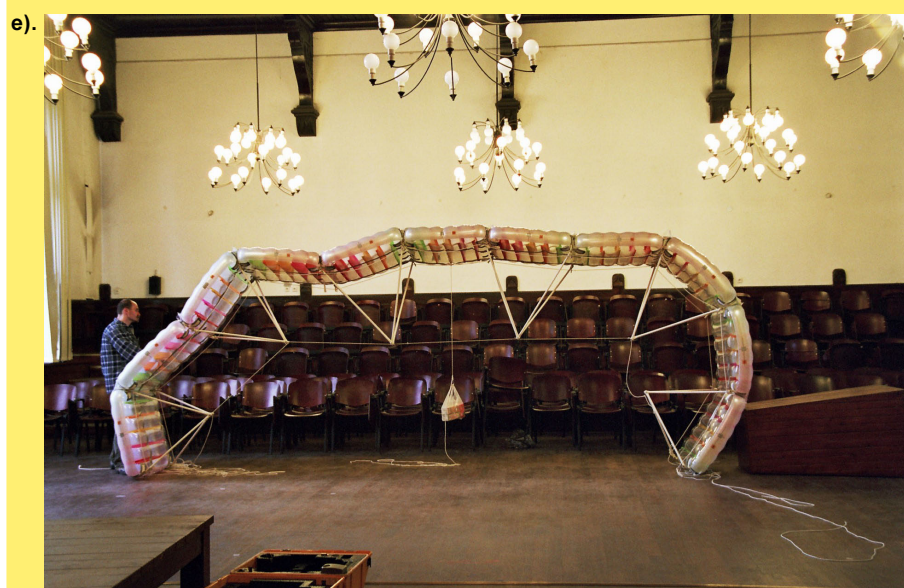
Rys. 5.75 – widok modelu M-3 po wypiętrzeniu

Po zakończeniu pomiarów model ponownie ułożono w pozycji poziomej i zamocowano krzyżulce, zgodnie ze schematem z rys. 5.72, uzyskując model M-4. Model ten następnie wypiętrzano. Po zakończeniu wypiętrzenia wykonany został pomiar geometrii modelu (seria 2). Następnie, w środkowym punkcie modelu zaczepiono obciążenie $Q = 0.03 \text{ kN}$ i ponownie wykonano pomiar geometrii modelu. Na rys. 5.76 przedstawiono przebieg badania modelu M-4.

W trakcie powyższych prób stwierdzono występowanie w warstwie poduszek punktów, w których następował nadmierny wzajemny obrót dwóch sąsiadujących poduszek. Analizę powodów występowania tego efektu przedstawiono w dalszej części pracy. Dla jego wyeliminowania, wykonany został, w drugiej fazie eksperymentu, model M-5, w którym poduszki ułożono w dwóch warstwach, zgodnie ze schematem z rys. 5.73. Model ten wypiętrzano analogicznie jak model M-3, a następnie wykonano pomiar jego geometrii. Rys. 5.77 przedstawia widok modelu M-5 przed i po wypiętrzeniu.

¹⁾ Pomiary wykonał dr inż. Mirosław Kaczałek z Katedry Geodezji i Fotogrametrii Akademii Rolniczej we Wrocławiu

²⁾ Sposób napełniania poduszek oraz pomiaru ciśnienia wewnętrznego – jak w pktcie. 5.3.6.1



Rys. 5.76 – wypiętrzanie modelu M-4:
 a). widok modelu przed wypiętrzaniem
 b). widok boczny modelu po wypiętrzaniu
 c). widok „przegubu”, powstałego po wypiętrzaniu
 d). widok frontowy modelu po wypiętrzaniu
 e). widok modelu po obciążeniu siłą $Q = 0.03 \text{ kN}$



Rys. 5.77 – wypiętrzanie modelu M-5:
a). widok modelu przed wypiętrzaniem
b). widok modelu po wypiętrzaniu



Rys. 5.78 – widok modelu M-6 po wypiętrzaniu

W trzeciej fazie, dla lepszego wyeliminowania efektu nadmiernego wzajemnego obrotu poduszek, wykonany został model M-6, w którym poduszki ułożono w dwóch warstwach, z przesunięciem o pół długości poduszki, zgodnie ze schematem z rys. 5.74. Dla zwiększenia skuteczności ucięglenia górnej powłoki poduszek, zastosowano dodatkowe cięgno górne. Do jego założenia wykorzystano łączniki znajdujące się w górnej warstwie poduszek. Model następnie wypiętrzono i wykonano pomiar jego geometrii. Na rys. 5.78 przedstawiono widok modelu M-6 po wypiętrzeniu, w pozycji, w której wykonany został pomiar.

Wyniki pomiarów | Pomiary położenia punktów pomiarowych znajdujących się na każdej poduszce, zostały wykonane z dokładnością do 1 mm. Z urządzenia pomiarowego uzyskano współrzędne położenia tych punktów w układzie współrzędnych związanym z pomiarami kontrolnymi. Wyniki pomiarów dla poszczególnych modeli przedstawiono w tabelach 5.2, 5.3 i 5.4.

Na podstawie współrzędnych punktów, zestawionych w w/w tabelach, skonstruowano linie reprezentujące kształt wypiętrzonych modeli. Ponieważ układy współrzędnych, przyjmowane w trakcie pomiarów, były nieznacznie skręcone w stosunku do płaszczyzny modeli, powstały linie przestrzenne, których współrzędne następnie sprowadzono do płaszczyzny modeli. Linie te przedstawiono na rys. 5.79, 5.80 i 5.81. Dla modeli M-5 i M-6, w których zastosowano dwie warstwy poduszek, wyznaczono dodatkowo linię środkową, jako średnią z wartości odpowiednich współrzędnych dla linii określających położenie poduszek w warstwie górnej i w warstwie dolnej.

Źródła błędów | Podczas przeprowadzania eksperymentu stwierdzono występowanie następujących okoliczności, które miały wpływ na jakość uzyskanych wyników:

1. w zakresie przygotowania modeli:

- wykorzystywane w modelach poduszki pneumatyczne, różniły się wymiarami; różnice w wymiarach rzutu dochodziły do $3 \div 5$ cm, a różnice w grubości do $2 \div 3$ cm
- ciśnienie powietrza w poduszkach ulegało zmianie w trakcie badania; niektóre poduszki stosunkowo szybko traciły powietrze i wymagały częstego uzupełniania. Miało to wpływ również na wymiary poduszek
- zastosowany sposób uciąglenia warstwy górnej poprzez fartuchy z taśmami samoszczepnymi okazał się niewystarczający; wynikało to ze zbyt małej szerokości taśmy oraz umieszczenia jej zbyt blisko krawędzi powierzchni stykowej
- kształt powierzchni styku poduszek znacznie odbiegał od założonego; wynikało to z braku jej usztywnienia przeponami wewnętrznymi, przez co powierzchnia ta miała kształt silnie wypukły. W wyniku tego, w miejscu styku poduszek powstawał rodzaj przegubu, umożliwiający „załamywanie się” warstwy poduszek. Widać to bardzo wyraźnie na rys. 5.76.c) oraz 5.76.d)., gdzie pokazane jest wyraźne odchylenie niektórych punktów od gładkiej krzywej opisującej wypiętrzony model

2. w zakresie przeprowadzenia eksperymentu:

- ilość elementów modułowych była stosunkowo mała, w porównaniu z rozpiętością, co powodowało, że krzywa opisująca odkształcony model nie była dostatecznie gładka
- w zastosowanym rozwiązaniu węzłów przelotowych, zwłaszcza w przesuwie cięgna, przez co występowały problemy z jego naciąganiem
- podłoże, na którym przeprowadzano eksperyment uniemożliwiało właściwe unieruchomienie podpór modeli, przez co konieczne było stosowanie dodatkowych elementów oporowych, zapobiegających ich przesuwaniu; nie wyeliminowało to jednak całkowicie tego zjawiska
- cięgna nie były blokowane w węzłach przelotowych, co – wobec dużych oporów tarcia – prowadziło do pewnej asymetrii odkształceń podczas wypiętrzania

Tablica 5.2 – Wyniki pomiarów odkształceń dla modeli M-3 i M-4

Nr pomiaru	Nr punktu pomiarowego	Współrzędne punktów pomiarowych			seria pomiarów
		X	Y	H	
1	1	1007.279	997.422	99.358	seria 0 model M-3 przed wypiętrzeniem (pomiar wstępny)
2	2	1007.152	998.311	99.365	
3	3	1007.015	999.196	99.370	
4	4	1006.860	1000.095	99.377	
5	5	1006.703	1000.940	99.379	
6	6	1006.551	1001.839	99.371	
7	7	1006.428	1002.711	99.396	
8	8	1006.277	1003.604	99.375	
9	9	1006.139	1004.477	99.378	
10	10	1006.029	1005.342	99.376	
11	11	1005.853	1006.210	99.366	
12	12	1005.731	1007.094	99.372	
13	13	1005.626	1007.981	99.358	
14	14	1005.508	1008.843	99.367	
15	15	1005.397	1009.697	99.338	
305	5	1006.014	1000.660	99.690	seria 1 model M-3 wypiętrzony nie obciążony
306	6	1006.016	1000.548	100.551	
307	7	1006.012	1000.636	101.382	
308	8	1005.883	1001.302	101.832	
309	9	1005.707	1002.180	101.784	
310	10	1005.585	1003.083	101.779	
311	11	1005.456	1003.938	101.928	
312	12	1005.403	1004.814	101.820	
313	13	1005.392	1005.444	101.256	
314	14	1005.424	1005.400	100.450	
315	15	1005.453	1005.098	99.706	
105	5	1006.511	999.499	99.695	seria 2 model M-4 wypiętrzony nie obciążony
106	6	1006.553	999.555	100.528	
107	7	1006.566	999.999	101.270	
108	8	1006.494	1000.672	101.706	
109	9	1006.368	1001.494	101.904	
110	10	1006.257	1002.320	102.008	
111	11	1006.084	1003.162	101.922	
112	12	1005.908	1003.996	101.709	
113	13	1005.766	1004.719	101.249	
114	14	1005.676	1005.096	100.483	
115	15	1005.679	1004.985	99.661	
205	5	1006.325	999.294	99.698	seria 3 model M-4 wypiętrzone obciążone siłą Q = 0.03 kN
206	6	1006.342	999.541	100.480	
207	7	1006.401	1000.102	101.114	
208	8	1006.394	1000.811	101.405	
209	9	1006.328	1001.626	101.459	
210	10	1006.285	1002.426	101.565	
211	11	1006.121	1003.253	101.524	
212	12	1005.998	1004.100	101.482	
213	13	1005.863	1004.869	101.227	
214	14	1005.730	1005.162	100.464	
215	15	1005.709	1004.904	99.663	
1000	pk 1	1000.000	1000.000	100.000	pomiar kontrolny
1001	pk 2	1013.550	1000.000		

Tablica. 5.2
Wyniki pomiarów
odkształceń dla mo-
deli M-3 i M-4

Tablica 5.3 – Wyniki pomiarów odkształceń dla modelu M-5

Nr pomiaru	Nr punktu pomiarowego	Współrzędne punktów pomiarowych			seria pomiarów	
		X	Y	H		
		m				
1	1	101.462	108.726	99.429	seria 0 model M-5 przed wypiętrzeniem (stan początkowy)	
2	2	101.477	108.735	99.633		
3	3	100.707	108.338	99.613		
4	4	100.615	108.288	99.438		
5	5	99.925	107.935	99.649		
6	6	99.887	107.900	99.441		
7	7	99.160	107.539	99.443		
8	8	99.132	107.505	99.653		
11	11	98.350	107.111	99.699		
12	12	98.378	107.113	99.481		
13	13	97.583	106.771	99.439		
14	14	97.547	106.736	99.648		
15	15	96.745	106.382	99.653		
16	16	96.752	106.395	99.446		
17	17	96.002	106.016	99.432		
18	18	95.956	106.007	99.638		
19	19	95.180	105.573	99.581		
101	1	99.166	106.833	99.789		seria 1 model M-5 po wypiętrzeniu nie obciążony
102	2	99.359	106.917	99.744		
103	3	99.439	106.948	100.564		
104	4	99.222	106.840	100.524		
105	5	99.248	106.867	101.376		
106	6	99.101	106.783	101.239		
107	7	98.580	106.571	101.599		
108	8	98.633	106.580	101.816		
111	11	97.868	106.217	101.781		
112	12	97.879	106.209	101.545		
113	13	97.130	105.914	101.465		
114	14	97.078	105.869	101.691		
115	15	96.402	105.595	101.303		
116	16	96.546	105.646	101.150		
117	17	96.364	105.557	100.458		
118	18	96.144	105.473	100.535		
119	19	96.226	105.457	99.686		
st1	pk_1	100.000	100.000	100.000	pomiar kontrolny	
st2	pk_2	100.000	120.000			

Tablica. 5.3
Wyniki pomiarów
odkształceń dla mo-
delu M-5

Wnioski | Na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych w trakcie doświadczalnego badania powłoki oraz jego przebiegu, można sformułować następujące wnioski:

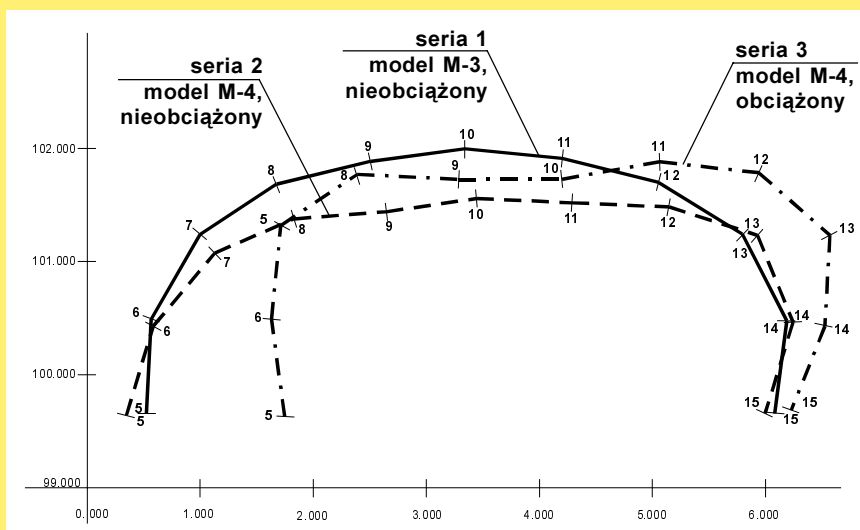
- uzyskane wyniki pomiarów dają obraz przebiegu procesu wypiętrzania pneumatycznej, modularnej powłoki walcowej
- niedoskonałości modeli użytych do badań, nie pozwalają na doświadczalne określenie ilościowych zależności, opisujących ten proces
- sposób odkształcania powłok oraz uzyskane krzywizny, odpowiadają oczekiwanym na podstawie analizy teoretycznej
- badanie potwierdziło, że poprzez zmianę sztywności powłoki wzdłuż jej rozpiętości, możliwe jest wpływanie na końcowy kształt powłoki po wypiętrzeniu; potwierdziła się również oczekiwana zależność kształtu końcowego od sposobu zmiany krzywizny (pkt 5.2.3.3)

Tablica 5.4 – Wyniki pomiarów odkształceń dla modelu M-6

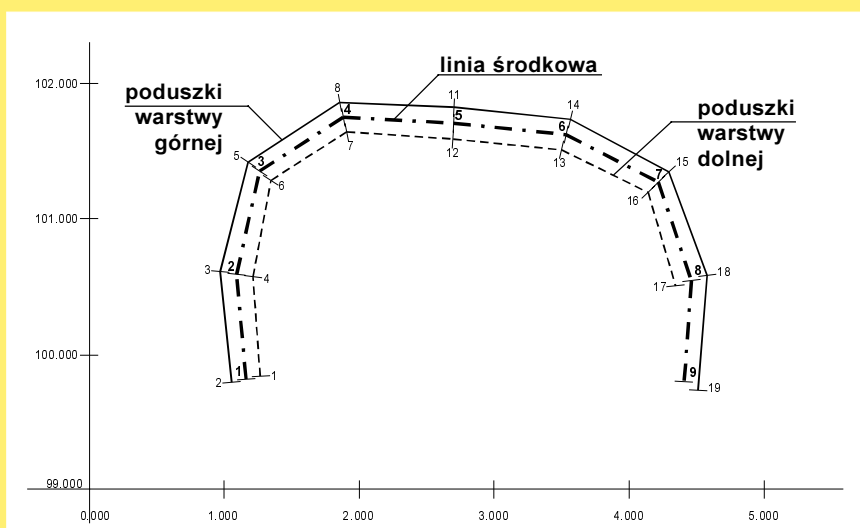
Nr pomiaru	Nr punktu pomiarowego	Współrzędne punktów pomiarowych			seria pomiarów
		X	Y	H	
		m			
1	1	94.576	98.395	99.310	seria 0 model M-6 przed wypiętrzeniem (stan początkowy)
2	2	94.583	98.728	99.101	
3	3	94.584	99.259	99.335	
4	4	94.607	99.578	99.122	
5	5	94.608	100.163	99.328	
6	6	94.631	100.426	99.106	
7	7	94.656	100.947	99.305	
8	8	94.692	101.242	99.098	
9	9	94.709	101.859	99.297	
10	10	94.711	102.132	99.099	
11	11	94.788	102.773	99.311	
12	12	94.819	103.223	99.113	
13	13	94.877	103.716	99.319	
14	14	94.858	104.096	99.106	
15	15	94.914	104.597	99.306	
16	16	94.919	105.003	99.098	
17	17	94.936	105.447	99.314	
18	18	94.921	105.859	99.116	
19	19	94.932	106.311	99.309	
101	1	95.215	98.104	99.463	seria 1 model M-6 po wypiętrzeniu nie obciążony
102	2	95.239	98.240	99.777	
103	3	95.238	98.195	100.322	
104	4	95.271	98.522	100.578	
105	5	95.275	98.535	101.160	
106	6	95.309	98.865	101.354	
107	7	95.344	99.181	101.604	
108	8	95.403	99.675	101.455	
109	9	95.423	100.083	101.739	
110	10	95.373	100.555	101.585	
111	11	95.541	100.996	101.679	
112	12	95.584	101.432	101.386	
113	13	95.669	102.206	101.602	
114	14	95.645	101.944	101.357	
115	15	95.726	102.715	101.190	
116	16	95.735	102.777	100.583	
117	17	95.758	103.016	100.395	
118	18	95.737	102.821	99.728	
119	19	95.755	103.019	99.531	
st1	pk_1	100.000	100.000	100.000	pomiar kontrolny
st2	pk_2	100.000	120.000		

Tablica. 5.4
Wyniki pomiarów
odkształceń dla mo-
delu M-6

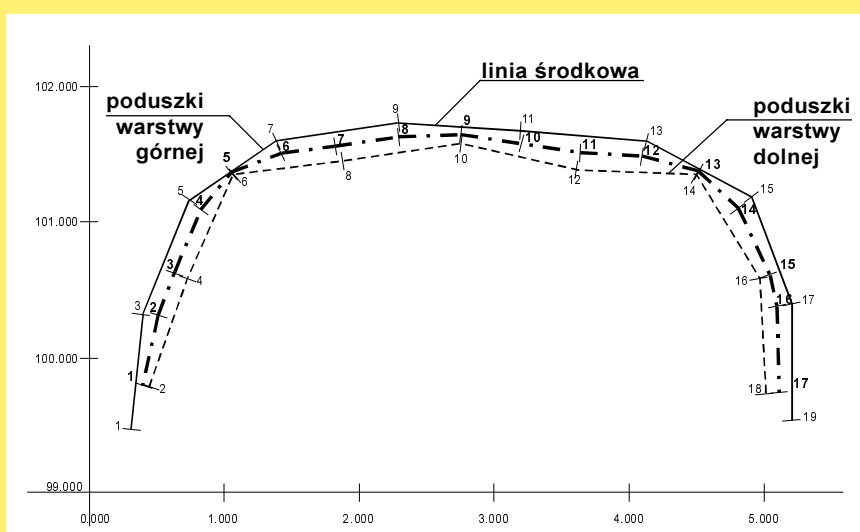
- warstwa poduszek w modularnych powłokach pneumatycznych, stanowi odpowiednik pręta warstwy górnej w konstrukcjach prętowych (pkt 5.2). Z tego względu, musi ona posiadać pewną minimalną „sztywność giętą”. Wymaga to zapewnienia ciągłości powłok poduszek zarówno na powierzchni górnej, jak i na powierzchni dolnej. Brak ciągłości dolnej powłoki poduszek ułatwia powstawanie rozwarcia ich styku. W zastosowanych modelach, efekt ten dodatkowo nakładał się na zjawisko powstawania przegubów na styku poduszek
- zastosowanie podwójnej warstwy poduszek częściowo wyeliminowało zjawisko powstawania przegubów na ich styku; jednakże przesunięcie obu warstw względem siebie, zastosowane w modelu M-6, utrudniło gładkie odkształcanie powłoki (rys. 5.78)



Rys. 5.79 – wyniki pomiarów odkształceń dla modeli M-3 i M-4. Numery przy liniach oznaczają numery punktów pomiarowych w poszczególnych modelach.



Rys. 5.80 – wyniki pomiarów odkształceń dla modelu M-5. Numery przy liniach warstwy dolnej i górnej oznaczają numery punktów pomiarowych. Numery przy linii środkowej oznaczają umowne numery punktów tej linii.

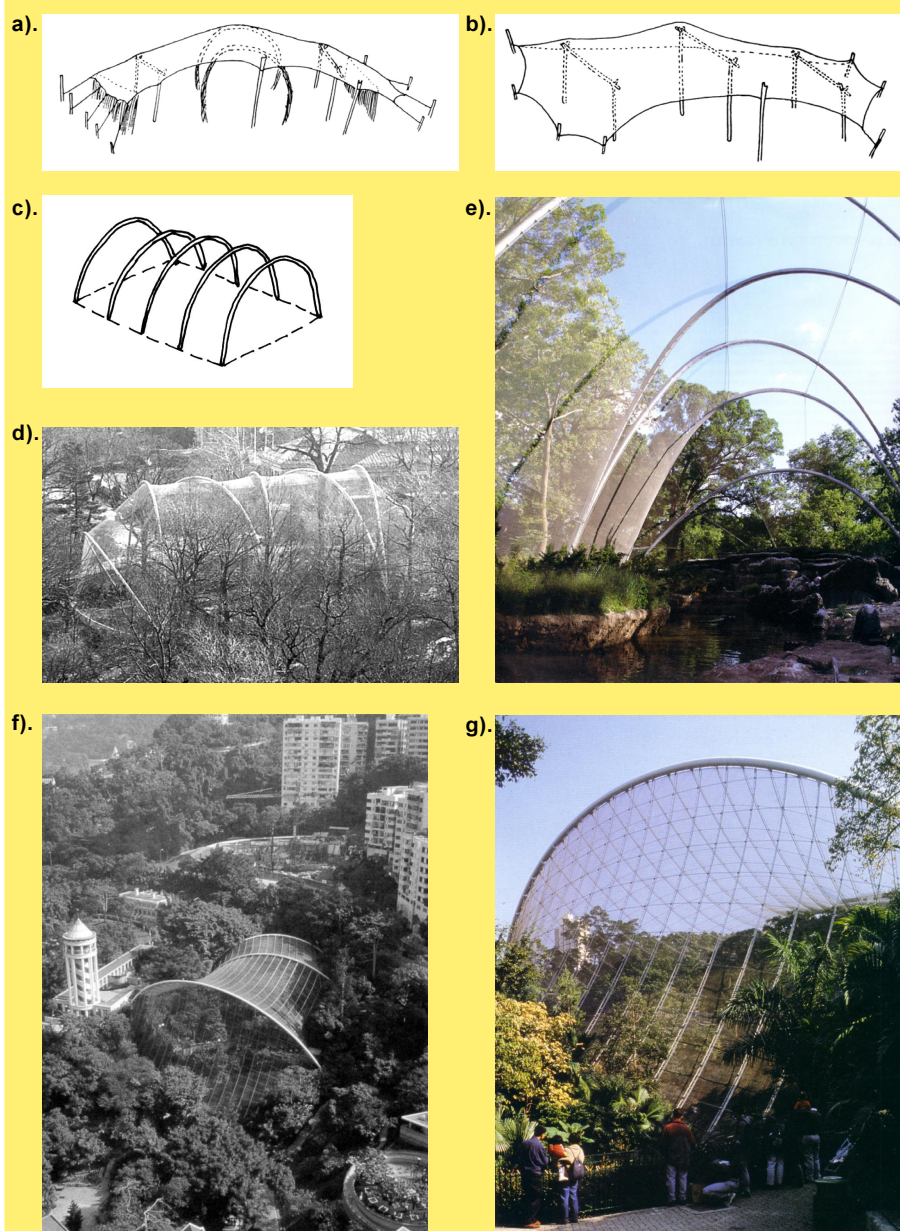


Rys. 5.81 – wyniki pomiarów odkształceń dla modelu M-6. Numery przy liniach warstwy dolnej i górnej oznaczają numery punktów pomiarowych. Numery przy linii środkowej oznaczają umowne numery punktów tej linii.

6. Wnioski

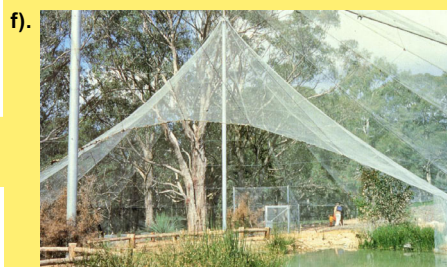
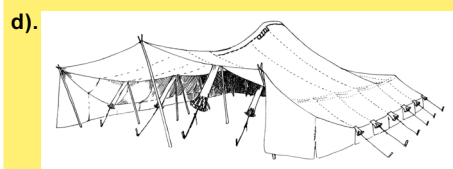
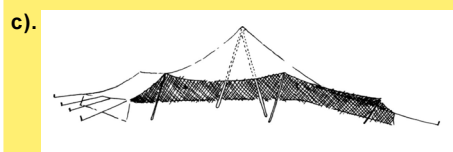
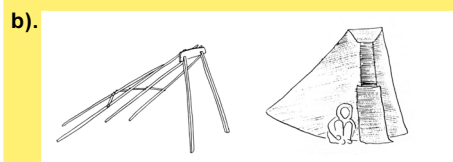
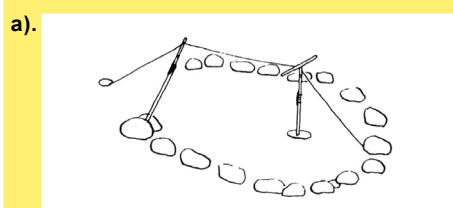
Konstrukcje z materiałów, mogących przenosić jedynie siły rozciągające, takich jak tkaniny i liny, były wykonywane już od początków działalności budowlanej człowieka. Przez tysiące lat wykształciły się pewne umiejętności i zwyczaje, które pozwalały ludziom wykonywać z tych materiałów obiekty o dużych wymiarach i złożonej formie. Wykonywano je w skrajnie różnych strefach klimatycznych: od afrykańskiej i arabskiej pustyni, po północne krańce Alaski. Były to zarówno skromne mieszkania zwykłych ludzi, jak i pełne przepychu siedziby władców. W każdym wypadku, konstrukcja była dobrze dostosowana do miejscowych warunków oraz do potrzeb użytkownika. Konstrukcje te osiągały znaczne rozmiary, a jednocześnie musiały być łatwe w montażu i demontażu, a także w transporcie.

Konstrukcje tego rodzaju są wykonywane również obecnie. Są to konstrukcje membranowe, nazywane często namiotowymi lub dachami wiszącymi oraz konstrukcje samowypiętrzalne i rozkładalne. Jest to jeden z najintensywniej rozwijających się obecnie rodzajów konstrukcji. Forma tych obiektów jest bardzo charakterystyczna dla obecnego okresu rozwoju architektury.



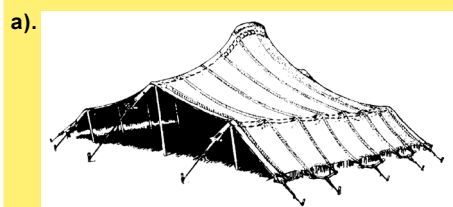
Rys. 6.1
systemy konstrukcyjne namiotów membranowych:

- a). przykładowe konfiguracje ram prostokątnych
- b). namiot o szkieletcie z ram łukowych i prostokątnych
- c). namiot o szkieletcie łukowym, patrz rys. 2.10, 2.11 i 2.12;
- woliery:
- d). – e). woliery Russell B. Aitken Seabird Aviary w Bronx Zoo, Nowy Jork
ilustracje za [225]
- f). – g). woliery w Hong Kong Park (Jockey Club)
ilustracje za [225]



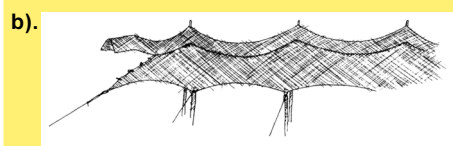
Rys. 6.2

- a). i b). szkielety konstrukcji namiotów kalenicowych Inuitów
c). typowy namiot mauretański
d). typowy namiot berberyjski patrz rys. 2.6, 2.19 i 2.20;
e). i f). konstrukcja woliery w Cleland Conservation Park, Adelajda (Australia) ilustracja za [225]
g). pawilon niemiecki na wystawie EXPO 67 w Montrealu ilustracja za [225]



Rys. 6.3

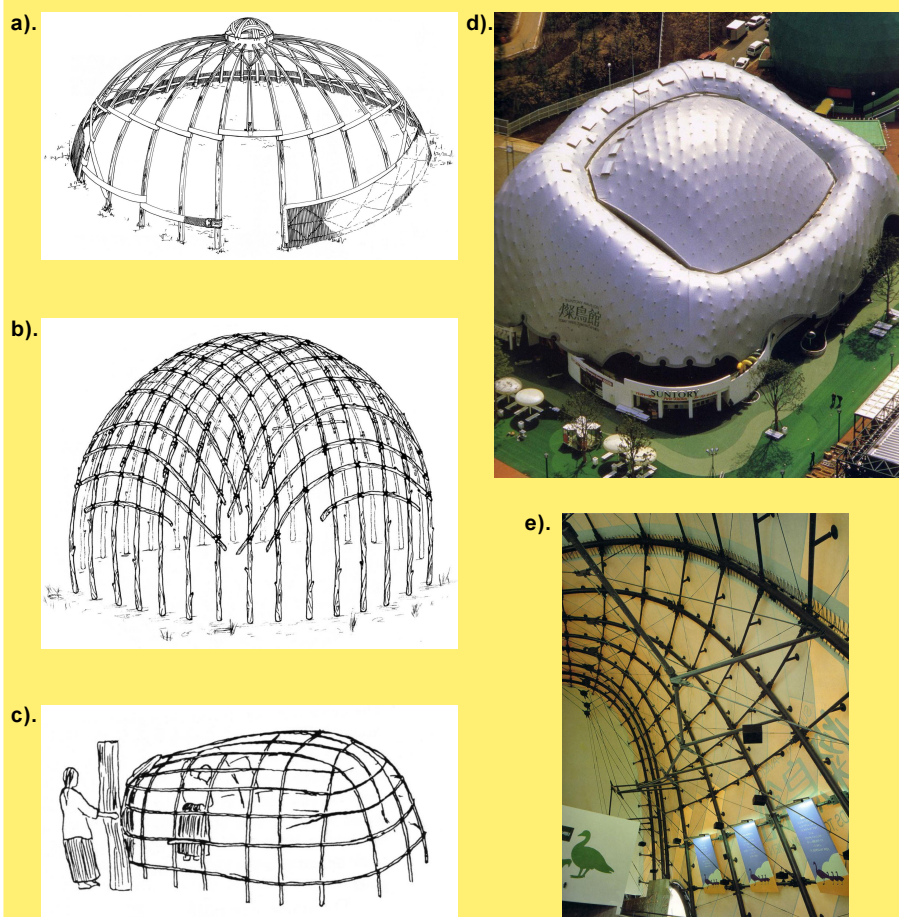
- a). jedna z tradycyjnych form „czarnego namiotu”, patrz rys. 2.9;
b). konstrukcja woliery Ocean Park Aviary, Hong Kong ilustracja za [225]



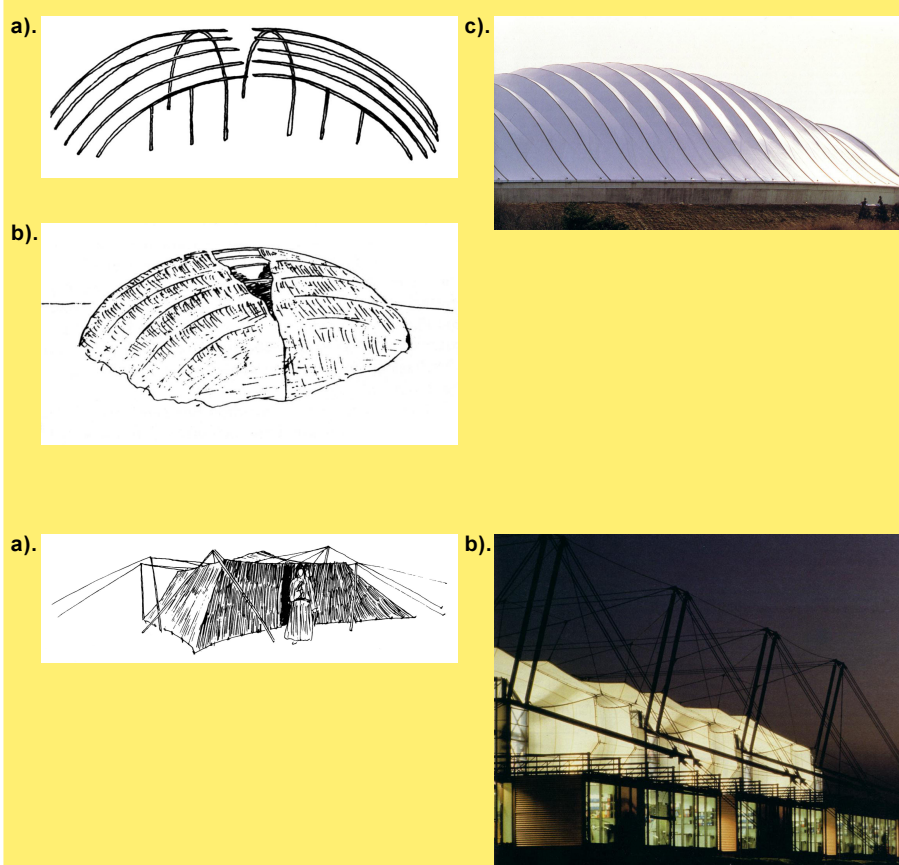
Rys. 6.4

- a). i b). namioty Kurdów, patrz rys. 2.21;
c). budynek firmy Schlumberger w Paryżu, ilustracja za [181]

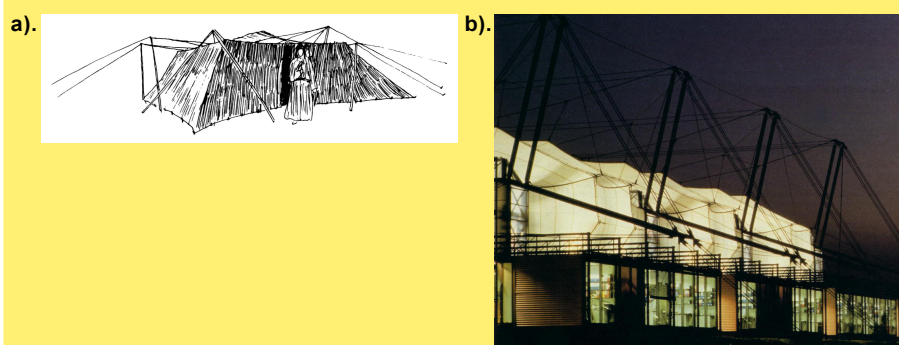
Powstanie i rozwój współczesnych konstrukcji membranowych i samowypiętrzalnych jest znany i dobrze udokumentowany. Jednakże porównanie tych systemów konstrukcyjnych ze znacznie prostszymi i mniejszymi konstrukcjami namiotowymi wykonywanymi w przeszłości, prowadzi do wniosku, że istnieje pomiędzy nimi bardzo duża zbieżność zasadniczych cech morfologicznych oraz konstrukcyjnych [215].



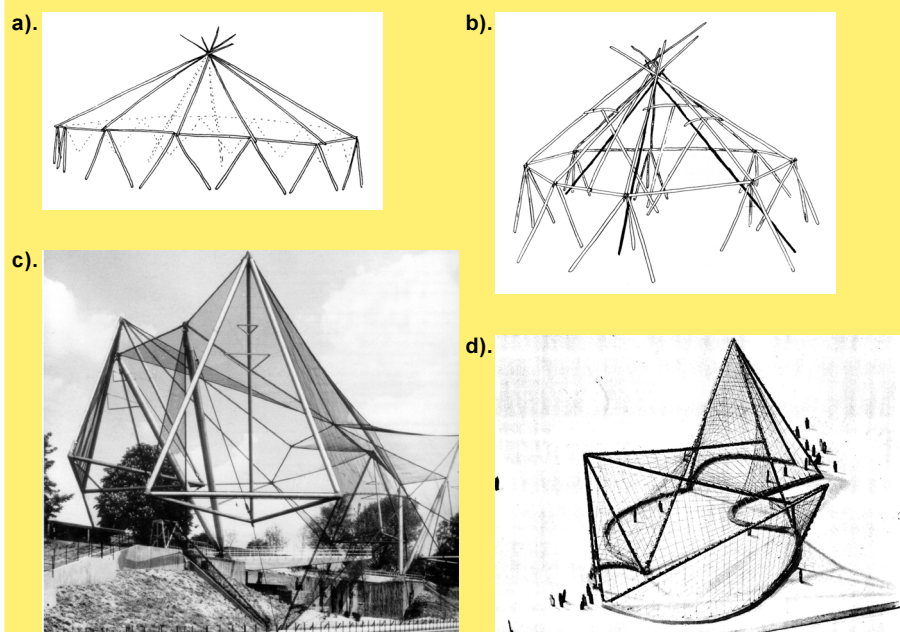
Rys. 6.5
 a). namioty żebrowe, kopułaste
 b). namioty łukowo-żebrowe
 c). namiot „wagino-gan Indian Ojibway”, patrz rys. 2.3 i 2.7;
 d). – e). Suntory Pavilion, na wystawie EXPO 85, w Tsukubie (Japonia), ilustracje za [23]



Rys. 6.6
 a). namiot łukowo-sklepieniowy, Indian Kutchin, patrz rys. 2.7,
 b). przekrycie stadionu Akita Sky Dome, ilustracja za [117]



Rys. 6.7
 a). widok namiotu używanego przez Tybetańczyków; patrz rys. 2.26
 b). budynek Schlumberger's Research Facility w Cambridge; ilustracja za [181]



Rys. 6.8
szkielety namiotów
koczowników sybe-
ryjskich:
a). Ewenków
b). Czukczów i Koria-
ków,
patrz rys. 2.4;
konstrukcje prętowo-
siatkowe:
c). woliera dla ptaków
Snowdon Aviary, w
londyńskim zoo,
ilustracja za [177]
d). pawilon firmy Phi-
lips na Wystawie
Światowej w Brukseli
w 1958 r. (proj.
Le Corbusier),
ilustracja za [225]

Porównanie takie ułatwia fakt, że wiele z wypracowanych tradycyjnie zasad konstruowania i wznoszenia zachowało się niemal bez zmian do obecnych czasów, wśród plemion wiodących koczowniczy tryb życia. Dostępne są ponadto źródła historyczne, dokumentujące rozwój konstrukcji namiotowych.

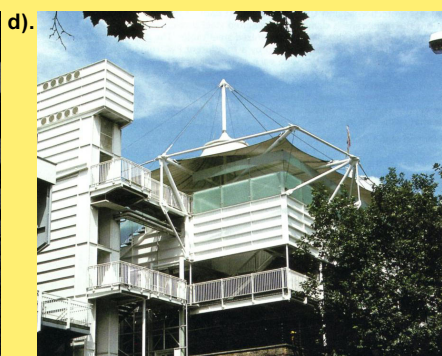
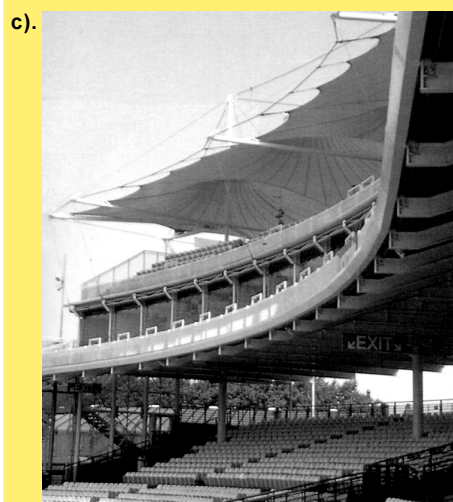
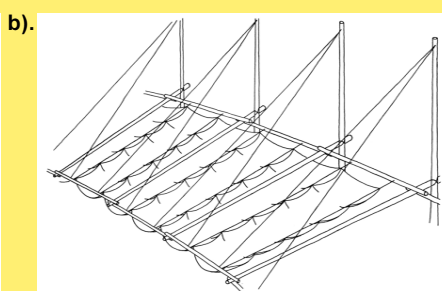
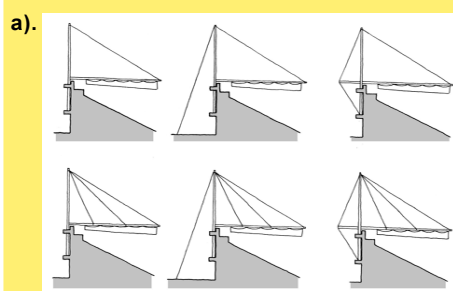
Porównanie najważniejszych cech konstrukcyjnych, wspólnych obydwu grupom, przedstawiono na rys. 6.1 ÷ 6.10. Są to:

- stosowanie podobnych elementów szkieletu: ram prostokątnych i łukowych, belek kalenicowych, słupków-wahaczy, rys. 6.1, 6.8
 - wykorzystanie tkaniny do stabilizacji szkieletu, rys. 6.1 ÷ 6.4
 - łączenie różnych elementów szkieletu w jednym systemie konstrukcyjnym, rys. 6.1, 6.6
 - podwieszanie membrany i szkieletu do zewnętrznych słupów, za pomocą cięgien, rys. 6.8, 6.9
 - optymalizacja szkieletu dla różnych warunków, rys. 6.2, 6.4
 - stosowanie deformacji (wyginania i sprężania) szkieletu, rys. 6.5, 6.10
- W zakresie podobieństw morfologicznych, charakterystyczne jest stosowanie form:
- łukowo-żebrowych, rys. 6.1, 6.6
 - kopulastych, rys. 6.5, 6.6
 - siodłowych, rys. 6.1, 6.4
 - stożkowych, rys. 6.2
 - wielościennych, rys. 6.7
 - wspornikowych, rys. 6.9

Przedstawiona powyżej daleko idąca korelacja cech współczesnych i historycznych konstrukcji membranowych dowodzi ciągłości rozwoju idei konstrukcyjnych oraz przydatności i stałej aktualności wykształconych form i rozwiązań.

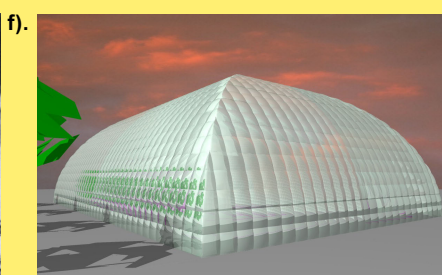
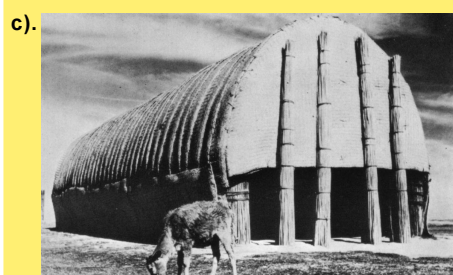
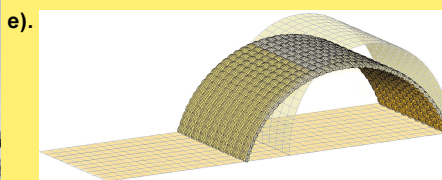
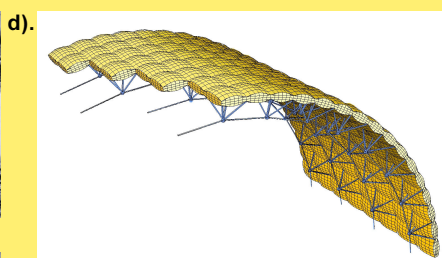
Forma budynku Schlumberger Research Facility w Cambridge powtarza niemal dosłownie – w znacznie większej skali – formę tradycyjnych tybetańskich namiotów *ba-nag* (rys. 6.7), a niewielkie namioty Indian Kutchin do złudzenia przypominają formę pokrycia Akita Sky Dome (rys. 6.6).

Podobnie wielkie woliery w ogrodach zoologicznych wydają się być powiększonymi czarnymi namiotami lub szałasami ludów dalekiej Północy (rys. 6.1, 6.2, 6.3 i 6.8). Te same inspiracje (świadome lub nie) są wyraźnie widoczne w budynkach biurowych i wystawowych (rys. 6.4, 6.5 i 6.8). Współczesne systemy konstrukcyjne zadaszeń trybun w zasadzie nie różnią się od konstrukcji velarium stosowanych w rzymskich amfiteatrach (rys. 6.9).



Rys. 6.9

- a). – b). przykłady systemów konstrukcyjnych velarium, patrz rys. 2.34 i 2.35;
c). – d). membranowa konstrukcja zadawania trybun – Mound Stand, Lord's Cricket Ground w Londynie, ilustracja za [181]
e). konstrukcja zadawania trybun – Sarawak Kuching Stadium, Malezja ilustracja za [35]



Rys. 6.10

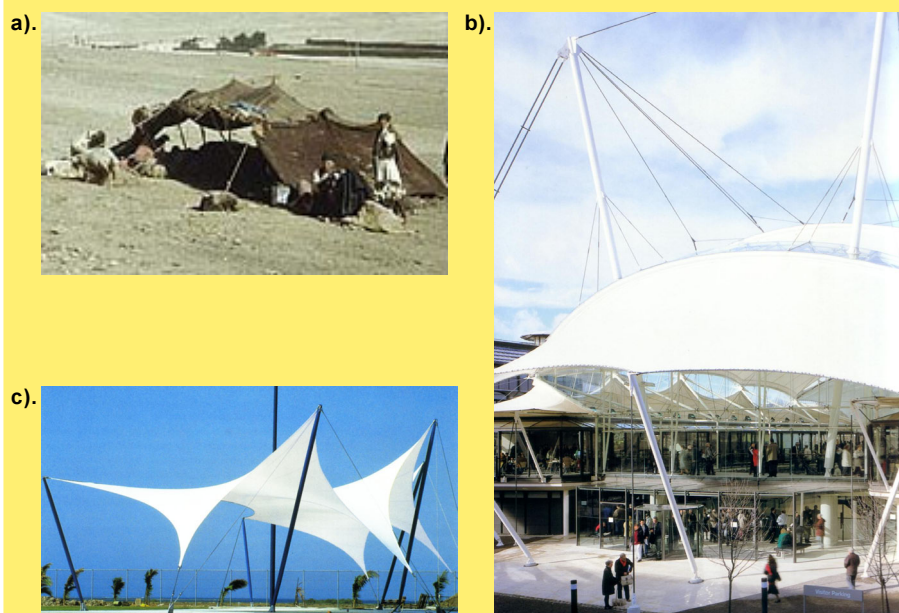
- a). – c). wykonywanie szalastów z trzciny w południowym Iraku, patrz rys. 2.2;
d). – f). modułarna sprężona powłoka pneumatyczna; patrz rys. 5.22, 5.24 i 5.48

Analizując ogromną różnorodność oraz indywidualny charakter form i rozwiązań technicznych stosowanych we współczesnych konstrukcjach membranowych można stwierdzić, że tego rodzaju systemy konstrukcyjne odznaczają się dużym potencjałem rozwojowym.

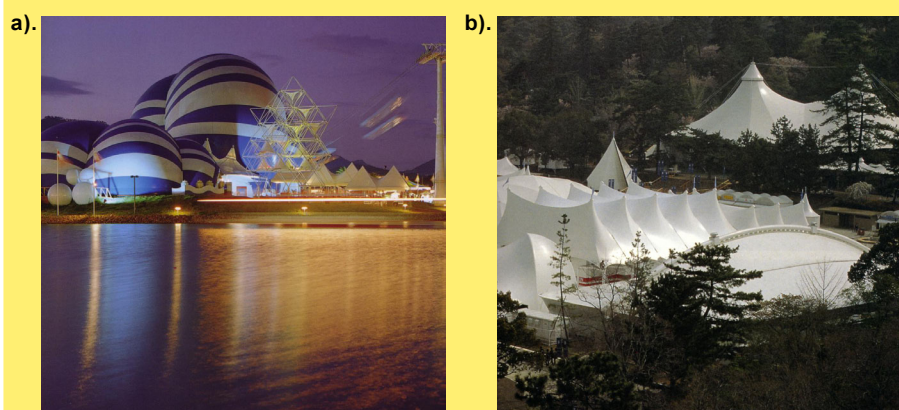
Współczesne możliwości technologiczne, przejawiające się przede wszystkim w stosowaniu wysokowytrzymałych materiałów, w metodach wykonywania połączeń, a także w dostępnych sposobach analizy obliczeniowej i modelowania, rozwinęły się odrębnie, w stosunku do wspomnianych wyżej tradycyjnych koncepcji. Okazały się jednak ważnym impulsem do ich reaktywacji w zakresie form architektonicznych i rozwiązań technicznych elementów składowych, umożliwiając ich nowe zastosowania funkcjonalne.

Prostota i czytelność rozwiązań konstrukcyjnych pozwala na ich stosowanie w obiektach o różnej skali i wykonywanych z różnych materiałów. Ujawnia się przy tej okazji unikalna cecha konstrukcji membranowych. O ile w obiektach naturalnych i w większości konstrukcji tworzonych przez człowieka, zmiana wielkości obiektu powoduje również zmianę jego proporcji, o tyle w konstrukcjach membranowych efekt ten jest w zasadzie nie występuje. Konstrukcje wielkich obiektów są równie smukłe i delikatne, jak konstrukcje obiektów znacznie mniejszych, rys. 6.11.

Zastosowanie konstrukcji membranowych umożliwia uzyskanie form przestrzennych trudno definiowalnych lub wręcz niemożliwych do uzyskania w innych rodzajach konstrukcji. Pozwala to na kreowanie własnej, specyficznej estetyki — osobliwego świata namiotów, rys. 6.12.



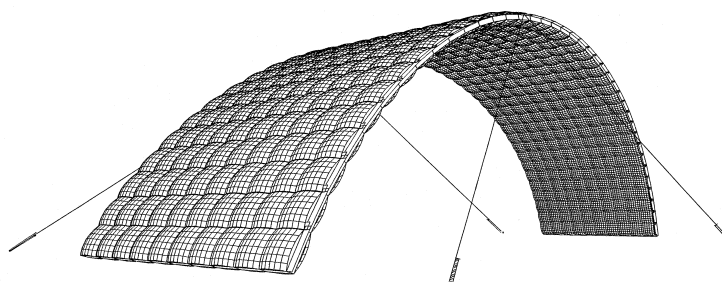
Rys. 6.11
skala obiektu a proporcje elementów w konstrukcjach membranowych:
a). namiot koczowniczy z okolic Kabulu
ilustracja za [233]
b). Dubai Creek Marina
ilustracja za [28]
c). Amenity Building, Nottingham
ilustracja za [28]



Rys. 6.12
a). Big Wave Pavilion na wystawie Ocean and Islands Expo'89 w Hiroszimie
b). Kirin Pavilion na wystawie Silk Road Expo'88 w Nara
ilustracje za [23]

Możliwości kształtowania konstrukcji poprzez deformację geometryczną uległy znacznemu poszerzeniu wraz z pojawieniem się techniki samowypiętrzania. Pozwala ona na połączenie w jednej operacji technologicznej procesu kształtowania konstrukcji oraz jej montażu. Prowadzi to do znacznego uproszczenia i skrócenia czasu realizacji obiektów oraz ogranicza ilość i rodzaj niezbędnego sprzętu montażowego.

W świetle przeprowadzonej analizy trudno jest jednoznacznie wskazać na systemy konstrukcyjne tradycyjnych obiektów namiotowych jako źródła inspiracji dla konstrukcji samowypiętrzalnych. Ich pierwsze zastosowanie miało miejsce przed około dwudziestu laty, w odniesieniu do metalowych konstrukcji prętowych. Zaproponowana w niniejszej pracy metoda deformacji geometrycznej umożliwia znaczne poszerzenie zakresu stosowania techniki samowypiętrzania rozciągając ją również na konstrukcje membranowe, rys. 6.13.



Rys. 6.13
najprostsza forma
samowypiętrzalnej
modularnej powłoki
pneumatycznej:
powłoka walcowa

Metoda deformacji geometrycznej, stosując historycznie sprawdzone koncepcje konstrukcyjne przy użyciu współcześnie dostępnych środków technicznych, umożliwia takie kształtowanie konstrukcji obiektów, aby mogły one szybko i w stosunkowo prosty sposób uzyskać zaprojektowaną postać. Obiekty realizowane za pomocą takich systemów konstrukcyjnych mogą być stosowane do wielu celów użytkowych, zarówno o charakterze stałym jak i tymczasowym oraz uzyskiwać jednocześnie interesujące formy architektoniczne.

* * *

7. Bibliografia

1. [b.a.], *Advanced FRPs for Civil Engineering*, broszura firmy SIREG S.p.A, Mediolan 2000
2. [b.a.], *Bainbridge Sailcloth*, broszura firmy Bainbridge, 2001
3. [b.a.], *Cable structures*, Katalog firmy Pfeifer, Memlingen 2002
4. [b.a.], *Cables de Structure*, Katalog firmy Trefileurope, Bourg-en-Bress, Francja, 1999.
5. [b.a.], *Carbon fiber composite cable*, broszura firmy Tokyo Rope, Tokyo 2000
6. [b.a.], *Casted iron joints*, materiały firmy Hitachi-Kizai, Tokyo 2001
7. [b.a.], *Coated fabrics*, broszura firmy Mehler Haku GmbH Hückelhoven (Niemcy) 2003
8. [b.a.], *Cuben Fiber*, broszura firmy Cuben Fiber Corp., USA, 2002
9. [b.a.], *Detan Tension Rod System. Guidelines for Design and Installation*, materiały firmy Deha Ankersysteme GmbH & Co. KG, Gross-Gerau (Niemcy) 1998
10. [b.a.], *EASY. Lightweight structure Design, User Manual*. Technet GmbH, Berlin 2002
11. [b.a.], *Elvstrom Sobstad Racing Sails*, broszura firmy Elvstrom Sobstad, Dania/USA, 2003
12. [b.a.], *Fibers for the World*, Honeywell International Inc., Colonial Heights (USA), 2003
13. [b.a.], *Fibre Reinforced Plastic Mooring Lines. Joint Industry Project. Revision 3*, Deepsea Engineering & Management Ltd., 13 March 2002 (DeepSea Ref: FRPJIPRev3)
14. [b.a.], *Galfan Technology*, broszura firmy Le Four Industriel Belge (FIB), Brussels 2003
15. [b.a.], *Galfan Zn-AL alloy galvanized sheet*, broszura firmy Sollac, Francja, 2000
16. [b.a.], *Gore Industrial Products*, broszura firmy W.L. Gore & Associates, Putzbrunn (Niemcy) 2003
17. [b.a.], *Heytex membrane. Coated products for architectural structures*, broszura firmy Julis Heywinkel, Bramsche (Niemcy) 2002
18. [b.a.], *Hochleistungs-Förderseile*, materiały firmy Tréfileurope, Francja 1997
19. [b.a.], *Hochleistungs-Spezialseile*, materiały firmy Tréfileurope, Francja 1997
20. [b.a.], *Inflated Roof Tops Boston Tent Theater*, Progressive Architecture, Vol.40, October 1959, s. 83
21. [b.a.], *Macalloy 460 Tension Systems*, materiały firmy McCalls Special Products, Sheffield (Wlk. Brytania) 2002
22. [b.a.], *Membrane Design in Japan (1967-1990)*, Shinkenchiku-sh Co. Ltd., Tokyo 1990
23. [b.a.], *Membrane Structures*. Taiyo Kogyo Corporation. Vol.1, Osaka 1991
24. [b.a.], *Naizil Special Fabrics for Frame Supported and Air-inflated Structures*, broszura firmy La Plastiveneta S.p.a., Campodarsego (Włochy) 2002
25. [b.a.], *Poradnik Mechanika*, WNT, Warszawa 1970
26. [b.a.], *Pręty sprężające Macalloy*, materiały firmy McCalls Special Products, Sheffield 1998
27. [b.a.], *Rotary 3DL Mould Sail Production*, broszura firmy North Sails UK Ltd., 2003
28. [b.a.], *Skyspan*, broszura firmy Skyspan, Rimstig (Niemcy) 2001
29. [b.a.], *Some textile history*, The School of Fibre Science and Technology, University of New South Wales, Sydney 2003

30. [b.a.], *Specialty Architectural Products*, broszura firmy Birdair, Amherst (USA) 2000
31. [b.a.], *Super corrosion protection prestressing strand*, Fudo Building Research Co. Ltd., Tokyo 2000
32. [b.a.], *Tape-Drive Sails*, broszura firmy UK Sailmakers, 2000
33. [b.a.], *Technical Data on CFCC*, materiały firmy Tokyo Rope, Tokyo 1993 i 2001
34. [b.a.], *Technika wantowa Freyssinet (Freyssinet Stay Cables) tłum. Maciej Hildebrand*, materiały firmy Freyssinet (Francja), Wrocław 2002
35. [b.a.], *The architectonic textiles for buildings*, broszura firmy Ferrari S.A., La Tour du Pin (Francja) 2000
36. [b.a.], *Tokyo Rope Bulletin*, biuletyn firmy Tokyo Rope, vol. 51, 2001
37. [b.a.], *Twaron – The Power of Aramid. Ropes and Cables*, broszura firmy Teijin Twaron BV, Arnhem 2001
38. [b.a.], *Vectran – Grasp The World Of Tomorrow. Engineering Data. Technology*, broszura firmy Celanese Acetate LLC, Charlotte, North Carolina (USA) 2000
39. [b.a.], *Why Galfan? Performance characteristics of coated steel products*, Galfan Technology Centre Inc., University of Pittsburgh Applied Research Center, 2003
40. [b.a.], *Wire Ropes Industries. Technical Information. Rope terms & information*, Wire Ropes Industries, Pointe-Claire USA, 2003
41. [b.a.], *World's first air-supported stainless steel roof built for Canadian university*, Nickel Topics 2/1979, s. 7-10
42. Aeberhard H.U. et al., *External post-tensioning*, VSL International Ltd., Lyssach (Szwajcaria) 1992.
43. Allami A.F., *A'in-i Akbari (The Institutions of Akbar)*, transl. H. Blochmann & H.S. Jarret, 3 vols., Bibliotheca Indica, Asiatic Society of Bengal, Calcutta 1873-94
44. Andrews P.A., *Felts and pavilions: the Nomadic tradition and its interaction with Princely Tentage*, Vol. 1, 2, Melisende, London
45. Andrews P.A., *Nomad tent types in the Middle East. Part 1 – Framed tents*, Vol. 1 – Text, Beihefte zum Tübinger Atlas des Vorderen Orients: Reihe B (Geisteswissenschaften) Nr. 74/1/1, Dr. Ludwig Reichert Verlag, Wiesbaden 1997
46. Andrews P.A., *Nomad tent types in the Middle East. Part 1 – Framed tents*, Vol. 2 – Illustrations, Dr. Ludwig Reichert Verlag, Wiesbaden 1997
47. Andrews P.A., *Zwiebelkuppel und Gitterzelt*, [w:] Rainer Graefe (ed.), *Zur Geschichte des Konstruierens*, Fourier Verlag, Wiesbaden 1989
48. Athenaeus, *Deipnosophistae* (tłum. C.D. Yonge), H.G. Bohn, London 1854
49. Αθηναίου, *Δειπνosoφισται*, Ex officina Caroli Tauchni, Lipsk 1834
50. Aziz A., *Thrones, tents and their furniture used by the Indian Mughuls*, Lahore, A. Aziz, 1970
51. Bach K., Burkhardt B., Otto F., *Forming bubbles (IL 18)*, Institute für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1987
52. Balz M., Gühring J., *Botanic shell structures*, [w:] Proc. of the IASS 2001 International Symposium on „Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures”, October 2001, Nagoya, TP 128.
53. Barucki T., *Maciej Nowicki*, Arkady, Warszawa 1986
54. Belenya E.I., *Prestressed load-bearing metal structures*, Mir Publishers, Moscow, 1977
55. Berger H., *Light structures. Structures of light. The art and engineering of tensile structures*, Birkhäuser, Basel 1995
56. Bergermann R., Sobek W., *Die Überdachung der antiken Arena in Nîmes*, Bauingenieur 6/1992, s.213-220

57. Bernhardt M.L., *Sztuka grecka V w. p.n.e.*, wyd. III popr. i rozszerzone, PWN, Warszawa 1991
58. Bini D., *A new pneumatic technique for construction of thin shells*, [w:] Feder D. (ed.), Proc. of the 1st International Colloquium on Pneumatic Structures, May 11-12 1967, University of Stuttgart-IASS, Stuttgart 1967, s. 52-55
59. Bird W.W., *The development of pneumatic structures; past, present, future*, [w:] Feder D. (ed.), Proc. of the 1st International Colloquium on Pneumatic Structures, May 11-12 1967, University of Stuttgart-IASS, Stuttgart 1967, s. 1-9
60. Black J.H. (red.), *Textile terms and definitions. Sixth Edition*, The Textile Institute, Manchester 1970.
61. Blum R., *Design Process of a Membrane Structure and the Relevant Material Properties*, [w:] „Designing Tensile Architecture”, Bruksela 2003
62. Blum R., *Material Properties of Coated Fabrics for Textile Architecture*, [w:] Mollaert, Marijke (ed), The Design of membrane and lightweight structures. from concept to execution, VUB Press, Brussels 2000, s. 63-88
63. Blum R., *Proposal for a general approval of coated fabrics test methods*, [w:] Tensinet Information Package No.1, Brussels 2002
64. Bober W., *Wielowarstwowe struktury przestrzenne jako konstrukcje płaskich przekryć dachowych*, praca doktorska, promotor Prof. Janusz Rębielak, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2003
65. Borusiewicz, *Władysław Konstrukcje budowlane dla architektów*, Arkady, Warszawa 1978
66. Broneer O., *The tent of Xerxes and the Greek Theater*, University of California Publications in Classical Archaeology, Vol. 1, No. 12, March 1944, s. 305-312
67. Бубнер Э., *Материалы и конструктивные формы пневматических сооружений и их применение в ФРГ*, [w:] Ермолов В.В. (ред.), Пневматические строительные конструкции, Стройиздат Москва 1983, s. 83-111
68. Bujak J., Midak J., *Zaciski i zakotwienia cięgien stalowych stosowane w konstrukcjach budowlanych*, Inżynieria i Budownictwo 8/1972, s. 322-326
69. Bulson P.S., *The behaviour of some experimental inflated structures*, [w:] Feder D. (ed.), Proc. of the 1st International Colloquium on Pneumatic Structures, May 11-12 1967, University of Stuttgart-IASS, Stuttgart 1967, s. 68-77
70. Buonopane S.G., Billington D.P., *Theory and history of suspension bridge design from 1823 to 1940*, Journal of Structural Engineering (ASCE), Vol. 119, No. 3, 1993.
71. Burford N., Gengnagel C., *A morphology of mobile shelters systems*, [w:] R. Motro (ed.), „Shell and spatial structures from models to realization”, Proc. of. International IASS Symposium, September 20-24, Montpellier, s.394-395
72. Burgoyne Ch.J., *Advanced Composites in Civil Engineering in Europe*, Structural Engineering International 4/ 99, s. 1-7
73. Burkhardt B., *Das Historische Zelt. Aspekte zu Form, Konstruktion und Anwendung*, [w:] U. Hangleiter, J. Hennicke, W. Winter (eds), Proc. of International Symposium on Wide Span Surface Structures, Universität Stuttgart, 6-9 April 1976, Vol. 2, 7.4-1 ÷ 7.4-5
74. Burkhardt B., *Die Architektur der Zelte. Formen und Konstruktionen im Zeltbau von 1850 bis heute*, Arcus 4/1985
75. Burkhardt B., *Geschichte des Zeltbaus*, Detail 6/2000
76. Burkhardt B., Otto F., Schmall I. et al., *Tents (IL 16)*, Institute für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1976

77. Burns B., *History of the Atlantic Cable & Submarine Telegraphy. Wire rope and the submarine Cable Industry*, FTL Design, New York 2003
78. Cabaj J., Kowal Zb., *Przekrycia ciągnowe*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej 22, seria: Monografie 7, Wydawnictwo PWR. Wrocław 1977.
79. Costello G.A., *Theory of Wire Rope*, Springer-Verlag, New York 1997
80. DeJke V., *Durability of FRP Reinforcement Concret*, Chalmers University of Technology, Göteborg 2001
81. DeLony E., *Context for World Heritage Bridges*, ICOMOS – International Council on Monuments and Sites (A joint publication with TICCIH), Paris 1996
82. Dessauce M., *The inflatable moment. Pneumatics and protest in '68*, Princeton Architectural Press, New York 1999
83. Dolan Ch.W., Hamilton H.R. III, Bakis Ch.E., Nanni A., *Design Recommendations for Concrete Structures Prestressed with FRP Tendons. Final Draft*, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation Washington, DC 20590, August 1, 2001, (FHWA Contract DTFH61-96-C-00019)
84. Dove A.B. (ed.), *Ferrous Wire. Volume 1: The Manufacture of Ferrous Wire*, The Wire Association International Inc., Guilford, Connecticut, USA 1989
85. Dove A.B. (ed.), *Ferrous Wire. Volume 2: The Manufacture of Ferrous Wire Products*, The Wire Association International Inc., Guilford, Connecticut, USA 1989
86. Drüsedau H., Dickson M., Hennicke J., *Air hall handbook (IL15)*, Institute für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1982
87. Dürr H., *Seilnetze. Planung, Berechnung, Ausführung und Werkplanung*, Stahlbau 8/2000, s. 585-594
88. Durville D., *Numerical simulation of the mechanical behavior of textile structures at a mesoscopic scale*, [w:] Onate E. and Kröplin B. (eds), *Textile Composites and Inflatable Structures*, Proceedings of "Structural Membranes" International Conference Barcelona 2003, s. 310-315
89. Escrig F., *General survey of deployability in architecture*, [w:] F. Escrig, C.A. Brebbia (eds), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, WIT Press, Southampton Boston 1996, s. 3-22
90. Faegre T., *Tents. Architecture of the Nomads*, John Murray, London 1979
91. Ferrier R.W. (ed.), *The Arts of Persia*, Yale University Press, New Haven & London 1989
92. Forster B., *Engineered Fabric Architecture – Characteristic and Behaviour*, [w:] Mollaert, Marijke et al. (eds), „Designing Tensile Architecture”. Proceedings of International Tensinet 2003 Symposium, Brussels 2003, s. 28-43
93. Forstner D., *Świat symboliki chrześcijańskiej*, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 1990
94. Gańko A., Dziwulski J., *Jachtowe roboty bosmańskie*, Wydawnictwo Sport i Turystyka, Warszawa 1978
95. Geiger D.H., Majowiecki M., *Structures pneumatiques de grande portée, renforcées par des câbles en acier*, Acier-Stahl-Steel 9/1977, s. 281-288
96. Gilliam J., *History of Sailing Yacht Masts, Rigging and Sails: 1900-Present day*, (niepublikowane)
97. Goodwin F.E., Wright R.N., *The Process Metallurgy of Zinc-Coated Steel Wire and Galfan® Bath Management*, International Lead Zinc Research Organization, 2003
98. Graefe R., *Hängedächer des 19. Jahrhunderts*, [w:] Rainer Graefe (ed.), *Zur Geschichte des Konstruierens*, Fourier Verlag, Wiesbaden 1989, s. 168-187

99. Graefe R., *Vela Erunt. Die Zeltdächer der römischen Theater und ähnlicher Anlagen*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz am Rhein, 1979
100. Graefe R., *Virtuose Sparsamkeit*, Deutsche Bauzeitung 7/1990, s. 24-31
101. Greiner S., *Realistic concept for building metal structures*, [w:] H. Nooshin (ed.), Third International Conference on Space Structures, Elsevier, London New York, 1984, s. 929-934
102. Gründig L., Moncrieff E., *Computational Modelling of Lightweight Structures: Form-finding, Load Analysis and Cutting Pattern Generation*, [w:] Mollaert, Marijke (ed.), The Design of membrane and lightweight structures. from concept to execution, VUB Press, Brussels 2000, s. 237-259
103. Guyon Y., *Béton Précontraint. Étude Théorique et Expérimentale (3e édition)*, Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Éditions Eyrolles, Paris 1958
104. Habermann K.J., *Zu Luft und zu Lande. Stationen textiler Konstruktionen*, Detail 6/1994, s. 774-775
105. Habermann K.J., *Zur Geschichte der Zirkuszelte. Konstruktionen mit Holz, Stahl und textilen Membranen*, Detail 8/1996, s. 1182-1183
106. Hajduk J., Osiecki J., *Ustroje ciągnowe. Teoria i obliczanie*, WNT, Warszawa 1970
107. Hanson D., Abbott B., *Visit to North Sails 3DL Fabrication Plant*, (niepublikowane)
108. Happold E., *A history of convertible roofs*, Architectural Design 7/1973
109. Hennicke J., *The formfinding of grid shells. Comments on the fundamentals of a new lightweight structure*, [w:] U. Hangleiter, J. Hennicke, W. Winter (eds), Proc. of International Symposium on Wide Span Surface Structures, Universität Stuttgart, 6-9 April 1976, Vol. 1, 4.4-1 ÷ 4.4-6
110. Hennik van P.C., Wagemans L.A.G., *Revival of pneumatic formwork for the construction of monolithic (irregular) shells*, [w:] R. Motro (ed.) „Shell and spatial structures from models to realization”, Proc. of International IASS Symposium, September 20-24, Montpellier, s. 450-451
111. Herwig O., *Featherweights. Light, Mobile and Floating Architecture*, Prestel Verlag, Munich, 2003,
112. Herzog T., *Pneumatische Konstruktionen. Bauten aus Membranen und Luft*, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1976
113. Holgate A., *The art of structural engineering. The work of Jörg Schlaich and his team*, Edition Axel Menges. Stuttgart / London 1997
114. Hooks J., Siebels J. et al., *FHWA Study Tour for Advanced Composites in Bridges in Europe and Japan*, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, Washington, DC 20590, October 1997
115. Houston G.W. (ed.), *Roman Textile Industry*, [w:] Roman Technology Handbook, University of North Carolina, Chapel Hill, USA 1997
116. Ishii K., *Membrane Designs and Structures in the World*, Shinkenchiku-sha Co. Ltd, Tokyo 1999
117. Ishii K., *Membrane Structures in Japan*, SPS Publishing Company, Tokyo 1995
118. Jackowski T., Szosland J., Korliński W., *Podstawy mechanicznej technologii tekstyliów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987

119. Енджиевский Л. В. Караченцев Е. Н., *Блок-фермы покрытий из стального предварительно напряженного профилированного листа, совмещающего ограждающие и несущие функции*, [w:] J. B. Obrębski, L. Małyszko, R. Szmit (eds), Konferencja Naukowo-Techniczna „Aktualne problemy budownictwa”, kwiecień 2003, Olsztyn-Kortowo, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn, s. 61-70
120. Ермолов В.В., *Прошлое, настоящее и будущее пневматических строительных конструкций*, [w:] Ермолов В.В. (ред.), Пневматические строительные конструкции, Стройиздат, Москва 1983, s. 5-47
121. Karbhari V.M., *WTEC Study on Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan. Final Report*, International Technology Research Institute, World Technology Evaluation Center (WTEC), Loyola College Baltimore, August 1998
122. Karczewski J., *Sprężone konstrukcje stalowe*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1981
123. Kawaguchi M., *A few nonlinear topics in structural design*, [w:] Hangai Y., Mashita K., Mitsui K. (eds), „Nonlinear analysis and design for shell and spatial structures”, Proceedings of the Seiken-IASS Symposium, Tokyo 1993
124. Kiefer M., *Beispiele für Textiles Bauen – Ausgeführte und projektierte Bauten*, Bauingenieur 6/1995, s. 263-269
125. Kłobukowski J., Bródka J., *Sprężone konstrukcje stalowe*, Arkady, Warszawa 1965
126. Ko F.K., *Textile structural composites for building constructions*, [w:] P. Hamelin, G. Verchery (eds), Textile Composites in Building Construction. Proceedings of the International Symposium „Composite Materials with Textile Reinforcement for Use in Building Construction and Related Applications”, Lyon July 16-18, Part 3, s. 43-60
127. Koch K.M., *Bauen mit konstruktiven Membranen – Budgetierung, technische Bearbeitung und Ausfrumg*, Bauingenieur 12/1995, s. 523-528
128. Koelle H.-H., *Moonbase 2015. Model of a near-term Lunar Base*, Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, ILR Mitt. 341 (2000), 1.1.2000, Berlin 2000
129. Koslowski H.J., *Dictionary of Man-Made Fibers*, International Business Press Publishers, Frankfurt am Main 1998
130. Kowalczyk J., Steininger Z., *Liny stalowe*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1963
131. Kronenburg R., *Portable Architecture*, 3rd ed., Elsevier / Architectural Press, Oxford 2003
132. Kuś St., *Stal do konstrukcji sprężonych w świetle normy europejskiej i norm polskich*, Inżynieria i Budownictwo 12/1995, s. 652-655
133. Kuś St., *Trwałość konstrukcji sprężonych. Doświadczenia polskie na tle doświadczeń światowych*, Inżynieria i Budownictwo 3/1995, s. 158-163
134. Kuś St., Misiak R., *Własności wytrzymałościowe splotów i lin*, Inżynieria i Budownictwo, 7/1968
135. Kuś St., Plewako Zb., Kamel Z., *Cięgna z włókien szklanych w konstrukcjach sprężonych*, Inżynieria i budownictwo 10/1992, s. 376-381
136. Levy M., *From Shells to Membranes*, [w:] R. Motro (ed.), „Shell and spatial structures from models to realization”, Proc. of. International IASS Symposium, September 20-24, Montpellier, s. 18-19
137. Lewis W.J., *Tension structures*, Thomas Telford, London 2003
138. Maass P. (red.), *Cynkowanie ogniowe*, Placet, Warszawa 1998

139. Mańkowski T., *Les tentes orientales et les tentes polonaises*, Rocznik orientalistyczny, XXII, 1, Warszawa 1957
140. Mańkowski T., *Sztuka islamu w Polsce w XVII i XVIII w.*, Nakładem Polskiej Akademii Umiejetności, Kraków 1935
141. Mańkowski T., *Wyprawa po kobierce do Persji w roku 1601*, Rocznik Orientalistyczny, XVII, Kraków 1953
142. Markham C.R. (Ruy González de Clavijo), *Narrative of the embassy to the court of Timour at Samarcand A.D. 1403-6 / Translated for the first time with notes, a preface and an introductory life of Timour Beg by Clements R[obert] Markham*, Lenox Hill Pub. & Dist. Co. (Burt Franklin), New York 1970 (Works issued by the Hakluyt Society, No. 26 - Reprinted by permission, originally published 1859)
143. Masajtis J., *Budowa i projektowanie tkanin*, Politechnika Łódzka 1991, skrypt
144. Mayr G., Gabriel K., *Seilkonstruktionen – Untersuchungen an Netzlitzen, -knoten und -endbeschlägen, Weitgespannte Flächentragwerke*, SFB 64 – Universität Stuttgart, Werner-Verlag, Düsseldorf 1975
145. Michalak H., *Wpływ optymalnych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych na kształtowanie formy architektonicznej przekryć podwieszonych dużych rozpiętości*, Rozprawa doktorska w Politechnice Warszawskiej, promotor Prof. Kazimierz Szulborski, Warszawa 1996
146. Mollaert M., *Tensile Membrane Buildings and Building Components*, [w:] Mollaert, Marijke et al. (eds), „Designing Tensile Architecture”. Proceedings of International Tensinet 2003 Symposium, Brussels 2003, s. 10-27
147. Moncrieff E., *Extreme Patterning: Lessons From the Cutting Pattern Generation of the Mina Valley Tent City and the German Federal Chancellery Projects*, [w:] Mollaert, Marijke et al. (eds), „Designing Tensile Architecture”. Proceedings of International Tensinet 2003 Symposium, Brussels 2003, s. 66-81
148. Moncrieff E., *Systems for Lightweight Structure Design: The State-of-the-Art and Current Developments*, [w:] Onate E. and Kröplin B. (eds), Proceedings of International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Barcelona, 30 June - 2 July 2003, CIMNE Barcelona, s.54-63
149. Moore C.J., Rawlings B., *Inflated metal structures – some small and large scale tests*, Proc. of Intern. Symposium on Pneumatic Structures. TU Delft 1972, poz.5.8
150. Moritz K., *Materialeinsatz und Konfektionierung von Membranwerkstoffen*, Stahlbau 8/2000
151. Münsch R., Reinhardt H.-W., *Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter*, Bauingenieur 6/1995, s. 271-275
152. Nappo S., Pompeje. *Przewodnik po starożytnym mieście*, Arkady, Warszawa 2000
153. Nelson J., *The history of rope making*, The Cordage Institute 2002
154. Off R., *Membranbeispiele allgemein*, I.M.S. e.V. Institut for membrane and shell technologies, Bobingen 2003 (niepublikowane, korespondencja prywatna)
155. Otto F., „...there's still plenty of scope...” – *Frei Otto on the Future Tent Construction*, Detail 6/2000, s. 965-970
156. Otto F., *Architecture et Bionique. Constructions naturelles*, Editions Delta et Spes, Denges (Switzerland), 1985
157. Otto F., *Dachy wiszące*, Arkady, Warszawa 1959
158. Otto F., *Zugbeanspruchte Konstruktionen, Bd.1*, Frankfurt n. Menem / Berlin 1962

159. Otto F., *Zugbeanspruchte Konstruktionen*, Bd.2, Frankfurt n. Menem / Berlin 1965
160. Otto F., Stromeyer P., *Tents*, Journal of the American Institute of Architects, Vol. 35, February/1961 s. 77-85, April/1961 s. 109-116
161. Palucka T., Bensaude-Vincent B., *History of composites - overview*, Material Science and Engineering Group, The Dibner Institute for the History of Science and Technology, MIT, Cambridge 2002
162. Pałkowski Sz., *Konstrukcje ciągnowe*, WNT, Warszawa 1994
163. Pałkowski Sz., *Zur statischen Berechnung von Seilkonstruktionen im elastisch-plastischen Bereich*, Bauingenieur, Vol. 67, 1992, s. 359-364
164. Pampuch R. i inni, *Nowe materiały węglowe w technice i medycynie*, PWN, Warszawa 1988
165. Peitgen H-O., Jürgens H., Saupe D., *Granice chaosu. Fraktale*, PWN, Warszawa 1995
166. Piekarski J., *Współczesne rozwiązania konstrukcji lin do mostów i innych podwieszonych konstrukcji inżynierskich*, Inżynieria i Budownictwo 9/1996, s. 524-526
167. Pierelmuter A.W., *Ustroje prętowo-ciężnowe. Podstawy obliczeń*, Arkady, Warszawa 1972
168. Pietrzak J., Rakowski G., Wrześniowski K., *Macierzowa analiza konstrukcji*, PWN, Warszawa-Poznań 1979
169. Piwocka M., *Namioty wschodnie*, Krajowa Agencja Wydawnicza, Warszawa 1982
170. Polo M., *Opisanie świata*, Wyd. Alkazar, Warszawa 1993
171. Pugsley A., Mainstone R.J., Sutherland R.J.M., *The relevance of history*, The Structural Engineer, Vol.53, 9/1975, s. 387-398
172. Regipa R., Villaeys J., Jacobs M., *Pressurised inflatable structures: a remarkable innovation*, [w:] P. Hamelin, G. Verchery (eds), Textile Composites in Building Construction. Proceedings of the International Symposium „Composite Materials with Textile Reinforcement for Use in Building Construction and Related Applications”, Lyon July 16-18, Part 2, s. 181-190
173. Robin T., *Engineering a new architecture*, Yale University Press. New Haven / London 1996.
174. Rudofsky B., *Architecture without architects. A short introduction to non-pedigreed architecture*, The New York Museum of Modern Art, Distributed by Doubleday & Company, Inc., Garden City, New York 1965
175. Rychlewska M., *Namiotnictwo*, [w:] Kamińska J., Turnau I. (red.), Zarys historii włókiennictwa na ziemiach polskich do końca XVIII w., Ossolineum, Wrocław 1966
176. Salecki J., Piechal A., *Liny, węzy, sploty*, Wydawnictwo Junga, Warszawa 1995
177. Sandaker B.N., Eggen A.P., *Die Konstruktiven Prinzipien der Architektur*, Birkhäuser Verlag, Basel-Berlin-Boston, 1994
178. Saul R., Svensson H.S., *On the corrosion protection of stay cables*, Stahlbau 6/1990, s. 165-176
179. Saxe K., Kürten R., *Zur Temperaturabhängigkeit des Kraft-Dehnungsverhaltens PTFE-beschichteter Glasgewebe Bei üblichen Verarbeitungstemperaturen*, Bauingenieur 6/1992, s. 291-296
180. Sayenga D., *Modern history of wire rope*, The Wire Association International Inc., Guildford, Connecticut, USA 2002
181. Scheuermann R., Boxer K., *Tensile Architecture in the Urban Context*, Butterworth Architecture, Butterworth-Heinemann, Oxford 1996
182. Schlaich J., Bergermann R., Sobek W., *Tensile membrane structures*, [w:] Bulletin of IASS, Madrid 1990

183. Schmidt H., *Nanotechnology in Environmental and Hygienic Technologies*, [w:] Mollaert, Marijke et al. (eds), „Designing Tensile Architecture”. Proceedings of International Tensinet 2003 Symposium, Brussels 2003, s. 218-221
184. Schmidt L.C., *Erection of space trusses of different forms by tensioning of near mechanism*, Proc. of the IASS Congress, 11-15 September 1989, Madrid, Vol. 4
185. Schmidt L.C., Dehdashti G., *Hypar space trusses formed by means of post-tensioning*, International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, 25-29 September 1995, Warsaw, Part III, s. 629-636
186. Schmidt L.C., Dehdashti G., *Shape Creation and erection of metal space structures by means of post-tensioning*, G. Park, P. Disney (eds), *Space Structures 4*, Thomas Telford, London 1993, s. 69-77
187. Schmidt L.C., Selby S., *Shape erection of some dome-like space trusses*, International Journal of Space Structures, Vol.16, No. 2, 2001, s. 137-147
188. Schock H.-J., *General remarks on the structural behavior and material characteristics of coated fabrics with reference to PTFE-coated glass fiber fabric*, [w:] P. Hamelin, G. Verchery (eds), *Textile Composites in Building Construction. Proceedings of the International Symposium „Composite Materials with Textile Reinforcement for Use in Building Construction and Related Applications”*, Lyon July 16-18, Part 2, s. 49-58
189. Schock, H.-J., *Soft Shells. Design and technology of tensile architecture*, Birkhäuser, Basel 1997
190. Schuler M., *Innovative Energy Concept for the New Bangkok Airport*, [w:] Mollaert, Marijke et al. (eds), „Designing Tensile Architecture”. Proceedings of International Tensinet 2003 Symposium, Brussels 2003, s. 150-167
191. Schultz H.C., Sobek W., Habermann K.J., *Steel construction manual*, Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel, Switzerland, 2000
192. Sczyslo S., *Brückenseile aus der Sicht der Straßenbauverwaltung. Anforderungen., Erfahrungen, Korrosionsschutz*, Bauingenieur 7/1992, s. 347-358
193. Sedlak V., *Architecture and textile structures, a question of design choice*, [w:] P. Hamelin, G. Verchery (eds), *Textile Composites in Building Construction. Proceedings of the International Symposium „Composite Materials with Textile Reinforcement for Use in Building Construction and Related Applications”*, Lyon July 16-18, Part 2, s. 3-20
194. Senosiain J., *Bio-Architecture*, Elsevier / Architectural Press, Oxford 2003
195. Shaeffer R.E. (ed.), *Tensioned Fabric Structures. A practical information*, Task Committee on Tensioned Fabric Structures, American Society of Civil Engineers, New York 1996
196. Sircovich Saar O., *A new type of hardening structure*, [w:] F. Escrig, C.A. Brebbia (eds), *Mobile and Rapidly Assembled Structures III*, WIT Press Southampton Boston, s. 111-124
197. Sircovich Saar O., *Self-erecting two-layer steel prefabricated arch*, [w:] H. Nooshin (ed.), *Third International Conference on Space Structures*, Elsevier, London-New York, 1984, s. 823-827
198. Sobek W., *Technologische Grundlagen des textilen Bauens*, Detail 6/1994, s. 776-779
199. Sobek W., *Von der Faser zum Gewebe*, Deutsche Bauzeitung 9/1993, s. 74-81
200. Sobek W., Speth M., *Textile Werkstoffe*, Bauingenieur 6/1995, s. 243-250

201. Stauske D., *Drahtseile für Seilbauwerke*, Stahlbau 8/2000, s. 612-618
202. Ströbel D., Singer P., *How to compensate membrane material in warp and weft direction?*, materiał niepublikowany firmy Technet GmbH, Stuttgart 2001
203. Studniczka, F., *Das Symposion Ptolemaios II*, [w:] Abhandlungen der Philologisch-Historischen Klasse der Kueniglich Saechs. Gessell. d. Wiss. 1914, Bd. 30 Nr 2, s. 1-188
204. Svedova J. (red.), *Industrial textiles. Textile Science and Technology vol. 9*, Elsevier, Amsterdam 1990
205. Szablowski J. (red. nacz.), *Odsiecz wiedeńska 1683. Tło historyczne i materiały źródłowe*, Państwowe Zbiory Sztuki na Wawelu, Kraków 1990
206. Szablowski J., *W namiotach wezyrskich*, Polska 1 (125) 1965
207. Szilard R., *Pneumatic structures for lunar bases*, [w:] Feder D. (ed.), Proc. of the 1st International Colloquium on Pneumatic Structures, May 11-12 1967, University of Stuttgart-IASS, Stuttgart 1967, s. 34-47
208. Tarczewski A., *Konstrukcje pneumatyczne. Projektowanie i realizacja*, Arkady. Warszawa 1965
209. Tarczewski R., *Actively adaptable structures*, [w:] G.A.R. Parke, P. Disney (eds), Space Structures 5, Vol. 2, Thomas Telford, London, England, 2002, s. 1501-1510
210. Tarczewski R., *Application of modular pneumatic elements for large span space covers*, [w:] Obrębski J.B. (ed), Lightweight Structures in Civil Engineering, Local Seminar of IASS Polish Chapter Warsaw, Poland, December 1, 2000, Micro-Publisher Jan B. Obrębski Wydawnictwo Naukowe, s. 134-138
211. Tarczewski R., *Bar and pneumatic self-erecting space structures*, [w:] Ciesielski R., Ciszewski B., Gronostajski J., Hawrylak H., Kobiela S. (eds), Proceedings of the International Conference: „Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond”, June 2-5, 1997, Wrocław, Poland, Vol. III, s. 505-513
212. Tarczewski R., *Compensative structures*, [w:] Obrębski J.B. (ed), Proceedings of International Conference on „Lightweight Structures in Civil Engineering”, Warsaw, Poland, 24-28 June, 2002, s. 1009-1011
213. Tarczewski R., *Deployable inflated bridge*, [w:] Onate E., Kröplin B. (eds), Proceedings of International Conference on „Textile Composites and Inflatable Structures”, Barcelona, 30 June - 2 July 2003, CIMNE Barcelona, s. 154-158
214. Tarczewski R., *Modular inflated shells*, [w:] Onate E., Kröplin B. (eds), Proceedings of International Conference on „Textile Composites and Inflatable Structures”, Barcelona, 30 June - 2 July 2003, CIMNE Barcelona, s. 298-303
215. Tarczewski R., *Morphological similarities of primeval tents and contemporary tensile surface structures*, [w:] Obrębski J.B. (ed), Lightweight Structures in Civil Engineering, Local Seminar of IASS Polish Chapter, Warsaw-Częstochowa, Poland, December 3, 2004, Micro-Publisher Jan B. Obrębski Wydawnictwo Naukowe, s. 225-230
216. Tarczewski R., *Przykład zastosowania konstrukcji pneumatyczno-ciężnowej do wykonania konstrukcji mostu składanego*, [w:] J. Obrębski, L. Małyszko, R. Szmit (red.), „Aktualne problemy badawczo-naukowe budownictwa”, Materiały 7 Konferencji Naukowo-Technicznej, Olsztyn-Kortowo, 25-26 kwietnia 2003, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, s. 389-392
217. Tarczewski R., *Self-erecting pneumatic structures*, [w:] F. Escrig & C.A. Brebbia (eds), Proceedings of the Third International Conference on „Mobile and Rapidly Assembled Structures –

- MARAS III", Madrid, June 21-23 2000, WITPRESS, Southampton Boston 2000, s.59-46
218. Tarczewski R., *Shaping of space structures by means of shortening of cable-type bottom chord*, [w:] Obrębski J.B. (ed), *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Local Seminar of IASS Polish Chapter Warsaw, Poland, December 6, 1996 Warsaw, s. 156-163
 219. Tarczewski R., *Variable rigidity as a tool of shaping of self-erecting structures*, [w:] F. Escrig & C.A. Brebbia (eds), *Proceedings of the Third International Conference on „Mobile and Rapidly Assembled Structures – MARAS III”*, Madrid, June 21-23 2000, WITPRESS, Southampton Boston 2000, s.125-129
 220. Temple R., *Geniusz Chin. 3000 lat nauki, odkryć i wynalazków*, Ars Polona, Warszawa 1994
 221. Tobolczyk M. *Narodziny architektury*, PWN, Warszawa 2000
 222. Topham S., *Blowup. Inflatable art, architecture and design*, Prestel-Verlag, Munich 2002
 223. Tsuboi Y. et al., *IASS Recommendations for air-supported structures*, International Association for Shell and Spatial Structures, Madrid 1985
 224. Tuchman J.L., Ho-Chul Sh., *Olympic domes first of their kind. New vision of tension concept produces lightweight roof*, *Engineering News-Record*, March 6, 1986
 225. Vandenberg M., *Cable Nets*, Academy Editions, London 1998
 226. Vasari G., *Żywoty najslawniejszych malarzy, rzeźbiarzy i architektów (przekł. K. Estreichera)*, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1980
 227. Wasilewski Zb.J., *Mechanizmy i części maszyn budowlanych*, [w:] Kalabiński B. (red.), *Technologia robót zmechanizowanych*, t. VII, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1992
 228. Waterson R., *Mobilität in der traditionellen Architektur*, *Detail* 8/1998, s. 1372-1374
 229. Whitehouse D., *Double bubble is no trouble*, *BBC News I Sci/Tech*, 21 March, 2000
 230. Williams R., *The geometrical foundation of natural structure. A source book of design*, Dover Publications, Inc. New York 1979
 231. Wuensch B., *On the history of materials research (an interview conducted at the Dibner Institute)*, The Dibner Institute for the History of Science and Technology, MIT Cambridge, 9 Jan 2001
 232. Normy

[N-1]	PN-P-85009:1996 Tekstylnia szklane. Terminologia.
[N-2]	PN-ISO 6938:1998 Tekstylnia. Włókna naturalne. Nazwy rodzajowe i definicje.
[N-3]	PN-ISO 2076:1995 Włókna chemiczne. Nazwy rodzajowe
[N-4]	PN-72/M-80001 Druty stalowe. Podział i sposób budowy oznaczenia.
[N-5]	PN-92/M-80264 Liny stalowe. Terminologia. (idt ISO 2532:1974)
[N-6]	PN-91/H-84028 Stal niskostopowa przeznaczona na walcówkę do produkcji drutu
[N-7]	PN-EN 2232:1996 Druk okrągły ciągniony na liny stalowe ogólnego przeznaczenia i na liny stalowe o dużej średnicy. Wymagania i badania.
[N-8]	PN-M-80285:1997 Druty kształtowe do lin. Wymagania i metody badań.
[N-9]	PN-ISO10092:2000 Liny stalowe o dużej wytrzymałości. Wymagania.
[N-10]	PN-71/M-80014 Druty stalowe gładkie do konstrukcji sprężonych.
[N-11]	prEN 10138 Stale sprężające.

- [N-12] PN-71/M-80236 Liny do konstrukcji sprężonych.
- [N-13] PN-ISO 2408:1996 Liny stalowe ogólnego przeznaczenia. Charakterystyki.
- [N-14] PN-ISO 8369:2000 Liny stalowe o dużych średnicach.
- [N-15] PN-93/P-01734 Tekstylnia. Scalona tablica zamienników zastępująca tradycyjne numery nitok przez zaokrąglone wartości w Systemie Tex.
- [N-16] PN-ISO 3578:1996 Liny stalowe. Oznaczenia podstawowe.
- [N-17] PN-ISO 2078:1993 Tekstylnia szklane. Nitki. Oznaczenia
- [N-18] PN-EN ISO 13002:2001 Włókna węglowe. System oznaczeń przędz filamentowych.
- [N-19] ISO 10618:1999 Carbon fibre. Determination of tensile properties of resin-impregnated yarns.
- [N-20] PN-89/P-01706 Tekstylnia. System Tex.
- [N-21] PN-ISO 1139:1998 Tekstylnia. Oznaczanie nitok.
- [N-22] PN-ISO 4345:1995 Liny stalowe. Włókienne rdzenie główne. Wymagania.
- [N-23] PN-EN 698:1999 Liny włókienne ogólnego zastosowania. Manila i sizal.
- [N-24] PN-EN 1261:1999 Liny włókienne ogólnego zastosowania. Konopie.
- [N-25] PN-90/P-85014 Wyroby powroźnicze lniane.
- [N-26] PN-EN 697:1999 Liny włókienne ogólnego zastosowania. Poliester.
- [N-27] PN-EN 696:1999 Liny włókienne ogólnego zastosowania. Poliamid.
- [N-28] PN-EN 699:1999 Liny włókienne ogólnego zastosowania. Polipropylen.
- [N-29] PN-EN 700:1999 Liny włókienne ogólnego zastosowania. Polietylen.
- [N-30] PN-92/P-01738 Tekstylnia. Morfologia włókien i nitok. Terminologia. (idt ISO 8159:1987)
- [N-31] PN-82/P-01730 Wyroby włókiennicze. Nazwy.
- [N-32] PN-ISO 1968:1999 Liny i powrozy. Terminologia.
- [N-33] PN-ISO 9554:1999 Liny włókienne. Wymagania ogólne.
- [N-34] PN-EN 919:1999 Liny włókienne ogólnego zastosowania. Wyznaczanie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych.
- [N-35] PN-90/P-85013 Wyroby powroźnicze konopne.
- [N-36] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [N-37] PN-ISO 3108:1996 Liny stalowe ogólnego przeznaczenia. Określenie rzeczywistego obciążenia niszczącego.
- [N-38] PN-EN10244-2:2002(U) Druć stalowy i wyroby z drutu. Powłoki z metali nieżelaznych na drucie stalowym. Część 2: Powłoki z cynku lub stopu cynku.
- [N-39] PN-92/G-46603 Liny stalowe okrągłe. Wyznaczanie stopnia zużycia metodą magnetyczną.
- [N-40] BN-90-6859-04 Włókno szklane i wyroby z niego. Roving.
- [N-41] PN-EN ISO 1421:1998 Płaskie wyroby tekstylne, powleczone gumą lub tworzywami sztucznymi. Wyznaczanie wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia przy zerwaniu.
- [N-42] PN-93/P-04966 Płaskie wyroby tekstylne, powleczone gumą lub tworzywami sztucznymi. Wyznaczanie wytrzymałości na rozdzielanie. (idt ISO 4674:1977)

233. Strony internetowe:

http://ant.edb.miyakyo-u.ac.jp/INTRODUCTION/Gakken79E/Page_18.html
<http://dakota84.free.fr/galerie/galeyrieux03.htm>
http://dgcwww.epfl.ch/guide_des_ponts/Fribourg/Zeahringen/Zeahringen.htm
http://home.earthlink.net/~marutgers/frames_menus/science_submenu.html
http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/bbv_homepage/bbv_home.htm
[http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Bernadettespaperforhrst_files/intro\(bbvhistMSE\).htm](http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Bernadettespaperforhrst_files/intro(bbvhistMSE).htm)
http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm
<http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/general.htm>
<http://nt3850.vs.netbenefit.co.uk/index.asp>
<http://ntl.bts.gov/DOCS/advcom3a.html>
<http://perso.club-internet.fr/jgourdol/Ardeche/07celebr/07celTex/seguinm.html>
<http://sablons.chez.tiscali.fr/index4.htm?seginvp.htm>
<http://saint.fortunat.free.fr/index.php?afficher=histoires>
<http://syr.stanford.edu/NSVISIT.HTM>
<http://totyx.joensuu.fi/thule/eno2000/materiaali.nsf>
<http://www.ac-toulouse.fr/lp-jacquard-lavelanet/cdrom/fr/musee/sommaire.htm>
<http://www.agc.co.jp/english/chemicals/jushi/etfe/etfe.htm>
<http://www.arpa.gov/>
<http://www.atlantic-cable.com/>
<http://www.bainbridgeint.com/>
<http://www.bm.chalmers.se/research/Acrobat/p011.pdf>
<http://www.buitinkzeilmakerij.nl/frans/projecten/projecten.htm>
<http://www.carbon.co.jp/english/products/develop/develop.html>
<http://www.ciks.org/index.html>
<http://www.corrosion-doctors.org/Principles/Glossary.htm>
<http://www.covertex.de/eng/covertex/index.php>
<http://www.daikin-america.com/products/>
http://www.deepsea-eng.com/pdf_files/frpjip.pdf
<http://www.denardis.com/>
http://www.fib.be/en/products/rm_pages/
<http://www.fibersource.com/>
<http://www.galfan.org>
<http://www.galvalume.com/>
<http://www.gatewaystobabylon.com/introduction/assyriankings.htm>
<http://www.iabse.org/sei/backissues/abstracts.sei9904/burgoyne.pdf>
<http://www.icomos.org/studies/bridges.htm>
<http://www.intechservices.com/>
<http://www.interplastinc.com/spec.htm>
<http://www.intexa.com/downloads/hightemp.pdf>
<http://www.inventionfactory.com/history/RHAgem/>
<http://www.kochmembranen.de/ger/main.htm>
<http://www.liros.com/>
<http://www.materials.ac.uk/resources/index.asp>
<http://www.matweb.com>
<http://www.northsuperyacht.com/index.html>
<http://www.perspex.co.uk/focus/perspex.htm>
<http://www.plasticsusa.com/index.htm>
<http://www.polyflon.co.uk/index.htm>
<http://www.psrc.usm.edu/macrog/fiber.htm>
<http://www.rimnetics.com>
<http://www.ropecord.com/cordage/publications>
<http://www.rope-maker.com/ropemaking.html>
<http://www.royalsignals.army.org.uk/post1.htm#Crimea>
<http://www.saminfo.com/>
<http://www.saminfo.com/wirerope4.htm>
<http://www.sciences-en-ligne.com/momo/chronomath/chrono1/>
<http://www.sobstad.com/home.htm>
<http://www.spectrafiber.com>
http://www.tensiontech.com/papers/papers/deep_mor/deep_mor.html
http://www.tensiontech.com/papers/papers/deep_mor/synthetic_fibreyarn_table1.html
<http://www.tensys.com/index.htm>
<http://www.texloc.com/index.html>
<http://www.textile.unsw.edu.au/Main/toc.htm>
<http://www.textileasart.com/index2.html>
<http://www.toyobo.co.jp/e/seihin/dn/dyneema/tokuchou.htm>
<http://www.toyobo.co.jp/e/seihin/kc/pbp/bussei.htm>
<http://www.uksailmakers.com/core.html>
<http://www.vectranfiber.com/>
http://www.vectranfiber.com/celanese_fiber_dictionary.html
<http://www.wallrope.com/>
<http://www.wirerope.com/>
<http://www.worldwideschool.org/library/books/tech/engineering/AHistoryofAeronautics/chap43.html>
http://www.wtec.org/loyola/compce/03_01.htm
http://www.zeusinc.com/product_sheets/products.html
<http://zeugma.ist.lu/html/projets/de/zeugma/home.html>

Politechnika Wrocławska
Wydział Architektury

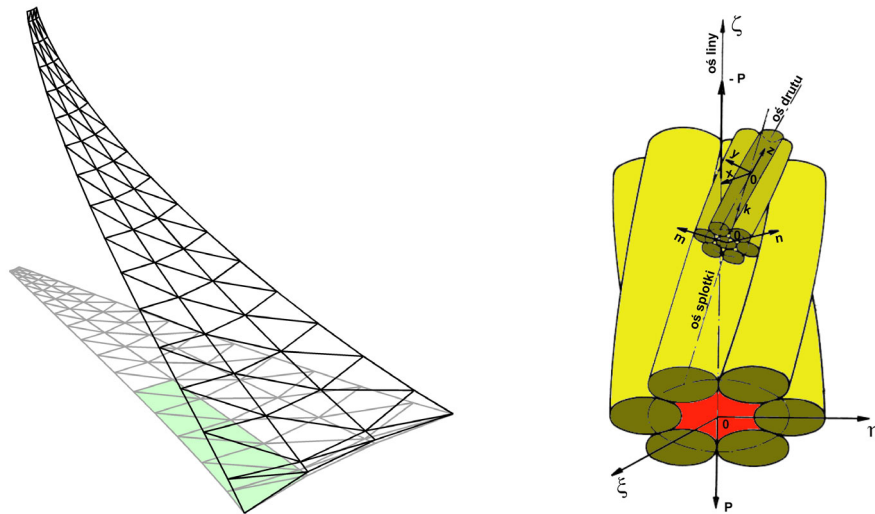
ROZPRAWA DOKTORSKA
p.t.

**Morfologia
lekkich systemów konstrukcyjnych
kształtowanych w procesie
deformacji geometrycznej**

SUPLEMENT

autor

mgr inż. Romuald Tarczewski



Promotor:

dr hab inż. arch. prof. nadzw. P.Wr. **Janusz Rębielak**

Wrocław 2004

Morfologia lekkich systemów konstrukcyjnych kształtowanych w procesie deformacji geometrycznej

Suplement – wybrane zagadnienia z konstrukcji membranowych

Spis treści

1.	Powierzchnie minimalne w kształtowaniu konstrukcji membranowych	4
1.1.	Rzeczywiste matematyczne metody powierzchni minimalnych	4
1.2.	Blony mydlane	7
1.3.	Konstrukcje membranowe o powierzchniach minimalnych	10
2.	Materiały i wyroby stosowane na konstrukcje membranowe	13
2.1.	Rzeczywiste inżynierii materiałowej	13
2.2.	Włókna techniczne	14
2.2.1.	Rzeczywiste włókien technicznych	14
2.2.2.	Systematyka włókien technicznych	15
2.2.3.	Charakterystyka włókien technicznych	17
2.2.3.1.	Włókna naturalne	17
2.2.3.2.	Włókna chemiczne	24
2.2.4.	Właściwości włókien technicznych	77
2.2.4.1.	Wiadomości wstępne	77
2.2.4.2.	Właściwości geometryczne włókien	82
2.2.4.2.	Właściwości mechaniczne włókien	82
2.3.	Wyroby liniowe z włókien technicznych – liny włókiennicze	85
2.3.1.	Wiadomości wstępne	85
2.3.2.	Budowa lin włókienniczych	87
2.3.3.	Wykonywanie lin włókienniczych	90
2.3.4.	Wyznaczanie podstawowych właściwości lin włókienniczych	92
2.3.5.	Właściwości lin wykonanych z poszczególnych rodzajów włókien	95
2.4.	Wyroby liniowe z włókien technicznych – liny stalowe	106
2.4.1.	Wiadomości wstępne	106
2.4.2.	Rodzaje lin stalowych	110
2.4.2.1.	Budowa liny	110
2.4.2.2.	Materiał liny	116
2.4.3.	Oznaczenia lin stalowych	117
2.4.4.	Produkcja lin stalowych	118
2.4.5.	Właściwości mechaniczne i reologiczne lin stalowych	120
2.4.6.	Nośności lin stalowych	127
2.4.7.	Zabezpieczenia antykorozyjne lin stalowych	138
2.4.8.	Cięgna z prętów stalowych	145
2.5.	Wyroby liniowe z włókien technicznych – cięgna kompozytowe	148
2.5.1.	Wiadomości wstępne	148
2.5.2.	Ogólna charakterystyka cięgien kompozytowych	154
2.5.3.	Charakterystyka najważniejszych produkowanych cięgien kompozytowych	164
2.5.4.	Cięgna kompozytowe CFCC	172
2.6.	Wyroby powierzchniowe z włókien technicznych – tkaniny techniczne	176
2.6.1.	Wiadomości wstępne	176
2.6.2.	Budowa tkanin	179
2.6.2.1.	Modele budowy tkanin	179
2.6.2.2.	Podstawowe parametry struktury tkaniny	181
2.6.3.	Sploty tkanin	186
2.6.3.1.	Sposoby przedstawiania splotów	186
2.6.3.2.	Podział splotów	188
2.6.3.3.	Charakterystyka splotów	188
2.6.3.3.1.	Sploty zasadnicze	188
2.6.3.3.2.	Sploty pochodne	191
2.6.3.3.3.	Sploty modyfikowane i zestawne	195
2.6.3.3.4.	Sploty złożone	197
2.6.3.3.5.	Sploty gazejskie	198
2.6.4.	Tkaniny kompozytowe (laminowane)	198
2.6.5.	Tkaniny trójosiowe	201

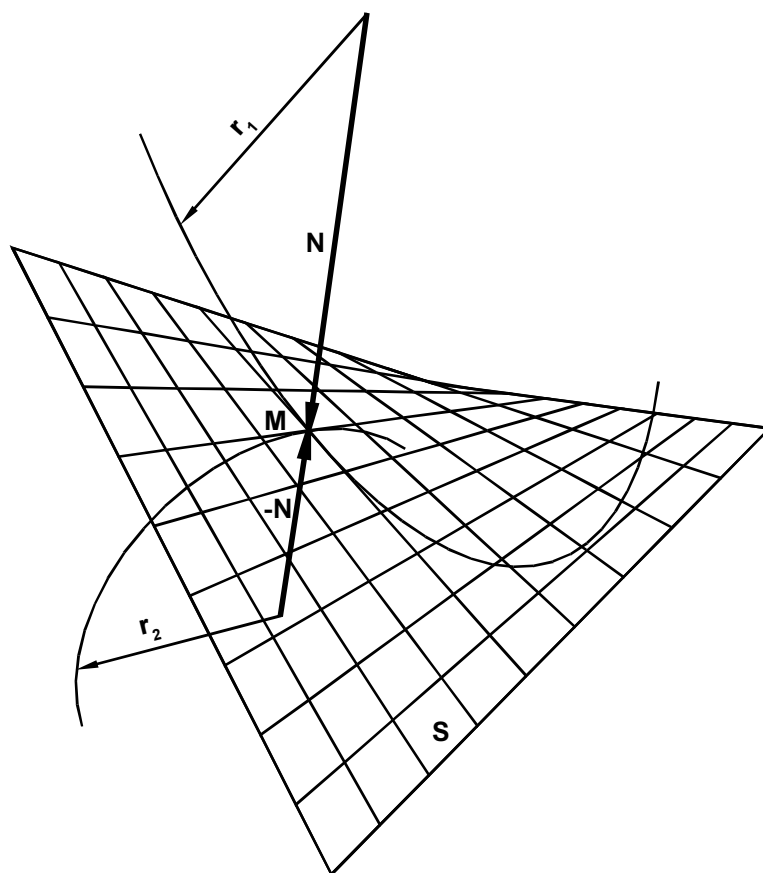
2.6.6. Tkaniny z włókien nieorganicznych	202
2.6.7. Produkcja tkanin	203
2.6.8. Tkaniny techniczne stosowane w konstrukcjach membranowych	211
2.6.8.1. Charakterystyka ogólna	211
2.6.8.2. Właściwości mechaniczne	214
2.6.8.3. Charakterystyka pożarowa	227
2.6.8.4. Połączenia tkanin w konstrukcjach membranowych	227

1. Powierzchnie minimalne w kształtowaniu konstrukcji membranowych

1.1. Rozwój matematycznych koncepcji powierzchni minimalnych

Definicja | Dowolna gładka powierzchnia S , w przestrzeni trójwymiarowej, rys. 1.1, posiada w dowolnym punkcie M dokładnie dwa, przeciwnie skierowane, wektory normalne N i $-N$. Przecięcie powierzchni S płaszczyznami prostopadłymi, zawierającymi te wektory, daje przekroje normalne powierzchni. Dla każdego z przekrojów normalnych można określić jego krzywiznę w punkcie M :

$$\rho_1 = \frac{1}{r_1} \quad \text{oraz} \quad \rho_2 = \frac{1}{r_2} \quad (1.1)$$



Rys. 1.1 – sposób określania promieni głównych krzywiz powierzchni S w punkcie M

Krzywizny ρ_1 i ρ_2 nazywa się krzywiznami głównymi, jeżeli są one ekstremalnymi krzywiznami wszystkich przekrojów normalnych powierzchni S , w punkcie M . Przekroje, dla których wyznaczono te krzywizny, przecinają się pod kątem prostym w punkcie M .

Średnia krzywizna H , powierzchni S , jest zdefiniowana jako:

$$H = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.2)$$

Powierzchnia minimalna jest to powierzchnia, której średnia krzywizna H jest w każdym punkcie równa zero:

$$H = 0 \quad (1.3)$$

Z zależności (1.2) i (1.3) wynika, że

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = 0 \quad (1.4)$$

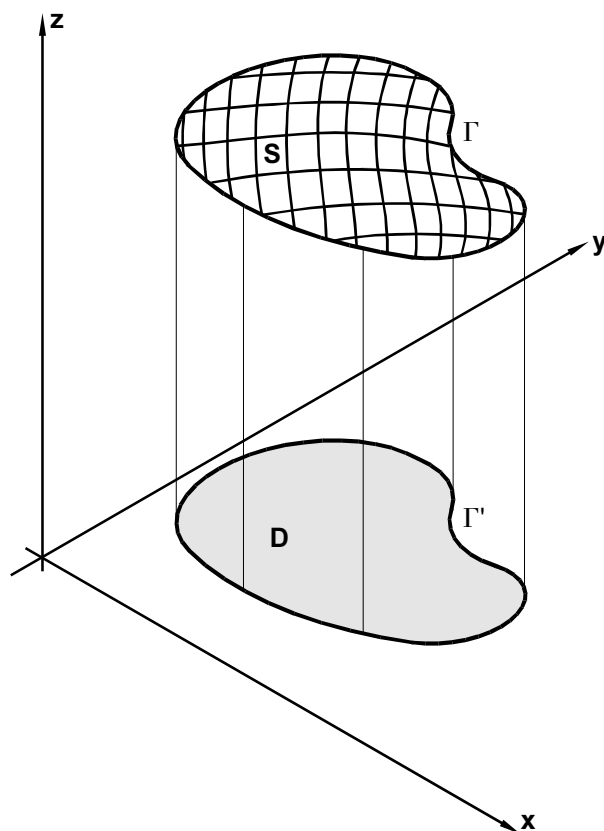
i ostatecznie

$$\rho_1 = -\rho_2 \quad (1.5)$$

Dla powierzchni minimalnej dwie główne krzywizny mają tę samą wartość lecz przeciwny znak. Obie linie przekrojów głównych zakrzywiają się zatem w przeciwnych kierunkach, normalnych do powierzchni. Z tego powodu, każda, niepłaska powierzchnia minimalna, ma lokalnie kształt siodłowy [51].

Powierzchnie minimalne można też zdefiniować w kategoriach rachunku wariacyjnego. Rozpatrując powierzchnię $\mathbf{S}$, w przestrzeni trójwymiarowej, opisanej współrzędnymi $\mathbf{xyz}$, zdefiniowaną na dziedzinie $\mathbf{D}$, leżącej w płaszczyźnie $\mathbf{x-y}$, rys. 1.2, można określić współrzędną z każdego z punktów powierzchni $\mathbf{S}$, jako funkcję $z = z(x,y)$ współrzędnych odpowiedniego punktu dziedziny $\mathbf{D}$. Powierzchnia $\mathbf{S}$ jest powierzchnią minimalną, jeżeli wszystkie jej punkty spełniają równanie Eulera-Lagrange'a [137]:

$$(1 + z_y^2)z_{xx} - 2z_xz_yz_{xy} + (1 + z_x^2)z_{yy} = 0 \quad (1.6)$$



Rys. 1.2 – aaa
Opracowano na
podstawie [137]

Podstawowe powierzchnie minimalne | Równanie (1.5) jest nieliniowym równaniem różniczkowym cząstkowym drugiego rzędu, dwóch zmiennych. Znalezienie ogólnych rozwiązań analitycznych tego równania, dla zadanych warunków brzegowych, tj. dla zadanej krzywej Γ , ograniczającej powierzchnię $\mathbf{S}$, jest w ogólnym przypadku bardzo trudne. Niemniej, już w początkowym okresie badania problemu powierzchni minimalnych, znaleziono dwie klasy powierzchni, będące powierzchniami minimalnymi.

Płaszczyzna jest trywialną powierzchnią minimalną. Pierwszymi nietrywialnymi przykładami powierzchni minimalnych były: katenoida i helikoida.

Najwcześniejszy opis powierzchni minimalnej pochodzi od Eulera (1744). Później zajmował się tym problemem Lagrange (1761), ustalając ostateczną formę równania (1.6), opisującego powierzchnie minimalne. J.B.M.C. Meusnier¹⁾ wykazał w czysto matematyczny sposób, że równanie Eulera-Lagrange'a można przedstawić w formie równania (1.4). Ten sam matematyk odkrył, w 1776 r. i opublikował w 1785 r., dwa pierwsze nietrywialne przykłady powierzchni minimalnych: katenoidę i helicoide²⁾.

Katenoida jest powierzchnią obrotową, powstałą przez obrót linii łańcuchowej o równaniu

$$y = \frac{1}{2} a \left(e^{\frac{z}{a}} + e^{-\frac{z}{a}} \right) \quad (1.7)$$

wokół osi z. Jest to jedyna powierzchnia obrotowa, będąca powierzchnią minimalną. Katenoidę można przedstawić za pomocą równań parametrycznych

$$\begin{aligned} x &= c \cdot \cosh\left(\frac{v}{c}\right) \cos u \\ y &= c \cdot \cosh\left(\frac{v}{c}\right) \sin u \\ z &= v \end{aligned} \quad (1.8)$$

gdzie: $u \in [0, 2\pi]$
 v, c – parametry

Przykład katenoidy przedstawia rys. 1.3.a).

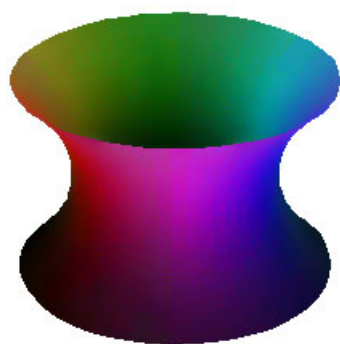
Helikoida, inaczej powierzchnia śrubowa ogólna, jest powierzchnią powstałą poprzez obrót krzywej dokoła ustalonej prostej (osi) i jednocześnie ruch wzdłuż tej prostej, przy stałym stosunku szybkości tych ruchów. Jest to jedyna powierzchnia minimalna translacyjna. Równania parametryczne helikoidy mają postać

$$\begin{aligned} x &= u \cdot \cos v \\ y &= u \cdot \sin v \\ z &= f(u) + h \cdot v \end{aligned} \quad (1.9)$$

gdzie: u, v – parametry
 h – skok helikoidy
 f – dowolna funkcja ciągła

Przykład helikoidy przedstawia rys. 1.3.b).

a).



b).



Rys. 1.3 – aaa
a). widok wnętrza
b). widok obiektu z góry
Opracowano na podstawie [233]

¹⁾ Jean-Baptiste Marie Meusnier (1754-1793) był uczniem G. Monge'a w akademii woj-skowej w Mézieres. Za wkład w badania matematyczne dotyczące właściwości po-wierzchni został, w 1784 r., członkiem Akademii Nauk. Kontynuował jednak karierę woj-skową. W czasach rewolucji był generałem wojsk inżynieryjnych. Zginął, raniony kulą armatnią, w bitwie pod Cassel. Znany jest również z opracowania pierwszego projektu sterowca i namiotu do przykrywania go.

²⁾ J.B.M.C. Meusnier, *Memoire sur la courbure des surfaces*. Mem. Mathem. Phys. Acad. Sc. Paris, pres. par du Savans, 1785, s.477-510; Praca ta została zaprezentowana przed Francuską Akademią Nauk już w 1776 r.

1.2. Błony mydlane

Powierzchnie o najmniejszym obszarze¹⁾ | Zależność (1.4) podana w rozdz. 1.1 dotyczy przypadku teoretycznie „czystej” powierzchni minimalnej, tj. takiej, na którą nie oddziałują ośrodki, w którym się znajduje. W szczególności, nie występują różnice ciśnień w ośrodku, po obu stronach powierzchni minimalnej. W przypadku, kiedy warunek ten nie jest spełniony, zależność (1.4) przyjmuje postać

$$p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.10)$$

gdzie: p – różnica ciśnień pomiędzy powierzchnią wewnętrzną i zewnętrzną
 σ – napężenie powierzchniowe

Już Meusnier²⁾ odkrył, że powierzchnia o zadanych granicach, mająca najmniejszy obszar, musi spełniać równanie (1.10).

W 1805 r. T. Young oraz niezależnie, P. S. Laplace w roku 1806, opracowali fenomenologiczną teorię zjawisk kapilarnych. Częścią tej teorii stała się teoria błonek mydlanych. Błony mydlane były znane już od dawna³⁾, jednak wtedy zauważono ich związek z powierzchniami minimalnymi i zaczęto traktować jako modele powierzchni minimalnych. W roku 1830, K. F. Gauss, wyprowadził ogólne zależności z zasady prac wirtualnych Johanna Bernoulliego. Najważniejsze stwierdzenia w teorii Gaussa, to:

- stabilny stan równowagi systemu fizycznego charakteryzuje się tym, że energia potencjalna systemu jest mniejsza niż w jakimkolwiek innym możliwym (wirtualnym) stanie
- stan równowagi systemu fizycznego jest stanem stacjonarnym jego energii potencjalnej

Jeżeli błonka mydlana zostanie potraktowana jako system fizyczny, to jego energia potencjalna jest proporcjonalna do obszaru powierzchni błony. Współczynnik proporcjonalności jest stałą materiałową. Powierzchnie o minimalnym obszarze są więc matematycznymi modelami błonek mydlanych w stanie równowagi trwałej. Powierzchnie minimalne w ogólności, są matematycznymi modelami błonek mydlanych w stanie równowagi, niezależnie od tego, czy jest to równowaga trwała, czy nie.

Zatem **każda powierzchnia o minimalnym obszarze jest powierzchnią minimalną, ale nie każda powierzchnia minimalna jest powierzchnią o najmniejszym obszarze**. Powierzchnie o najmniejszym obszarze są nazywane **stabilnymi powierzchniami minimalnymi**, a pozostałe powierzchnie minimalne – **niestabilnymi powierzchniami minimalnymi** [51] [137].

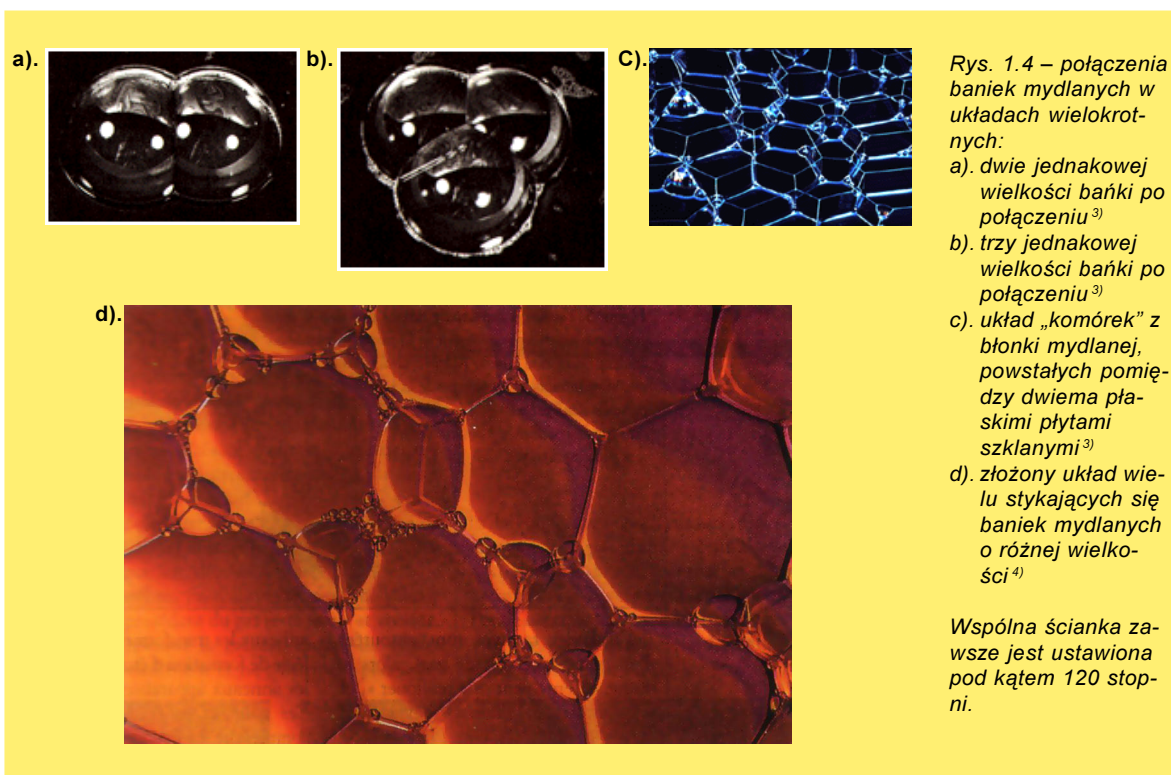
Problem istnienia stabilnych powierzchni minimalnych dla dowolnego konturu postawił w 1873 r. belgijski fizyk, J. A. F. Plateau. W całej serii eksperymentów wykazał on, że dla każdej zamkniętej krzywej brzegowej istnieje co najmniej jedna stabilna powierzchnia minimalna. Dowód matematyczny tego twierdzenia przeprowadził dopiero w 1933 r. węgierski matematyk Tibor Rado i – niezależnie – Amerykanin Jesse Douglas.

Połączenia powierzchni minimalnych | Wykorzystanie błonek mydlanych jako modeli fizycznych, stabilnych powierzchni minimalnych, umożliwiło obserwację i badanie bardziej złożonych zjawisk, dotyczących układów składających się z wielu stykających się powierzchni minimalnych. Układy takie mogą być bardzo złożone i składać się z wielu elementów o różnej wielkości, rys. 1.4. Doprowadziło to do pytania: „w jaki sposób muszą łączyć się poszczególne powierzchnie, aby powstały system był stabilny?”.

¹⁾ Dla uniknięcia powtórzeń, słowo „powierzchnia” w znaczeniu miary wielkości powierzchni (rozumianej w sensie geometrycznym), zastąpiono słowem „obszar”.

²⁾ Patrz przypis ²⁾, na poprzedniej stronie.

³⁾ Patrz rozdz. 1.3



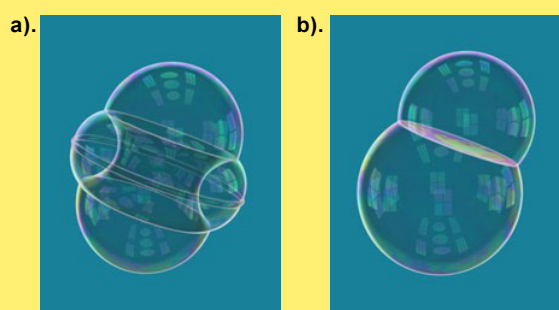
Eksperymenty z bąbkami mydlanymi¹⁾ wykazały, że dla każdego układu kilku połączonych powierzchni minimalnych istnieje tylko jedna, fizycznie możliwa stabilna konfiguracja, rys. 1.5.

Przyczynkiem do teoretycznego rozwiązania tego zadania był tzw. problem Steinera²⁾. Dotyczy on najkrótszego połączenia trzech punktów ABC na płaszczyźnie, został również uogólniony na większą ilość punktów.

Udowodniono że, jeżeli jeden z kątów trójkąta ABC jest większy lub równy 120° , to najkrótsze połączenie trzech punktów składa się z boków trójkąta tworzących ramiona tego kąta. Jeżeli jednak wewnętrzne kąty trójkąta są mniejsze niż 120° , to istnieje wewnątrz niego dokładnie jeden punkt P, który ma taką właściwość, że trzy linie: AP, BP i CP tworzą najkrótsze połączenie pomiędzy punktami ABC, rys. 1.6.

Już Torricelli stwierdził, że koła opisane na bokach trójkąta równobocznego, zbudowanych na bokach trójkąta ABC, przecinają się w punkcie P. Podobnie Simpson, w 1750 r., stwierdził, że linie przechodzące przez wierzchołki tych trójkątów równobocznego oraz przez przeciwległe wierzchołki trójkąta ABC, przecinają się w punkcie P, a ich długości są jednakowe i równe sumie długości odcinków AP, BP i CP, rys. 1.6.a).

Stwierdzono też, że kąty pomiędzy odcinkami AP, BP i CP wynoszą dokładnie 120° , rys. 1.6.b). Punkt P jest nazywany punktem Steinera, a figura składająca się z odcinków AP, BP i CP, zaznaczona kolorem czerwonym na rys. 1.6.b). – figura Steinera [51]. Figura ta powstanie również



¹⁾ Bąbki mydlane są przykładem stabilnych powierzchni minimalnych. Pomiędzy ich powierzchnią wewnętrzną i zewnętrzną występuje różnica ciśnień powietrza.

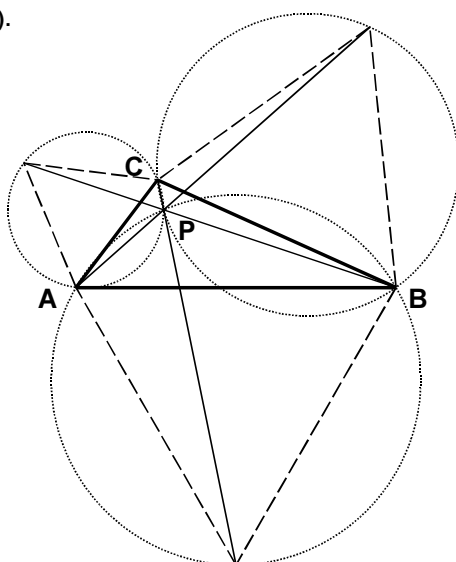
²⁾ Od nazwiska szwajcarskiego matematyka pracującego w Berlinie – J. Steinera (1796-1863). Problem ten po raz pierwszy sformułował Torricelli.

³⁾ Wg: Ron Hipschman, Exploratorium, San Francisco's Palace of Fine Arts [233]

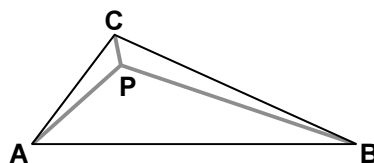
⁴⁾ Ilustracja za L'architecture d'aujourd'hui, vol. 327, 04/2000

⁵⁾ grafika: John M. Sullivan, University of Illinois [233]

a).



b).



Rys. 1.6 – rozwiązanie problemu Steinera dla trzech punktów:

a). konstrukcyjne znalezienie punktu Steinera, P

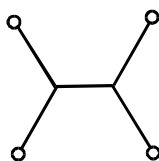
b). figura Steinera
Opis w tekście.

Opracowano na podstawie [51]

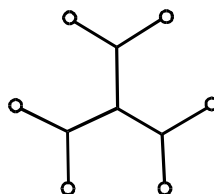
po zanurzeniu w roztworze mydła dwóch płyt szklanych, połączonych trzema prętami, odpowiadającymi punktom A, B, C.

Dla układów złożonych z większej ilości punktów, powstają bardziej rozbudowane figury, jednak zawsze kąty pomiędzy poszczególnymi, tworzącymi je odcinkami wynoszą 120° , rys. 1.7.

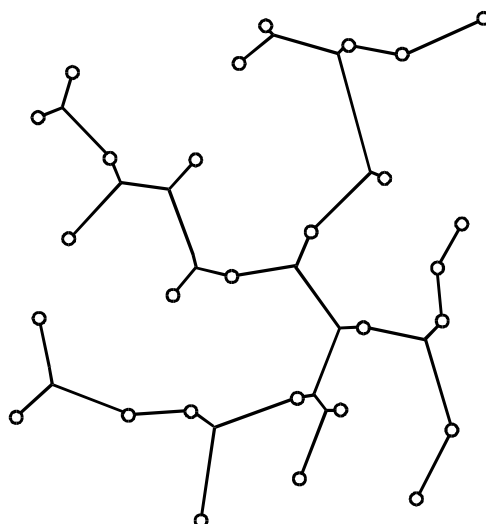
a).



b).



c).

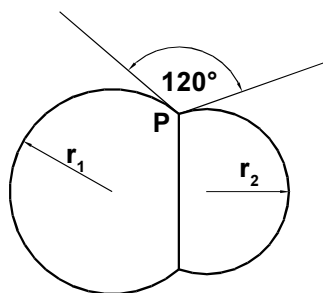


Rys. 1.7 – schemat najkrótszych połączeń w układach o różnej ilości węzłów:

a). cztery punkty
b). sześć punktów
c). dwadzieścia osiem punktów

Opracowano na podstawie [51]

W odniesieniu do powierzchni baniek mydlanych, odcinki AP, BP i CP wyznaczają styczne do powierzchni baniek w punktach połączenia. Jak wspomniano wyżej, zasada minimum energii potencjalnej wymaga, aby powierzchnia układu po połączeniu była minimalna, gdyż inaczej nie będzie on stabilny. Odcinki wyznaczające najkrótsze połączenia pomiędzy wierzchołkami trójkąta ABC, na rys. 1.6, odpowiadają ułożeniu ścianek baniek mydlanych, które zapewnia ich minimalną powierzchnię, rys. 1.8.



Rys. 1.8 – zasada, według której następuje połączenie baniek mydlanych: kąt pomiędzy stycznymi do powierzchni w punkcie styku P, wynosi dokładnie 120° . Porównaj rys. 1.5

Dopiero w 1995 roku, przeprowadzono dowód poprawności tego twierdzenia dla szczególnego przypadku dwóch stykających się baniek o jednakowej wielkości. Dowód ten jednak nie był ogólny ale opierał się na komputerowych symulacjach numerycznych. W marcu 2000 r. czterech matematyków: F. Morgan z Williams College w Massachusetts, M. Hutchings ze Stanford oraz M. Ritor i A. Ros z Granady ogłosiło na konferencji w Rose-Hulman Institute of Technology (USA), że udało im się przeprowadzić ogólny dowód w sposób ściśle teoretyczny. Wykazali oni, że każda inna konfiguracja połączonych baniek jest niestabilna. Dowód oparty jest m.in. o analizę obrotu różnych części bańki dookoła odpowiednio dobranych osi. Twierdzenie to zostało następnie rozszerzone na matematyczne odpowiedniki baniek w czterech wymiarach i – w pewnych przypadkach – w pięciu [229].

1.3. Konstrukcje membranowe o powierzchniach minimalnych

Powierzchnie minimalne są powierzchniami o stałej wartości naprężenia powierzchniowego (patrz wzór 1.10). Koncepcja zastosowania takich powierzchni w projektowaniu jest niezwykle atrakcyjna intelektualnie – zarówno ze względu na swoją „czystość” matematyczną, jak i ze względu na wiele przykładów zastosowania takich powierzchni w naturze¹⁾.

Przeciwnicy takiego projektowania podkreślają, że stała wartość naprężenia powierzchniowego jest możliwa wyłącznie dla jednego przypadku obciążenia. Z tego względu, dla konstrukcji o dominującym udziale ciężaru własnego w całości obciążeń, takie kształtowanie jest jak najbardziej uzasadnione. Jednakże, w przypadku konstrukcji membranowych tak nie jest. Co więcej obciążenia zmienne mogą mieć – i najczęściej mają – różne kierunki działania i bardzo różne wartości, np. obciążenie śniegiem i obciążenie wiatrem. Dlatego, w wielu przypadkach korzystniejsze jest różnicowanie wartości naprężeń wstępnych, co prowadzi do uzyskania membrany o kształcie innym niż minimalny, chociaż stabilnym [102].

Z drugiej strony, zwolennicy projektowania konstrukcji membranowych w oparciu o powierzchnie minimalne, podkreślają ich zalety, nazywając je wręcz „jedynymi rzeczywistymi powierzchniami równowagi” [137]. Wiele bardzo pięknych i interesujących pod względem konstrukcyjnym konstrukcji, zostało zaprojektowanych jako powierzchnie minimalne²⁾. Na rys. 1.9 przedstawiono przykład określenia falistej powierzchni minimalnej za pomocą błonki mydlanej rozpiętej na konturze falistym, z okrągłym otworem pośrodku.

Obecnie, przy projektowaniu konstrukcji membranowych, modele z błonek mydlane są wykorzystywane jedynie we wstępnej fazie poszukiwania kształtu konstrukcji. Ścisłe wyznaczanie powierzchni minimalnej membrany odbywa się za pomocą specjalistycznego oprogramowania komputerowego.



Rys. 1.9 – błonka mydlana rozpięta na zewnętrznym konturze falistym oraz wewnętrznym – okrągłym, tworzy powierzchnię minimalną dla danych warunków brzegowych³⁾

¹⁾ Szereg interesujących przykładów występowania powierzchni minimalnych w przyrodzie opisał C. Mattheck, *Why they grow, how they grow: the mechanics of trees*, *Arboreal Journal*, 14, 1-7

²⁾ F. Otto, podsumowując swoje doświadczenia z konstrukcjami membranowymi stwierdził: „Wszystkie membrany, które nie są poddane jednakowym naprężeniom, stwarzają problemy. Mają one tendencję do powstawania zmarszczek i naciągają się bardziej w miejscach poddanych większym naprężeniom, dopóki nie ulegną rozdarciu lub osiągną kształt różniący się znacznie od pierwotnie skrojonego. Prawidłowo naciągnięty namiot ma niemal jednakowe naprężenia we wszystkich kierunkach. [...] Oznacza to, że namioty o powierzchni minimalnej stwarzają mniej problemów przy opracowywaniu wykrojów, właściwym naciąganiu oraz lepiej znoszą zmiany naprężeń spowodowane przez zmiany temperatury lub wilgotności” [51].

³⁾ Ilustracja za *Textile Roofs 2001 Workshop*

Bańki mydlane powstają dzięki specyficznej budowie cząsteczek wody i cząsteczek mydła. Cząsteczka wody składa się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu. Niezwykła lepkość wody wynika z tego, że atomy wodoru ustawione z jednej strony molekuły są przyciągane przez atomy tlenu z sąsiednich cząsteczek.

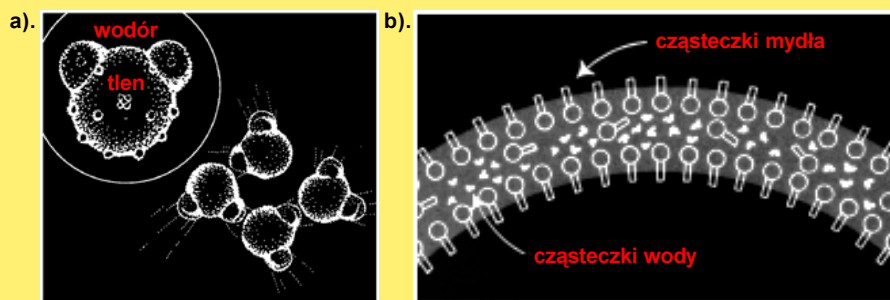
Atomy wodoru mają pojedyncze elektrony, które dążą do przebywania „wewnątrz” cząsteczki wody, od strony atomu tlenu, pozostawiając zewnętrzną stronę dodatnio naładowaną. Atom tlenu posiada osiem elektronów i często większość z nich znajduje się przeciwnej niż atomy wodoru, powodując że ta strona atomu jest ujemnie naładowana. Ponieważ przeciwne ładunki przyciągają się – atomy wodoru z jednej cząsteczki kierują się w stronę atomów tlenu w innych cząsteczkach, tworząc chwilowe „wiązania”. Są one zbyt słabe aby utrzymać cząsteczki w stałym położeniu ale powodują, że woda jest bardzo lepką cieczą.

W wodzie, w odległości najwyżej kilku cząsteczek od powierzchni, każda cząsteczka oddziałyduje z sąsiednimi cząsteczkami po każdej stronie. Każdemu przyciąganiu „z góry” towarzyszy przyciąganie „z dołu” i każdemu przyciąganiu „z lewej” towarzyszy przyciąganie „z prawej strony” itd. Inaczej jest na powierzchni. Przyciąganiu „z dołu” nie towarzyszy przyciąganie „z góry”. Powoduje to, że cząsteczki na powierzchni dążą do „powrotu” do cieczy. Przemieszczenie („wyciągnięcie”) cząsteczki na powierzchnię wymaga pracy. Jeśli powierzchnia jest rozciągnięta – tak jak to się dzieje przy wydychaniu bąbelków – staje się większa i molekuły przemieszczają się z wnętrza cieczy aby włączyć się w powiększoną powierzchnię. Ten efekt, przypominający „rozciąganie skóry” nazywany jest napięciem powierzchniowym i odgrywa istotną rolę w zachowaniu się cieczy.

Cząsteczki mydła zbudowane są z długich łańcuchów atomów węgla i wodoru. Na jednym końcu łańcucha występuje konfiguracja hydrofilowa - atomy dążą do przebywania „w wodzie”. Na drugim końcu występuje konfiguracja hydrofobowa - atomy „unikają” wody ale przylgają się łatwo np. do tłuszczu, pozwalając wodzie przesączać się poniżej.

W roztworze mydła w wodzie hydrofobowe końce cząsteczek mydła dążą do ucieczki z płynu, „przeciskając” się pomiędzy powierzchniowymi molekułami wody. To powoduje rozdzielenie cząsteczek wody od siebie. Ponieważ siły napięcia powierzchniowego maleją wraz ze wzrostem odległości, wciskające się cząsteczki mydła, zmniejszając siły przyciągania cząsteczek wody, zmniejszają jej napięcie powierzchniowe, umożliwiając uformowanie kształtu bańki, rys. 1.10.

Ponieważ hydrofobowe końce cząsteczek mydła wystają poza powierzchnię bańki, film mydlany jest czymś w rodzaju ochrony przed ewaporacją (tłuszcz nie odparowuje), istotnie przedłużając czas istnienia bańki. Wysoka wilgotność otaczającego powietrza również opóźnia parowanie i pozwala na dłuższe istnienie bańki.



Rys. 1.10 – schemat:

- a). budowy cząsteczki wody
- b). ułożenia cząsteczek wody i cząsteczek mydła w ścianie bańki mydlanej

Opracowano na podstawie [233]

Znajomość bąbelków mydlanych jest w Europie niemal tak samo stara jak znajomość mydła. Najstarszy przedstawiający je rysunek – sztych Hendricka Golziusa pochodzi z 1594 roku. Później wielokrotnie pojawiają się w sztuce, chętnie wykorzystywane jako symbol nietrwałości, przelotności i śmierci, rys. 1.11.



Rys. 1.11 – bańki mydlane często były symbolem ulotności i kruchości ludzkiego życia:

- a). sztych Hendricka Golziusa z roku 1594. Podpis brzmi: „Któż tego uniknie?”
- a). płaskorzeźba z nagrobka w Bergen w Norwegii. Około 1700 r.

Ilustracje za [233]

Jeszcze w XIX w. pojawił się zwyczaj, że matki zostawiały niewykorzystane resztki mydła na bańki dla dzieci. Na początku XX w. sprzedawcy uliczni i domokrażcy byli pierwszymi, którzy zaczęli sprzedawać sprzęt do puszczania bąbelków jako zabawkę, rys. 1.12.a).

Do ogromnej popularyzacji bąbelków mydlanych w XIX w. w Anglii przyczyniła się firma Pears produkująca kosmetyki. Było to zasługą jednego ze współwłaścicieli firmy, Thomasa Barrata, uważanego za jednego z pionierów współczesnej reklamy. Najbardziej pamiętanym jego posunięciem było wykorzystanie obrazu „Bańki” („Bubbles”) Johna Everetta Millais, najpopularniejszego (i najbogatszego) wówczas malarza brytyjskiego, jako reklamy firmy, rys. 1.12.b). Na kampanię wydano ogromną kwotę 30 000 funtów, a ilość reprodukcji osiągnęła miliony sztuk. Obraz stał się jednym z najlepiej rozpoznawalnych symboli reklamowych, jakie kiedykolwiek opracowano. Wiele egzemplarzy było oprawianych i wieszanych na ścianach salonów.

a).



b).



Rys. 1.12 – obrazy przedstawiające dzieci puszczające bańki mydlane:

- a). „Dzieci puszczające bańki” – obraz Jean-Etienne Liotarda (1702–1789).
b). obraz Johna Everetta Millaisa „Bańki” („Bubbles”), 1886.

Obraz „Bańki” (Bubbles) Sir Johna Everetta Millaisa, przedstawiony po raz pierwszy w roku 1886 w Grosvenor Gallery w Londynie, przedstawiał małego chłopca, zajętego puszczaniem baniek mydlanych. Do obrazu pozował wnuk malarza, późniejszy admirał Sir William James. Pierwotny tytuł obrazu brzmiał „Świat Dziecka” (A Child's World).

Obraz ten został wykorzystany przez firmę Pears jako element jej kampanii reklamowej. Był to przełomowy moment w stylu działania tej, istniejącej od 1789 r., firmy. Spowodował go zięć ówczesnego właściciela – Thomas J. Barrat. Ten pełen pomysłów, skłonny do ryzyka człowiek, uznawany za jednego z twórców reklamy we współczesnym rozumieniu, doprowadził do rozpoczęcia słynnych kampanii reklamowych firmy Pears. Miały one wówczas ogromny oddźwięk społeczny. Jedną z najbardziej znanych była kampania wykorzystująca obraz „Bańki”.

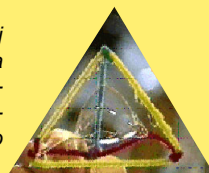
Jego autor początkowo wzbraniał się przed tak jednoznacznie komercyjnym wykorzystaniem swojego dzieła ale wysokiej jakości próbki reklam przedstawione przez Barrata przekonały go. Sprawa wywołała zgorszenie świata sztuki i była przedmiotem dyskusji w Timesie jeszcze w roku 1899, w trzy lata śmierci autora obrazu.

We wczesnych latach 40. XX w. firma Chemtoy, sprzedająca środki czyszczące rozpoczęła sprzedaż gotowych roztworów do wykonywania baniek. W latach 60. bańki były dla hippiesów i dzieci kwiatów symbolem pokoju i harmonii. Przyczynili się oni do dalszego ich spopularyzowania. Obecnie roztwór i przyrządy do puszczania baniek są najlepiej sprzedającymi się zabawkami na świecie. Amatorzy tej rozrywki prześcigają się w uzyskiwaniu baniek o największych wymiarach lub najdziwniejszych kształtach.

Stabilność baniek mydlanych zależy od wielu czynników. Najważniejsze przyczyny ich pęknięcia to: odparowywanie zawartej w nich wody, ruchy powietrza oraz – najczęstsza – suchość: kontakt z suchą powierzchnią lub suchym powietrzem. Najlepsze efekty można uzyskać wykonując bańki bezpośrednio po zachodzie słońca lub w cieniu, po ulewnym deszczu, z dala od wszelkich suchych przedmiotów, utrzymując narzędzia bardzo dobrze zwilżone roztworem. Zalecane jest stosowanie roztworów detergentów w wodzie, z dodatkiem gliceryny. Proporcje zależą od rodzaju detergentu. Jeżeli jakiś przedmiot jest dostatecznie dobrze zwilżony, może wnikać do wnętrza banki nie powodując jej pęknięcia.

Banki mydlane mogą uzyskiwać kształty inne niż kuliste, jeżeli są wytwarzane za pomocą narzędzi o odpowiednim kształcie, rys. 1.13.

Oficjalny rekord Guinnessa dla najdłuższej banki mydlanej należy do Davida Steina. Za pomocą opatentowanego urządzenia własnego pomysłu („The Bubble Thing”) wykonał on bankę o długości 15.2 m (50 stóp) o średnicy 60 cm (dwie stopy), rys. 1.14.



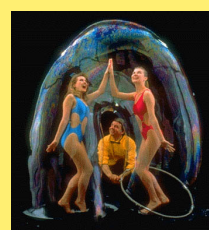
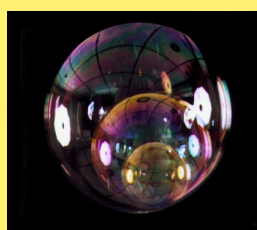
Rys. 1.13 – bańki mydlane o kształcie zbliżonym do czworoscianu i sześciannu
Ilustracje za [233]



Rys. 1.14 – najdłuższa, wykonana na świecie bankę mydlaną

Ilustracja za [233]

Oprócz zastosowań w rozrywce, rys. 1.15, i sztuce (np. dekoracje teatralne) – są one wykorzystywane m.in. do modelowania przepływów cieczy, wirów Karmana itp.



Rys. 1.15 – przykłady wykorzystywania baniek mydlanych o złożonych kształtach, do celów rozrywkowych

Ilustracje za [233]

2. Dostępne materiały i sposoby ich stosowania

2.1. Rozwój inżynierii materiałowej

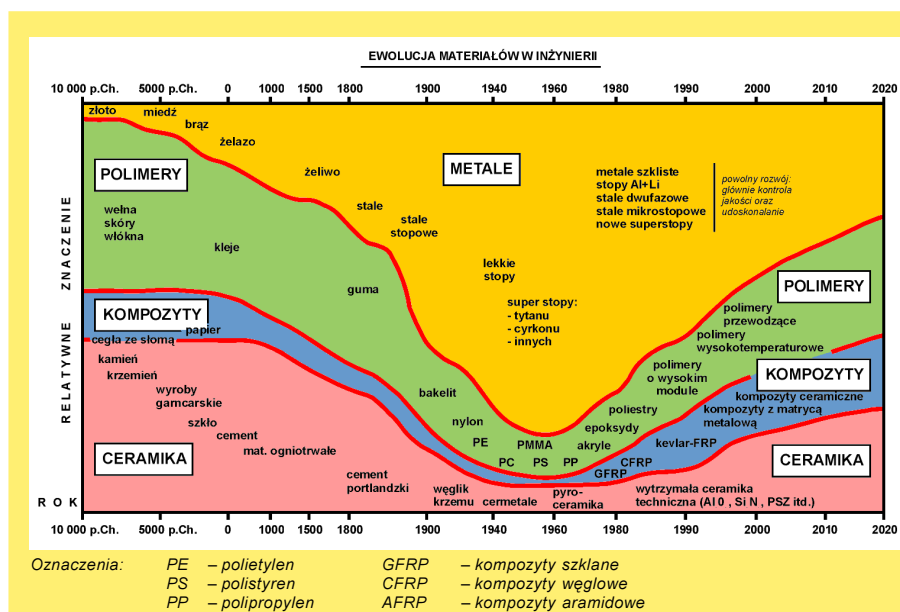
Przyjęto często określać etapy rozwoju danej kultury poprzez główne materiały, które wykorzystywała. Neolit, epoka brązu, epoka żelaza i obecna – która być może będzie nazwana epoką krzemu [231]. Człowiek początkowo dysponował jedynie materiałami stworzonymi przez naturę, takimi jak np. kamień, drewno, skóry. Bardzo wczesnie zaczął jednak wytwarzać przydatne mu materiały, które w przyrodzie nie istniały. Produkcja szkła była w Egipcie rozwiniętym przemysłem już 2 500 lat przed Chrystusem. Wytwarzanie ceramiki była zawsze jednym z przełomowych wydarzeń w ewolucji każdej kultury. Dalszy rozwój przyniósł odkrycia kolejnych materiałów: metali, cementu, tworzyw sztucznych. Aż do początków XX w. rozwój i postęp w dziedzinie materiałów odbywały się całkowicie empirycznie. Nie rozumiano istoty skomplikowanych procesów fizycznych i chemicznych powodujących np. przekształcenie wilgotnej, wyrobionej gliny w twardą nieprzepuszczającą wody ceramikę.

Pojawienie się tworzyw sztucznych, których właściwości można było w dużym zakresie dostosowywać do oczekiwań, uruchomiło rozwój wydarzeń prowadzący do powstania nowej dyscypliny naukowej – inżynierii materiałowej. Jej powstanie spowodowało przesunięcie środka ciężkości rozwoju z tanich, objętościowych materiałów konstrukcyjnych do materiałów o wysokiej technologii, gdzie rozwój konkretnego urządzenia był ograniczony przez dostępne materiały, których ulepszenie wymagało precyzyjnej znajomości zachodzących zjawisk (np. w przypadku metali: stal stosowana na dźwigary konstrukcyjne i wysokotemperaturowe stopy stosowane w silnikach odrzutowych i podobnych urządzeniach; w przypadku ceramiki: podstawowa ceramika techniczna, rury kanalizacyjne, wyposażenie łazienek, ceramika kuchenna i kompozyty ceramiczne, wysokowytrzymała ceramika techniczna). Współzależność zakresu dostępnych materiałów i sposobu, w jaki rozwijała się technika jest wyraźna.

Rysunek 2.1 ilustruje ewolucję materiałów stosowanych w inżynierii w układzie czterech głównych grup materiałowych [161]:

- metali
- polimerów (naturalnych i sztucznych)
- kompozytów (naturalnych i sztucznych)
- ceramiki

Przedstawiona jest kolejność pojawiania się materiałów oraz zmiana w czasie relatywnego znaczenia poszczególnych grup w zastosowaniach technicznych.



Rys. 2.1 – ewolucja materiałów w inżynierii wg [161]. Wykres przedstawia relatywne znaczenie czterech głównych grup materiałów: metali, polimerów, kompozytów i ceramiki oraz kolejne pojawianie się poszczególnych materiałów. Skala czasu jest nieliniowa.

2.2. Włókna techniczne

Zasadniczymi elementami składowymi konstrukcji membranowych, których topologia jest kształtowana w procesie poszukiwania formy, są ciągną i powłoki. Są to elementy wiotkie, mogące przenosić jedynie siły rozciągające. Ich istotną cechą wspólną jest to, że są to najczęściej wyroby wykonywane z włókien¹⁾.

2.2.1. Rozwój włókien technicznych

Podobnie jak wszystkie inne rodzaje materiałów stosowanych w technice, włókna techniczne przeszły długi etap rozwoju, podczas którego wykorzystywane początkowo surowce naturalne zostały uzupełnione przez ogromny asortyment wyrobów wytwarzanych całkowicie syntetycznie.

Historycznie, zastosowanie włókien do celów technicznych można uważać za nieco tylko młodsze od zastosowania ich do wytwarzania tkanin ubraniowych, a w rzeczywistości miały początkowo bardzo podobne przeznaczenie: chronić człowieka przed warunkami atmosferycznymi i umożliwiać mu ujarzmianie sił przyrody. Materialnymi dowodami tego są namioty, brezenty, żagle a także sznury i liny używane już przed tysiącami lat. Surowcem do wytwarzania tych wysoko przydatnych tekstyliów był początkowo wyłącznie len, najstarsze wykorzystywane przez człowieka włókno. Używano go już 5000 lat p.Ch. Nieco później, przed rokiem 3000 p.Ch, zaczęto wykorzystywać bawełnę i wełnę, a wkrótce potem – jedwab, który dodawano niekiedy do innych włókien technicznych. Podobnie jak w tekstyliach ubraniowych, taka struktura surowców utrzymywała się niemal do połowy XX w., kiedy to w handlu stały się dostępne masowo nie istniejące w naturze włókna, które zostały wytworzone przez człowieka.

Pierwszym z wielkiej grupy włókien, wyprodukowanych w sposób sztuczny, był jedwab wiskozowy. Początki poszukiwania substytutu jedwabiu sięgają daleko wstecz. Naukowcom udało się uzyskać pierwsze rozpuszczalne związki celulozy o właściwościach włóknistych i lepkich w połowie XIX w. Był to azotan celulozy. Produkcję włókien wiskozowych z nitrocelulozy rozpoczął H. de Chardonnet we Francji. W roku 1889, na wystawie światowej w Paryżu, jego tkaniny wiskozowe były pokazywane po raz pierwszy, wzbudzając sensację. W dwa lata później uruchomiono ich produkcję. Początkowo była ona ograniczona jedynie do włókien ciągłych (filamentów¹⁾) – tzw. „sztucznego jedwabiu”. W latach dwudziestych XX w. niemieccy naukowcy opracowali metodę wykonywania wiskozowych włókien nieciągłych (staplowych¹⁾), które umożliwiły produkcję przędzy i tkanin wiskozowych, o właściwościach zbliżonych do bawełnianych. Istniało już wówczas znaczne zapotrzebowanie na tego typu włókna, przeznaczone do zastąpienia – ze względu na swoje szczególne właściwości – wysokiej jakości bawełny, zwłaszcza w oponach samochodowych i płótnach wykorzystywanych przez przemysł gumowy [204].

Pierwszym w całości syntetycznym polimerem był polichlorek winylu, po raz pierwszy otrzymany w 1872 r. Jednak jego użyteczną (uplastycznioną) formę – vinyl uzyskano dopiero w 1925 r., a produkcję przemysłową rozpoczęto w 1931 r. W tym samym też roku z polichlorku winylu wyprodukowano pierwsze w całości syntetyczne włókna — Pe-Ce. Jednak w powszechnej świadomości pierwszym włóknem z polimerów syntetycznych było włókno poliamidowe – nylon (wg dzisiejszej systematyki był to nylon 6.6), które jako pierwsze pojawiło się w handlu, w 1937 r.

Pojawienie się nylonu zapoczątkowało okres, w którym z wyrobami z włókien zaczęto utożsamiać właściwości nigdy wcześniej z nimi nie kojarzone, takie jak wysoka wytrzymałość, sprężystość, jednorodność, odporność chemiczna, zmniejszona lub niemal zupełnie wyeliminowana zapalność, odporność na ścieranie i zginanie oraz wiele innych cech szczególnie cennych w zastosowaniach technicznych.

Włókno | Przez włókno rozumiemy drobny wyrób charakteryzujący się względnie małą grubością i wysokim stosunkiem długości do grubości lub średnicy [60][N-01]. Włókna mogą występować w formie włókien nieciągłych (odcinkowych zwanych też staplowymi) albo ciągłych (filamentów).

Pojedyncze włókna (poza wyrobami nieorganicznymi) są na ogół tak słabe, że muszą być uformowane w postaci przędzy, tj. wyrobu liniowego, w którym włókna są ze sobą skręcone na skutek nadania im skrętu, owinięcia, splątania, wzajemnej migracji lub sklejenia ze sobą. Z przędzy są wykonywane wyroby liniowe o większej masie, takie jak nici, przędze skręcone, sznurki, liny itp. lub wyroby powierzchniowe o odpowiednich właściwościach użytkowych: tkaniny, dzianiny, włókniny [118].

¹⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pktcie. 2.2.4.

Fakt, że charakterystyki włókien sztucznych mogą być projektowane specjalnie do określonych celów zmienił sposób myślenia o materiałach z „pasywnego”, wykorzystującego właściwości dostępnych wyrobów, na „kreatywny” domagający się od przemysłu wyrobów dostosowanych do konkretnych potrzeb. W rezultacie zakres i ilość zastosowań wyrobów z włókien znacznie się zwiększyła, obejmując obszary, w których nigdy przedtem ich nie stosowano, a właściwości wprowadzanych produktów otwierały nowe możliwości w wielu dziedzinach.

Inne ważne gospodarczo włókna syntetyczne pojawiały się kolejno w krótkich odstępach czasu: włókna fluoropolimerowe (teflon) – w 1938 r., włókna poliestrowe (terylene) – w 1941 r., włókna poliakrylonitrylowe – w 1950 r., włókna polietylenowe – w 1956 r., włókna polipropylenowe – w 1957 r., wysokoelastyczne włókna poliuretanowe (spandex) – w 1959 r. [233].

W roku 1971 firma DuPont wprowadziła na rynek Kevlar – włókno aramidowe. Był to kolejny przełom. Pojawiły się włókna organiczne o właściwościach mechanicznych przewyższających właściwości stali. Cechowały je ponadto inne niezwykle właściwości: bardzo duża odporność na wysokie temperatury i działanie wielu substancji chemicznych.

Kiedy Neil Armstrong wykonał „mały krok dla człowieka, a wielki skok dla ludzkości”, stając 20 lipca 1969 r. na Księżycu, jego kombinezon był wykonany z wielu warstw tkanin nylonowych i aramidowych. Flaga, którą zatknął była wykonana z nylonu.

Niezależnie od włókien organicznych, naturalnych i chemicznych, wykorzystywano włókna nieorganiczne. Początkowo były to jedynie druty metalowe. Produkowane od bardzo dawna, dopiero w latach dwudziestych XIX w. znalazły zastosowanie w budownictwie – do wyrobu lin. Pierwsze włókna szklane wyprodukowano w roku 1932.

Zapotrzebowanie na nowe materiały na potrzeby wojska oraz badań kosmosu zaowocowało powstaniem włókien z zupełnie nowych materiałów nieorganicznych, o właściwościach jakich nie posiadały dotychczas stosowane. W latach sześćdziesiątych XX w. pojawiły się włókna węglowe i borowe, a nieco później – krzemowe [161]. Zaczęto również wykonywać wyroby kompozytowe zbrojone włóknami nieorganicznymi, z których wiele znalazło zastosowanie w budownictwie.

Poniżej przedstawiono systematykę i omówione najważniejsze grupy włókien stosowanych do wykonywania wyrobów o zastosowaniu technicznym.

2.2.2. Systematyka włókien technicznych

Systematyka włókien technicznych jest dość złożonym problemem i może być oparta o rozmaite kryteria:

- podstawowy surowiec użyty do ich wytwarzania
- dziedzinę gospodarki, w której są wykorzystywane
- końcowe zastosowanie
- technikę produkcji i sposób wykończenia
- inne

Klasyfikacja w oparciu o dziedzinę gospodarki, w której są wykorzystywane, nie wydaje się praktyczna, ze względu na właściwą sobie ograniczoną w czasie ważność. Może ponadto prowadzić do wielokrotnego powtórzenia tego samego wyrobu. Podobne problemy stwarza klasyfikacja oparta o technikę produkcji i sposób wytwarzania.

Klasyfikacja ze względu na końcowe zastosowanie wydaje się bardzo przydatna, jednak przy szybkim obecnie wzroście produkcji i zastosowań mogłaby pomijać ewentualne przyszłe zastosowania wyrobu.

Poniżej, na rys. 2.2, przedstawiono systematykę włókien technicznych w oparciu o surowiec, z którego są one wytwarzane. Jej zaletą jest to, że pojawienie się ewentualnych nowych wyrobów lub zmiana zakresu stosowania istniejących nie powoduje jej dezaktualizacji, a jedynie stwarza potrzebę rozszerzenia. W zależności od źródła, układy tej klasyfikacji różnią się między sobą. Przedstawiona tu systematyka oparta jest o [60] i [204] oraz normy [N-02] i [N-03].

Włókna naturalne

- z nasion
 - bawełna
 - kapok
 - akund
- z owoców
 - włókno kokosowe
- z liści
 - manila/abaka
 - sizal
 - henequen
 - cantala
 - phormium
 - inne
- z todygi / tyka
 - len
 - konopie
 - sunn
 - juta
 - ramia
 - kenaf
 - inne
- roślinne

Włókna chemiczne

- z polisacharydów
 - celuloza i jej pochodne
 - octanowe (jedwab octanowy)
 - modalne
 - lyocell
 - Tencel
 - inne
 - alginowe
 - PLA
- z polipeptydów
 - roślinne
 - Azlon
 - zwierzęce (z protein zwierzęcych)
 - inne
 - kauczuk
- z polimerów syntetycznych
 - poliamidy
 - alifatyczne (nylony)
 - Nylon
 - Caprolan
 - Hydrofil
 - Anso
 - aromatyczne (aramidy)
 - meta-
 - Nomex
 - Conex
 - para-
 - Kevlar
 - Twaron
 - Technora
 - poliestry
 - PET
 - Dacron
 - Trevira
 - Diolen
 - Terylene
 - PEN
 - Pentex
 - LCP
 - Vectran
 - poliwinyle
 - poliolefiny i pochodne
 - polietyleny
 - standard
 - Tyvek
 - UHMWPE
 - Spectra
 - Dyneema
 - Certran
 - polipropyleny
 - Merkalon
 - polimery fluorowe
 - ETFE
 - Neoflon
 - Fluon
 - PTFE
 - Teflon
 - Hostafion
 - Polyfon
 - Toyofion
 - akryle
 - Dralon
 - Orlon
 - modakryle
 - Perspex
 - Plexiglas
 - Metapleks
- poliuretany
 - Lycra
 - Dorlastan
- włókna specjalne
 - PBO
 - Zylon
 - PBI
 - PBI Logo
 - poliimidy
 - Kapton
 - Kinel
 - PPS
 - Sulfar
 - P-84
 - melamina
 - Basofil
 - poliakrylate
 - Inidex
 - novoloidy
 - Kynol
 - PEEK
 - Zyex

- nieorganiczne
- węglowe
 - Celion
 - Carbolon
 - Thornel
 - Torayca
- szklane
 - Nicalon
- borowe
- krzemowe
- azbest

Włókna naturalne

- z okryw włosowych kręgowców
 - wełna
 - kaszmir
 - moher
 - wielbłąd
 - wigoń
 - guanako
 - alpaka
 - lama
 - jak
 - angora
 - inne
- z wydzielin gruczołów przędnych
 - jedwab szlachetny
 - jedwab dziki (tusosowy, muga, eri, anaphe)
 - byssus
- zwierzęce

Włókna chemiczne

- z polimerów syntetycznych
 - poliamidy
 - alifatyczne (nylony)
 - Nylon
 - Caprolan
 - Hydrofil
 - Anso
 - aromatyczne (aramidy)
 - meta-
 - Nomex
 - Conex
 - para-
 - Kevlar
 - Twaron
 - Technora
 - poliestry
 - PET
 - Dacron
 - Trevira
 - Diolen
 - Terylene
 - PEN
 - Pentex
 - LCP
 - Vectran
 - poliwinyle
 - poliolefiny i pochodne
 - polietyleny
 - standard
 - Tyvek
 - UHMWPE
 - Spectra
 - Dyneema
 - Certran
 - polipropyleny
 - Merkalon
 - polimery fluorowe
 - ETFE
 - Neoflon
 - Fluon
 - PTFE
 - Teflon
 - Hostafion
 - Polyfon
 - Toyofion
 - akryle
 - Dralon
 - Orlon
 - modakryle
 - Perspex
 - Plexiglas
 - Metapleks
 - poliuretany
 - Lycra
 - Dorlastan
 - włókna specjalne
 - PBO
 - Zylon
 - PBI
 - PBI Logo
 - poliimidy
 - Kapton
 - Kinel
 - PPS
 - Sulfar
 - P-84
 - melamina
 - Basofil
 - poliakrylate
 - Inidex
 - novoloidy
 - Kynol
 - PEEK
 - Zyex
- nieorganiczne
 - węglowe
 - Celion
 - Carbolon
 - Thornel
 - Torayca
 - szklane
 - Nicalon
 - borowe
 - krzemowe
 - azbest

Włókna naturalne

- z nasion
 - bawełna
 - kapok
 - akund
- z owoców
 - włókno kokosowe
- z liści
 - manila/abaka
 - sizal
 - henequen
 - cantala
 - phormium
 - inne
- z todygi / tyka
 - len
 - konopie
 - sunn
 - juta
 - ramia
 - kenaf
 - inne
- roślinne

Włókna chemiczne

- z polisacharydów
 - celuloza i jej pochodne
 - octanowe (jedwab octanowy)
 - modalne
 - lyocell
 - Tencel
 - inne
 - alginowe
 - PLA
- z polipeptydów
 - roślinne
 - Azlon
 - zwierzęce (z protein zwierzęcych)
 - inne
 - kauczuk
- z polimerów syntetycznych
 - poliamidy
 - alifatyczne (nylony)
 - Nylon
 - Caprolan
 - Hydrofil
 - Anso
 - aromatyczne (aramidy)
 - meta-
 - Nomex
 - Conex
 - para-
 - Kevlar
 - Twaron
 - Technora
 - poliestry
 - PET
 - Dacron
 - Trevira
 - Diolen
 - Terylene
 - PEN
 - Pentex
 - LCP
 - Vectran
 - poliwinyle
 - poliolefiny i pochodne
 - polietyleny
 - standard
 - Tyvek
 - UHMWPE
 - Spectra
 - Dyneema
 - Certran
</

Rys. 2.2 – klasyfikacja włókien technicznych w oparciu o surowiec, z którego są wytwarzane. Opracowano na podstawie [60][204] [233][N-02][N-03]. Klasyfikacja nie obejmuje niektórych rzadko stosowanych włókien. W poszczególnych grupach wymieniono najbardziej znane nazwy handlowe – nie obejmują one wszystkich dostępnych wyrobów.

2.2.3. Właściwości włókien technicznych

2.2.3.1. Włókna naturalne

Włókna naturalne są włóknami występującymi w przyrodzie. W zależności od pochodzenia dzielą się na roślinne, zwierzęce i mineralne. Zarówno włókna z roślin uprawnych jak i ze zwierząt hodowlanych różnią się znacznie, a ich właściwości bardzo mocno zależą od warunków klimatycznych i sposobu produkcji.

Nazwy włókien naturalnych są obecnie znormalizowane [N-02], jednak używanych jest bardzo wiele tradycyjnych nazw zwyczajowych, które niejednokrotnie są stosowane powszechniej niż nazwy normowe. Włókna naturalne dzielą się na organiczne, pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego oraz na włókna nieorganiczne (mineralne).

Poniżej omówiono właściwości naturalnych włókien technicznych. W tablicy 2.1 zestawiono niektóre właściwości dla najważniejszych z nich, a na rys. 2.14 – porównanie zależności σ – ε dla wybranych włókien naturalnych i chemicznych.

W nazwach zwyczajowych często w niewłaściwy sposób używane są terminy: konopie, juta, len czy sisal (np. konopie bombajskie – w odniesieniu do kenafu).

Włókna naturalne pochodzenia roślinnego

Włókna naturalne pochodzenia roślinnego obejmują [60][204][233][N-02]:

- włókna z nasion roślin (np. bawełna, kapok), o strukturze jednokomórkowej, utworzone przez komórki naskórka nasienia, prawie całkowicie zbudowane z celulozy
- włókna uzyskiwane z łyka łądyg roślinnych (np. len, konopie), wielokomórkowe, zbudowane głównie z celulozy i połączone substancjami inkrustującymi i wewnątrz komórkowymi (pektyna, hemiceluloza, lignina)
- twarde włókna uzyskiwane z liści roślin (np. abaka, sisal), wielokomórkowe, zbudowane głównie z celulozy z dodatkiem substancji inkrustujących i wewnątrz komórkowych (lignina, hemiceluloza)
- włókna z owoców roślin (kokos), wielokomórkowe, zbudowane głównie z celulozy z dodatkiem substancji inkrustujących i wewnątrz komórkowych (lignina, hemiceluloza).

1). Włókna uzyskiwane z łyka łądyg roślin

Len¹⁾ | Włókno otrzymywane z łądygi lnu siewnego *Linum usitatissimum*. Długość włókna wykorzystywanego do wykonywania wyrobów technicznych wynosi od 30 cm do 1 m. Ma stosunkowo dużą wytrzymałość na rozciąganie. Charakteryzuje się dużą higroskopijnością i silnym pęcznieniem oraz wzrostem wytrzymałości (do 20 %) na mokro. Jest sztywne i łatwo ulega gniciu.



włókna lniane

Włókno lniane jest używane do wyrobu nici i tkanin technicznych, tkanin odzieżowych i dekoracyjnych oraz technicznych. Włókna odpadowe są używane jako szczeliwo.

Len jest uważany za włókno, które człowiek zaczął używać najwcześniej, bo ponad 5000 lat p.Ch.

Konopie¹⁾ | Włókno otrzymywane z łądygi konopi siewnych *Cannabis sativa* L. Jest drobne, jasne, błyszczące i mocne. Kolor i czystość są zróżnicowane, w zależności od metody obróbki włókna. Najgorsze gatunki są ciemne i zawierają wiele składników niewłóknistych. Jego główne zastosowanie to sznury, powrozy, szpagaty i liny ale najlepsze gatunki wykorzystuje się do wyrobu ciężkich tkanin, czasami jako surowiec tapicerski. Długość włókien waha się od 1 do 2.5 m. Włókna konopne są 5÷6 razy grubsze od włókien lnianych i z tego powodu należą do włókien grubych.

Włókno konopi jest bardzo wytrzymałe na rozciąganie, twarde i bardzo odporne na gnienie. Podobnie jak włókna lniane ma tendencję do załamywania. Ze względu na małą zawartość tłuszczu może wchłoniąć aż do 30% wody. Pod jej wpływem twardnieje i pęcznieje. Z tego powodu jest chętnie stosowane do uszczelnień. W odniesieniu do konopi bywa stosowana również nazwa zwyczajowa sireta.

W krajach anglosaskich są stosowane określenia: „konopie włoskie” dla włókien i wyrobów z nich, pochodzących z Włoch, Hiszpanii, Algierii i Europy Południowo-Wschodniej, które są cieńsze, bardziej miękkie i łatwiej dają się prążyć niż tzw. „konopie rosyjskie”, pochodzące z Polski, Rosji i innych krajów Europy Wschodniej.

Określenie konopie jest często błędnie stosowane w odniesieniu do włókien pochodzących z innych roślin, np. konopie maniłskie, sisalowe itp.

¹⁾ Właściwości podstawowych organicznych włókien technicznych podano w tablicy 2.1

Sunn | Włókno podobne do konopi, otrzymywane z indyjskiego drzewa krolataria różgowata, nazywanego też gruchatka (*Crotalaria juncea* L.). Stosowane są następujące nazwy zwyczajowe: konopie indyjskie, konopie Madras, konopie brązowe, konopie Św. Helena, czarne konopie Phillibit, jubblepore, itersi, seonie, benaris.

Juta¹⁾ | Włókno otrzymywane z łyka łodygi roślin *Corchorus capsularis* (w handlu tzw. juta biała) oraz *Corchorus olitorius* (w handlu tzw. juta ciemna lub kolorowa). Zarówno juta biała jak i ciemna są dzielone na wiele tzw. sortów, w zależności od jakości i charakterystycznych właściwości. Znajduje zastosowanie do wyrobu tkanin opakunkowych, dywanów, obić tapicerskich, linoleum, papieru oraz jako materiał elektroizolacyjny.

Ramia | Włókno otrzymywane z łyka wieloletniej łodygi rośliny szczmiel biały (*Boehmeria nivea* Gaud), należącej do rodziny *Urticaceae* (pokrzywowatych), zwłaszcza z odmiany *tenacissima*. Łodyga zawiera dużą ilość gum i pektyn, dlatego niezbędna jest specjalna obróbka włókien. Najpierw mechanicznie lub ręcznie odrywane są z zewnętrznej części łodyg „pasy” włókien, po ich wcześniejszym namoczeniu. Dalsza obróbka jest taka jak dla innych włókien otrzymywanych z łodyg.

Ramia jest uprawiana od stuleci w Azji i Ameryce Południowej. W ilościach handlowych produkowane jest w Chinach i w Japonii. W Europie jest sprzedawana w postaci taśm, znanych jako „chińska trawa”. Aby włókno nadawało się do przędzenia, należy je poddać odgumowaniu, np. poprzez gotowanie w roztworze alkalicznym. Odgumowane włókna mają do 30 cm długości, są białe, z jedwabistym połyskiem. Włókno ma dużą wytrzymałość na rozciąganie, zarówno suche jak i wilgotne. Znajduje zastosowanie do wyrobu lin i sieci rybackich, ubrań sportowych i tropikalnych, w tapicerstwie. Stosowana jest nazwa zwyczajowa Rhea.

Kenaf | Włókno otrzymywane z łyka łodygi rośliny *Hibiscus Cannabinus*. Polska nazwa: ketmia konopiovata. Znane również pod nazwami zwyczajowymi: hibiskus, gambo, juta jawajska, juta afrykańska, juta brazylijska, juta syjamska, konopie bombajskie, konopie awaste, konopie gwinejskie, ambari, bimbli, deccan, stockroos, teal. W Indiach nazywane jest mesta. Jego właściwości są pod wieloma względami podobne do juty. Z tego względu jest wykorzystywany jako jej zamiennik lub dodatek do niej.

Żarnowiec | Włókno z łodyg żarnowca *Cytisus scoparius* i *Spartium junceum*

Ketmia szczawiowa | Włókno z łodyg ketmii szczawiowej *Hibiscus sabdariffa*. Jest pokrewne do juty. Stosowane są również nazwy: roselle, gogu, juta syjamska.

Urena | Włókno z łodyg ureny *Urena lobata* i *Urena juncea*. Włókno pokrewne do juty. W odniesieniu do ureny stosowana jest wielka ilość nazw tradycyjnych: juta kubańska, juta brazylijska, juta kongijska, aramina, bamia, canhamo, carrapicho, culotan, gonama, guaxima, guiazo, malva, ototo, paka, toja, vicima.

Zaślaz | Włókno z łodyg roślin *Abutilon angulatum*, *Abutilon aviceneae*, *Abutilon theophrasti*. Jest pokrewne do juty. Nazywane również jutą chińską oraz chingma.

Punga | Włókno z łodyg roślin *Clappertonia ficifolia*, *Triumfetta cordifolia* i *Triumfetta rhomboidea*. Jest pokrewne do juty.

Toina | Włókno z łodyg roślin *Apocynum androsae mifolium* i *Apocynum cannabinum*. Używana jest również nazwa bluish dogbane.

¹⁾ Właściwości podstawowych organicznych włókien technicznych podano w tablicy 2.1

2). Włókna uzyskiwane z liści roślin

Manila (Abaka)¹⁾ | Włókno uzyskiwane z pochw liściowych bananów manilskich *Musa textilis*. Jest lekkie i twarde, długości 0.7÷4.5 m. Zawartość tłuszczu powoduje, że jest lśniące, niełamliwe i elastyczne. Charakteryzuje się dużą odpornością na działanie wody morskiej i drobnoustrojów. Stosowane do wyrobu wysokogatunkowych lin okrętowych, plecionki, grubych tkanin, a gorsze gatunki – do wyrobu papieru, tektury i płyt budowlanych. Zwane jest również powszechnie abaka. Inna nazwa zwyczajowa to konopie manilskie.

Sizal¹⁾ | Włókno otrzymywane z liści agawy karaibskiej *Agave sisalana* Perrine, rośliny pochodzącej z Ameryki Środkowej (Meksyk), obecnie uprawianej również we wschodniej Afryce, Brazylii, Indonezji i innych krajach. Włókno koloru bladokremowego, długości 90÷120 cm, średniej grubości (pomiędzy włóknem kokosowym a konopiami). Twarde i wytrzymałe, o jedwabistym połysku. Ze względu na małą zawartość tłuszczu pęcznieje i twardnieje pod wpływem wilgoci. Znajduje zastosowanie głównie do wyrobu sznurów i lin. Dzięki niskiej cenie konkurencyjne wobec manili i juty. W mniejszym zakresie stosowane również do wyrobu worków, dywanów i grubych tkanin. Znany również jako konopie Bahama albo konopie sizalowe.

Henequen (heneken) | Włókno otrzymywane z liści agawy karaibskiej odmiany henequen (*Agave fourcroydes* Lemaire), uprawianej głównie w Meksyku, na Jamajce i na Kubie. Jest sztywne i łamliwe. Używane wyłącznie do wyrobu sznurów i lin. Bardzo podobne do sizalu i często tak nazywane – pokrywa około połowy światowego zapotrzebowania na wyroby tego typu. Inne nazwy zwyczajowe to sizal kubański i sizal meksykański.

Cantala | Włókno z liści rośliny *Agave cantala*. Poprawna nazwa to Maguey [N-02], jednak nazwa tradycyjna cantala jest bardzo rozpowszechniona. Inne nazwy to nanas sabrong i poepoes.

Phormium | Włókno pochodzące z liści rośliny *Phormium tenax*, gatunku wywodzącego się rdzennie z Nowej Zelandii. Nazywane również konopiami nowozelandzkimi lub Inem nowozelandzkim.

Do włókien uzyskiwanych z liści zaliczane są również:

Ostnica | Włókno z liści roślin *Stipa tenacissima* i *Lygeum spartum*. Używana jest nazwa zwyczajowa alfa.

Aloes | Włókno z liści rośliny *Furcraea gigantea*.

Fique | Włókno z liści rośliny *Furcraea macrophylla*.

Tampico | Włókno z liści rośliny *Agave funkiana*.

3). Włókna uzyskiwane z nasion roślin

Bawełna¹⁾ | Jest to włókno jednokomórkowe otrzymywane z nasion roślin z rodziny *Gossypium*. Botanicznie jest to ponad 2 000 rodzajów roślin. Uprawia się ją w krajach tropikalnych i subtropikalnych (Chiny, Azja Środkowa, Indie, USA). Po przekwitnięciu z kwiatów formują się torebki nasienne, które po osiągnięciu dojrzałości pękają, uwalniając włókna bawełniane. Po zebraniu formuje się z nich bale o wadze ok. 200 kg, z których w przędzalniach powstają włókna. Najlepsze gatunki to amerykański Sea-Island i egipski Mako.



bawełna

Bawełnę zaczęto wykorzystywać prawdopodobnie pomiędzy 3000, a 5000 r. p.Ch. Na pewno używano jej w Egipcie przed rokiem 2500 p.Ch. Zastosowanie w roku 1793 odziarniarki, wynalezionej przez Eli Whitneya, zrewolucjonizowało przemysł bawełniarski.

¹⁾ Właściwości podstawowych organicznych włókien technicznych podano w tablicy 2.1

Włókna bawełniane wchłaniają dużo wilgoci przez co szybko pęcznieją, jednakże są bardzo elastyczne. Ich wytrzymałość wynosi w przybliżeniu połowę wytrzymałości włókien lnianych.

Kapok | Jednokomórkowe włókno uzyskiwane ze strąków nasiennych drzewa kopokowego, *Ceiba pentandra* D.C. (*Eriodendron anfractuosum* (L) Gaertn). Włókna mają długość 20÷30 mm, są szare lub brązowo-brązowe, błyszczące i kruche. Włókno jest odporne na wilgoć, elastyczne i nietonące. Produkowane głównie w Indonezji, Tajlandii, Kambodży, Laosie i Wietnamie. Służy jako wypełnienie poduszek, materacy, kamizelek ratunkowych oraz jako izolacja cieplna i akustyczna. Włókno to nazywane jest również bawełną jawańską, bawełną jedwabną, filozelą oraz ceba lub ceiba.

Akund | Włókno jednokomórkowe z nasion roślin *Calotropis gigantea* i *Calotropis procera*.

4). Włókna uzyskiwane z owoców roślin

Włókno kokosowe¹⁾ | Włókno otrzymywane z owoców palmy *Cocos nucifera* L. Występuje w kolorze czerwono-brązowym do płowóżółtego. Włókna mają od 15 cm do 33 cm długości i są znane ze swej rozciągliwości, mają jednak umiarkowaną wytrzymałość. Nie zawierają olejów tłuszczowych, są kruche, suche, szorstkie i bardzo lekkie. Wilgoć powoduje ich butwienie i gnicie.

Występują trzy rodzaje włókien kokosowych: najdłuższe i zwykle najcieńsze uzyskiwane z nieprzeciętego orzecha – wykonuje się z nich przędzę do produkcji lin i mat; krótsze włókno, znane jako „szczecina” używane jest do wyrobu pędzli; najkrótsze włókna są wykorzystywane do wypełniania materacy, w tapicerstwie itp.

Włókna naturalne pochodzenia zwierzęcego

Włókna naturalne pochodzenia zwierzęcego są zbudowane z białek prostych o strukturze włóknistej. Zaliczamy do nich [60][204][233][N-02]:

- włókna pochodzące z gruczołów przędnych wydzielane przez niektóre owady, w szczególności przez gąsienice rzędu motyli (zbudowane z fibroiny i serycyny)
- włókna wydzielane przez niektóre mięczaki
- włókna z okryw włosowych, o strukturze wielokomórkowej, składające się z keratyny, tworzące runo, sierść, grzywę lub ogon pewnych zwierząt, w szczególności kręgowców (zbudowane z keratyny)

1). Włókna uzyskiwane z okryw włosowych kręgowców

Wełna¹⁾ | Włókno uzyskiwane owiec i jagniąt z rodzaju *Ovis aries*. W przemyśle tekstylnym używa się terminu „wełna” bez przymiotnika na określenie wełny owczej. Wprowadza to rozróżnienie pomiędzy włóknami uzyskiwanymi z owiec a uzyskiwanymi z innych zwierząt, bez względu na podobieństwa we właściwościach włókien. (W terminologii angielskiej na określenie włókien pochodzenia zwierzęcego innych niż wełna owcza i jedwab używa się terminu ogólnego *hair*. Czasami dopuszcza się stosowanie również terminu *wool*, jeżeli z jednego zwierzęcia uzyskuje się dwa rodzaje włókien, np. długie i twardsze oraz krótsze bardziej miękkie – jak w przypadku wielbłądów; w takim przypadku należy zawsze dodatkowo używać nazwy zwierzęcia.) Najdelikatniejsza wełna owcza uzyskiwana jest z owiec czystej rasy merino – jej przeciętna średnica wynosi 24 μm lub mniej.



wełna

Włókno kokosowe uzyskuje się z włókien otaczających orzech palmowy, poprzez moczenie orzechów w wodzie przez okres do dziewięciu miesięcy, a następnie odrywanie włókien, ręczne lub mechaniczne.

Włókna najkrótsze i o średniej długości oraz niewielkie ilości włókien do wyrobu przędzy są dostarczane głównie z Ceylonu. Włókno najdłuższe, do wyrobu przędzy, jest dostarczane przede wszystkim z Indii kontynentalnych.

Wełna była używana już w późnej epoce kamiennej. Obecnie istnieje ok. 40 ras owiec, z których uzyskuje się ponad 200 różnych gatunków wełny.

¹⁾ Właściwości podstawowych organicznych włókien technicznych podano w tablicy 2.1

Kaszmir | Włókno uzyskiwane z delikatnego puchu (włosa krótszego i delikatniejszego od wełny) kóz kaszmirskich *Capra hircus laniger*. Obecnie stosowane także do przędzy, tkanin i odzieży wykonywanych z puchu innych kóz azjatyckich, np. irańskich.

Moher (mohair) | Włókno uzyskiwane z kóz angorskich *Capra hircus aegagrus*. Słabo karbikowata, cechuje się znaczną długością włókna (30 ÷ 50 cm), miękkością i dużym połyskiem.

Wielbłąd | Włókno uzyskiwane z wielbłądów *Camelus bactrianus*. Występują dwa rodzaje: mocne, grubsze, pochodzące z zewnętrznej warstwy, długości od 12 do 15 cm oraz miękkie, jasnobrązowe włókno z warstwy podścielającej (blisko skóry zwierzęcia), długości od 4 do 5 cm.

Wigoń (wikunia) | Włókno otrzymywane wigonia *Lama vicugna* (*Vicugna vicugna*), zwierzęcia żyjącego w wysokogórskich rejonach Andów, przeżuwacza z rodziny wielbłądów spokrewnionego z lama i alpaka, dziś rzadkiego. Jego wełna jest delikatniejsza od najlepszej wełny owczej (merino). Ma kolor płowobrazowy, ok. 5 cm długości. Wyrabia się z niego tkaniny bardziej miękkie i delikatniejsze niż z jakiegokolwiek innej wełny.

Guanako (gwanako) | Włókno uzyskiwane guanako *Lama huanaco* (*Lama guanicoe*), bezgarbnego przeżuwacza z rodziny wielbłądów, żyjącego dziko na stepowych wyżynach Ameryki Południowej. Włókno ma kolor rudobrazowy.

Alpaka | Włókno uzyskiwane alpaki – na wpół udomowionego zwierzęcia z rodziny wielbłądów *Lama pacos*, żyjącego w wysokogórskich rejonach Andów. Jest ono miękkie, błyszczące, o zmiennej barwie i doskonałej jakości. Jego długość wynosi od 15 do 30 cm. Nazwy tej używa się również na określenie włókien otrzymywanych z wełny lamy – zwierzęcia blisko spokrewnionego z alpaka.

Lama | Włókno uzyskiwane z lamy *Lama glama*. Ze względu na podobieństwo, nazwy Alpaka i Lama są często używane zamiennie.

Jak | Włókno uzyskiwane z jaka *Bos (Poëphagus) grunniens*.

Angora | Włókno uzyskiwane z wełnistej rasy królików angorskich *Oryctolagus cuniculus*. Włókno długości od 8 do 20 cm jest bardzo delikatne, przeważnie białe.

Inne | Do włókien otrzymywanych z okryw włosowych kręgowców zaliczane są również włókna uzyskiwane z bardzo wielu gatunków zwierząt zarówno hodowlanych (np. królik, nutria, lis, renifer, koń, koza, wół) jak i dzikich (np. bóbr, jeleń, zając, wydra, kuna, niedźwiedź).

2). Włókna uzyskiwane z wydzieliny gruczołów przednich owadów

Jedwab (jedwab naturalny, jedwab szlachetny)¹⁾ | Włókno otrzymywane z oprzędów gąsienicy jedwabnika morwowego *Bombyx mori*. Jest to motyl nocny z rodziny prządek, hodowany w Chinach dla przędzy od ok. 6000 p.Ch. (prawdopodobnie także w Indiach). Surowe włókno jest zbudowane z białek z grupy skleroproteidów: składa się z włókienek (filamentów) fibroiny sklejonych seryciną (klej jedwabny, guma jedwabna). Ponieważ pojedyncza nitka z kokonu jest zbyt cienka, splata się razem



kokon jedwabnika

Przędka morwowa, jak nazywa się gąsienicę jedwabnika, ma ok. 2 mm długości, kiedy opuszcza jajeczko. Odżywia się ogromną ilością liści drzewa morwowego. Po dwudziestu dniach osiąga wielkość palca środkowego ręki. Snuje przędę poprzez wydzielanie białka zwierzęcego

¹⁾ Właściwości podstawowych organicznych włókien technicznych podano w tablicy 2.1

nitki (oprzędę) z 3÷13 kokonów uzyskując surową nitkę jedwabną, tzw. greżę (ang. *gregesilk*). Greża składa się z długich na ok. 1 000 m filamentów ze środkowej części ścianki kokonu, do których nadal przylega guma jedwabna. Z części kokonu, który nie może zostać rozwinięty są wywiedzione długie włókna jedwabne. Jest z nich uprzedzona delikatna, gładka przędza jedwabna, nazywana jedwab odpadowy (*schappe*). Wytrzymałość jedwabiu na rozrywanie jest ogólnie zbliżona do wytrzymałości bawełny. Przy zgniataniu włókna jedwabne mają doskonałą elastyczność. Dlatego z reguły nie gniotą się.

Główni producenci jedwabiu to Chiny, Indie i Japonia. W Europie jedwabniki są hodowane głównie w Turcji, Francji oraz w Hiszpanii.

Jedwab dziki | Jest to wspólna nazwa włókien otrzymywanych z oprzędów jedwabników dębowych zwanych też dzikimi jedwabnikami. Nazwa ta obejmuje kilka gatunków motyli nocnych pochodzących z Chin, Indii oraz Japonii. Dzikie jedwab jest grubszy niż jedwab szlachetny. Ma barwę brązową i zazwyczaj jest tak wysnuty, że większości kokonów nie da się rozwinąć. Jest trudny do odgumowania. Uprzędzony dziki jedwab ma wyraźne wahania w grubości. Tradycyjnie stosowane są różne nazwy dla włókien wysnutych przez każdy z gatunków motyli.

Jedwab tusowy | Właściwa nazwa znormalizowana brzmi „jedwab tasar” [N-02], jednak określenie „tusowy” (ang. „*tussah*”), chociaż etymologicznie niepoprawne, jest powszechnie stosowane w przemyśle tekstylnym w nazewnictwie włókien i filamentów [60]. Jest to włókno wysnute przede wszystkim przez gąsienicę indyjskiego gatunku *Antheraea mylitta*, a także przez gąsienice z gatunków *Antheraea pernyi*, *Antheraea yama-yama*, *Antheraea roylei* oraz *Antheraea proylei*.

Jedwab muga | Włókno wysnute przez gąsienicę jedwabnika *Antheraea assamensis*.

Jedwab eri | Włókno wysnute przez gąsienicę jedwabnika *Phylosamia ricini*.

Jedwab anaphe | Włókno wysnute przez gąsienicę jedwabnika *Anaphe*.

Byssus | Włókno wysnute przez niektóre mięczaki *Pinna nobilis*.

Włókna naturalne pochodzenia mineralnego

Włókna mineralne są uzyskiwane ze skał o strukturze włóknistej, zbudowane głównie z krzemianów.

Azbest | Naturalny krzemian włóknisty. Jest to jedyne mineralne włókno pochodzenia naturalnego. Otrzymywany jest z różnych minerałów, takich jak np. serpentyn czy chryzolit. Wydobywany jest w Rosji, Kanadzie, Zimbabwe, we Włoszech, Niemczech i w Czechach. Elementarne włókna azbestu są bardzo drobne, ich średnica wynosi zaledwie kilka mikrometrów (dla najdrobniejszych włókien chryzolitowych zaledwie 0.2 mikrometra). Wydłużenie rzędu 0.5 do 2 % jest podobne jak dla włókien lnianych. Masa właściwa wynosi od 2 500 do 3 300 kg/m³.

Z włókien azbestowych przędzie się grubszą przędzę o masie liniowej 100÷2 000 g/km (tex)¹⁾. Jej jakość zależy od rodzaju użytych włókien. Przędza może być wykonywana z samych włókien azbestowych jednego rodzaju lub mieszanki kilku rodzajów albo z domieszką innych włókien, zwykle bawełny lub jedwabiu wiskozowego, w ilości 10 do 15 %. Produkcja przędzy azbestowej jest bardzo uciążliwa ze względu na powstający szkodliwy pył. Przędza azbestowa jest skręcana podczas produkcji, co poprawia jakość jej powierzchni. Tkaniny z przędzy azbestowej są wykorzystywane do produkcji ubrań ochronnych, taśm izolacyjnych itp.

¹⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pktcie. 2.2.4.

fibroiny w postaci płynu, z brodawki na dolnej wardze (gruczoł przędny) i pokrywanie jej gumą jedwabną (serycyna). Nici zawsze są dwie, połączone ze sobą gumą jedwabną. Podczas trzech dni gąsienica przędzie ok. 3 000 m podwójnej nici. Po ok. dwóch tygodniach w kokonie następuje przepoczwarczenie z gąsienicy w motyla. Motyl rozpłaszcza ścianę kokonu i wydobywa się z niego. Po złożeniu jajeczek zwierzęta giną. Zbiór z ok. 50 000 gąsienic to ok. 1 000 kg kokonów jedwabnych, z których można uzyskać ok. 120 kg jedwabiu surowego. Aby można było użyć skać nieuszkodzone kokony, jedwabniki są hodowane na farmach. Zwierzęta wewnątrz kokonu są zabijane gorącą parą. Do rozpuszczania gumy jedwabnej i rozwinięcia kokonów jest stosowana gorąca woda.

Czasami dwa kokony są ze sobą zrosnięte. Taki podwójny kokon określa się w hodowli jedwabników angielskim terminem *dupion* (fr. *doupioue*, wł. *doppione*). Oznacza ono również surowy, nierówny jedwab, przędziony z podwójnych kokonów.

W roku 1770 Francuz, Jacques de Vaucanson, jako pierwszy w Europie zastosował napęd łańcuchowy w rozmołnialniach kokonów i maszynach do skręcania jedwabiu [220].

Tablica 2.1 – Niektóre właściwości podstawowych organicznych, naturalnych włókien technicznych, wg [204]

Włókno	masa właściwa kg/m ³	wytrzymałość na rozciąganie w stanie suchym N/tex	relatywna wytrzymałość na rozciąganie na mokro ¹⁾ %	wydłużenie przy zerwaniu		relatywna wytrzymałość w spłotach		początkowy moduł sprężystości na sucho N/tex	współcz. pracy	LOI (limiting oxygen index)	temperatura		
				na sucho %	na mokro %	pętlowych %	węzłowych %				zapłonu °C	topnienia °C	mięknięcia °C
Len	1 350÷1 370	0.57÷0.71	110÷120	1.5÷1.8	1.6÷2.2			18	–				
Konopie	1 000	0.27÷0.71	115÷125	1.5÷2.5	1.7÷2.8			21.7					
Juta		0.27÷0.36	110÷120	15÷2.2	1.5÷2.5			17.2					
Manila / Abaka	1 500	0.32÷0.69		2.5÷8									
Sisal	1 090	0.45÷0.51		1.9÷5									
Bawełna	1 520÷1 540	0.20÷0.49	100÷110	8÷10	9÷11	70	90	3.8÷8.2	0.47	18.4	400÷500		
Kokos	980	~ 0.18		~ 16									
Wełna	1 300÷1 320	0.09÷0.18	80÷90	22÷35	25÷50	80	85	2÷3.1	0.68	25.2	600	130 ²⁾	205÷300 ³⁾
Jedwab naturalny	1 340÷1 370	0.31÷0.44	80÷85	20÷25	25÷30	85÷90	8÷90	7.3	0.66				

¹⁾ w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie w stanie suchym

²⁾ degradacja włókien

³⁾ karbonizacja włókien

*Tablica. 2.1
Niektóre właściwości
najważniejszych or-
ganicznych włókien
technicznych, wg
[204]*

2.2.3.2. Włókna chemiczne

Włókna chemiczne, nazywane często włóknami sztucznymi, są to włókna otrzymywane w procesie wytwórczym w odróżnieniu od materiałów, które występują w postaci włóknistej w sposób naturalny [N-02]. Angielskie określenie tych włókien „*man-made fibres*” lepiej oddaje istotę tej definicji. Współcześnie włókna chemiczne stanowią większość materiałów wyjściowych produkowanych ogólnie przez przemysł tekstylny oraz przez jego dział – sektor tekstyliów przemysłowych. Włókna te stosunkowo łatwo mogą być sklasyfikowane w oparciu o budowę chemiczną ale w ramach każdej z grup znajdują się włókna o różnych markach handlowych, wykazujące różnice właściwości wynikające z różnych metod produkcji oraz różnych właściwości użytych surowców. Podstawowy podział wyróżnia:

- włókna organiczne, wytwarzane z polimerów naturalnych i sztucznych
- włókna nieorganiczne.

Porównanie przeciętnych właściwości włókien chemicznych podano w tablicach 2.10 i 2.11.

Poniżej podano angielskie odpowiedniki omawianych terminów. Mogą one być przydatne ze względu na dominującą ilość publikacji angielskojęzycznych z dziedziny włókien technicznych.

Metody produkcji włókien chemicznych | Włókna chemiczne są formowane z polimerów, poprzez ekstrudowanie, tj. wyciskanie przez dyszę *przędzalniczą*, rys. 2.3. Polimery znajdują się początkowo w stanie stałym i muszą być przed tym procesem wprowadzone w stan płynny (tzw. płyn przędzalniczy, o konsystencji zbliżonej do miodu). Obecnie istnieją cztery odmiany tego procesu:

ang. spinneret

1). Przędzenie na mokro polimerów rozpuszczonych w chemicznie w rozpuszczalnikach. Jest to najstarszy z procesów produkcji włókien chemicznych. Dysza przędzalnicza jest zanurzona w kąpeli chemicznej, w której włókna wydostające się z dyszy ulegają utwardzeniu, rys. 2.4. W procesie przędzenia na mokro produkowane są włókna akrylowe, sztuczne jedwabie, aramidy, modakryle i poliuretany.

ang. wet spinning

2). Przędzenie na sucho jest również, wbrew nazwie, procesem formowania włókien z roztworu polimerów rozpuszczonych w rozpuszczalnikach. Jednakże twardnienie włókien następuje nie na skutek reakcji chemicznej lecz poprzez odparowanie rozpuszczalnika. Dysza przędzalnicza nie jest zanurzona w kąpeli ale owiewana strumieniem powietrza lub gazu obojętnego. W procesie tym produkowane są włókna octanowe, niektóre akryle modakryle i poliuretany, winyle, PBI.

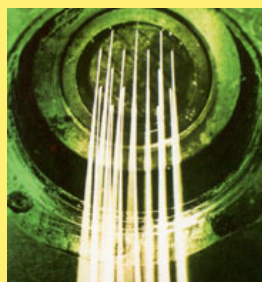
ang. dry spinning

3). Przędzenie na mokro polimerów rozpuszczonych poprzez podgrzanie do temperatury topnienia. Twardnienie włókien następuje bezpośrednio, poprzez chłodzenie. W procesie tym powstają nylony, poliolefiny, poliestry, polchlorki winylidenu, PPS. Możliwe jest uzyskiwanie włókien o różnych kształtach przekroju poprzecznego, w tym również zawierających jeden lub więcej pustych kanałów.

ang. melt spinning

4). Przędzenie włókien z polimerów w stanie żelu. Proces ten jest również formą przędzenia na sucho. Uzyskiwane w nim są niektóre wysokowytrzymałe polietyleny i aramidy. Polimer, który jest ekstrudowany, nie znajduje się w rzeczywistym stanie płynnym ale tworzy ciekły kryształ, w którym łańcuchy polimerowe łączą się ze sobą w wielu punktach. Umożliwia to powstanie – po wytłoczeniu – silnych sił pomiędzy łańcuchami oraz wysokiego stopnia zorientowania łańcuchów wzdłuż osi włókna.

ang. gel spinning



Rys. 2.3 – typowa dysza przędzalnicza¹⁾

Rys. 2.4 – proces przędzenia na mokro – widok wanien, w których włókna są poddawane kąpeli utwardzającej¹⁾

¹⁾ fotografia – AKZO Nobel, za [233]

Włókna chemiczne z polimerów naturalnych

W tej grupie głównym naturalnym surowcem o znaczeniu ekonomicznym jest celuloza, otrzymywana z pulpy drzewnej.

1). Włókna na bazie polisacharydów

1.1). Włókna otrzymywane na bazie celulozy i jej pochodnych

Polimerem włóknotwórczym jest tu celuloza. Jest ona otrzymywana przemysłowo z pulpy drzewnej (miazgi drzew iglastych, głównie świerku i sosny). Celuloza jest rozpuszczana w różnych substancjach chemicznych, dając roztwór nazywany płynem przędzalniczym. . Roztwór ten jest następnie tłoczony poprzez niewielkie dysze do kąpieli, w której formowane są włókna (regeneracja celulozy).

Włókna wiskozowe | Jest to tzw. jedwab wiskozowy – najwcześniej uzyskane włókna chemiczne. Są one formowane z roztworu celulozoksantogenianu sodu (otrzymywanego z celulozy pod wpływem działania wodorotlenku sodu i dwusiarczku węgla) w rozcieńczonym wodorotlenku sodu. W kąpieli następuje rozkład tego związku i formowane są włókna. Skład kąpieli wpływa na dalsze właściwości włókien wiskozowych, stąd występuje duża ich różnorodność. Ogólnie włókna wiskozowe mają właściwości podobne do właściwości bawełny. Obecnie ich znaczenie w produkcji tekstyliów technicznych coraz bardziej się zmniejsza. Wynika to z niskich parametrów mechanicznych tych włókien, takich jak niska wytrzymałość oraz słabe zachowywanie kształtu. Niektóre właściwości włókien wiskozowych podano w tablicy 2.10.

Włókna modalne | Włóknami modalnymi nazywamy modyfikowane włókna celulozowe wiskozowe, mające wysoką wytrzymałość na zerwanie i wysoki moduł sprężystości przy rozciąganiu¹⁾ w stanie mokrym. Są one stosowane – same lub w mieszankach z innymi włóknami naturalnymi lub chemicznymi – do wytwarzania tkanin i dzianin odzieżowych oraz elementów wyposażenia wnętrza itp.

Lyocell | Są to włókna otrzymywane z celulozy w nowym procesie bezpośredniego rozpuszczania w związku złożonym – NMMO. W procesie produkcji celuloza jest rozpuszczana bezpośrednio i po przefiltrowaniu, bez formowania pochodnych, ekstrudowana do kąpieli aminotlenków, gdzie koaguluje w postaci włókien. Są to włókna wytrzymałe (również na mokro), dobrze wchłaniają wilgoć. Dają się dobrze barwić. Możliwe jest uzyskiwanie specjalnych tekstur. Są odporne na zaganianie. W dotyku przypominają jedwab, zamsz lub skórę. Ulegają biodegradacji. Prace nad opracowaniem nowej technologii rozpoczęły się już w 1939 r., a produkcja przemysłowa – od 1992 r. Najbardziej znane nazwy handlowe to Tencel (Courtaulds Fibers, USA) oraz Lenzing Lyocell (Lenzing, Austria).

Włókna octanowe | Włókna octanowe zbudowane są z estrów (octanów) celulozy. Jest to tzw. jedwab octanowy. Włókna są formowane z trioctanu celulozy rozpuszczonego w acetonie lub mieszaninie alkoholu metylowego i dichlorometanu, po przetłoczeniu przez dysze do kąpieli regenerującej. Wyróżniamy włókna octanowe i trójoctanowe. Włókna octanowe, są to włókna w których od 74% do 92% grup hydroksylowych jest acetylowanych. Jeżeli nie mniej niż 92% grup hydroksylowych jest acetylowanych – mówimy o włóknach trójoctanowych. Włókna octanowe są podobne do jedwabiu naturalnego: są miękkie, połyskliwe, mało gniotliwe oraz mniej – od innych włókien celulozowych – higroskopijne. Mają jednak małą – mniejszą od włókien wiskozowych wytrzymałość na rozciąganie. Włókna octanowe mają raczej ograniczone zastosowanie w produkcji tekstyliów technicznych. Niektóre właściwości włókien octanowych podano w tablicy 2.10.

Pierwsze zapiski dotyczące wytwarzania włókien sztucznych pochodzą z 1665 r. Angielski naturalista, Robert Hook, w książce „Micrographia or some physiological descriptions of minute bodies” sugerował możliwość wytwarzania z masy żelatynowej włókien równie dobrych („if not fully as good, nay better”) jak jedwabne. Ideę tę powtórzył później Francuz Rene A.F. Réaumur w 1710 r. („Jedwab jest tylko płynną gumą, która została wysuszona. Czyż nie możemy sami uzyskać jedwabiu z gumy i żywicy?”), a w 1734 r. w książce „Notatki przydatne dla historii owadów”, opisuje sposób produkcji jedwabiu [129]. Szwajcarski chemik Audemars uzyskał w 1855 r. angielski patent nr E.P. 283, na „sztuczny jedwab”. Rozpuszczał on wewnętrzną, włóknistą korę drzewa morwowego. Włókna uzyskiwał zanurzając igłę w lepkiej cieczy i susząc je w powietrzu. Angielski chemik i elektryk, Sir Joseph W. Swan, na początku lat osiemdziesiątych XIX w. współpracował z T. Edisonem przy opracowaniu włókna do żarówki. Eksperymentował on z roztworem podobnym do uzyskanego przez Audemarsa, przepuszczając go przez bardzo małe otworki do kąpieli koagulującej (patent brytyjski nr 5978 z 1883 r.). Te włókna były stosowane we wczesnych konstrukcjach żarówek Edisona. Swan pokazywał drobne wyroby ze swoich włókien na londyńskiej wystawie wynalazków w 1885 r.

Prawdziwy początek i produkcja na masową skalę nastąpiły dzięki francuskiemu chemikowi, hrabiemu Hilaire de Chardonnet, który w 1884 r. uzyskał pierwszy ze swoich 48 patentów na produkcję „sztucznego jedwabiu” (nr 165 3499). Jego tkaniny wzbudziły sensację na wystawie światowej w Paryżu, w 1889 r. Dwa lata później wybudował on w Besançon pierwszą fabrykę włókien wiskozowych, zyskując tym samym miano „ojca przemysłu jedwabiu sztucznego”. Tzw. „jedwab Chardonnet” był materiałem pięknym ale stosunkowo łatwopalnym (używano

¹⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pktcie. 2.2.4.

Włókna miedziowe | Włókna miedziowe są formowane z roztworu celulozy w wodorotlenku amonowym miedzi (metoda miedziowo-amoniakalna). Zwane są też cupro lub cuprammonium.

Włókna miedziowe mają właściwości zbliżone do włókien wiskozowych. Mogą znacznie zwiększać swoją objętość („puchnąć”) pod wpływem wilgoci, przez co w stanie wilgotnym mają małą wytrzymałość i wykazują duże wydłużenie plastyczne. Nie mają dużego zastosowania w produkcji tekstyliów przemysłowych. Niektóre właściwości włókien miedziowych podano w tablicy 2. 10.

1.2). Inne

Włókna alginowe | Włókna otrzymywane z soli metali kwasu alginowego. Najczęściej jest to alginian wapnia, o budowie chemicznej $C_6H_8O_8$ podobnej do celulozy. Kwas alginowy jest to naturalnym polimerem występującym w wodorostach. Jest to polisacharyd zbudowany głównie z kwasu mannurowego (pochodna mannozy). Stanowi składnik błony komórkowej glonów, przeważnie brunatnic. Kwas alginowy jest stosowany w wielu dziedzinach przemysłu. Włókna alginowe wyprodukowano po raz pierwszy w Japonii w 1939 r., a następnie uzyskano je po II wojnie światowej w Anglii (Courtaulds).

Włókna alginowe cechują się bardzo wysoką absorpcją wilgoci. Ulegają żelowaniu pod wpływem kontaktu z jonami sodu. Mają zdolność stałej wymiany jonów z innymi metalami. Włókna te są stosowane przede wszystkim w materiałach opatrunkowych, w których utrzymywanie stałej wilgotności rany jest niezwykle ważne. Najbardziej znany wyrób z tej grupy to Alginate, firmy Acordis.

PLA | Nazwa PLA jest skrótem od angielskiej nazwy *Polyactide Fiber*. Są to włókna produkowane z estrów kwasu mlekowego otrzymywanego z naturalnych cukrów (min. 85 % składu włókna). Jako surowiec podstawowy wykorzystywane są ziarna kukurydzy i trzcina cukrowa. Ulegają biodegradacji.

Włókna PLA charakteryzują się małą absorpcją wilgoci, są wytrzymałe i miękkie. Są lżejsze niż większość włókien. Są odporne na działanie promieniowania UV. W procesie wytwarzania możliwe jest dostosowywanie w szerokim zakresie ich właściwości do wymagań. Włókna te są produkowane komercyjnie od 2002 r., przez firmę Cargill Dow. Włókna PLA są wykorzystywane głównie przy produkcji odzieży (zwłaszcza sportowej i do specjalnych zastosowań) oraz mebli (również do użytku zewnętrznego).

2). Włókna na bazie polipeptydów

Włókna na bazie polipeptydów otrzymuje się z białek prostych roślinnych (np. *zeina* z kukurydzy) lub zwierzęcych: *kazeiny* (z mleka), *keratyny* (z piór ptaków), *żelatyny* lub z *fibroiny* i *serycyny* (z odpadów jedwabiu). Z wyglądu i dotyku przypominają wełnę. Mają małą wytrzymałość mechaniczną, zwłaszcza po zawilgoceniu. Najczęściej produkowane są jako włókna staplowe dodawane do wełny tkackiej i pilśni.

Przykładowe nazwy handlowe: wipolan (Polska), anital (Włochy). Nie mają zastosowania w produkcji tekstyliów przemysłowych.

Azlon | Włókna produkowane z protein roślinnych określane są często ogólną nazwą rodzajową Azlon. Są to włókna regenerowane (podobnie jak większość włókien celulozowych). Włókna te są miękkie i w stanie mokrym bardzo szybko tracą wytrzymałość.

3). Inne włókna z polimerów naturalnych

Włókna kauczukowe (elastodienowe) | Jest to włókno formowane z naturalnego poliizoprenu wyekstrahowanego z wodnego roztworu kauczuku lub z emulsji lateksowej drzewa *Hevea brasiliensis* i zwulkanizowanego. Jest elastyczne, najczęściej o przekroju okrągłym. Mało odporne na działanie światła i podwyższonej temperatury. W oplocie z włókien celulozowych jest stosowane do wyrobu tkanin elastycznych.

nitrorozpuszczalników). W 1892 r. trzech brytyjscy wynalazcy: Charles F. Cross, Edward J. Bevan i Clayton Beadle opatentowali metodę produkcji bezpiecznych włókien wiskozowych (z sodą kaustyczną jako rozpuszczalnikiem).

Pierwszy produkt z octanów celulozy opracował w 1893 r. Arthur D. Little z Bostonu. Była to cienka folia. W 1910 r. Camille i Henry Dreyfus rozpoczęli w Bazylei produkcję filmów dla kinematografii i artykułów toaletowych z tego materiału. Wybudowali oni w czasie I wojny światowej, w Anglii, fabrykę lakierów octanowych do skrzydeł samolotowych i innych produktów. Włókna octanowe wprowadziła amerykańska firma Celanese w 1924 r.

Metodę produkcji włókien miedziowych opracował Francuz L.-H. Despaissis (patent nr 203 741). Ich produkcję rozpoczęto w Niemczech w 1897 r.

Emulsja lateksowa jest uzyskiwana z kauczukowca (*hevea*, głównie *Hevea brasiliensis*) – drzewa z rodziny wilczomleczowatych, występującego w strefie międzyzwrotnikowej Ameryki Południowej, uprawianego również na Półwyspie Malajskim. Wytwarza ono w korze mleczny sok (lateks) przerabiany na kauczuk naturalny. Metodami tradycyjnymi otrzymuje się 8 rodzajów kauczuku naturalnego (np. płyty wędzone, krępy jasne, krępy brązowe itd). Ulepszone metody chemiczno-mechaniczne pozwalają uzyskać standaryzowane gatunki kauczuku naturalnego.

Kauczuki syntetyczne są to polimery, z których podobnie jak z kauczuku naturalnego można otrzymać gumę. Najważniejsze rodzaje: kauczuk styrenowy, butadienowy, izoprenowy, również droższe odmiany (kauczuk nitylowy, kauczuk chloroprenowy). Służą jako surowiec do otrzymywania gumy.

1). Poliamidy

Włókna poliamidowe są uzyskiwane z polimerów, których łańcuchy zbudowane są z merów zawierających charakterystyczną grupę --CO--NH-- . Włókna poliamidowe dzielimy na dwie główne grupy, których każda obejmuje dużą ilość wyrobów o specyficznych właściwościach:

- poliamidy alifatyczne (nylony)
- poliamidy aromatyczne (aramidy)



W okresie po I Wojnie Światowej wielu chemików dostrzegało potrzebę rozwijania podstawowej wiedzy na temat chemii polimerów. Na początku lat trzydziestych XX w. chemik Wallace M. Carothers wraz ze współpracownikami z firmy E. I. DuPont de Nemours & Company w USA rozpoczął fundamentalne badania kwasów dwukarboksylowych oraz dwuamin. Badania te doprowadziły w 1937 r. do syntezy poliamidu, uznawanego najczęściej za pierwsze w pełni syntetyczne włókno¹⁾. Otrzymano je poprzez polikondensację sześciometylenodwuaminy z kwasem adypinowym. Uzyskany polimer, o nazwie nylon został przez firmę DuPont opatentowany. Była to odmiana nazywana dzisiaj nylonem 6.6 lub nylonem 66 (Carothers nazywał je po prostu włóknami 66). Ze względu na wspomniany patent inne firmy chcące skorzystać z sukcesu nowego włókna musiały opracować nieco inny polimer. Zaledwie rok później, w 1938 r., niemiecki naukowiec Paul Schlack z I.G. Farben, zsyntezował polimer o jednym sześciatomowym łańcuchu węglowym zamiast dwóch, poprzez polimeryzację monomeru o nazwie



Rys. 2.5²⁾ – Wallace Hume Carothers w prezentuje nylon w laboratorium firmy DuPont

Rys. 2.6³⁾ – prezentacja nylonu w pawilonie DuPonta na Targach Światowych w Nowym Jorku w 1938 r. Dwie modelki próbują rozerwać parę nylonowych pończoch.

kaprolaktam. Polimer ten nosi obecnie nazwę nylon 6, a jego właściwości są niemal identyczne jak nylonu 6.6. Jego produkcję rozpoczęto pod nazwą perlon.

Włókno nylonowe zostało zaprezentowane po raz pierwszy na Targach Światowych w Nowym Jorku w 1938 r. (rok po śmierci Carothersa) w formie słynnych nylonowych pończoch, które w następnym roku stały się dostępne w handlu. Był to wielki „przebój” rynkowy od 1940 r., ale wkrótce stał się bardzo trudno dostępny, gdy Stany Zjednoczone przystąpiły do II Wojny Światowej. Nylon stał się materiałem do produkcji wojskowej – wykonywano z niego liny i spadochrony. Mało znany jest fakt, że pierwszym komercyjnym wyrobem z nylonu były nici do zębów. W początku lat pięćdziesiątych nylon podbił ostatecznie świat – nic nie mogło zatrzymać ekonomicznego przełomu i triumfalnego marszu „nylonowych pończoch”. Włókna nylonowe są obecnie pod względem ilości produkcji (4 + 5 mln ton rocznie) na drugim miejscu, po poliestrze.

1.1). Poliamidy alifatyczne (nylony)

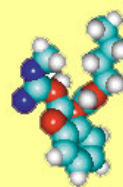
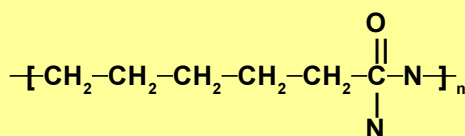
Nylon był pierwszym całkowicie syntetycznym włóknem chemicznym. Do dzisiaj jest jednym z najpowszechniej stosowanych włókien z polimerów wytwarzanych przez przemysł. Wciąż jest wykorzystywany w przemyśle odzieżowym, chociaż zakres jego zastosowań jest znacznie szerszy i obejmuje wiele dziedzin techniki.

Włókna nylonowe odznaczają się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi: dużą wytrzymałością na rozciąganie i zginanie, dużą sprężystością oraz wytrzymałością na ścieranie, małym współczynnikiem

¹⁾ Niestety, gdyż pierwsze były włókna Pe-Ce, otrzymane przez I.G. Farbenindustrie w 1931 r.

²⁾ Pictorial Collections, Hagley Museum and Library, Wilmington, DE. Ilustracja za [233]

³⁾ Ilustracja za [233]



Rys. 2.7¹⁾ – budowa cząsteczki nylonu 6.6

tarcia. Cechują się również, dużą odpornością na gnienie i niszczące działanie insektów.

Z punktu widzenia produkcji tekstyliów ich wady to: duża skłonność do pilingu (mechacenia), mała odporność na działanie silnych kwasów i środków utleniających. Pod wpływem światła słonecznego włókna poliamidowe mogą żółknąć, a także zmniejsza się ich wytrzymałość. Są wrażliwe na działanie wilgoci, pod której wpływem zmieniają długość. Większość nylonów w temperaturze bliskiej temperatury topnienia gwałtownie traci wytrzymałość²⁾.

Nylony są polimerami o średniej krystaliczności. Zawierają zarówno część krystaliczną jak i amorficzną. Inaczej niż w innych polimerach, procent krystaliczności może się zmieniać w dość szerokim zakresie. Pod mikroskopem elektronowym można zaobserwować kryształy w formie lamelli. Podczas formowania wyrobów włóknistych struktura ta jest częściowo niszczone, co nadaje włóknom wysoki stopień zorientowania kierunkowego, któremu m.in. zawdzięcza nylon swoją wysoką wytrzymałość na rozciąganie.

Włókna z poliamidów alifatycznych wytwarza się w wielu odmianach oznaczanych liczbami oznaczającymi ilość atomów węgla w podstawowym merze łańcucha, np. nylon 6: $\text{[NH}-(\text{CH}_2)_5\text{CO]}_n$.

Ponieważ nazwa nylon, mimo że powszechnie stosowana, jest zastrzeżona dla firmy DuPont, wyroby innych producentów oznaczane są innymi nazwami handlowymi, np. caprolan, hydrofil, anso, perlon, silon, kapron, rilsan, enant, dederon, helion, lilion, ortalion. W Polsce używane są również nazwy: polana (włókna cięte), stilon (włókna ciągłe). Dla określenia całej grupy włókien stosuje się zazwyczaj nazwę poliamidy, oznaczając je liczbą j.w., np. poliamid 6.

Z włókien nylonowych bardzo wiele wyrobów: tkaniny i tekstylia techniczne, odzieżowe i dekoracyjne, liny, włókna wzmacniające itp. Niektóre właściwości nylonu 6.6 jako polimeru podano w tablicy 2.8, a właściwości włókien nylonowych – w tablicy 2.10.

1.2). Poliamidy aromatyczne (aramidy)

Włókna aramidowe należą do grupy włókien technicznych o najwyższych parametrach użytkowych (*ang. high performance fibers – HPF*) i były pierwszymi w tej grupie. Zachowują wysokie właściwości mechaniczne w dużym zakresie temperatur. Ze względu na bardzo szczególne, ukierunkowane właściwości poszczególnych rodzajów włókien aramidowych, stosuje się je do wykonywania wyrobów o specjalnym przeznaczeniu. Chemicznie są to włókna składające się z makrocząsteczek liniowych zawierających grupy aromatyczne połączone wiązaniami amidowymi lub imidowymi, z których co najmniej 85% jest połączonych bezpośrednio z dwoma pierścieniami aromatycznymi. Aramidy dzielimy na dwie grupy:

- para-aramidy, np. Kevlar, Twaron, Technora (prod. ok. 40 tys. ton rocznie)
- meta-aramidy, np. Nomex, Conex (prod. ok. 15 tys. ton rocznie)

Meta-aramidy są włóknami stosunkowo szeroko stosowanymi. Charakteryzują się dużą wytrzymałością i trwałością oraz odpornością na podwyższone temperatury, przy relatywnie niezbyt wysokiej cenie.

Para-aramidy są to włókna o module sprężystości podłużnej 3 – 7 razy wyższym niż dla meta-aramidów i podobnej co one odporności termicznej. Stabilność termiczna jest rezultatem obecności pierścieni aramidowych w cząsteczce, a budowa typu para- zapewnia wysoki moduł sprężystości i wytrzymałość.

W roku 1971 firma DuPont wprowadziła Kevlar – włókno aramidowe opracowane już w 1964 r. przez Stephanie Louise Kwolek. Pracowała ona nad polimerami, które mogłyby zastąpić stalowe kordy opon samochodowych. Zwykle rozpuszczała uzyskane przez siebie polimery, a jej współpracownik, Herbert Blades, wytwarzał z nich włókna. W 1964 r. wykonała polimer, który się nie rozpuścił, poszła więc poszukać odpowiedniego rozpuszczalnika. Po wielu próbach polimer rozpuścił się ale roztwór wyglądał jak brud-

¹⁾ Ilustracja wg University of Southern Missouri, za [233]

²⁾ Patrz – tablica 2.10

Kevlar | Jest to pierwsze z włókien aramidowych i pierwsze z grupy włókien HPF, wprowadzone na rynek w 1971 r. Jego producentem jest firma DuPont. Chemicznie jest to *poli para-fenylene tereftalamid*. Główne zalety Kevlaru to: wysoka wytrzymałość na rozciąganie, mały ciężar własny, odporność termiczna, duży (dla tej grupy włókien) moduł sprężystości podłużnej, małe wydłużenie przy zerwaniu, mała przewodność elektryczna, duża odporność chemiczna. Kevlar, podobnie jak grafit, ma nieznacznie ujemny współczynnik rozszerzalności cieplnej, co pozwala to stosować go do produkcji stabilnych termicznie kompozytów. W odróżnieniu jednak od grafitu, cechuje go duża twardość, duża odporność na przecięcie i uderzenie. Kevlar posiada właściwości samogasnące (tj. nie podtrzymuje palenia).

Wadą Kevlaru jest spora absorpcja wilgoci, przez co kompozyty, w który jest zastosowany, są bardziej wrażliwe na wpływ środowiska niż kompozyty, w których zastosowano włókna szklane czy węglowe. Kevlar ma małą wytrzymałość na ściskanie, zwłaszcza zmęczeniową. Twardość Kevlaru powoduje, że do cięcia wykonanych z niego tkanin potrzebne są specjalne nożyce, a wykonywanie otworów w kompozytach kevlarowych wymaga specjalnych narzędzi. Kevlar jest obecnie produkowany w trzech odmianach. W tablicy 2.1 zestawiono właściwości wytrzymałościowe poszczególnych odmian Kevlaru.

Pierwotnie opracowany jako materiał do wzmacniania opon samochodowych, kevlar jest obecnie stosowany również do wykonywania wyrobów narażonych na duże obciążenia, np. kamizelki kuloodporne, czy hełmy. W mieszkankach z innymi włóknami stosowany jest do produkcji wielu wyspecjalizowanych wyrobów, np. kombinezonów strażackich, rękawic odpornych na przebicie przez metal itp. Wykorzystywany jest też do produkcji kompozytów, z których wykonywane są np. fragmenty samolotów. W budownictwie były stosowane tkaniny z Kevlaru, jednak ich wysoka cena powoduje, że są to zastosowania jednostkowe.

na woda, a nie – jak zwykle – jak gęsta męś. Chciała jednak uzyskać z tego roztworu włókna. Jej współpracownik nie chciał tego wykonać, tłumacząc się, że roztwór jest zbyt rzadki, a płynące w nim zanieczyszczenia zatkają jego urządzenie. Po naganiach Kwolek wykonała jednak włókna, które okazały się bardziej wytrzymałe na rozciąganie niż stal. Kwolek opatentowała Kevlar w 1966 r. Ta urodzona w 1923 r. w Kensington, w Pensylwanii chemiczka, ukończyła w 1946 r. Carnegie Institute of Technology (obecnie Carnegie-Mellon University) i od razu podjęła pracę w firmie DuPont. Ogółem, w ciągu czterdziestu lat swojej pracy badawczej uzyskała 28 patentów. W 1995 r. została wprowadzona do amerykańskiego National Inventors Hall of Fame.

Tablica 2.2 – Charakterystyka aramid Kevlar

Odmiana	Gęstość	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości podłużnej	Wydłużenie przy zerwaniu
	g/cm ³	GPa	GPa	%
29	1.44	3.6	83	4.0
49	1.44	3.6 ÷ 4.1	131	2.8
149	1.47	3.4	186	2.0

Tablica. 2.2
Właściwości wytrzymałościowe Kevlaru¹⁾

Twaron | Twaron jest para-aramidem produkowanym przez firmę Teijin. Jest to aramid o właściwościach podobnych do Kevlaru 29, a w wersji HM (*ang. High Modulus*) – do Kevlaru 49. Z Twaronu są wykonywane m.in. liny do konstrukcji budowlanych, o bardzo wysokiej nośności.

Tablica 2.3 – Charakterystyka aramid Twaron

Odmiana	Gęstość	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości podłużnej	Wydłużenie przy zerwaniu
	g/cm ³	GPa	GPa	%
1000	1.44	2.90	75	2.4
D2100	1.44	3.10	55	2.4
2300	1.44	3.25	80	2.4
2200	1.44	3.00	110	2.4
1055	1.44	2.90	115	2.4

Tablica. 2.3
Właściwości wytrzymałościowe Twaronu, wg [5.65]

Znanym przykładem zastosowania lin z włókien Twaron są odcinki wieży telekomunikacyjnej Collserola, w Barcelonie, wybudowanej na Olimpiadę w 1992 r.

Inne właściwości Twaronu: wytrzymałość na ściskanie poprzeczne: ~150 MPa, wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe: ~0.45 MPa, współczynnik Poisson'a: 0.38, współczynnik rozszerzalności cieplnej: 1.8×10^{-6} 1/K.

¹⁾ Wg: Barry Berenberg: „Kevlar”, za [233]

Nomex | Niewielka zmiana w usytuowaniu grup amidowych pomiędzy pierścieniami aromatycznymi w stosunku do Kevlaru, pozwoliła uzyskać Nomex – ognioodporne włókno, o dobrych właściwościach tekstylnych. Produkuje się z niego (w mieszankach z Kevlarem) sprzęt ochronny dla strażaków, a także używa do ochrony miejsc narażonych na bezpośrednie oddziaływanie ognia, np. dolne strefy powłok balonów na gorące powietrze.

Inne | Spośród wielu produkowanych aramidów warto wymienić Kynol i Kaisol, produkowane przez Carborundum Co., USA. Mogą one wytrzymać krótkotrwale temperatury odpowiednio 1 000 °C i 2 500 °C [204]. Są stosowane przede wszystkim do celów wojskowych. Ponadto znane są takie wyroby jak Enkatherm (prod. Enka-Glanzstoff). Czasami wśród aramidów wymienia się również Kermel (prod. Rhône-Poulenc-Textiles), należący do grupy poliamido-imidów.

2). Poliestry

Poliestry są polimerami zawierającymi w łańcuchu grupy estrowe $[-CO-O-]$. Są one produkowane w wyniku polikondensacji kwasów dikarboksylowych z alkoholami polihydroksylowymi, najczęściej kwasu tereftalowego z glikolem etylenowym.

2.1). PET (poliestry niemodyfikowane)

PET jest podstawowym polimerem z grupy poliestrów. Chemicznie jest to tereftalan polietylenu (*ang. polyethylene terephthalate – PET*). Nazwa włókna poliestrowe, bezdodatkowych określeń oznacza zazwyczaj włókna PET.

Grupa ta obejmuje większość wykorzystywanych w zastosowaniach technicznych włókien poliestrowych. Włókna poliestrowe charakteryzują się: dużą wytrzymałością na rozerwanie i zginanie, dobrą odpornością na ścieranie, działanie światła i czynników chemicznych. Nie wchłaniają wilgoci i nie zmieniają długości pod wpływem wody. Są bardzo elastyczne i prawie nie ulegają złamaniu. Mają dobre właściwości tekstylne¹⁾. Mają dobrą odporność na działanie promieni słonecznych oraz czynników chem. (słabe kwasy i alkalia), są odporne biologicznie. Włókna ciągle mają powierzchnię gładką, cięte poddaje się karbikowaniu. Włókno o nazwie Trevira CS, produkowane przez koncern Hoechst ma właściwości kwalifikujące je jako samogasnące i nierozprzestrzeniające ognia. Nazwy handlowe włókien poliestrowych: dacron, trevira, diolen, terylen. W Polsce również: elana, torlen.

Znaczenie włókien poliestrowych w branży tekstyliów przemysłowych jest bardzo duże i stale rośnie, przede wszystkim ze względu na szczególne właściwości poliestrów, pod pewnymi względami korzystniejsze do niektórych zastosowań niż właściwości nylonów. **Poliestry są jednym z podstawowych surowców do produkcji tkanin wykorzystywanych na konstrukcje membranowe.** Niektóre, przeciętne właściwości poliestrów PET podano w tablicy 2. 10.

2.2). PEN

PEN jest nową generacją polimerów o wysokich właściwościach wytrzymałościowych, z rodziny poliestrów. Chemicznie jest to naftalan polietylenu (*ang. polyethylene naphthalate – PEN*). Wykonuje się z nich włókna i folie. Najważniejsza cecha włókien PEN to wysoki moduł sprężystości podłużnej – około 2.5-krotnie większy niż dla poliestru PET, a pięciokrotnie większy niż dla nylonu. Ponadto cechuje je duża stabilność wymiarowa i wysoka

Angielscy chemicy J.R. Whinfield i J. T. Dickson wraz z wynalazcami W.K. Birtwhistle i C.G. Ritchie they uzyskali pierwsze włókna poliestrowe o nazwie



Rys. 2.8 – przekrój włókien poliestrowych, powiększenie 1 000 x. Włókna półmatowe, barwione dwutlenkiem tytanu. Fotografia: Tae Woo Kim, FITI Testing & Research Institute, Korea za [233]

Terylene w 1941 r. (patent angielski nr 578 079). Firma DuPont opracowała w 1949 r. włókna Dacron, które wprowadziła na rynek w roku 1953. Poliester jest włóknem chemicznym produkowanym obecnie w największych ilościach (ok. 16 mln ton rocznie).

Włókno Pentex, przy dużej wytrzymałości jest relatywnie tanie – ok. dwukrotnie droższe od zwykłego poliestru ale wielokrotnie tańsze od innych włókien wysoko-wytrzymałych.

²⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pkt. 2.2.4.

wytrzymałość. Włókna te znajdują zastosowanie do wyrobu najwyższej jakości żagli regatowych, kompozytów, lin, kordów opon itp. Jedynym produktem dostępnym w tej grupie jest Pentex, produkowany przez firmę Honeywell. Podstawowe właściwości włókien Pentex podano w tablicy 2.4.

Tablica 2.4 – Charakterystyka włókien Pentex

Odmiana ¹⁾	Masa liniowa włókna	Wytrzymałość włókna na rozciąganie	Siła zrywająca włókno	Moduł sprężystości podłużnej	Wydłużenie przy zerwaniu
	tex	N/tex	N	N/tex	%
500	56	0.8	45	22	6
1000	111	0.8	90	22	6
1300	144	0.8	117	22	6
1500	167	0.8	135	22	6

¹⁾ oznaczenie masy liniowej włókna w denierach

Tablica. 2.4
Właściwości wytrzymałościowe włókien Pentex, wg [12]

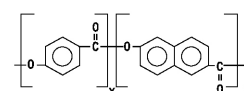
2.2). LCP

Nowym, bardzo specyficznym produktem jest grupa włókien produkowanych z roztopionych wysokoparametrowych polimerów ciekłokrystalicznych – LCP (*ang. liquid crystal polymer*). Stosowana jest również nazwa LCAP (*ang. liquid crystal aromatic polyester*). Jedynym, dostępnym komercyjnie, włóknem tego rodzaju jest Vectran. Jest to włókno poliestrowo-poliarylatowe. Jego powstanie poprzedził okres ok. dwudziestoletnich badań prowadzonych przez firmę Celanese (USA) od połowy lat siedemdziesiątych XX w. W roku 1985 wprowadziła ona na rynek rodzinę *termotropowych* żywic LCP o nazwie Vectra. Z tych żywic są produkowane włókna Vectran.

W procesie ich produkcji wykorzystywane są właściwości polimerów ciekłokrystalicznych, które są sztywne i ułożone w przypadkowo zorientowane domeny. W stanie roztopionym polimer wykazuje anizotropię w zachowaniu. Po wytłoczeniu polimeru przez bardzo małe dysze, domeny układają się równolegle do siebie wzdłuż osi włókna. Bardzo silnie zorientowana struktura włókna powoduje, że ma ono znakomite właściwości mechaniczne. Schemat procesu porządkowania domen przedstawiono na rys. 2.9.

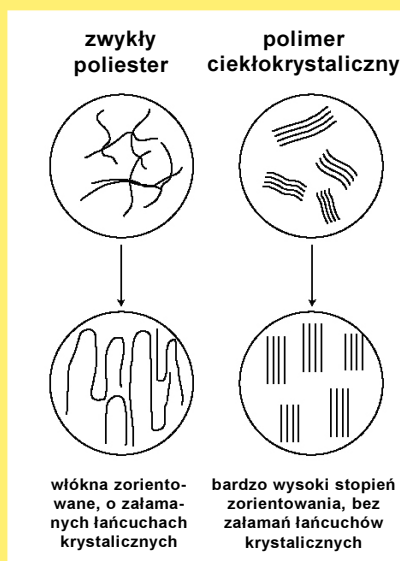
Vectran należy, obok aramidów, polietylenów UHMW i włókien PBO, do grupy włókien o najwyższych właściwościach mechanicznych i eksploatacyjnych.

Jego najistotniejsze cechy to: wysoka wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości podłużnej, bardzo małe pełzanie, bardzo wysoka odporność na ścieranie, bardzo duża odporność na wielokrotne zginanie, minimalna absorpcja wilgoci, bardzo dobra odporność chemiczna (praktycznie nie jest wrażliwy na działanie większości kwasów, zasad i rozpuszczalników), bardzo dobre właściwości dielektryczne, znakomita odporność na przecięcie (ok. trzykrotnie większa niż dla aramidów i UHMWPE), bardzo dobre tłumienie drgań, niezmiennosc parametrów w dużym zakresie temperatur. W postaci folii charakteryzuje się najmniejszą przepuszczalnością powietrza i pary wodnej ze wszystkich polimerów syntetycznych. Temperatura topnienia wynosi 330°C, gęstość 1.4 g/cm³. Współczynnik rozszerzalności cieplnej Vectranu jest ujemny, o wartości bezwzględnej wzrastającej wraz z temperaturą (od $-4.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ w temp. 20°C do $-26.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ w temp. 290°C).



budowa cząsteczki Vectranu

Polimery termotropowe są to polimery przetwarzane po roztopieniu w wysokiej temperaturze.



Rys. 2.9 – proces produkcji włókien Vectran z polimerów ciekłokrystalicznych. Opracowano na podstawie [38].

Włókna Vectran opracowano z myślą o zastosowaniach wojskowych. Po raz pierwszy zastosowano je do wykonania lin holujących w dużej odległości za okrętami podwodnymi US Navy sprzęt nastłuchowy, wykorzystując zarówno dużą wytrzymałość włókien, jak i bardzo małe pełzanie.

Włókna Vectran produkowane są w dwóch odmianach: M i HS. Odmiana HS ma wyższe wartości parametrów wytrzymałościowych. Z obydwu odmian produkowane są włókna o różnej masie liniowej¹⁾, różniące się wartościami wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości. Ogólnie, właściwości mechaniczne włókien Vectran są zbliżone do właściwości aramidów. Najważniejsze z nich podano w tablicy 2.5.

Dobrym przykładem praktycznego wykorzystania wysokich parametrów mechanicznych włókien Vectran jest zastosowanie ich do produkcji specjalistycznych rękawic

Tablica 2.5 – Charakterystyka włókien Vectran

Odmiana	Gęstość	Wytrzymałość włókna na rozciąganie		Moduł sprężystości podłużnej		Wydłużenie przy zerwaniu
	g/cm ³	N/tex	GPa	N/tex	GPa	%
Vectran M	1.4	0.79	1.11	37.5	52.5	2.0
Vectran HS	1.4	2.03 ± 2.29	2.84 ± 3.21	46.3 ± 51.6	64.8 ± 72.2	3.3 ± 3.7

Wartości te zostały określone dla przędzy z włókien Vectran, 166.6 tex f 300¹⁾ (1500/300 – dla stosowanych w USA oznaczeń w denierach¹⁾), tj. wykonanej z włókien o titrze 0.56 tex. Dla włókien o niższej masie liniowej wytrzymałość na rozciąganie jest wyższa.

Tablica. 2.5
Charakterystyka
włókien Vectran, wg
[38]

Vectran jest włóknem nowym i był wykorzystywany w pierwszym rzędzie w zastosowaniach wojskowych i kosmicznych. Spektakularnym przykładem jest wykonanie z niego poduszek pneumatycznych wykorzystywanych przy lądowaniu sondy Pathfinder na powierzchni Marsa w lipcu 1997 r – rys. 2.9. Obecnie producent oferuje to włókno do wykonywania wszelkiego rodzaju silnie obciążonych lin w zastosowaniach morskich, w rybołówstwie, lin cumowniczych i holowniczych zawiesi dźwigowych, lin dla przemysłu lotniczego, spadochronów, balonów, lin zastępujących liny ze stali nierdzewnej, **wysokociśnieniowych powłok pneumatycznych** itp. Ponadto znajdują one zastosowanie w produkcji sprzętu żeglarskiego, sportowego (cięciwy łuków, rakiety tenisowe, wędki), liny alpinistyczne i inne. W zastosowaniach przemysłowych wykorzystuje się – oprócz wytrzymałości – ich odporność chemiczną i odporność na przecinanie. Służą do wykonywania np. odzieży ochronnej. W formie włókien ciętych i filamentów służą do wykonywania kompozytów, przewodów ciśnieniowych, materiałów balistycznych.

wic dla pracowników zakładów mięsnych. Wynika to z wysokiej urazowości w tym przemyśle. Inne włókna o dużej odporności na przecięcie mają wady dyskwalifikujące je do takich zastosowań. Aramidy mają małą odporność na utleniacze stosowane do dezynfekcji, a włókna UHMWPE są wrażliwe na wysokie temperatury podczas suszenia.



Rys. 2.10²⁾ – poduszki pneumatyczne z Vectranu, wykorzystywane podczas lądowania sondy Pathfinder na powierzchni Marsa w lipcu 1997 r.

3). Poliwinyle

Poliwinyle stanowią ważną grupę włókien, obejmującą wiele rodzajów modyfikowanych włókien o różnych właściwościach i zastosowaniach. Znajdujący się w tej grupie polichlorek winylu (PVC) jest najstarszym z polimerów syntetycznych. Wszystkie włókna z tej grupy, oprócz włókien poliakrylonitrylowych, zdecydowanie bardziej nadają się do zastosowań technicznych niż odzieżowych. Włókna te mogą być modyfikowane metodami fizycznymi lub chemicznymi, pod kątem określonych zastosowań.

3.1). Polichlorki winylu (PVC)

Polichlorek winylu i jest najstarszym z polimerów syntetycznych. W handlu jest dostępny od 1931 r. Jest to polimer o budowie $[-CH_2-CHCl_2-]_n$. Otrzymuje się go przez polimeryzację chlorku winylu. Bez dodatku plastyfikatorów jest twardy. Zmiękczone dodatkiem 20÷70% plastyfikatorów jest miękkie i elastyczne. Można go wtedy formować w niższej temperaturze

Chlorek winylu został opisany po raz pierwszy przez Francuza Regnaulta w 1838 r. Polichlorek winylu uzyskał po raz pierwszy niemiecki chemik Eugen Baumann, w 1872 r. Nie został jednak opatentowany aż do roku 1913, kiedy to Friedrich Heinrich August Klatte uzyskał patent na proces polimeryzacji chlorku winylu przy wykorzystaniu światła słonecznego (patent nr 281 877). Przydatną w praktyce, uplastycznioną formę PVC otrzymał w 1925 r. Wal-

¹⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pkt. 2.2.4.

²⁾ Fotografia – ILC Dover, za [38].

niż polichlorek winylu niezmiękczony. Dodatek plastifikatorów powoduje jednak obniżenie odporności chemicznej, która jest duża w przypadku twardego PVC. Odznacza się wysoką wytrzymałością mechaniczną. Oprócz polichlorku winylu PVC, wykorzystywany jest również dwuchlorek winylu (PVDC).

Polichlorek winylu znajduje wiele zastosowań przemysłowych. Twardy PVC jest stosowany do wyrobu płyt, rur, wykładzin podłogowych, rynien, zbiorników odpornych na działanie czynników chemicznych. Zmiękczony PVC jest stosowany do wyrobu folii, opakowań, odzieży ochronnej, obuwia, węzów, izolacji kabli, zabawek oraz do powlekania tkanin. **Jest to jeden z najważniejszych materiałów stosowanych do powlekania tkanin membranowych.** Niektóre właściwości polichlorków winylu zostały podane w tablicy 2.10.

3.2). Polichlorki winylidenu (PVDC)

Pierwszym polichlorkiem winylidenu, jaki zostały wprowadzone na rynek był Saran. Do dzisiaj jest to najbardziej znany produkt z tej grupy. Wykonuje się z niego zarówno folie, jak i włókna. Włókna te są odporne na powszechnie stosowane chemikalia, na działanie światła słonecznego i pleśni. Nie płamą się i nie bledną. Tkaniny z włókien Saran dobrze nadają się do wyrobu odzieży. Dobrze się noszą, mogą być łatwo prane zwykłym mydłem z wodą. Włókna te są raczej grube i ciężkie, w porównaniu z innymi stosowanymi do wyrobu odzieży. Obecnie są one stosowane głównie na tkaniny do wyrobów tapicerskich stosowanych w obiektach publicznych, mebli ogrodowych itp.

3.3). Polifluorek winylidenu (PVDF)

Polifluorek winylidenu jest wysokokrystalicznym, niewzmocnionym polimerem fluorowym łączącym dobre własności mechaniczne, cieplne i elektryczne ze znakomitą odpornością chemiczną.

Charakteryzuje go wysoka wytrzymałość mechaniczna, sztywność i odporność na pękanie (lepsza niż innych fluoropolimerów), wysoka odporność na obciążenia dynamiczne (również w niskich temperaturach), znakomita odporność chemiczna i na hydrolizę, wysoka maksymalna dopuszczalna temperatura pracy (1 500°C). Ma bardzo dobrą stabilność wymiarowa i właściwą fluorowcom niską palność oraz właściwości samoczyszczące.

PVDF jest wykorzystywany w przemysłach petrochemicznym, chemicznym, żywnościowym, papierniczym, tekstylnym i jądrowym. Wykonuje się z niego wysokiej jakości folie na konstrukcje membranowe, charakteryzujące się dobrymi właściwościami mechanicznymi, odpornością na promieniowanie UV oraz wysoka przepuszczalnością światła. **Jest również stosowany jako powierzchniowe wykończenie tkanin pokrytych PVC.**

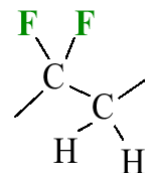
Najważniejsze marki handlowe PVDF to: Heliofon (prod. Hoechst, Niemcy), Kynar (prod. Corning-Owens, USA), Teflon (prod. Ensinger, Niemcy), CoorTek. Niektóre właściwości PVDF zestawiono w tablicy 2.8.

3.4). Alkohole poliwinylowe (włókna winylowe)

Włókna składające się z makrocząsteczek liniowych alkoholu poliwinylowego, o różnych poziomach acetalowania [N-03]. Włókna te są rozpuszczalne w wodzie ale po utwardzeniu stają się nierozpuszczalne i uzyskują dość dużą wytrzymałość na rozciąganie. Mają dobrą odporność na alkalia i słabe kwasy. Cieszą się ostatnio dużym zainteresowaniem w przemyśle tkanin technicznych. Nazwy handlowe: Kuralon (Japonia), Synthofil (Niemcy). Niektóre właściwości włókien wykonywanych z alkoholi poliwinylowych zostały podane w tablicy 2.10.

do Lonsbury Semon, pracujący w zakładach B.F. Goodrich Co. (USA) (patenty amerykańskie nr 1 929 453 i 2 188 396). Produkt ten, pod od nazwą vinyl stał się dostępny w handlu od 1931 r. W tym samym roku Niemcy Emil Hubert, Heinrich Papst i Hermann Hecht z I.G. Farbenindustrie otrzymali włókna z polichlorku winylu o nazwie Pe-Ce (pat. nr 666 264). Były to pierwsze włókna całkowicie syntetyczne. Próba produkcja od 1934 r. Zostały pokazane po raz pierwszy na Targach Wiosennych w Lipsku w 1939 r. Wzbudziły sensację ale bardzo szybko przegrały w konkurencji z nylonem.

W 1933 r., Ralph Wiley, student collegu, pracujący w laboratorium firmy Dow Chemical przy czyszczeniu szkieł laboratoryjnych, natrafił na



budowa cząsteczki PVDF

próbówkę, której nie mógł wyszorować. Znalezione substancję nazwał „eonite”, od nazwy niezniszczalnego materiału występującego w jego ulubionym komiksie „Little Orphan Annie”. Pracownicy laboratorium przekształcili tę substancję do postaci śliskiej, ciemnozielonej folii, którą nazwano później Saran. Wojsko pokrywało nią kadłuby myśliwców dla ochrony przed działaniem aerozolu słonecznej, morskiej wody, a w przemyśle samochodowym stosowano ją do tapicerki. Po drugiej wojnie światowej Saran został dopuszczony jako materiał do pakowania żywności, w bezpośrednim kontakcie z tłuszczami i wodą. W handlu jest dostępny od 1949 r. W 1953 r. wyprodukowano z niego pierwszą samoprzylegającą folię.

3.5). Poliakrylonitryle

Poliakrylonitryle są polimerami akrylonitrylu. Mogą zawierać również inne związki chemiczne. W zależności od zawartości poliakrylonitrylu wyróżniamy akryle i modakryle. Znajdują zastosowanie do wytwarzania pewnych tkanin technicznych. Są najważniejszymi prekursorami¹⁾ stosowanymi przy wytwarzaniu włókien węglowych. Niektóre ich właściwości podano w tablicy 2. 10.

Włókna akrylowe | Są to włókna, których głównym składnikiem jest akrylonitryl (min. 85%). Trudnopalne, odporne na działanie kwasów, zasad, mikroorganizmów. Nazwy handlowe: anilana, orlon, acrilan, nitron, dralon, courtelle.

Modakryle | Są to włókna o zawartości akrylonitrylu niższej niż 85%.

Modakryle mogą zawierać np.:

- chlorek winylu (verel, dynel)
- chlorek winylidenu (teklan, saran)

Polimetakrylan metylu | Jest to ważne tworzywo z grupy modakryli, występujące pod nazwami handlowymi Perspex, Plexiglas, a w Polsce – Metapleks. Jeżeli zawiera dodatek ftalanu butylowego jako zmiękczacza, nazywane jest szkłem organicznym.

Tworzywo to pojawiło się już w latach czterdziestych XX w. Wraz z doskonaleniem technologii jego zakres zastosowań stale się powiększał. Początkowo było wykorzystywane głównie przy produkcji lamp oświetleniowych, dzięki swojej znakomitej przepuszczalności światła i małemu ciężarowi. Dalsze jego zastosowania objęły wyroby reklamowe (dzięki możliwości pokrywania wielobarwnym drukiem i podświetlania), zastosowania jako lekki substytut szkła w artykułach domowych i biurowych, przeźroczyste przegrody akustyczne, przegrody chroniące np. dzieła sztuki przed promieniowaniem UV i przed wandalizmem, przegrody antyrefleksyjne itp.

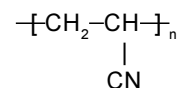
W budownictwie wykorzystuje się Perspex do wykonywania np. świetlików i innych przeźroczystych przegród. W ostatnim okresie popularne stało się wykorzystanie płyty z Perspexu do pokrywania siatek cięgnowych [1.7]. Spektakularnym przykładem takiego zastosowania było pokrycie ścian pawilonu niemieckiego na wystawie Expo 92 w Sewilli (rys. 2.11).

Z Perspexu wykonuje się płyty o grubości od 3 do 60 mm. Dają się one łatwo formować termicznie, również wyginać dwukrzywiznowo, obrabiać mechanicznie: ciąć, wiercić, polewować. Perspex ma dużą wytrzymałość oraz sztywność.

Może być stosowany w szerokim zakresie temperatur. Ma również dobrą odporność chemiczną. Jest odporny na działanie światła słonecznego. **Nie-mał nie brudzi się. Jego szczególną cechą charakterystyczną jest bardzo dobra przeźroczystość, równa niemal przeźroczystości szkła.** Niektóre właściwości Perspexu zestawiono w tablicy 2.9.

¹⁾ Patrz punkt dotyczący produkcji włókien węglowych

Syntezę poliakrylonitrylu opisał jako pierwszy Francuz C. Moureau w 1894 r. Przeprowadzono ją po raz pierwszy w firmie BASF, w 1929 r. W 1939 r. Otto Bayer i Peter Kurtz opracowali udoskonaloną reakcję syntezy bezpośredniej. Włókna akrylowe wyprodukowała jako pierwsza, w 1950 r., firma DuPont, pod nazwą Orlon.



budowa cząsteczki
poliakrylonitrylu

Metapleks występuje w następujących odmianach [5.37]:

- NL – niebarwiony, dla lotnictwa
- BT – barwiony, przeźroczysty
- BK – barwiony, kryty
- BP – barwiony, z efektem perłowym
- S – wytwarzany przez wylaczanie

a).



Rys. 2.11 – pawilon niemiecki na wystawie Expo 92 w Sewilli:

- a). elewacja widziana od wewnątrz; przegroda została wykonana ze sztywnych płyt z Perspexu, zamocowanych do przestrzennie ukształtowanej siatki cięgnowej [181].
- b). widok elewacji od zewnątrz [124].

b).



Autorzy projektu [3.12]:

Architektura: Peter Birke, Georg Lippsmeier.

Konstrukcja: IPL Ingenieurplanung Leichtbau GmbH

4). Poliolefiny i ich pochodne

Poliolefiny (polieny, polialkeny) są to wysokocząsteczkowe węglowodory nienasycone, o długich łańcuchach prostych lub rozgałęzionych. Dwie podstawowe grupy uzyskuje się poprzez polimeryzację etylenu lub propylenu

Za odkrycia w zakresie poliolefin została przyznana nagroda Nobla w 1963 r. (Giulio Natta i Karl Ziegler).

4.1). Polietylen (standardowy)

Polimer o budowie $\text{[-CH}_2\text{-CH}_2\text{-]}_n$. Ma dobre właściwości mechaniczne, dużą odporność chemiczną, doskonałe właściwości dielektryczne. Ma dużą odporność na działanie kwasów, zasad, soli i większości związków organicznych. Jest używany do produkcji folii, powłok itp. Polietylen został wprowadzony na rynek w 1956 r.

Wyróżnia się dwie handlowe odmiany polietylenu: o wysokiej i o niskiej gęstości. Polietylen o wysokiej gęstości (0.96 g/cm^3) jest produkowany w trakcie polimeryzacji niskociśnieniowej. Polietylen o niskiej gęstości (0.92 g/cm^3) jest zwykle produkowany w trakcie polimeryzacji niskociśnieniowej. Włókna formowane z polietylenu o wysokiej gęstości mają większą krystaliczność, wyższą temperaturę topnienia i podwyższoną trwałość. Z polietylenu wykonuje się liny włókiennicze.

4.2). Polietylen UHMW PE

Są to włókna polietylenowe o wydłużonym łańcuchu i bardzo dużej masie cząsteczkowej (*ang. Ultra-High Molecular Weight Polyethylen*). Stosowane jest również określenie HMPE (*ang. High Modulus Polyethylen*). Włókna UHMW PE produkowane są obecnie pod trzema markami handlowymi. Są to Spectra (prod. Honeywell, USA), Dyneema (prod. Toyobo, Japonia) oraz Certran (prod. Hoechst Celanese, USA). Włókna UHMW PE zostały wprowadzone na rynek w połowie lat osiemdziesiątych XX w. przez firmę Allied Signal Inc. (obecnie Honeywell) pod nazwą Spectra 900.

Włókna UHMW PE są to włókna o najwyższych (oprócz PBO) dostępnych obecnie właściwościach wytrzymałościowych. Ich wytrzymałość na rozciąganie jest ponad dziesięciokrotnie wyższa niż wytrzymałość stali kształtowej. Dzięki małej gęstości, równej 0.97 g/cm^3 , mogą utrzymywać się na powierzchni wody. Podobnie jak w przypadku włókien Vectran ich właściwości wynikają z niezwykle silnego zorientowania struktury krystalicznej równoległe do osi włókna (niemal 100% włókien jest zorientowanych równoległe). Następuje to podczas procesu wyciągania włókien z roztworu żelowego (*ang. super drawing*), w którym jest rozpuszczony polimer. Schłodzenie utrwala tę strukturę.

Dzięki niezwykle wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, wysokiemu modułowi sprężystości podłużnej i małej gęstości, włókna te cechują się również najwyższymi wartościami wytrzymałości właściwej (odniesionej do gęstości) – o ok. 40% wyższej niż dla aramidów oraz właściwego modułu sprężystości. ponadto charakteryzuje je bardzo wysoka zdolność do pochłaniania energii (ma to znaczenie zwłaszcza przy produkcji odzieży ochronnej), dużej odporności na działanie wielu czynników chemicznych i wody morskiej i odporność na działanie światła (nie wymagają żadnych powłok ochronnych). Pewną wadą jest mniejsza niż dla aramidów i Vectranu odporność na podwyższone temperatury. Podstawowe, średnie właściwości włókien UHMWPE podano w tab. 2.11. , a właściwości włókien Spectra i Dyneema – w tablicy 2.12.

Zakres zastosowań włókien UHMWPE to przede wszystkim produkcja lin do zastosowań w gospodarce morskiej i rybołówstwie, taśmy i zawieszki przemysłowe, odzież ochronna w przemyśle, akcesoria militarne (hełmy, tarcze itp.), sprzęt sportowy (zwłaszcza żeglarstwo - liny), przemysł samochodowy, specjalistyczna odzież ochronna itp. Jako materiał do zbrojenia kompozytów są wykorzystywane np. w przemyśle elektronicznym.

Tablica 2.6 – Niektóre właściwości wysokowytrzymałych włókien z polietylenu UHMW – Spectra i Dyneema, wg [233]

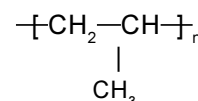
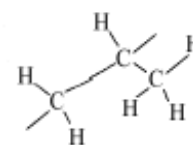
Włókno	Masa liniowa	Wytrzymałość na rozciąganie		Moduł sprężystości podłużnej		Gęstość	Wydłużenie przy zerwaniu
	dtex	N/tex	GPa	N/tex	GPa	kg/m ³	%
Spectra 900	722	2.69	2.61	81.2	79	970	3.6
	1333	2.65	2.57	75.0	73		3.9
	1778	2.38	2.31	63.4	62		4.4
	5333	2.25	2.18	69.3	67		3.9
Spectra 1000	239	3.36	3.25	116.6	113	970	2.9
	306	3.18	3.08	116.6	113		3.1
	417	3.09	3.00	106.0	103		3.1
	483	3.05	2.95	104.2	101		3.2
	611	3.36	3.25	114.8	11		3.1
	722	3.18	3.08	103.8	101		3.3
	1 222	3.36	3.08	109.9	107		3.3
	1 444	3.09	3.00	101.5	98		3.4
Dyneema	SK 60		3.00	2.91	106.0	970	
	SK 71		3.71	3.60	113.9		
	NKS		4.06	3.93	121.8		

Tablica. 2.6
Niektóre właściwości wysokowytrzymałych włókien z polietylenu UHMW – Spectra i Dyneema [233]

4.3). Polipropylen

Jest to polimer propylenu. Ma doskonałe właściwości mechaniczne i dielektryczne. W temperaturze pokojowej jest odporny na działanie wielu czynników chemicznych. Stosowany do wyrobu włókien przeznaczonych na tkaniny przemysłowe, dywany itp. oraz folii i różnego rodzaju kształtek. Z polipropylenu wykonuje się wytrzymałe liny, które – dzięki jego małej gęstości mogą utrzymywać się na powierzchni wody. Nie jest odporny na ścieranie i wrażliwy na zmiany temperatury. Najbardziej znane marki handlowe to Merkalon, Softlene i Leolene. Niektóre właściwości polipropylenu zestawiono w tablicy 2.10.

Włoski badacz Giulio Natta otrzymał polipropylen w 1953 r. Od 1959 r. rozpoczęto we Włoszech próbną produkcję.

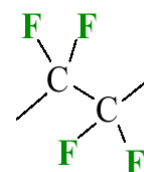


budowa cząsteczki polipropylenu

4.4). Polimery fluorowe (fluoroplasty)

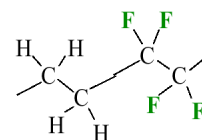
Są to polimery łańcuchowe otrzymywane przez polimeryzację fluoroalkenów, zwłaszcza tetrafluoroetylen, chlorotrifluoroetylen lub przez ich kopolimeryzację, np. z heksafluoropropenem oraz innymi monomerami. Największe znaczenie w tej grupie ma politetrafluoroetylen (policzterofluoroetylen). Polimery fluorowe są odporne na działanie chemikaliów, wysokiej temperatury, mają mały współczynnik tarcia, dobre właściwości dielektr. i antyadhezyjne; są stosowane do wyrobu uszczelnień, przewodów, urządzeń i wykładzin odpornych na działanie czynników chemicznych i wysoką temperaturę.

PTFE | Politetrafluoroetylen jest to polimer o budowie $\text{---}[\text{CF}_2\text{---CF}_2]_n\text{---}$. Został opracowany przez firmę DuPont w 1938 r. pod nazwą Teflon. Do dzisiaj jest to najważniejsza marka handlowa PTFE, mimo pojawienia się innych, np. Hostaflon firmy Hoechst. W Polsce jest produkowany pod nazwą tarflen.



budowa cząsteczki PTFE

PTFE jest tworzywem niepalnym, o dużej wytrzymałości mechanicznej i odporności na działanie wysokiej temperatury (przez dłuższy czas może być poddany działaniu temperatury 250°C). Jest odporny na działanie czynników atmosferycznych i większości chemikaliów. Ma bardzo mały współczynnik tarcia i dobre właściwości dielektryczne. Znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach techniki: do wyrobu łożysk bezsmarowych, części armatury, uszczeltek, przewodów, wykładziny aparatury chemicznej, naczyń kuchennych i in. **W budownictwie stosowany na powłoki tkanin z włókna szklanego, w postaci folii oraz – ostatnio – w postaci tkanin.** Niektóre właściwości PTFE jako polimeru zestawiono w tablicy 2.8., a włókien z PTFE – w tablicy 2.11.



budowa cząsteczki
ETFE

ETFE | Poli-etylen/tetrafluoroetylen jest polimerem etylenu $\text{[-C}_2\text{H}_4\text{-]}$ i tetrafluoroetylenem $\text{[-C}_2\text{F}_4\text{-]}$. Jest to fluoroplast o znakomitych właściwościach mechanicznych, chemicznych i elektrycznych.

W porównaniu z PTFE daje się wyjątkowo łatwo kształtować, w procesach technologicznych takich samych jak konwencjonalne termoplastyki: wtrysk, ekstruzja itp. Można z niego formować folie i łączyć z innymi materiałami. Jest niemal niewrażliwy na działanie nawet silnych chemikaliów. Nie traci swoich właściwości w zakresie temperatur od -200 °C do +180 °C. Zatrzymuje promieniowanie UV i nie traci swoich właściwości pod jego wpływem. Ma podobne do teflonu właściwości przeciwiadhezyjne. Właściwości mechaniczne ETFE są lepsze niż PTFE.

W konstrukcjach membranowych stosowane są folie z ETFE o grubości od 50 do 250 µm. **Wykorzystuje się znakomitą przeźroczystość tych folii, bliską przeźroczystości szkła. ETFE ma bardzo dobre właściwości samoczyszczące. Jest niepalny i nietoksyczny.**

Najbardziej znane marki handlowe ETFE to: Fluon (prod. Asahi Glass, Japonia), Neoflon (prod. Daikin America), Tecaflon (prod. Ensinger, Niemcy). Niektóre właściwości ETFE zestawiono w tablicy 2.8.

5). Poliuretany

Jest to grupa włókien syntetycznych otrzymywanych w wyniku poliaddycji diizocyjanianów aromatycznych lub alifatycznych ze związkami zawierającymi co najmniej 2 grupy hydroksylowe (np. diolami, polieterami, poliestrami). Mogą zawierać również dodatek poliestrów i polieterów ale zawartość poliuretanu nie może być mniejsza niż 85% masowych.

Na określenie włókien poliuretanowych stosowane są również nazwy: spandex, elastomery.

Poliuretany są odporne na działanie światła i wielu związków chemicznych oraz działanie mikroorganizmów i insektów. Są odporne na ścieranie i zginanie, w niewielkim stopniu chłoną wodę. Poliuretany są stosowane do wyrobu żywic lanych, miękkich lub twardych pianek (używanych głównie jako elementy mebli, wykładziny bieżni i hal sportowych, jako tworzywo termoizolacyjne), lakierów i klejów.

Włókna poliuretanowe są bardzo elastyczne, lekkie i miękkie, właściwościami zbliżone do włókien kauczukowych lub gumowych ale mają większą od nich wytrzymałość na rozciąganie. Ich najbardziej charakterystyczną cechą jest zdolność do bardzo dużych odkształceń, nawet do 500–700 %, bez zniszczenia. Nawet po wielokrotnych cyklach rozciągania, włókna wracają do pierwotnej długości.

Włókna poliuretanowe (ciągłe lub staplowe) stosuje się w mieszankach z innymi włóknami do wyrobu elastycznych, odpornych na gnienie tkanin i dzianin. Z włókien poliuretanowych wykonuje się przede wszystkim odzież, zwłaszcza sportową. Włókna z czystego poliuretanu znajdują zastosowanie do wyrobu niektórych tkanin technicznych.

Najbardziej znane marki handlowe, to: Lycra (prod. Du Pont) i Dorlastan (prod. Bayer). Poza tym znane są takie produkty jak: vyrene, strechever, estan, duraspan, vullkollan. W Polsce — elaston.

Otto Bayer, Heinrich Rinke i Werner Siefken z firmy Bayer, otrzymali poliuretan (paten niemiecki nr 728 981) w 1937 r. W USA niezależnie, poliuretan otrzymali William Hanford i Donald Holmes, w 1942 r. Pierwsze włókno z tej grupy zostało wprowadzone na rynek 1959 r. Była to Lycra firmy DuPont.

6). Włókna specjalne

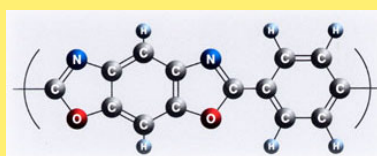
W grupie włókien specjalnych umieszczono włókna charakteryzujące się szczególnymi właściwościami użytkowymi, zwłaszcza odpornością termiczną i chemiczną, podwyższoną wytrzymałością mechaniczną. Pomimo, że chemicznie nie stanowią jednej grupy, włókna te najczęściej są wymieniane wspólnie. W języku angielskim są określane jako *High Performance Fibers (HPF)*. Niektóre z tych włókien zostały opracowane w ostatnim okresie (np. PBO) i na rynku są dostępne od niedawna. Inne były początkowo opracowane do zastosowań kosmicznych (np. PBI) i znacznie później udostępniono je do szerszego stosowania. Właściwości włókien tej grupy zestawiono w tablicy 2.11.

Zakres stosowania terminu High Performance Fibers nie jest ściśle określony i często można w literaturze spotkać jego zastosowanie również w odniesieniu do włókien aramidowych, PTFE i LCP.

PBO | Jest to nowy rodzaj wysokowytrzymałego włókna, produkowanego z polimeru zbudowany ze sztywnego łańcucha cząsteczek poli(p-fenylene-2,6-benzoxazolu) – PBO, rys.2.12. W handlu dostępny jest tylko jeden wyrób z tej grupy – Zylon. Został opracowany przez japońską firmę Toyobo ok. 1995 r. i jego podaż nie jest jeszcze zbyt wielka. **Jest to materiał o największej wytrzymałości na rozciąganie i najwyższym module sprężystości spośród wszystkich wysokowytrzymałych włókien.** Wykazuje bardzo małe pęczanie – mniejsze niż aramidy. Temperatura rozkładu jest o ok. 100°C wyższa niż dla aramidów. Indeks $LOI^{1)}$ = 68 % Ma dużą odporność na działanie kwasów oraz utleniaczy w temperaturze pokojowej. W wyższych temperaturach jest wrażliwy na czynniki chemiczne. Bardzo odporny na działanie wody morskiej. Odporny na ścieranie, również w podwyższonych temperaturach. Współczynnik rozszerzalności cieplnej Zylonu jest ujemny, podobnie jak dla Vectranu.

Najpoważniejszą wadą Zylonu jest jego wrażliwość na działanie światła. Dotyczy to zarówno promieniowania UV, jak i promieniowania widzialnego. Promieniowanie UV powoduje gwałtowny spadek wytrzymałości przede wszystkim we wstępnej fazie ekspozycji – nawet do 50 % po ok. 100 godz. W testach, w których był poddany działaniu światła słonecznego, jego wytrzymałość stabilizowała się po 6 miesiącach na poziomie ok. 35 % wartości początkowej. Z tego powodu jest uważany za materiał przeznaczony do krótkotrwałego użycia. W węzłach i splotach jego wytrzymałość wynosi ok. 30 ÷ 40% nominalnej wytrzymałości na rozciąganie. Podstawowe właściwości Zylonu zestawiono w tablicy 2.7., a na rys. 2.13 porównanie zależności $\sigma - \epsilon$ dla Zylonu i innych wysokowytrzymałych włókien. Najważniejsze zastosowania Zylonu to:

- elementy osłon kadłubów samolotów
- powłoki balonów
- liny na zawiesia dźwigowe itp.
- zbrojenie opon
- włókniny termoodporne
- sprzęt sportowy (żeglarski, golfowy itp.).
- odzież ochronna (kombinezony dla strażaków, rękawice dielektryczne, kamizelki kuloodporne)



Rys. 2.12¹⁾ – budowa cząsteczki Zylonu

PBI | Polibenzimidazol jest włóknem organicznym o niezwykle wysokiej odporności termicznej. Wynika ona zarówno ze sprzężonej struktury aromatycznej, jak i z „drabinkowej” budowy polimeru. Nie roztopia się i nie tworzy kropeł lecz ulega rozkładowi. Włókna z PBI mają charakterystyczny pomarańczowo-żółty kolor, który nie ulega zmianie nawet pod wpływem silnych utleniaczy. Wysoka wartość indexu $LOI^{1)}$ = 36 ÷ 43 % i zdolność do zatrzymywania wilgoci, powoduje że jest to materiał znakomicie nadający się na odzież ochronną, przegrody przeciwogniowe itp.

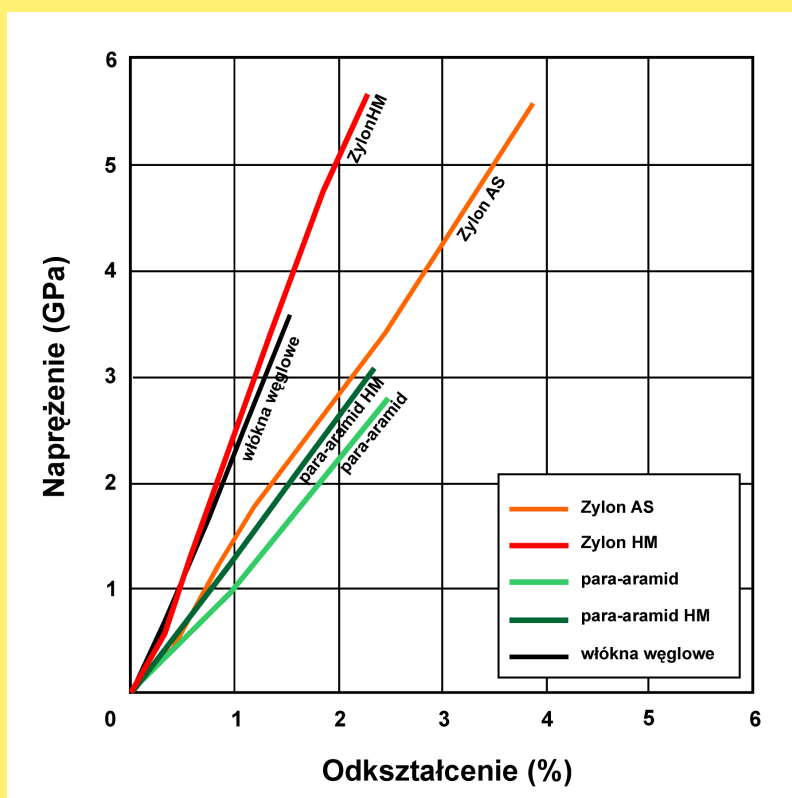
Włókna PBI są odporne na ścieranie, miękkie i bardzo dobrze dają się tkać wraz z innymi włóknami, np. węglowymi i aramidowymi. Najczęściej tak właśnie jest stosowany, zarówno ze względu na końcowe właściwości tkaniny (np. zwiększenie wytrzymałości), jak i ze względu na bardzo wysoką cenę, która dochodzi do 150 \$/kg włókna jako surowca.

¹⁾ Opracowano na podstawie materiałów firmy Toyobo, za [233]

²⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pkt. 2.2.4.

Tablica 2.7 – Niektóre właściwości włókien PBO – Zylon¹⁾

Rodzaj		Zylon	
		AS	HM
masa liniowa włókna	dtex	1.7	1.7
gęstość	g/cm ³	1.54	1.56
nasiąkliwość	%	2.0	0.6
wytrzymałość na rozciąganie	N/tex	3.7	3.7
	GPa	5.8	5.8
Moduł sprężystości podłużnej	N/tex	115.0	172.0
	GPa	180	270
wydłużenie	%	3.5	2.5
temperatura topnienia	°C	brak	
temperatura rozkładu	°C	650	
współczynnik rozszerzalności cieplnej	1/°C×10 ⁻⁴	-6 (w temp. ~ -100°C) -2 (w temp. ~ +30°C)	
LOI (limiting oxygene index)	%	68	68

Tablica. 2.7
Niektóre właściwości włókien PBO – Zylon¹⁾Rys. 2.13¹⁾ – porównanie zależności σ – ϵ dla Zylonu, aramidów i włókien węglowych

Wytrzymałość włókien na rozciąganie wynosi ok. 0.25 N/tex, a moduł sprężystości – ok. 2.8 N/tex, przy gęstości 1.43 g/cm³. Najważniejsze zastosowania włókien PBI to przede wszystkim odzież ochronna: skafandry astronautów (NASA), kombinezony ochronne i rękawice dla strażaków i hutników oraz do celów wojskowych (m.in. wojska chemiczne), kombinezony ochronne kierowców rajdowych. Ponadto są one stosowane w przemyśle jako izolacja silników rakietowych, w częściach narażonych na silne tarcie (np. hamulce), w pompach, uszczelkach itp. Służą również jako zbrojenie kompozytów o dużej odporności termicznej, z których wykonuje się np. osłony głowic pocisków taktycznych i radarów.

¹⁾ Opracowano na podstawie materiałów firmy Toyobo, za [233]

Tkanina składająca się z mieszanki PBI oraz para-aramidów (np. Kevlar) w proporcjach 60/40 %, osiągnęła duży sukces handlowy, stając się podstawowym materiałem do wyrobu odzieży ochronnej dla wysokich temperatur (tzw. „premium grade”). Włókna PBI są dostępne w handlu od 1983 r. pod nazwą PBI Logo. Ich jedynym producentem jest firma Celanese Corp. Podstawowe właściwości włókien PBI zestawiono w tabeli 2.11.

Poliimidy | Poliimidy są polimerami, w których dominują cząsteczki o budowie aromatycznej. Pojawiły się na rynku w ostatnim okresie. Wykonuje się z nich przede wszystkim folie ale również włókna. Produkty poliimidowe mają bardzo dobrą odporność termiczną, radiacyjną. Ich odporność chemiczna jest dobra, chociaż są podatne na działanie silnych kwasów i zasad. $\text{Index LOI}^{1)} = 36 \div 38 \%$.

Folie poliimidowe, występują pod nazwami handlowymi Kapton, Kinel, Upilex, Upimol, Vespe. Kapton był z powodzeniem stosowany w praktyce w ekstremalnym przedziale temperatur od -269°C do $+400^{\circ}\text{C}$. Folie poliimidowe mogą być przetwarzane przy zastosowaniu różnych technik: cięcia, tłoczenia, termoformowania itp. Najczęściej są stosowane jako materiały izolujące elektrycznie i termicznie. Nadają się również znakomicie jako materiał do badań modelowych membran.

Z poliimidów wykonuje się również włókna pod nazwą P-84 (opracowane przez firmę Lenzing, produkowane przez firmę Inspec, Austria). Są one stosowane do wyrobu odzieży chroniącej przed wysoką temperaturą. Podstawowe właściwości włókien poliimidowych zestawiono w tabeli 2.11.

PPS | Z polisiarczków fenyli (PPS) wykonuje się włókna o średniej odporności cieplnej ale o znakomitej odporności chemicznej. Ze względu na wysoką wartość indexu $\text{LOI}^{1)} = 34 \%$, charakteryzują się również bardzo dobrą odpornością ogniową. Ponieważ włókna cechuje niska zdolność zatrzymywania wilgoci i są nieprzyjemne w dotyku, nie nadają się do wykonywania odzieży ochronnej.

Wysoka odporność chemiczna włókien PPS, zarówno na kwasy jak i na zasady, predestynuje je do zastosowań przemysłowych, zwłaszcza w urządzeniach filtrujących (np. gorące gazy), w przemyśle gumowym, do wyrobu uszczelnień itp. Lista zastosowań nie jest długa ale są one bardzo ważne. Najważniejsze wyroby z tej grupy dostępne w handlu, to: Sulfar i Torcon. Podstawowe właściwości włókien PPS zestawiono w tabeli 2.11.

Melamina | Melamina jest polimerem, którego najważniejszą właściwością jest wysoka odporność chemiczna i ogromna izolacyjność cieplna w bezpośrednim kontakcie z płomieniem. Posiada również bardzo dobre właściwości dielektryczne. $\text{Index LOI}^{1)} = 32 \%$. Melamina jest wykorzystywana zarówno w formie żywicy, jak i w formie włókien. Z żywicy wykonywane są, np. różnego rodzaju elementy osprzętu elektrycznego. Włókna są dostępne w handlu pod nazwą Basofil (prod. Basofil Fibers).

W porównaniu z innymi włóknami o podobnych właściwościach (przede wszystkim cieplnych) włókna te są bardzo tanie, dzięki czemu znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach. Często są stosowane w mieszankach z włóknami aramidowymi lub innymi, dla podniesienia wytrzymałości tkaniny.

Tkaniny z włókien melaminowych stosuje się do wyrobu odzieży ochronnej dla strażaków, jako tapicerkę w samolotach, jako obicia stanowiące izolację cieplną, w urządzeniach narażonych na działanie kropli roztopionego metalu, rękawic ochronnych, w filtrach wysokotemperaturowych. Podstawowe właściwości włókien melaminowych zestawiono w tabeli 2.11.

Poliakrylaty | Poliakrylaty są polimerami o wysokiej odporności ogniowej. Nie topią się ale ulegają rozpadowi. $\text{Index LOI}^{1)} = 31 \div 40 \%$. Włókna poliakrylatowe są stosowane do produkcji wyrobów ogniochronnych. W handlu dostępne są włókna o nazwie Inidex (prod. Acordis). Podstawowe właściwości włókien poliakrylatowych zestawiono w tabeli 2.11.

Pierwsze włókno z grupy PPS – Rytan zostało opracowane przez firmę Phillips Fibers (USA) w 1973 r., a obecnie jest produkowane przez firmę Amoco. Najważniejsze spośród włókien tej grupy – Sulfar jest dostępne w handlu od 1983 r.



rękawice termochronne z włókien melaminowych

¹⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pkt. 2.2.4.

Novoloidy | Włókna te, często określane również jako novoliody fenolowe, zostały opracowane w USA, pod koniec lat siedemdziesiątych XX w. Produkowane są z żywicy fenolowej o nazwie novolak i formaldehydu, a ich właściwości fizyczne i chemiczne odróżniają je od innych włókien, zarówno chemicznych jak i naturalnych.

Gęstość novoloidów wynosi 1.27 g/cm^3 . Włókna te nie mogą być roztopione ale ulegają karbonizacji w wysokich temperaturach. Są nierozpuszczalne. Index LOI = $29 \div 35 \%$. Absorpcja wilgoci wynosi 6% . Wytrzymałość na rozciąganie włókien novolidowych wynosi $0.012 \div 0.016 \text{ N/tex}$. Moduł sprężystości przy rozciąganiu wynosi $2.60 \div 3.50 \text{ N/tex}$. Dają się barwić.

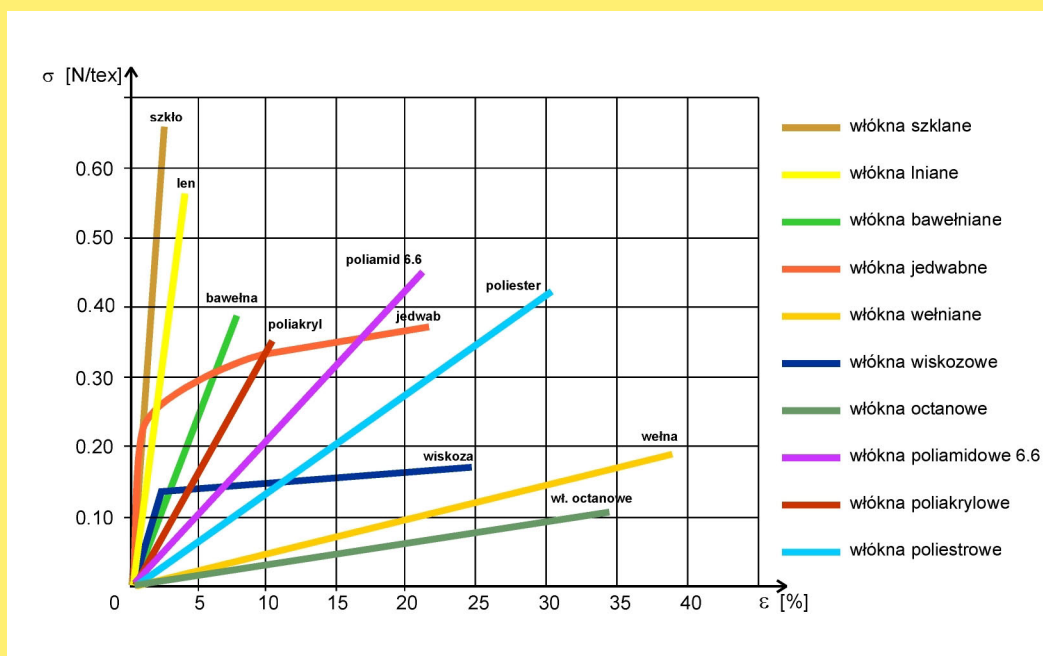
Włókna novolidowe są stosowane przede wszystkim jako substytut azbestu. Ponadto są stosowane w wyrobach kompozytowych. Produkowane są obecnie wyłącznie w Japonii, pod nazwą Kynol. Dostępne są w formie włókien odcinkowych oraz filamentów (jako rowingi)¹⁾.

PEEK | Chemicznie jest to polieter-eter-keton. Włókna PEEK są to włókna o wysokiej odporności termicznej, do zastosowań technicznych.

Gęstość włókien PEEK wynosi $1.27 \div 1.32 \text{ g/cm}^3$. Mogą przebywać przez długi okres w temperaturze 250°C . Temperatura topnienia wynosi 335°C . Są trudnozapalne, samogasnące. Index LOI¹⁾ = 30% . Absorpcja wilgoci wynosi 0.1% , skurcz $1 \div 2 \%$. Wydłużenie przy zerwaniu wynosi $20 \div 40 \%$. Wykazują dobrą odporność chemiczną.

Włókna PEEK są wykorzystywane przede wszystkim do produkcji tkanin filtracyjnych, przeznaczonych do stosowania w wysokich temperaturach. Stosowane są również do produkcji uszczelnień do pomp oraz przy produkcji papieru.

Jedynym produktem z tej grupy, dostępnym na rynku, są włókna Zyex, produkowane przez brytyjską firmę Zyex Ltd. Dostępne są w postaci monofilamentów oraz włókien staplowych¹⁾.



Rys. 2.14 – Porównanie zależności naprężenie – odkształcenie dla wybranych włókien naturalnych i chemicznych. Opracowano na podstawie [129]

¹⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pkt. 2.2.4.

Tablica 2.8 – Właściwości wybranych polimerów syntetycznych

Parametr	test ASTM	j.m.	Polimer			
			nylon 66	PTFE	ETFE	PVDF
wytrzymałość na rozciąganie, 23°C	D638	MPa	55	20 ÷ 35	40 ÷ 48	35 ÷ 55
granica plastyczności przy rozciąganiu, 23°C	D638	MPa		13	20	~ 40
wytrzymałość na ściskanie, 1% odksz., 23°C	D695	MPa	62	5 ÷ 6	10.9	83
moduł sprężystości przy rozciąganiu, 23°C	D638	MPa		400	500 ÷ 800	1400 ÷ 2000
moduł sprężystości przy zginaniu, 23°C	D790	MPa	1430	500 ÷ 600	900 ÷ 1200	1500 ÷ 2000
odkształcenie pod obciążeniem 23°C, 7 MPa, 24 h 100°C, 7 MPa, 24 h 25°C, 14 MPa, 24 h	D621	% % %		3.5 5.0 7.0	0.6 5.4 2.3	
max wydłużenie, 23°C	D638	%	150	200 ÷ 400	300 ÷ 450	200 ÷ 400
twardość Rockwell Durometr D	D785		100	18 D50 ÷ 65	50 D75 ÷ 85	110 D75 ÷ 80
współczynnik wydłużenia liniowego, 23°C ÷ 60°C	D696	1/°C	8×10^{-5}	10×10^{-5}	$5 \div 9 \times 10^{-5}$	12×10^{-5}
temperatura topnienia		°C	254	327	260	178
maksymalna temperatura ciąglego stosowania		°C	120	260	150	112 ÷ 150
nasiąkliwość		%	1.3	< 0.1	< 0.3	< 0.4 ÷ 0.5
palność		–		niepalny	niepalny	samogasnący
odporność chemiczna		–	średnia	znakomita	znakomita	dobra

Tablica 2.9 – Właściwości polimeru Perspex

Parametr	test	j.m.	PERSPEX			
			płyty odlewane GS	płyty ekstrudowane XT	bezpieczne wartości do projektowania	
					wartość krótkotrwała (6 godzin)	wartość długotrwała (10 lat)
wytrzymałość na rozciąganie	ISO 527 ¹⁾	MPa	75	70	17 ⁵⁾ 14 ⁶⁾	8.6 ⁵⁾ 7 ⁶⁾
wydłużenie przy zniszczeniu	ISO 527 ¹⁾	%	4	4		
wytrzymałość na zginanie	ISO 178 ²⁾	MPa	116	107		
moduł sprężystości przy zginaniu	ISO 178 ²⁾	GPa	3.2	3.03	2.5	1.2
punkt mięknienia Vicat	ISO 306 ³⁾	°C	~ 110	>105		
twardość Rockwell	ISO 2039-2		102	101		
przepuszczalność światła	ASTM D1003	% ⁴⁾	>92	>92		
współczynnik załamania	ISO 489/A	-	1.49	1.49		
współczynnik Poissona		-			0.39	0.40
gęstość względna	ISO 1183	-	1.19	1.19		
współczynnik wydłużenia liniowego	D696	1/°C	7.7×10^{-5}	7.8×10^{-5}		
nasiąkliwość	ISO 62	%	0.2	0.2		
palność			palny, bez kropeł (klasa B2 ⁷⁾)	palny, z kroplami (klasa B2 ⁷⁾)		
¹⁾ 5 mm / min ³⁾ metoda A ⁵⁾ nieekspozowany ⁷⁾ wg DIN 4102 ²⁾ 2 mm / min ⁴⁾ w płycie gr. 3 mm ⁶⁾ ekspozowany						

Uwaga: 1. W tablicy zamieszczono jedynie polimery znajdujące zastosowanie w konstrukcjach membranowych
2. Podane wielkości odnoszą się do ogólnie materiałów, a nie do konkretnych wyrobów, takich jak włókna, czy folie. Należy je traktować wyłącznie informacyjnie.
3. Podane wartości odnoszą się do najczęściej spotykanych na rynku produktów. W każdej z grup produkowanych jest wiele wyrobów różniących się parametrami.
4. Wielkości parametrów w tablicy podano wg informacji producentów, za [233].

Tablica 2.10 – Niektóre właściwości podstawowych organicznych, chemicznych włókien technicznych, wg [204]

Włókno	masa właściwa kg/m ³	wytrzymałość na rozciąganie w stanie suchym N/tex	relatywna wytrzymałość na rozciąganie na mokro ¹⁾ %	wydłużenie przy zerwaniu		relatywna wytrzymałość w splotach		początkowy moduł sprężystości na sucho N/tex	współcz. pracy	LOI (limiting oxygen index %)	temperatura		
				na sucho %	na mokro %	pętlowych %	węzłowych %				zapłonu °C	topnienia °C	mięknięcia °C
Wiskoza wt. staplowe, standard wt. staplowe, średniotwarte filament, standard	1 490÷1 540	0.18÷0.35	45÷55	20÷24	22÷35	30÷40		0.77	0.66	19.7	420		
		0.27÷0.35	60÷70	14÷20	16÷22	28÷35		6.0	0.62				
		0.27÷0.31	60÷70	19÷24	20÷28	30÷65	45÷60		0.55				
Włókna octanowe standard trójocetanowe	1 320	0.11÷0.16	60÷70	20÷30	30÷40	40÷50	90÷95	3.62		18.8÷19.0	470÷525	230÷260	175÷200
	1 320÷1 330	0.11÷0.18		20÷28	30÷35	80÷90	80÷90	3.09		18.4	475÷530	300	220÷230
Włókna miedziowe		0.15÷0.22	60÷65	12÷18	15÷30	70÷75	60÷75	5.3			420		
Nylon 6 standard HT (wysokotemp.)	1 140	0.40÷0.53	85÷95	25÷40	28÷45	80÷95		0.52÷0.62		20.0	510÷530	215	170÷180
		0.62÷0.75	80÷90	14÷25	16÷25			2.2÷2.6					
Nylon 66 standard HT (wysokotemp.)	1 140	0.40÷0.53	85÷95	25÷45	30÷50	80÷95		0.97÷2		20.0	530	255÷258	230÷250
		0.62÷0.79	80÷90	14÷22	18÷30			4.42	0.88				
Poliester	1 380÷1 420	0.40÷0.62	100	25÷55	25÷55	70÷90	75÷80	3.97÷7.06	0.80÷0.90	20.6	508	250÷260	230÷240
Polichlorek winylu	1 390÷1 410	0.09÷0.31	100	25÷60		90÷95	90÷95	3.62	0.70÷0.76	37.0÷45.0		170÷180	70÷80
Poliakrylonitryl	1 170	0.22÷0.44	80÷85	33÷45	35÷60	60÷90	55÷70	8.18	0.65÷0.70	18.2	515		220÷240
Alkohol poliwinylowy	1 260÷1 330	0.31÷0.62	80÷85	15÷20	16÷28	80÷85	65	2.21÷6.2		19.7		210	190÷200
Polipropylen	910÷930	0.40÷0.79	100	20÷30	20÷30	85÷90	90	0.88÷2.2	0.75	19.0	438	163÷175	140÷160

¹⁾ w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie w stanie suchym

Tablica. 2.10
Średnie właściwości
niektórych najważ-
niejszych organicz-
nych włókien tech-
nicznych, wg [204]

Tablica 2.11 – Niektóre właściwości chemicznych specjalnych włókien technicznych

Włókno	masa właściwa	wytrzymałość na rozciąganie		wydłużenie przy zerwaniu	absorpcji a wilgoci	LOI ¹⁾	odporność					sprężystość włókien	zakres temperatur użytkowych °C		relatywny koszt ²⁾
							na kwasy		na zasady		na UV				
							slabe	stężone	slabe	stężone					
aramidy	kg/m ³			%	%	%									
	1 380	0.35 ÷ 0.47	0.48 ÷ 0.65	22 ÷ 32	6.5	30	dobra	dobra	dobra	niska	b. dobra				3
	1 440	1.85 ÷ 2.38	2.66 ÷ 3.43	2.5 ÷ 4.0	4.0	29	dostat.	dobra	dobra	niska	b. dobra	315 ÷ 370	230		3
	1 340	0.30	0.40	16 ÷ 21	4 ÷ 4.5	32	dostat.	dobra	dobra	dobra	-	> 400	250		3
LCP	1 410	2.29 ÷ 2.56	3.22 ÷ 3.61	3.8	< 0.10	37	b. dobra	b. dobra	b. dobra	niska	dobra	rozkl. > 400	> 200		3
UHMWPE	970	2.12 ÷ 3.09	2.05 ÷ 3.00	2.8 ÷ 4.4	0	-	b. dobra	b. dobra	b. dobra	b. dobra	dostat.				2
PTFE	2 100	0.08 ÷ 0.18	0.17 ÷ 0.38	19 ÷ 140	0	> 100	b. dobra	b. dobra	b. dobra	b. dobra	niska	rozklad 430	288		4
PBO	1 500	3.7	5.55	2.5 ÷ 3.5	0.6 ÷ 2.0	68	dobra	b. dobra	-	dobra	b. dobra	rozklad 650	> 300		3
PBI	1 430	0.23 ÷ 0.26	0.33 ÷ 0.37	25 ÷ 30	15	38	b. dobra	b. dobra	b. dobra	dobra	b. dobra	> 595	315		4
poliimidy	1 410	0.33	0.46	19 ÷ 21	3	40	b. dobra	b. dobra	niska	dobra	dostat.	< 485	< 260		3
PPS	1 370	0.31	0.42	40	0.6	34	b. dobra	b. dobra	b. dobra	b. dobra	dobra	260	205		3
melamina	1 440	0.16	0.23	18	5	32	dobra	niska	b. dobra	dobra	dostat.	260 ÷ 370	> 200		2
poliakrylaty	1 500	0.11 ÷ 0.15	0.16 ÷ 0.22	20 ÷ 30	12	43	b. dobra	b. dobra	b. dobra	b. dobra	dobra	160	205		3
novaloidy fenolowe	1 270	0.11 ÷ 0.21	0.14 ÷ 0.27	30 ÷ 60	6 ÷ 7.3	33	b. dobra	niska	b. dobra	b. dobra	dostat.	rozklad 400	205		2
włókna węglowe (prekursor PAN)	1 400	2.12	2.97	19	9	55	dobra	niska	dobra	dobra	niska	b. wysoka	220		3
włókna szklane	2 500	1.35	3.35	4.8	< 0.10	> 100	b. dobra	b. dobra	dostat.	b. dobra	niska	b. wysoka	315		2

1) LOI = limiting oxygen index, patrz pkt.2.2.4

3) 1 = niski koszt, 4 = wysoki koszt

Tablica. 2.11
Średnie właściwości niektórych specjalnych chemicznych włókien technicznych.
Opracowano na podstawie [233]

Włókna chemiczne nieorganiczne

1). Włókna metalowe (druty stalowe)

Fakt, że cienkie włókna stalowe mają znacznie większą wytrzymałość na rozciąganie niż grubsze pręty wykonane z tego samego gatunku stali stwierdzono już w latach dwudziestych XIX w. (Séguin, Navier) [220][233]. Dało to podstawę do zastosowania lin stalowych z drutów jako elementów przenoszących efektywnie siły rozciągające. Obecnie produkowane druty stalowe charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie, wynikającą ze specyficznego składu chemicznego stali stosowanej do ich wyrobu oraz z technologii ich produkcji.

Druty metalowe znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach techniki. W zależności od zastosowania mogą być wykonywane ze stali niestopowych (węglowych), ze stali stopowych (odpornych na korozję) lub z metali nieżelaznych. Główna część produkcji drutów na liny to druty ze stali wysokowęglowych. Charakteryzują się one znacznie większą zawartością węgla w porównaniu ze stalami stosowanymi do wykonywania kształtowników profilowych (zawierającymi do ok. 0.23% C), a ponadto zawierają dodatek manganu, chromu, niklu, miedzi.

Drut był bez wątpienia w użyciu wcześniej niż trzy tysiące lat przed Chrystusem [84]. Wytwarzano go prawdopodobnie przez młotkowanie i zaginanie na sztancy wąskich pasków naciętych z miękkiego metalu, w celu nadania im okrągłego kształtu. Zwłaszcza złoto było wykorzystywane do wyrobu drutu na ozdoby. Są dowody, że drut metalowy był szeroko stosowany w XVII w. p. Ch. przez Asyryjczyków i Babilończyków.

W Biblii, przy opisie sposobu wykonywania szat Aarona znajduje się fragment: „Wykuli przeto cienkie blaszki ze złota i pocięli na nitki, aby można je było wpleść we fioletową i czerwoną purpurę, w karmazyn oraz w bisor, sposobem biegłego tkacza.”¹⁾

Przeciąganie drutu jest wspomniane po raz pierwszy w roku 400, w manuskrypcie rzymskiego trybuna Claudiusa Claudianusa. Na południu Francji znaleziono ciągadła do przeciągania pochodzące z tego okresu. Mają one formę prętów z rowkami lub otworami i są podobne do narzędzi znalezionych w grobie Wikinga w Loiten-Hedemark w Norwegii oraz znajdujących w różnych klasztorach [84].

Pierwszy pewny opis procesu przeciągania zawdzięczamy Teofilusowi Prezbyterowi, który w dziele „Schedula Diversarum Artium”, opisującym wszystkie znane wówczas techniki rzemieślnicze, pisze: „Ma on dwa żelaza, szerokie na trzy palce, wąskie na końcach, przebite trzema lub czterema rzędami dość ciasnych otworów, przez które przeciąga się druty²⁾” (rys. 2.15). Dopóki drut był wykonywany przez zakuwanie wąskich pasków metalu, był materiałem luksusowym. Przeciąganie zaczęło stosować dla różnych metali w VIII i IX w., jak podaje wspomniany manuskrypt Teofilusa³⁾ i wtedy drut stał się szerzej dostępny. Wzmianki o przeciąganiu są bardzo częste w XII w. i wtedy istniało wyraźne rozróżnienie pomiędzy rzemieślnikami wytwarzającymi drut przez kucie (ang. wire smith) a rzemieślnikami zajmującymi się przeciąganiem drutu (ang. wire drawer). Przeciąganie drutu było bardzo rozpowszechnione w Paryżu w XIII w. W dokumencie miejskim z roku 1270 wymienione są przywileje stanowiące część porozumienia pomiędzy miastem a cechem rzemieślników zajmujących się przeciąganiem drutu [84].



Rys. 2.15 – przeciąganie drutu, początek XV w., Bibl. Publ. w Norymberdze [84]

¹⁾ Ex. 39,3; cyt. za Biblią Tysiąclecia, wyd. III, Poznań 1980

²⁾ Lib. III, Cap. VIII: „De ferris per que fila trahuntur”. Cytat wg wydania Wilhelma Braumüllera, Wiedeń 1874; tłum. autora

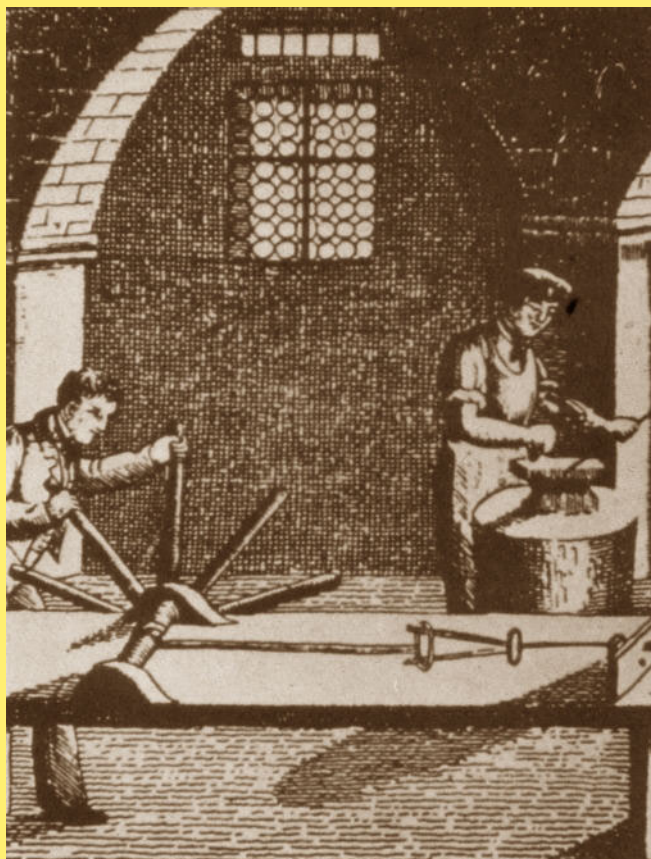
³⁾ ibidem, Lib. III, Cap. XC: „De ferro”

Pierwsze mechaniczne urządzenie do przeciągania drutu wprowadził Rudolf z Norymbergii w 1350 r. Miało ono napęd wodny. Powstający w tym samym czasie angielski przemysł tekstylny, oparty na wełnie wymagał dużych ilości drutu do urządzeń czesankowych. Spowodowało to powstanie znacznej ilości warsztatów zajmujących się przeciąganiem drutu, skupionych głównie wokół ośrodków tekstylnych (York, Coventry, Bristol, Londyn – do dziś tutaj występuje największa koncentracja wytwórni drutu). Mimo wynalazku Rudolfa, drut był w Anglii przeciągany ręcznie jeszcze przez następne dwieście lat. Dopiero w roku 1564, królowa Elżbieta I zaprosiła grupę rzemieślników z Saksonii do osiedlenia się w tym kraju. W krótkim czasie potrafił on stworzyć dobrze prosperującą gałąź przemysłu, rozpoczynając od słynnego warsztatu w Tintem (Monmouthshire). Mechanizacja obejmowała wówczas jedynie produkcję (poprzez kucie młotami z napędem wodnym) prętów, podlegających dalszemu, ręcznemu przeciąganiu. Zachował się szkic Leonarda da Vinci przedstawiający urządzenie do przeciągania drutu.

Już wówczas do produkcji drutu stosowano żelazo o zwiększonej zawartości węgla, uzyskiwanej przez stopienie ze specjalnym rodzajem węgla drzewnego. Wytwórnia w Tintem stosowała tzw. żelazo Osborn, podczas gdy na pograniczu Francji, Belgii i Luksemburga Walonowie wytwarzali żelazo nazywane przez nich Asmunt (w tym rejonie nie mniej niż trzy gminy mają nazwę Aysomunt). Prawdopodobnie słowo „Ayso” odpowiada słowu „eisen”. Żelazo Osborn zostało w XVIII w. wyparte przez żelazo zgrzewne (puclarskie).

Trudność wyprodukowania ciągłego (lub o dostatecznie dużej długości) drutu wynikała w tym okresie z niemożności wykonania poprzez kucie dostatecznie długiego pręta podlegającego dalszemu przeciąganiu. Problem ten został rozwiązany przez walcowanie. Pierwsze proste (dwuwalcowe) walcarki napędzane wodą powstały prawdopodobnie przed rokiem 1600. Produkowano za ich pomocą płaskie płyty, które następnie ręcznie (młotkiem i dłutem) cięto na wąskie paski, przekuwano na pręt i poddawano przeciąganiu. Następne udoskonalenie polegało na zastosowaniu drugiego zestawu walców, umieszczonych w niewielkiej odległości od pierwszych, tzw. walców tnących, wyposażonych w nacięcia i kołnierze. Uważa się, że ten typ urządzeń został wprowadzony w Europie około roku 1683. Wiadomo jednakże, że już ok. roku 1640 sprowadzano do Anglii gwoździe ze Szwecji, które były bardzo konkurencyjne właśnie dlatego, że produkowano je z wykorzystaniem walców tnących. Inny stosowany wówczas sposób produkcji prętów wyjściowych do produkcji drutu polegał na zastosowaniu napędzanych wodą młotów kujących. Sprawny kowal mógł za ich pomocą wykonywać pręty o długości do 2 m i średnicy 1 cm. Ze względu na konieczność częstego podgrzewania pręta, ich produkcja była niewielka. Przyjmuje się, że proces pełnego kształtowania prętów poprzez walcowanie wprowadził w 1783 r. Henry Cort, przemysłowiec angielski z Fareham koło Portsmouth, choć – być może – był on jedynie pierwszym, który zastosował je z sukcesem¹⁾. Wiadomo, że Szwed, Christopher Polhem, miał urządzenie wyposażone w walce z kołnierzami ale nie był w stanie ich skutecznie zastosować. Ponieważ to ten sam Henry Cort wprowadził rok później pudlingowanie jako nowy sposób świeżenia surówki, nastąpił wówczas – po dwustu latach zastoju – ogromny przełom w wytwarzaniu drutu. Początkowo pręty walcowane na walcach dwuwalcowej mogły mieć długość do ok. 4.5 m i rzadko osiągały średnicę mniejszą niż pół cala – były znacznie tańsze od prętów wytwarzanych wcześniejszymi metodami. Pomimo niskiej jakości pierwszych walcowanych prętów ze stali pudlarskiej, moment ich pojawienia się był decydujący dla wprowadzenia później metod produkcji stosowanych do dzisiaj. Walcarki trzywalcowe zostały wprowadzone w Anglii w 1819 r., co przyczyniło się do wyraźnego podniesienia jakości walcowanych prętów. Wciąż jednak – ze względu na ograniczenia długości prętów – zwoje drutu były niewielkie i przez następne pięćdziesiąt lat nie było znaczących udoskonaleń w produkcji drutu. Zapotrzebowanie na drut było aż do 1850 roku niewielkie i ograniczone do zastosowań specjalnych, takich jak np. mosty wiszące. Proces przeciągania był wciąż wykonywany ręcznie, a ograniczenia długości powodowały problemy w zastosowaniu drutu do nowych wynalazków jak choćby budowane od 1844 r. przez Samuela Morse’a międzymiastowe linie telegraficzne (pierwsza łączyła Waszyngton z Baltimore).

Pierwsze walcarki pętlowe, umożliwiające wielokrotne przepuszczanie pręta przez walce, pojawiły się w Belgii w 1860 r.²⁾ Spowodowało to możliwość uzyskiwania zwojów drutu o kilkukrotnie większej długości. W roku 1862, Brytyjczyk George Bedson zainstalował w zakładach Bradford Ironworks w Manchesterze pierwszą walcarkę ciągłą do produkcji drutu. Było to urządzenie o układzie pionowym. Udoskonalił je w 1878 r. Charles H. Morgan, ustawiając walce poziomo. Od tego okresu wprowadzono wiele większych i mniejszych udoskonaleń w procesie walcowania prętów jednak nie zmieniły się jego ogólne zasady.



Rys. 2.16 – przeciąganie drutu, ok. 1800 [84]

¹⁾ Niezależnie od Corta, kilka miesięcy wcześniej opracował proces pudlarski Peter Onions, mistrz w walijskich zakładach żelaznych.

²⁾ Wcześniej wydano patenty na walcarki ciągłe Anglikowi Johnowi Hazeldine (1798) oraz Amerykanom Serrelowi (1843) i Comerowi (1859) ale nie powstało żadne urządzenie na podstawie tych patentów.

Gatunki stali | Gatunki stali niestopowych przeznaczonych na walcówkę do produkcji drutu są określone w normie [N-06]. Oznaczone są one symbolem składającym się z litery D oraz dwucyfrowej liczby, określającej zawartość węgla w setnych procenta masy. Ponadto, w oznaczeniu stosuje się litery:

- A – oznaczającą obniżoną zawartość fosforu i siarki oraz chromu, niklu i molibdenu (dodawaną na końcu symbolu)
- S – oznaczającą znacznie obniżoną zawartość fosforu i siarki (dodawaną po literze D)
- G – oznaczającą podwyższoną zawartość manganu (dodawaną po liczbie)

Norma wymienia stale o symbolach od D36 do D95. Zawartość węgla wynosi w nich od 0.33% do 0.98%. Odpowiednia norma międzynarodowa ISO 8457-2:1989 wymienia stale o zawartości węgla do 0.99%.

Liny wykonuje się z drutów ze stali gatunku D35÷D70 i D45A÷D85A (dla lin najwyższej jakości). Stale o większej zawartości węgla mają wyższą wytrzymałość, a jednocześnie są bardziej kruche i mniej odporne na zmęczenie [2.2]. Tak wysoka zawartość węgla powoduje 4 ÷ 5 krotny wzrost wytrzymałości w stosunku do zwykłych stali budowlanych [132].

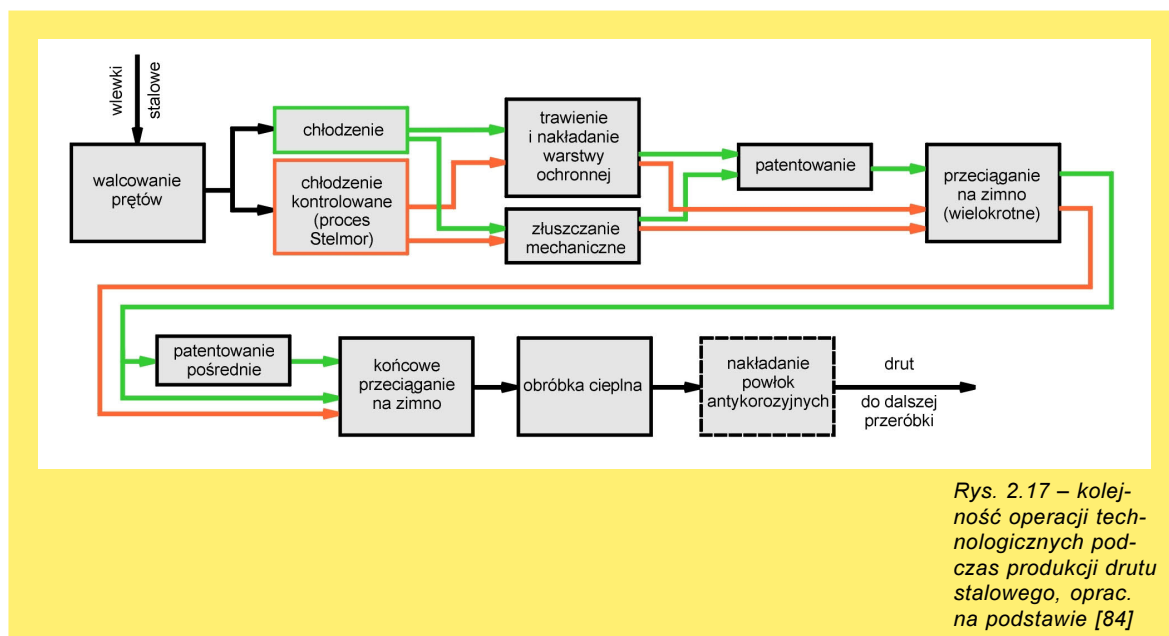
Drugim – oprócz jakości prętów – poważnym problemem przy produkcji drutu były ograniczenia wynikające z ręcznego przeciągania druty przez otwór ciągadła. Pojawienie się napędu parowego umożliwiło zmechanizowanie procesu przeciągania. Pierwsze urządzenia mechaniczne do ciągłego przeciągania drutu opracowano w Niemczech (Wafios) i w Anglii około roku 1871, a wkrótce potem w USA (Morgan, Vaughn). Urządzenia te nie mogły jednak być w pełni wykorzystane, dopóki nie opracowano odpowiednio trwałych ciągałek, przez które przechodził drut. Początkowo stosowano grube płyty stalowe¹⁾, o wymiarach ok. 30 × 180 cm, w których wykonywano do dwudziestu otworów do przeciągania o różnych średnicach. Ciagałka takie zużywały się bardzo szybko i podczas przeciągania pręta w zwoju o wadze 150 kg, jego uzyskiwanego drutu wzrastała o kilka setnych milimetra. Ten rodzaj ciągałek ograniczał jednocześnie maksymalne prędkości, z jakimi można było przeciągać drut, ze względu na nagrzewanie metalu. Kiedy otwory uległy rozkalibrowaniu, płytę wygrzewano w piecu i wypełniano otwory przez młotkowanie. Następnie wykonywano nowe otwory. Później wprowadzone zostały do użycia podobne ciagałka ale odlewane z żeliwa, o odpowiednio dobranych kształtach przekroju otworów. Zapewniały one lepszą dokładność niż ciagałka stalowe oraz większą trwałość. Do produkcji drutu o bardzo wysokich wymaganiach w zakresie tolerancji wymiaru i kształtu oraz do produkcji drutów o bardzo małych średnicach stosowano ciagałka wykonane z diamentów. Były one jednak bardzo drogie i kłopotliwe w eksploatacji, gdyż wszelkie korekty wymiarów, konieczne ze względu na zużycie, musiały być wykonywane w wyspecjalizowanych szlifierniach diamentów. Z tego względu stosowano je jedynie do wykonywania drutów o średnicy mniejsze niż 1 mm.

Wprawdzie już w 1893 r. Henri Moissan opracował metodę produkcji sztucznych diamentów, ale uzyskiwane przez niego kamienie były o wiele za małe, aby można je było stosować w matrycach do przeciągania drutu. W tym samym czasie odkrył on jednak węgiel wolframu, który okazał się materiałem niezwykle twardym. Bodźcem do prac nad znalezieniem nowego materiału do wykonywania ciągałek był dotkliwy brak diamentów, jaki dotknął gospodarkę niemiecką w czasie I wojny światowej. Już w 1914 r. Lohmann i Voightlander, a później, w roku 1917, Liebmann i Laise eksperymentowali z zastosowaniem węgla wolframu. Próbowano go topić i odlewać lub spiekać metodami znanymi z metalurgii proszków. Uzyskiwany produkt był jednak bardzo kruchy i nie nadawał się do zastosowania. Dopiero w roku 1923, Baumhauer i – pracujący w berlińskim laboratorium badawczym należącej do koncernu Kruppa firmy Osram – Schroter, wpadli niezależnie od siebie na pomysł dodania do spieku dodatkowego metalu. Był to kobalt, w ilości nawet do 20%. Pełni on rolę „lepiszcza” łączącego twarde cząsteczki węgla wolframu. Nowy wyrób został wprowadzony na rynek pod nazwą handlową „widia” (z niemieckiego „wie diament”). Pierwsze ciagałka do przeciągania drutów z tego materiału stosowano już w 1925 r. Od 1929 r. produkowane były również przez kilka firm amerykańskich (m.in. General Electric). Zastosowanie tych bardzo trwałych ciągałek (ponad pięćdziesięciokrotnie trwalszych od stalowych) umożliwiło przeciąganie drutu z dużą prędkością i uzyskiwanie najwyższych parametrów jakościowych. Podczas drugiej wojny światowej Niemcy eksperymentowali uzyskując uzyskać równie twardy produkt nie zawierający bardzo deficytowego wówczas wolframu ale okazało się to niemożliwe. Badanie te wykazały jednak, że jakość spiekanego węgla wolframu bardzo silnie zależy od rygorystycznego zachowywania parametrów podczas całego procesu produkcji.

Podstawowym materiałem, z którego wykonuje się obecnie ciagałka do przeciągania drutu jest spiekany węgiel wolframu. Pomimo tego jednak, wciąż stosowane są ciagałka diamentowe. Używa się ich wtedy, gdy niezbędne jest uzyskanie bardzo dużej dokładności wymiarów i kształtu (okrągłości), bardzo gładkiej powierzchni drutu oraz do produkcji drutu o średnicy mniejszej niż 0.2 mm. Ponadto, niektóre składniki stali nierdzewnych mogą wykazywać powinowactwo do węgla wolframu. Powoduje to duże trudności w zapewnieniu właściwego smarowania podczas przeciągania. Powinowactwo takie nie występuje w przypadku ciagałek diamentowych. Są one stosowane również przy przeciąganiu drutów powlekanych.

¹⁾ Wcześniej stosowano również, niezależnie od ciagałek stalowych, ciagałka wykonywane z twardych kamieni [84]

Produkcja | Proces produkcji drutów stalowych odbywa się w ciągu wielu następujących po sobie operacji technologicznych. Zasadnicza operacja – przeciąganie na zimno – jest poprzedzona przez operacje wstępne, a po niej następuje dalsza obróbka. Poszczególne fazy produkcji mogą często odbywać się w kilku wariantach różniących się zarówno co do zasady jak i co do rozwiązań technologicznych, które z reguły są opatentowane przez producentów. Szczegółowy przebieg każdego z tych procesów ma wpływ na właściwości końcowego produktu. Kolejność operacji technologicznych podczas produkcji drutu jest przedstawiona na rys. 2.17.



Poniżej podano opis poszczególnych operacji:

Walcowanie prętów | Półproduktem wyjściowym do produkcji drutu są pręty okrągłe produkowane z wlewk stalowych. Stal, dzięki swojej strukturze krystalicznej oraz znacznej ciągliwości, może być deformowana poprzez zastosowanie odpowiedniego nacisku. Można to zrealizować poprzez walcowanie lub kucie. Operacje te mogą być wykonywane na zimno lub na gorąco. Materiał wyjściowy do produkcji drutu – pręt jest wykonywany poprzez walcowanie na gorąco wlewków stalowych. Dzięki dużej mobilności atomów żelaza i węgla w wysokiej temperaturze, stal może być przerabiana w tym procesie na pręty szybko i ekonomicznie. Ponadto, wstępne walcowanie pozwala usunąć liczne defekty występujące we wlewkach. Współcześnie stosowanych jest kilka różnych procesów walcowania prętów: walcowanie ciągłe, Garretta, półciągłe, kombinowane. W najbardziej zaawansowanych obecnie urządzeniach amerykańskiej firmy Morgan (VEE No-Twist Mill), wyposażonych w urządzenia do ciągłej kontroli temperatury pręta, prędkość walcowania dochodzi do 360 km/godz. Urządzenia te są wyposażone w umieszczone na przemian z lewej i prawej strony oraz z góry i dołu pary rolek walcujących (do dziesięciu par), których osie ustawione są pod kątem 45° do poziomu. Zapobiega to skręcaniu pręta podczas walcowania. Operator może w dowolnym momencie zmienić rolki, dostosowując je do rodzaju walcowanej stali i zakładanego stopnia redukcji przekroju [84].

Chłodzenie i chłodzenie kontrolowane prętów | Zachowanie ścisłej kontroli temperatury pręta jest bardzo istotne dla uzyskania właściwej struktury krystalicznej, utrzymywania stałego przekroju poprzecznego oraz uniknięcia niektórych wad przekroju. Wczesne techniki chłodzenia polegały na schładzaniu zwojów drutu powietrzem w specjalnych komorach o wymuszonym obiegu. Następnie stosowano chłodzenie wodą oraz na przemian wodą i powietrzem. W 1964 r. wprowadzony został tzw. proces

Stelmor (obecnie stosowany jest w trzech wersjach: Standard, Slow Cool i Retarded). Pręt jest w tym procesie gwałtownie schładzany wodą (do temperatury ok. 785°C w czasie jednej sekundy lub krótszym), a następnie w postaci kręgów układany w sposób ciągły na przenośniku, gdzie następuje dalsze kontrolowane ciągłe chłodzenie w tempie od 3.8°C do 8.5°C na sekundę. Na końcu przenośnika formowane są zwoje. W procesie Stelmor powstaje w pręcie tzw. mikrostruktura pseudo-patentowa. Jest to struktura pośrednia pomiędzy strukturą uzyskiwaną w procesie patentowania w ołowiu a strukturą uzyskiwaną w patentowaniu powietrznym. Wprowadzenie w tym samym czasie procesu Stelmor oraz walcowania bez skrętu uważane jest za największy przełom technologiczny w produkcji prętów w ostatnim okresie. Metoda ta jest tańsza i pozwala na przyspieszoną produkcję prętów.

W wielu zastosowaniach pręty produkowane metodą Stelmor zastępują pręty tradycyjnie patentowane w powietrzu lub w ołowiu. Dla drutów o małej średnicy, które wymagają patentowania pośredniego po wstępnym przeciągnięciu, w którym następuje duża redukcja średnicy – zastosowanie tych prętów pozwala wyeliminować patentowanie wstępne. Dla drutów o większej średnicy, które nie wymagają patentowania pośredniego, konieczna jest korekta zawartości węgla w pręcie. Pręty produkowane metodą Stelmor mają wytrzymałość na rozciąganie wyższą niż pręty o tym samym składzie patentowane w powietrzu i niższą niż pręty o tym samym składzie patentowane w ołowiu. Od czasu wprowadzenia procesu Stelmor pojawiło się również kilka innych metod ciągłego chłodzenia prętów. Są to m.in. procesy Kobe, Tempcore, Demag-Tower, Krupp, Ashlow, Schloemann i inne [84]. Zanotowano jednakże wiele wypadków zerwania się cięgien wykonanych z drutów wyprodukowanych metodą Stelmor w miejscach ich odgięcia (łożyska, zakotwienia). Było to jednym z powodów wprowadzenia wymogu badania w złożonym stanie naprężenia – próby przeginania [132][N-07].

Czyszczenie chemiczne i mechaniczne | Czyszczenie prętów ze stali węglowych ma na celu usunięcie zgorzeliny powstającej na pręcie podczas walcowania oraz powstałej później rdzy. Masa zgorzeliny powstającej na powierzchni pręta chłodzonego w sposób tradycyjny wynosi $1 \div 2.5$ % masy pręta, a dla prętów chłodzonych po walcowaniu w procesie Stelmor — $0.2 \div 0.7$ % masy pręta.

Oczyszczanie chemiczne polega na trawieniu pręta w kąpeli kwasu siarkowego lub solnego. Kwas solny daje lepszy efekt – powierzchnia jest biała, z mniejszą tendencją do powstawania plam. Kwas ten może być stosowany w niższej temperaturze i trawienie trwa krócej. Z drugiej strony, kwas solny jest bardziej uciążliwy w operowaniu i stwarza więcej problemów z usuwaniem oparów. Przy czyszczeniu chemicznym stosuje się również inhibitory, które ulegają adsorpcji na powierzchni metalu, redukując agresywne działanie kwasów. Początkowo jako inhibitory stosowano takie substancje jak mąka, melasa, skrobia, otręby, kora garbarska, mydło, alkohole, mannit itp. Obecnie stosowane są długocieczowe związki organiczne. Nie stosuje się czynników pianotwórczych, które dawniej umożliwiały redukcję parowania roztworów trawiących. Zastosowanie inhibitorów ma również aspekt niekorzystny, gdyż wydłuża czas kąpeli, co może przyczyniać się do powstawania kruchości wodorowej prętów. Obecnie stosuje się trawienie w procesie ciągłym (np. KCC-Voest). Zwoje drutu są w tym procesie zanurzone kolejno w szeregu kąpeli trawiących, splukiwane, a następnie suszone i nakładana jest warstwa ochronna.

Nakładanie powłoki ochronnej jest tradycyjnie nierozdzielnie związane z procesem czyszczenia chemicznego. Stosowane jest ono w celu usunięcia nieprzereagowanej do końca zgorzeliny i w celu zapobiegnięcia powstawaniu korozji na powierzchni oczyszczonego pręta. Powłoki te odgrywają również bardzo ważną rolę środka smarującego podczas przeciągania na zimno. Stosowane jest zanurzenie pręta w roztworach wapna lub boraksu, a w wielu przypadkach również fosfatowanie lub miedziowanie. Fosfatowanie, mimo że droższe niż inne powłoki, jest szczególnie dobrym środkiem zapobiegającym „przypawaniu się” pręta do matrycy podczas przeciągania oraz pozwala uzyskiwać po przeciągnięciu gładszą powierzchnię niż w przypadku drutów pokrytych kredą. Z tego względu jest stosowane przy produkcji drutów ze stali wysokowęglowych oraz drutów kształtowych.

Pierwsza linia technologiczna produkcji drutu, wykorzystująca jednocześnie bezskrętowe urządzenie walcujące „No-Twist” oraz proces kontrolowanego chłodzenia „Stelmor” została uruchomiona w roku 1965, w zakładzie firmy The Steel Company of Canada, w Hamilton (Ontario).

Kruchość wodorowa występuje wtedy, gdy w mikroskopijnych kanalikach przebiegających przez ziarna znajduje się wodór pod wysokim ciśnieniem. Większość tego gazu pozostaje w stali nawet po ogrzaniu jej przez zanurzenie w kolejnych kąpielach olejowych o coraz to wyższej temperaturze.

Fosfatowanie jest zabiegiem polegającym na zanurzeniu metalu w roztworze fosforanu cynku. Temperatura roztworu wynosi od 71°C do 88°C i w czasie kąpeli nie powinna się zmienić więcej niż o 3°C. Czas zanurzenia wynosi od trzech do siedmiu minut. Po kąpeli następuje splukanie zimną wodą i splukanie neutralizujące roztworem wapna lub boraksu.

Złuszczenie mechaniczne, dawniej jedyna metoda usuwania zgorzeliny, częściowo wyparta później przez czyszczenie chemiczne, stało się ponownie atrakcyjne po wprowadzeniu kontrolowanego chłodzenia prętów (metoda Stelmor). Warstwa zgorzeliny powstająca na prętach produkowanych tą metodą jest cieńsza, a powierzchnia metalu pod nią – gładsza. Powoduje to, że efekt końcowy złuszczenia mechanicznego jest bardzo dobry. Urządzenia do złuszczenia były wykonywane w oparciu o różne metody usuwania zgorzeliny. Obecnie wykorzystuje się trzy z nich: śrutowanie, polerowanie taśmą ścierną i przeginanie. Czyszczenie mechaniczne jest często łączone z czyszczeniem chemicznym.

Tak, jak nakładanie powłoki ochronnej jest związane z czyszczeniem chemicznym – tak ze złuszczeniem mechanicznym jest związane smarowanie. Jest ono stosowane dla zapewnienia właściwych warunków kontaktu pomiędzy przeciąganym drutem, a matrycą. Chociaż pierwotnie środki smarujące zostały opracowane dla prętów złuszczanych mechanicznie, które nie mają wapiennej lub boraksowej powłoki ochronnej, obecnie są one stosowane niemal zawsze w procesie przeciągania [84].

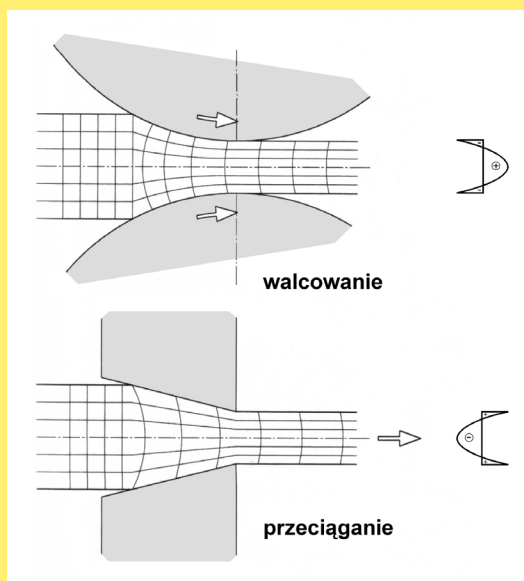
Do roku 1650 w zasadzie nie stosowano trawienia kwasami do usuwania zgorzeliny z prętów. Czyszczenie odbywało się ręcznie, za pomocą piasku i kamienia. Uważa się [84], że po raz pierwszy zastosował moczenie prętów w wodzie wapiennej Rinman w Szwecji w 1750 r. Zaledwie dwa miesiące później zanurzał pręty w kwasie pirolignicznym – produkcie ubocznym powstającym przy suchej destylacji drewna. W roku 1806 zastosowano po raz pierwszy vitriol (kwas siarkowy) zamiast tzw. „wody jęczmiennej”. Pierwszy patent na trawienie blach uzyskał w 1816 r. Walijczyk John Parnell. Opis tego patentu podaje, że blachę należy zanurzać w roztworze dwóch półkwart „kwasu morskiego” w trzech galonach wody. Aby uzyskać białą powierzchnię blachy należało zanurzyć na dobę w kąpeli sfermentowanych otrębów, następnie zaś w roztworze dwóch półkwart vitriolu w dwóch galonach wody i w końcu oczyścić piaskiem. W roku 1829, Anglik Morgan, uzyskał pierwszy patent na „czarne trawienie” blach, wyłącznie za pomocą kwasu siarkowego. Chociaż kwas siarkowy był znany już od roku 1530, dopiero w roku 1746 Dr Roebuck z Birmingham zbudował pierwszą komorę ołowianą do produkcji tego kwasu. Kwas solny został zastosowany prawdopodobnie przez Priestleya w 1772 r., chociaż są wzmianki o stosowaniu go do trawienia już w roku 1760 [84]. Mała dostępność oraz stosunkowo wysoka cena obu wspomnianych kwasów spowodowała, że przed rokiem 1860 rzadko stosowano czyszczenie chemiczne. Po tym roku zaczęto stosować wytrawianie całych zwojów drutu poprzez kąpiel w kwasie siarkowym, zanurzenie w wodzie wapiennej a następnie w mące. Mechanizacja tego procesu nastąpiła w 1863 r., kiedy Washburn wprowadził w zakładach w Worcester (Anglia) linię do ciągłego wyżarzania, czyszczenia i cynkowania.

Patentowanie | Patentowanie polega na nagrzanu drutu w specjalnym piecu do temp. $850 \div 950^{\circ}\text{C}$, a następnie szybkim ochłodzeniu go, w kąpeli ołowiowej (temp. $450 \div 550^{\circ}\text{C}$) lub solnej albo w strumieniu powietrza. Przed patentowaniem struktura pręta składa się z blaszek twardego węgliku żelaza (cementytu) rozdzielonego miękkim ferrytem. Po nagrzanu do temperatury przemiany austenicznej cementyt rozpuszcza się. Podczas chłodzenia wydziela się ponownie w formie cienkich blaszek. Im większa jest prędkość chłodzenia, tym cieńsze są blaszki i tym wyższa jest wytrzymałość materiału na rozciąganie i ciągliwość [25][84]. Patentowanie zwiększa wytrzymałość drutu nawet $2 \div 3$ krotnie [132].

Patentowaniu poddaje się stal o zawartości węgla pomiędzy 0.40 % a 0.90 %. Pręty produkowane metodą Stelmor nie muszą być poddawane patentowaniu przed przeciąganiem na zimno, jednakże wykonuje się patentowanie pośrednie, jeżeli przeciągnię zredukowało średnicę pręta o ok. 85 %, a ma on być poddawany dalszemu przeciąganiu. Dla prętów grubych, o średnicy powyżej 12 mm konieczne jest stosowanie innych zabiegów [84].

W połowie XIX w. pręty poddawane przeciąganiu na zimno były wykonywane w odcinkach o długości ok. 4.5 m i miały średnicę ok. 12 mm. Wykonywano je przez walcowanie żelaza zgrzewnego, poddanego wcześniej procesowi nawęglania poprzez tzw. „cementowanie”. Polegało ono na wygrzewaniu żelaza nagrzanego do czerwoności w komorach wypełnionych węglem drzewnym. Komory były uszczelnione opilkami kamienia do sotrzeżenia narzędzi aby wykluczyć dostęp powietrza. Nawęglone kęsy były ponownie podgrzewane, kute, a następnie walcowane na pęty. Cementowany pręt był bardzo trudny do przeciągania, ze względu na swoją twardość i kruchość. Problem ten został rozwiązany w roku 1854 przez Jamesa Horsfalla z firmy Webster & Horsfall (Hay Mills) z Birmingham, który opatentował proces wstępnej obróbki cieplnej prętów i drutów, która pozwalała na łatwiejsze ich przeciąganie. Miało to związek z dostawami drutu na potrzeby budowanego transatlantyckiego kabla telegraficznego [77][84]. Proces ten miał tak wielki wpływ na przemysł, że termin „patentowanie” stosowany jest do dzisiaj jako określenie obróbki cieplnej [84].

Przeciąganie na zimno | Przeciąganie na zimno jest operacją, w której następuje ostateczna redukcja średnicy pręta do żądanej średnicy drutu. Polega ono na kilkukrotnym przeciąganiu przez odpowiednio ukształtowane otwory o coraz to mniejszej średnicy. Wprowadzone zostało pierwotnie wyłącznie jako metoda produkcji drutów o małej średnicy, niemożliwej do osiągnięcia przez stosowane wcześniej kucie. Okazało się jednak, że przeciąganie w istotny sposób wpływa na zmianę struktury materiału drutu oraz na jego właściwości mechaniczne. Kilukrotne przeciąganie na zimno powoduje zgniot powierzchniowy materiału i pasmowe ukierunkowanie struktury krystalicznej stali zgodnie z osią drutu, co zwiększa wytrzymałość materiału nawet dwukrotnie, w stosunku do wytrzymałości pierwotnej. Przeciąganie wywołuje w materiale naprężenia o znakach przeciwnych niż naprężenia powstające podczas walcowania. Schematycznie zostało to pokazane na rys. 2.18.



Rys. 2.18 – redukcja średnicy drutu podczas procesów walcowania i przeciągania prętów. Opracowano na podstawie [201]

Współcześnie przeciąganie drutu odbywa się w sposób ciągły, w urządzeniach nazywanych ciągarkami, pojedynczych lub wielostopniowych. Najistotniejszą częścią tych urządzeń są ciągadła – narzędzia o oczku wykonywanym ze spiekanych węglików wolframu. Schemat budowy ciągadła oraz opis funkcji jego najważniejszych elementów jest przedstawiony na rys. 2.19.

Funkcja poszczególnych elementów oczka ciągadła do przeciągania drutu [84]:

1. Stożek wlotowy – służy do naprowadzania pręta podczas wprowadzania do ciągadła. Nie pełni żadnej funkcji podczas przeciągania

2. Stożek smarujący – jego rola polega na ukierunkowaniu strumienia smaru do obszaru stożka zgniotu.

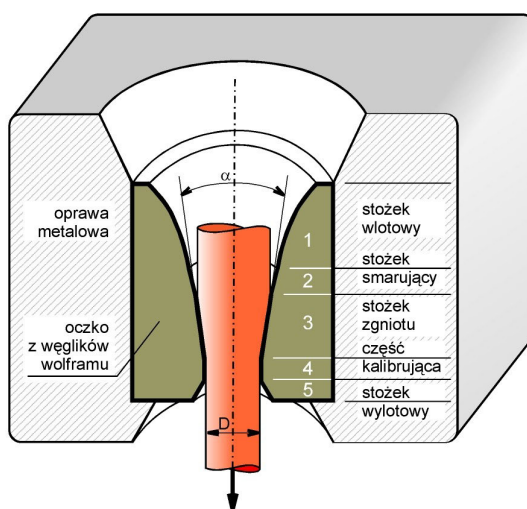
3. Stożek zgniotu – jest to najważniejsza część oczka. W niej następuje redukcja średnicy drutu. Wielkość tego kąta wierzchołkowego α i długość odcinka, na którym następuje redukcja średnicy zależy m.in. od rodzaju materiału, z którego jest wykonany przeciągany drut i różni się nieco pomiędzy wytwórniami. Na ogół kąt α wynosi:

- dla stali wysokowęglowych 12°
- dla stali niskowęglowych 14° – 16°
- dla stali nierdzewnych 18°
- dla drutu miedzanego i aluminium 16°

Najczęściej podczas jednego przeciągnięcia następuje redukcja średnicy o 20% – 35% .

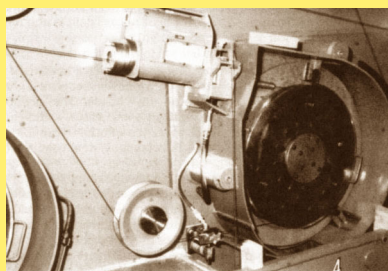
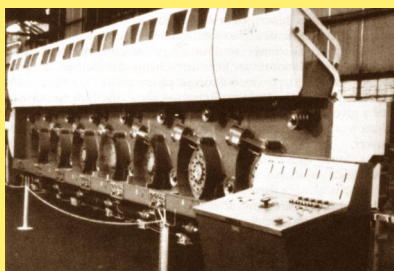
4. Część kalibrująca – jest to cylindryczny odcinek powierzchni oczka ciągadła. Zapewnia zachowanie kształtu przekroju poprzecznego, zapobiega zakrzywianiu drutu, nadaje gładkość powierzchni. Zapobiega szybkiemu zużywaniu się krawędzi powierzchni stożka redukcyjnego. Jej długość powinna wynosić od 35% do 50% średnicy.

5. Stożek wylotowy – jest to stożkowe poszerzenie obszaru wyjścia drutu z ciągadła. Zapobiega wykruszaniu węglika i pomaga utrzymać osiowe położenie drutu podczas przeciągania. Kąt wierzchołkowy stożka wynosi najczęściej 90° .



Rys. 2.19 – budowa i funkcje poszczególnych elementów ciągadła do przeciągania drutu. Opracowano na podstawie [84]

Ze względu na zmniejszającą się ilość materiału, który przechodzi przez każde kolejne ciągadło, mogłoby dochodzić do gromadzenia się zredukowanego materiału po jednej stronie i w konsekwencji do zablokowania otworu. Z tego powodu prędkość przeciągania jest zwiększana na każdym kolejnym otworze ciągadła. Dzięki temu nie występuje efekt gromadzenia się materiału, gdyż jego ilość „wciągana” do kolejnego ciągadła jest w jednostce czasu taka sama, jak ilość materiału wychodząca z ciągadła poprzedniego.

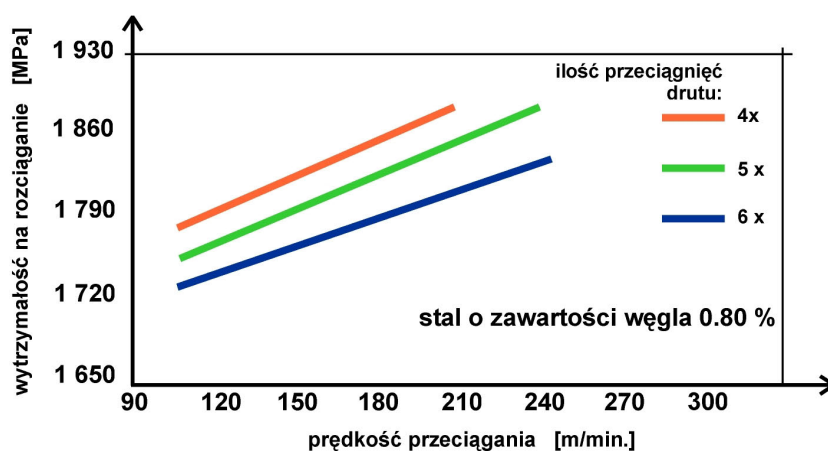


Rys. 2.20 – współczesne urządzenie do przeciągania drutu (firma Marshall Richards Barcro Machine Co):
a). widok ogólny
b). widok pojedynczego ciągnadła [84]

Końcowy stopień redukcji średnicy może być bardzo duży – ponad 90%. W czasie jednego przeciągnięcia następuje redukcja średnicy o $20 \div 35\%$. Prędkość przeciągania może znacznie przekraczać 200 m/min. Rys. 2.20 przedstawia widok współczesnego urządzenia do przeciągania drutu.

Warunki, w jakich odbywa się przeciąganie mają wpływ na wytrzymałość drutu. Badania przeprowadzone przez H.J. Godfreya¹⁾ wykazały, że wytrzymałość drutu rośnie wraz ze wzrostem prędkości przeciągania, natomiast maleje wraz ze wzrostem ilości otworów, przez które przechodzi przeciągany drut – rys. 2.21. Wzrost zawartości węgla w stali powoduje, że przyrost wytrzymałości podczas przeciągania następuje szybciej niż dla stali o niższej zawartości węgla.

Wpływ warunków przeciągania na wytrzymałość drutu jest zjawiskiem powszechnie znanym, natomiast nie ma dotychczas zadowalającego wyjaśnienia tego zjawiska. Oprócz wymienionych wyżej, występują również czynniki drugorzędne, mające wpływ na końcowe właściwości drutu. Są to np.: kierunek przeciągania, stopień redukcji przekroju w jednym otworze ciągnadła, stopień chłodzenia ciągnadeł itp.



Rys. 2.21 – zależność wytrzymałości na rozciąganie od warunków przeciągania drutu: prędkości i ilości przeciągnięć. Wykres dla stali o zawartości węgla 80%, patentowanej w Ołowiu. Całkowita redukcja średnicy – 70%. Wyjściowa średnica pręta – 8.9 mm. Opracowano na podstawie [84]

Zjawisko wzrostu wytrzymałości drutu w czasie przeciągania jest obecnie tłumaczone w oparciu o zaproponowaną w 1934 r. przez Taylora teorię deformacji. Według niej, podczas przeciągania następuje plastyczna deformacja kryształów, polegająca na wzajemnym przesuwaniu blaszek krystalicznych w płaszczyźnie. Zjawisko deformacji zostało zaobserwowane pod mikroskopem elektronowym w roku 1956, przez Bollmana i Hirscha.

Podczas przeciągania następuje również wzrost ciągliwości stali. Jest to tłumaczone wpływem ciepła powstającego podczas przeciągania, co daje efekt podobny do wyżarzania.

Jako środki smarujące podczas przeciągania stosowane są związki o różnym stopniu rozpuszczalności w wodzie, najczęściej stearynian wapnia i stearynian sodu lub ich mieszanki. Stosuje się również cały szereg domieszek, których zadaniem jest regulacja lepkości, odporności na wysokie ciśnienie, czy temperatury topnienia. Najczęściej stosowane domieszki to: wapń, soda, borax, siarczany żelaza, siarka, alkohole i glikole.

Środek smarujący w formie proszku jest podawany pod ciśnieniem w pierwszym ciągnadle i pozostaje na drucie w postaci przylegającego cienkiego filmu podczas przeciągania w następnych otworach.

¹⁾ „The Physical Properties of Steel Wire as Affected by Variation in the Drawing Operations”, H.J. Godfrey, Proc. A.S.T.M., vol.42, 1942. za [84]

Dodatek dwutlenku tytanu, zapobiega przyleganiu cząsteczek metalu do ostrza z węglików wolframu, pogarszającemu jakość powierzchni drutu. Cząsteczki dwutlenku tytanu nieustannie polerują ostrze, zmniejszając efekt „drapania” powierzchni drutu. Dodatek dwusiarczku molibdenu istotnie zmniejsza współczynnik tarcia środka smarującego ale jest to dodatek bardzo drogi. Stosowane są również pigmenty barwiące, które pozwalają uzyskać podczas przeciągania określony kolor powierzchni drutu. Może to być np. grafit (kolor czarny) lub siarczan żelaza (kolor brązowy).

Obróbka cieplna | Obróbka cieplna pojawia się w różnych etapach produkcji drutu i jest niezwykle istotnym elementem procesu technologicznego. Może ona około dwu- trzykrotnie zwiększyć wytrzymałość drutu na rozciąganie.

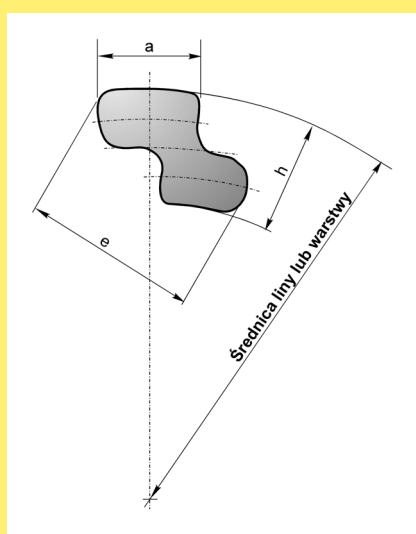
Końcowa obróbka cieplna może polegać na zabiegu wyżarzania: rekrytalizującego, normalizującego, zmiękczającego lub odpężającego [N-05]. Wyżarzanie definiowane jest jako: „następujące po sobie operacje nagrzewania i chłodzenia, przy czym chłodzenie jest relatywnie wolne” [84]. Celem tego zabiegu jest przede wszystkim usunięcie naprężeń własnych, poprawa właściwości plastycznych i ujednorodnienie struktury stali.

Oprócz wyżarzania stosuje się również ulepszanie cieplne (hartowanie w oleju i odpuszczanie), a także (ponowne) patentowanie.

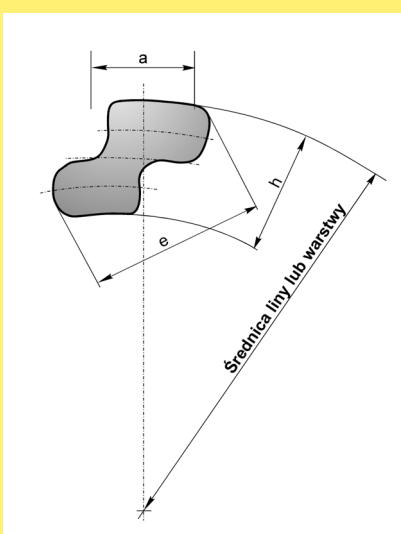
Przed obróbką cieplną konieczne jest usunięcie z powierzchni drutu środków smarujących. Odbywa się to np. w kąpieli o odczynie zasadowym. Zastosowanie do smarowania mydła na bazie sodu eliminuje najczęściej ten problem [84].

Kształt przekroju | Druty mogą mieć różny kształt przekroju poprzecznego. Podstawowy jest kształt okrągły uzyskiwany bezpośrednio w procesie przeciągania. Poprzez dodatkowe walcowanie na zimno można uzyskać inne kształty (rys. 2.22): zbliżony do litery Z lub S, trapezowy (T), trójkątny, prostokątny lub płaski, owalny, iksowy. [N-16][201]

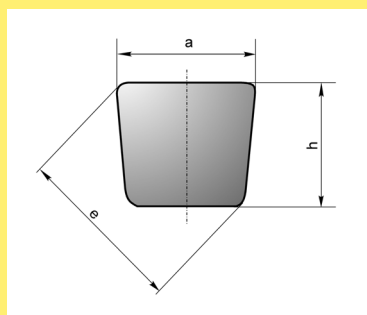
Nagrzewanie odbywa się w specjalnych piecach, do których drut jest wkładany w zwojach lub w sposób ciągły, w długich (nawet do 20 m) złożach piasku „upłynnianego” gazem, którego spalanie dostarcza jednocześnie ciepła. Chłodzenie najczęściej odbywa się za pomocą powietrza.



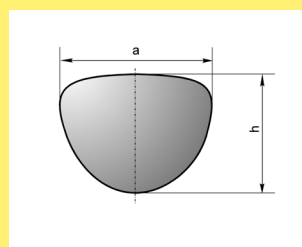
drut rodzaju Z



drut rodzaju S



drut rodzaju T



drut owalny

Rys. 2.22 – druty kształtowe do lin:
– drut rodzaju Z
– drut rodzaju S
– drut rodzaju T (trapezowy)
– drut trójkątny
Druty rodzaju Z, S i T – wg [N-08], druty trójkątne – wg [18]

Druty rodzaju Z, S i T, określone normą [N-08] mają następujące wartości h:

- rodzaj Z i S
3, 3.5, 4, 4.2, 4.5, 5, 5.5, 6, 7
- rodzaj T
3, 3.5, 4, 4.5, 5

Stosunek wymiarów przekroju h/a wynosi:

- rodzaj Z i S
 $1.05 \div 1.25$
- rodzaj T
 $1.0 \div 1.3$

Stosunek wymiarów przekroju h/e wynosi:

- rodzaj Z i S
 $0.55 \div 0.75$
- rodzaj T
 $0.75 \div 0.90$

Średnica warstwy zależy od budowy liny. Norma [N-08] dopuszcza inne wymiary przekroju poprzecznego, po uzgodnieniu.

Podział drutów | Podział drutów stalowych oraz wymagania odnośnie ich właściwości mechanicznych nie są jednoznacznie ustalone. Różne źródła formułują je niezależnie i nieco inaczej, w zależności od specyficznego przeznaczenia wyrobu. Tablica 2.12. przedstawia podział drutów stalowych wg [N-04] oraz podział drutów do wyrobu lin stalowych wg [N-05].

Tablica 2.12 – Podział drutów stalowych wg [N-04] i podział drutów do wyrobu lin stalowych wg [N-05]

Podział drutów według							
kształtu przekroju poprzecz.	wielkości przekroju poprzecznego	stanu powierzchni	rodzaju stali	jakości wykonania	wytrzymałości na rozciąganie	rodzaju ostatecznej obróbki cieplnej	stanu dostawy
• okrągłe • półokrągłe • płaskie • kwadratowe • trapezowe • trójkątne • inne	• bardzo cienkie $d \leq 0,2 \text{ mm}$ • cienkie $0,2 < d \leq 0,7 \text{ mm}$ • średnie $0,7 < d \leq 1,4 \text{ mm}$ • grube $1,4 < d \leq 6,0 \text{ mm}$ • bardzo grube $6,0 \text{ mm} < d$	• druty gładkie • blyszczące (b) • matowe (m) • druty pokryte - miedziowane (pa) - cynkowane (pb) - cynkowane (pc) - fosforanowane (pf) - boraksoowane (pk) - mosiężowane (pm) - inne	• ze stali niskowęglowych o zawartości węgla do 0,3% • ze stali średniowęglowych o zawartości węgla powyżej 0,3 do 0,6% • ze stali wysokowęglowych o zawartości węgla powyżej 0,6%	• najwyższej jakości (I) • wyższej jakości (II) • pospolitej jakości (III)	• bardzo niskiej wytrzymałości do 42 kg/mm² • niskiej wytrzymałości powyżej 42 – 60 kg/mm² • średniej wytrzymałości powyżej 60 – 80 kg/mm² • normalnej wytrzymałości powyżej 80 – 125 kg/mm² • podwyższonej wytrzymałości powyżej 125 – 200 kg/mm² • wysokiej wytrzymałości powyżej 200 – 320 kg/mm² • bardzo wysokiej wytrzymałości powyżej 320 kg/mm²	• wyżarzane rekryształizująco • wyżarzane zniekształcająco • wyżarzane odprężająco • ulepszone cieplnie (hartowane i odpuszczane) • normalizowane • patentowane • nieobrobiane cieplnie	• na szpulach (sz) • w postaci prętów (t) • w kęgach

Podział drutów do wyrobu lin według					
metod wytwarzania	kształtu przekroju poprzecznego	materiału	stanu powierzchni (obrobki)	położenia drutu	przeznaczenia drutów
• ciągnięcie - na mokro - na sucho • walcowanie na zimno • patentowane - w kąpielach oliwowej - w powietrzu	• okrągły • kształtowy - żełowy - trapezowy (klinowy) - lśkowy - inny	• stal niestopowa (węglowa) - miękka (niskowęglowa) - twarda (wysokowęglowa) • stal stopowa - odporna na korozję • metale nieżelazne	• bez powłoki (stal z polyskiem) • powłoka ochronna - cynkowa - na gorąco - elektrolitycznie - po ciągnięciu - przed ciągnięciem - cynkowa - kadmiowa - mosiężna - miedziowa - inna	• drut rdzeniowy • druty warstw pokrywających - druty wypełniające - druty warstw zewnętrznych	• druty nośne ¹⁾ • druty wypełniające ²⁾ • druty zszywające ³⁾ • druty łączące (wiązące) ⁴⁾

właścności klasyfikujących drut	łączenia drutów
• klasa wytrzymałości ⁵⁾ • jakość powłoki ⁶⁾	• zgrzewanie elektryczne stykowe • lutowanie lutem twardym • skręcanie

¹⁾ wszystkie druty, których przekrój wlicza się do przekroju nośnego liny
²⁾ druty o niedużych średnicach, wykorzystywane w niektórych konstrukcjach lin o liniowym styku drutów, w celu otrzymania odpowiedniej wartości odstępów i podtrzymywania drutów warstwy pokrywającej. wartość przekroju poprzecznego drutów wypełniających nie jest wliczana do przekroju nośnego liny. W niektórych przypadkach drut wypełniający może być drutem nośnym.
³⁾ pojedynczy drut lub druty tworzące spletkę wykorzystywane do zscicia lin płaskich
⁴⁾ pojedynczy drut lub druty tworzące spletkę wykorzystywane do utworzenia spiralnego, drucianego pokrycia zabezpieczającego spletki przed przesuwaniami
⁵⁾ poziom wymaganej wytrzymałości na rozciąganie, określony przez minimalną wartość odpowiedniego zakresu wytrzymałości na rozciąganie
⁶⁾ właściwość określona przez masę jednostkową, równomierność i przyczepność powłoki

Tablica. 2.12
Podział drutów
wg [N-04] i [N-05]

Wytrzymałość drutów | Ostateczne właściwości drutu stalowego zależą od wielu czynników, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

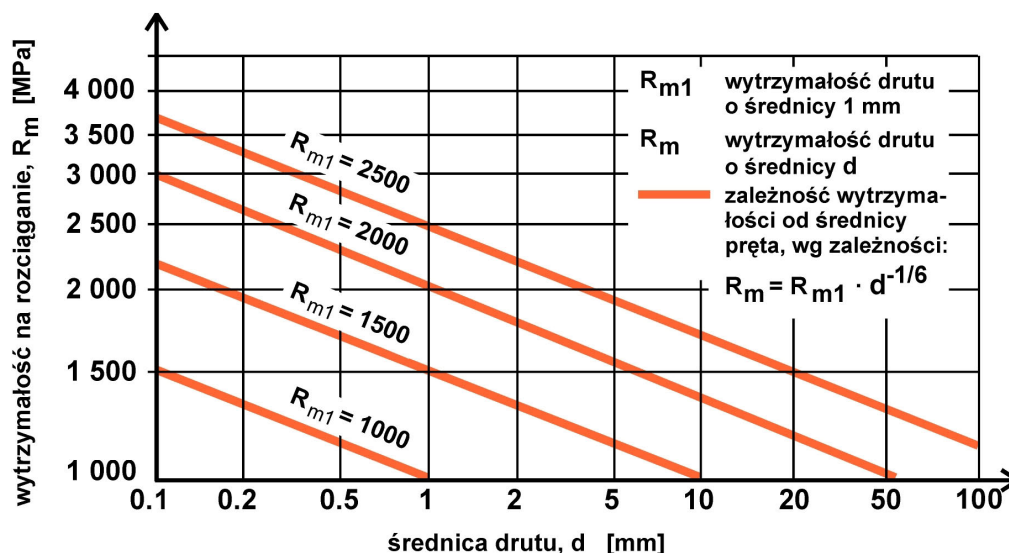
- materiałowe – skład chemiczny stali, średnica drutu
- związane ze szczegółowym przebiegiem procesu technologicznego – sposób wstępnej i końcowej obróbki cieplnej, materiał i budowa ciągnadeł do przeciągania, prędkość i krotność przeciągania oraz stopień redukcji przekroju na każdym otworze, sposób smarowania i chłodzenia podczas przeciągania, sposób czyszczenia i użyte chemikalia; szczegóły tych operacji stanowią tajemnicę firm i są najczęściej chronione patentami.

W zależności od sposobu produkcji, właściwości mechaniczne drutów stalowych mieszczą się w bardzo szerokim przedziale. W odniesieniu do drutów wykorzystywanych w budownictwie (zwłaszcza w konstrukcjach sprężonych), przyjęto miarę porównawczą właściwości mechanicznych sprowadzoną do średnicy końcowej drutu. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o różnej średnicy końcowej, wykonanych z jednakowego materiału, w identycznym procesie technologicznym, jest odnoszona od wytrzymałości drutu o średnicy 1 mm. Wyraża to zależność (2.1) [132]:

$$R_m = R_{m1} \cdot d^{-1/6} \quad (2.1)$$

gdzie: R_m – wytrzymałość na rozciąganie drutu o średnicy d , [MPa]
 R_{m1} – wytrzymałość na rozciąganie drutu o średnicy 1 mm, [MPa]
 d – średnica końcowa drutu, [mm]

Wartość R_{m1} jest też nazywana stopniem trudności produkcji. Wykres zależności (2.1) jest w skali logarytmicznej linią prostą. Rysunek 2.23 przedstawia zależność $R_m = R_m(R_{m1}, d)$ dla kilku wartości R_{m1} z zakresu stosowanego typowo w budownictwie.



Rys. 2.23 – zależność wytrzymałości drutu od jego średnicy; opracowano na podstawie [132]

Przy większych średnicach przeciąganie na zimno jest utrudnione, dlatego grubsze druty uzyskuje się najczęściej jedynie w niższych klasach wytrzymałości, poprzez walcowanie na zimno [201].

Ciągnięcie na zimno zmniejsza ponadto odkształcalność plastyczną, rozszerzając zakres sprężystej pracy drutu niemal do wytrzymałości na zerwanie [132][162][191].

Zwiększanie zawartości węgla w stali prowadzi do wzrostu jej wytrzymałości na rozciąganie. Ten sposób zwiększania wytrzymałości drutu ma jednak ograniczenia wynikające z trwałości korozyjnej stali. Obiektywnym pomiarem tej trwałości jest badanie w znormalizowanym medium korozyjnym (wywołującym przyspieszoną korozję) – 20% roztworze wodnym tiocjanku amonowego NH_4SCN , w temperaturze 50°C . Określa ono ilość godzin L , po której drut zanurzony w roztworze i naprężony do wartości $0.8 R_m$, ulega zerwaniu. Czas ten jest wyrażony zależnością empiryczną (2.2) [133]:

$$L = C_1 \cdot R_m^{-12}$$

Badanie trwałości korozyjnej w tiocjanku amonowym zostało wprowadzone – po dwudziestoletniej dyskusji – na początku lat 90. XX w., przez Komisję Stali i Systemów Sprężania FIP (Fédération Internationale de Précontrainte) [132].

(2.2)

gdzie: L – czas przyspieszonej korozji, [godz.]
 R_m – wytrzymałość drutu na rozciąganie drutu, [MPa]
 C_1 – stała materiałowa; dla drutu zimnociągniętego $C_1 = 10^{40}$

Z zależności (2.2) wynika, że drut ze stali o wytrzymałości $R_m = 1\,900$ MPa ulega korozji ponad trzydziestokrotnie szybciej niż drut ze stali o wytrzymałości $R_m = 1\,425$ MPa, jeżeli oba są naprężone do 80% swojej wytrzymałości na rozciąganie. Jeżeli te same druty zostaną naprężone do takiej samej wartości naprężeń $\sigma = 1\,140$ MPa, tj. odpowiednio do 60% i 80% wytrzymałości, to przewaga odporności korozyjnej drutu o niższej wytrzymałości jest dziesięciokrotna. Wynika z tego, że korzystniej jest osiągnąć tę samą wartość naprężeń przy większym wykorzystaniu stali o niższej wytrzymałości niż przy mniejszym wykorzystaniu stali o wyższej wytrzymałości [133].

Tak duża różnica w trwałości korozyjnej stali spowodowała, że obecnie nie dąży się już do stosowania drutów ze stali o wytrzymałości większej niż ok. $2\,000 \div 2\,200$ MPa. Ograniczenie to znalazło wyraz w wartościach wytrzymałości przyjmowanych przez normy przedmiotowe dotyczące lin i spletek.

Według normy [N-07] należy przyjmować następujące klasy wytrzymałości drutu do wyrobu lin ogólnego przeznaczenia oraz lin o dużej średnicy¹⁾:

- 1570 N/mm² – dla drutów wszystkich jakości ocynkowania²⁾
- 1770 N/mm² – dla drutów gołych i ocynkowanych jakości B²⁾
- 1960 N/mm² – dla drutów gołych i ocynkowanych jakości B²⁾

Klasa wytrzymałości drutu oznacza dolną granicę przedziału, w którym zawiera się wytrzymałość stali.

Średnica nominalna drutu wg w/w normy zawiera się w przedziale $0.2 \div 6$ mm. Podane wartości nominalne są dolnymi granicami wytrzymałości. Granice górne są równe dolnym powiększonym o tolerancje, zależne od średnicy drutu. Tablica 2.13 podaje tolerancje wytrzymałości dla różnych średnic nominalnych drutu. Przyjmuje się, że w przypadku stosowania w warunkach sprzyjających korozji, średnica drutu nie powinna być mniejsza niż 2.5 mm [78].

Tablica 2.13 – Tolerancje wytrzymałości drutu

Średnica nominalna drutu d mm	Tolerancje wytrzymałości N/mm ²
$0.2 \leq d < 0.5$	390
$0.5 \leq d < 1$	350
$1 \leq d < 1.5$	320
$1.5 \leq d < 2$	290
$2 \leq d$	260

Tablica. 2.13
Tolerancje wytrzymałości drutu w zależności od średnicy, wg [N-07]

¹⁾ dla wszystkich wartości podawanych na podstawie norm zachowano oryginalne jednostki; $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$
²⁾ określenie „jakość cynkowania” jest wyjaśnione w dalszej części pracy

Według normy [N-13], do wykonywania lin stalowych ogólnego przeznaczenia należy używać drutów w klasach wytrzymałości:

- 1770 N/mm² – drutów gołych i ocynkowanych jakości B dla wszystkich grup lin, oprócz grupy 8
- 1570 N/mm² – drutów gołych i ocynkowanych jakości A, dla lin grupy 8

Norma [N-14], dotycząca lin stalowych o dużych średnicach, nie podaje wprost zaleceń odnośnie wymaganej klasy wytrzymałości drutu, jednak z zawartej w niej tablicy podającej wartości minimalnej siły zrywającej wynika, że przyjęto klasę wytrzymałości 1770 N/mm².

W przypadku drutów kształtowych rodzaju Z, S i T norma [N-08] podaje następujące klasy wytrzymałości:

- dla drutów nie pokrytych:
980, 1080, 1180, 1280, 1370, 1470, 1570 N/mm²
- dla drutów ocynkowanych:
980, 1080, 1180, 1280, 1370, 1470 N/mm²

W przypadku drutu do wyrobu lin o dużej wytrzymałości norma [N-09] podaje, że producent powinien określić jego klasę wytrzymałości. Przykładowe wartości podane przez tę normę to:

- 2060 N/mm² dla średnicy liny $9 < d \leq 24$ mm
- 1960 N/mm² dla średnicy liny $24 < d \leq 42$ mm
- 1900 N/mm² dla średnicy liny $42 < d \leq 61$ mm

Do wyrobu lin dźwigowych używa się też drutu w klasie wytrzymałości 2160 N/mm² [201][19][18].

Druty do sprężania konstrukcji z betonu oraz do produkcji splotów do konstrukcji sprężonych wg normy [N-10] powinny mieć średnicę $2.5 \div 8.0$ mm, w klasach wytrzymałości od 1373 MPa do 2157 MPa (zależnie od średnicy).

Norma [N-12] zaleca stosowanie na liny do konstrukcji sprężonych drutów o średnicy $2.5 \div 5.5$ mm, o nominalnej wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 145, 155, 185$ i 205 kG/mm². Według projektu normy międzynarodowej [N-11], do sprężania należy stosować druty o średnicach $4 \div 10$ mm, wykonywanych w klasach wytrzymałości od 1570 N/mm² do 1860 N/mm². Stosunkowo małe wytrzymałości i duże średnice wynikają z wymaganej odporności na korozję w betonie. Według [N-11] do sprężania można również stosować znormalizowane pręty sprężające o średnicach $15 \div 30$ mm i wytrzymałości $R_m = 1100$ N/mm² ÷ 1240 N/mm² [132].

Druty ze stali nierdzewnych | Ze stali nierdzewnych chromoniklowych wykonuje się druty okrągłe o największej średnicy 3.2 mm i w maksymalnej klasie wytrzymałości 1570 N/mm². Stale te są bardzo wrażliwe na różnice wartości naprężeń pomiędzy powierzchnią i rdzeniem przekroju, wprowadzanych podczas przeciągania drutu. Wykonywanie drutów kształtowych ze stali nierdzewnych jest ekonomicznie nieuzasadnione [201].

Ochrona przed korozją | Korozja jest to proces, w którym następuje niszczenie metalu pod wpływem czynników środowiska, w którym się znajduje. Rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje procesów korozyjnych:

- korozję chemiczną
 - korozję elektrochemiczną.
- Stal ulega korozji elektrochemicznej. Może ona mieć dwojaki charakter [84]:
- galwaniczny (przepływ prądu jest wynikiem działania cieczy na dwa różne metale)
 - stężeniowy (przepływ prądu jest wynikiem różnicy stężeń w roztworze cieczy działającej na jeden metal)

Odpowiednikiem podstawowej klasy wytrzymałości 1770 MPa jest w USA i Kanadzie:

- grade 115/125^{*)}
 - Improved Plow Steel grade (oznacz. dawn.)
 - Level 3
- Ponadto są tam stosowane do wyrobu lin druty w klasach wytrzymałości (w kolejności od najwyższej):
- grade 130/140
 - grade 120/130
 - grade 110/120

Dawniej w krajach tych stosowano następujące oznaczenia klas wytrzymałości (w kolejności wzrastającej wartości):

- Mild Plow Steel
- Plow Steel
- Improved Plow Steel
- Extra Improved Plow Steel

Układowi temu odpowiadają nowe określenia, kolejno: Level 1, Level 2, Level 3, Level 4, przyjęte w „U.S. Federal Specification, Wire Rope and Strand RR-W-410” [85].

^{*)} klasy wytrzymałości drutu w USA, Kanadzie i (dawniej) w Wielkiej Brytanii są podawane w tonach siły na cal kwadratowy [tonf/in²].
(1 tonf/in² = 15.70 MPa)

Ze zjawiskiem korozji ludzie zetknęli się od momentu, kiedy zaczęli wykorzystywać metale. Pliniusz¹⁾ pisze, że „...rdza, to tzw. przez Greków «antypatia» żelaza²⁾, oraz że „...przed rdzą potrafi uchronić je biel ołowiana, gips oraz płynna smoła³⁾”. Pojęcie korozji we współczesnym rozumieniu pojawiło się w literaturze angielskiej w XVII w. Określenie „corroded” zostało użyte do opisu stanu uszkodzeń (wgłębienia przypominające kształtem komórki plastra miodu) żelaznych armat w twierdzy na Jamajce, w 1667 r. W roku 1669, J. Clanvill⁴⁾ użył rzeczownika „corosion” opisując silnie agresywne działanie gorącej wody w kąpielisku na srebrne monety [138]. Mało znany jest fakt, że już w roku 1761, Admiralicja brytyjska podała opis bardzo trafnych obserwacji dotyczących powstawania korozji i wzajemnego oddziaływania różnych metali w środowisku morskiej wody. Opis ten jest zawarty w raporcie z długiego rejsu próbnego fregaty HMS Alarm, której dolna część kadłuba była pokryta blachą miedzianą. Był to pierwszy z serii poważnych eksperymentów przeprowadzonych przez Admiralicję z różnymi rodzajami pokrycia. Raport wskazuje m.in. na nieoczekiwane i bardzo gwałtowne zużycie wszystkich części żelaznych mających kontakt z miedzią: „...the greatest [difficulty] is, the bad effect that Copper has upon Iron” [84]. Odkrycie i opisanie przez Galvaniego zjawiska „elektryczności zwierzęcej” w 1791 r., a następnie wyjaśnienie jego prawdziwych przyczyn przez Voltę dziewięć lat później, stworzyło podstawy do odkrycia przyczyn i wyjaśnienia elektrochemicznego mechanizmu korozji.

Ulick R. Evans⁴⁾ zauważył, że narzekania iż współczesne żelazo nie jest tak odporne na korozję jak „dobry, stary materiał” nie są nowe [84]. Już Pliniusz⁵⁾, ponad 1900 lat temu opisał, jak w jego czasach wymieniono niektóre elementy żelazne w moście pontonowym przez Eufrat (przeprawa Zeugma, pomiędzy miastami Seleukeia i Apameia⁶⁾), zbudowanym przez Aleksandra Wielkiego czterysta lat wcześniej (podczas przeprawy w 331 r. p.Ch.). Stwierdzono wówczas, że elementy z nowego materiału rdzewiały, podczas gdy oryginalne, macedońskie żelazo pozostawało w dobrym stanie: „...nad rzeką Eufratem, w mieście zwanym Zeugma, ma istnieć łańcuch żelazny, którym Aleksander Wielki związał tam kiedyś most - otóż jego ogniwa, wstawione później trawione są przez rdzę, podczas gdy dawniejsze są od niej wolne⁷⁾”.

Sławna kolumna z Delhi, wykonana w 310 r. z niezwykle czystego żelaza, budzi niezmienny podziw dla znakomitego stanu swojej powierzchni, który zupełnie nie ulega pogorszeniu. Kontrastuje to szczególnie z dużo gorszym stanem żelaznych belek zastosowanych w innych indyjskich świątyniach w Puri i Konark, które liczą sobie „zaledwie” 700 lat^{7b)}.

Kolumna z Delhi została wzniesiona prawdopodobnie w roku 310, przez króla Chandra Gupta II. Znajdująca się na niej inskrypcja w sanskrycie podaje, że kolumna „...została wzniesiona na wzgórzu Vishnupada (niezidentyfikowane, prawdopodobnie Mathura), ku czci Wisznu, dla upamiętnienia potężnego króla Chandry”. W roku 1052 król Anandgupa II przeniósł ją do Mehrauli, będącego dziś przedmieściem Delhi (ok. 15 km od centrum). Znajduje się tam do dzisiaj, stojąc na obszerym dziedzińcu meczetu Quwwat-ul-Islam Masjid, obok słynnego minaretu Qutab Minar (najwyższa kamienna wieża w Indiach – 72.5 m). To arcydzieło dawnej metalurgii ma całkowitą długość ok. 7.3 m, z czego ok. 6.5 m – ponad terenem. Jej średnica wynosi ok. 42 cm przy podstawie i 32 przy początku głowicy (niektóre źródła podają odpowiednio 48 i 29 cm). Część podziemna ma kształt bulwy o średnicy 72.5 cm, z czterema krótkimi odgałęzieniami, które są przymocowane za pomocą ołowianych węzłów do kamiennej podstawy. Niezwykłość tej kolumny dotyczy zarówno sposobu wykonania jak i odporności na korozję. Jest wykonana z żelaza o bardzo dużej czystości. Zawartość siarki wynosi tylko ok. 0.006%, dzięki redukcji rudy za pomocą węgla drzewnego. Charakterystyczna jest wysoka zawartość fosforu – do 0.48%. Nie występują żadne inne metale. Niemal 80% składu warstwy pasywnej stanowią tlenki żelaza w formie roztworu fazowego mieszaniny FeO i Fe_2O_3 . Około 10 % stanowi uwodniony tlenek żelaza zbliżony do limonitu ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Odporność korozyjna kolumny wynika przede wszystkim z wytworzenia ciągłej warstwy ochronnej amorficznego δ - $\text{FeO}(\text{OH})$ oddzielonego od metalu warstwą $\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, która nie powstaje przy korozji innych rodzajów stali. Istotne jest również suche i nie zanieczyszczone środowisko atmosferyczne, w którym przebywa oraz duża zdolność akumulacji ciepła ważącej ok. 6.5 tony kolumny. Kolumna została wykonana przez kucie kilku set brył żelaza o masie 10÷15 kg każda. Nazwisko jej twórcy jest przedmiotem sporów; najczęściej wymieniani są: Radza Dhang, Radza Dhara i Bilan Deoor (lub Anong Pal) – założyciel dynastii Tomar. Kolumna budziła zawsze duże emocje ludzi, którzy ją podziwiali lub nienawidzili: Nadhir Szach kazał do niej strzelać z armaty – kolumna przetrwała ale ślady są widoczne do dzisiaj. Zostały odkryte również inne podobne, choć nie tak słynne kolumny. Jedna z nich znajduje się w Dhar (Madhya Pradesh, ok. 50 km na zachód od Indore). Kolumna ta leży na ziemi w trzech częściach. Jej wysokość była około dwukrotnie większa niż wysokość kolumny z Delhi. Druga znajduje się Kollur, na wzgórzach Kodachari w Kamatace, obok świątyni bogini Mookambika. Jej wysokość wynosi 9.76 m. Jest ona szczególnie godna uwagi, gdyż – w odróżnieniu od poprzednich – znajduje się w bardzo wilgotnym (opad roczny 500 ÷ 750 cm!) klimacie, na wysokości 1450 m n.p.m., a pomimo tego korozja nie wyrządziła jej większych szkód. Znalezione również trzecią żelazną kolumnę na Mount Abu ale znacznie niższą od wymienionych wcześniej – ok. 3.6 m. Kolumna z Delhi była analizowana jako przykład porównawczy przy rozpatrywaniu długotrwałej odporności korozyjnej pojemników na odpady radioaktywne w przyszłym amerykańskim składowisku Yucca Mountain¹⁰⁾.



Kolumna z Delhi⁸⁾

¹⁾ Caius Plinius Secundus, *Historia Naturalis*, XXXIV, 149-150

²⁾ cytat za: Pliniusz, *Historia Naturalna*, przekład i komentarz Ireny i Tadeusza Zawadzkich, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1961.

³⁾ J. Clanvill, *Philosophical Transactions I* (1665/72), (skrót - 1809) s. 364

⁴⁾ U.R. Evans, *J.Soc. of Chem. Ind.*, vol. 43, 1924

⁵⁾ Caius Plinius Secundus, op. cit., XXXIV, 150

⁶⁾ ibidem, V, 86, 119

⁷⁾ Thako Hari Goswami, K.K. Prasad and H.S. Ray, „Delhi Iron Pillar... a Unique Scientific Phenomenon from Ancient India”, *Science Report*, August 1997

⁸⁾ R. Balasubramaniam, *On the Corrosion Resistance of the Delhi Iron Pillar*, *Corrosion Science*, 42 (2000) s.2103-2129

⁹⁾ W świątyni Jagannath w Puri oraz w świątyni w Konarku zastosowano żelazne belki o przekroju kwadratowym jako elementy konstrukcyjne. Ich rozpiętość wynosi od 7 do 11 m. Wymiar przekroju wynosi od 17 do 28 cm. Obydwie miejscowości znajdują się w strefie ostrego, morskiego klimatu. Stan belek jest dobry, chociaż wyraźnie gorszy niż stan – znacznie starszych – żelaznych kolumn (za Centre for Indian Knowledge Systems).

¹⁰⁾ ACNW Audit Review of Chemistry Issues for the Yucca Mountain Site Recommendation – Considerations Report, US Nuclear Regulatory Commission, Work Order No.: NRC-078, Rockville, Maryland, February 21, 2001

Korozji sprzyjają następujące czynniki [84]:

- zanieczyszczenia metalu
- kontakt z innymi metalami (o niższej pozycji w szeregu elektrochemicznym)
- obecność wilgoci
- obecność dwutlenku węgla
- obecność tlenu
- obecność innych gazów, które po rozpuszczeniu w wilgoci atmosferycznej tworzą kwasy

Ze względu na rodzaj działania wyróżniamy następujące rodzaje korozji [84]:

- równomierna lub bezpośrednia (zachodzi na całej powierzchni elementu)
- wżerowa (zachodzi, gdy metal jest atakowany jedynie w niektórych miejscach na powierzchni, gdzie powstają zagłębienia – wżery)
- zmęczeniowa (zachodzi, gdy czynnik korozyjny atakuje miejsca pęknięć zmęczeniowych; często zginanie powoduje pękanie powstającej warstwy ochronnej)
- międzykrystaliczna (zachodzi, gdy czynnik korozyjny atakuje granice ziaren krystalicznych, nie naruszając ich wnętrza)
- naprężeniowa (zachodzi, gdy w miejscach o różnych wartościach naprężeń wewnętrznych wytwarzają się różne potencjały elektryczne, co prowadzi do wytworzenia ogniw elektrycznych)
- szczelinowa (zachodzi najczęściej w ciasnych szczelinach lub na ich krawędzi, gdzie dochodzi do zróżnicowania stężenia tlenu lub jonów metalu)
- kontaktowa (zachodzi, gdy stal styka się bezpośrednio z innymi metalami, przez co powstają lokalne ogniwa)

Korozji stali można zapobiegać przez:

- stosowanie gatunków stali odpornych na korozję
- stosowanie powłok ochronnych
- eliminację czynników korozyjnych

W przypadku drutów do wyrobu lin stalowych, które mogą być narażone na bezpośrednie oddziaływanie środowiska atmosferycznego, wyeliminowanie czynników korozyjnych jest niemożliwe. Stosowanie gatunków stali odpornych na korozję jest w budownictwie w większości przypadków nieuzasadnione ekonomicznie. Z tych powodów, najszerzej stosowanym sposobem zapobiegania korozji drutów stalowych jest stosowanie powłok ochronnych.

Wyróżniamy następujące rodzaje powłok ochronnych [84]:

- 1). Powłoki metaliczne
 - a). cynkowe
 - nanoszone na gorąco (cynkowanie ogniowe)
 - nanoszone elektrochemicznie
 - nanoszone dyfuzyjnie (w procesie szerardyzacji)
 - nanoszone natryskowo
 - b). cynkowo-aluminiowe
 - c). chromianowe
 - d). kadmowe
 - e). ołowiowe
 - f). miedziowe
 - g). aluminiowe
- 2). Powłoki niemetaliczne
 - a). malarskie
 - b). bitumiczne
 - c). z tworzyw sztucznych

Cynkowanie dyfuzyjne (tzw. szerardyzacja) polega na kilkugodzinnym wygrzewaniu przedmiotów stalowych w temp. 340–400°C w sproszkowanym cynku zawierającym 5–8% tlenu cynku.

Najczęstszy sposób ochrony przed korozją drutów do wyrobu lin na konstrukcje membranowe to pokrycie ich powłoką cynkową na gorąco oraz – ostatnio – pokrycie powłoką cynkowo-aluminiową na gorąco (powłoka Galfan). Przy wykonywaniu lin stosuje się również przesycanie ich smarami oraz dodatkowe zewnętrzne powłoki ochronne z tworzyw sztucznych.

Francuski chemik z Rouen, Malouin [5.50] lub Melouin [84], wynalazł cynkowanie ogniowe w roku 1742 [5.50] (wg innych źródeł – w roku 1741 [5.47]). Eksperymentował on z zanurzaniem żelaznych przedmiotów w roztopionym cynku. Była to modyfikacja znanego wcześniej sposobu pokrywania żelaza i miedzi cyną, poprzez proste zastąpienie tego metalu cynkiem. Angielski biskup R. Watson, profesor uniwersytetu w Cambridge, w opublikowanej w roku 1787 w Londynie serii artykułów pod tytułem „Chemical Essays” opisuje, że „...opracowano metodę nakładania cynku na kute z żelaza rondle, które wcześniej dokładnie oczyszczono, zwiłżono roztworem soli amoniaku i zanurzono w żelaznym kotle wypełnionym stopionym cynkiem” [84]. Metoda ta nie mogła być wówczas zastosowana w skali przemysłowej, ponieważ nie znano odpowiedniej, wydajnej i ekonomicznej, metody przygotowania powierzchni stali.

Dopiero w roku 1836, działający w Paryżu inżynier Stanisław Sorel, opracował metodę oczyszczania powierzchni żelaza oraz stali przez trawienie, uzyskując 10 maja 1837 roku patent francuski, a wkrótce potem – amerykański [138][84]. W zgłoszeniu patentowym Sorel opisuje pięć różnych metod zastosowania cynku w różnych postaciach do pokrywania przedmiotów żelaznych i stalowych. Jedną z nich zawiera wszystkie istotne elementy występujące do dziś w procesach cynkowania ogniowego. Zaledwie rok później, Anglik William Henry Craufurd, często wymieniany jako wynalazca cynkowania ogniowego uzyskał patent brytyjski identyczny z francuskim patentem Sorela, do którego zresztą specyfikacja tego patentu zawiera odwołanie [84].

Opracowanie metody cynkowania ogniowego zbiegło się w czasie z powstaniem w latach trzydziestych XIX w. pierwszych linii kolejowych. Ich ciągła rozbudowa spowodowała ogromny wzrost zastosowania stali na elementy konstrukcyjne, urządzenia sygnałowe i warsztatowe, konstrukcje dworców itp. Do zabezpieczania stosowano znane już wówczas biel ołowiową i minię ołowiową, które jednak były drogie i trujące. Materiały malarskie nie spełniały jednak wymagań kolejnictwa, co stworzyło szansę rozwoju dla cynkowania. Po roku 1840 powstało wiele cynkowni we Francji, Anglii i w Niemczech [138].

W roku 1854 Boucher i Muller uzyskali patent francuski na cynkowanie drutu żelaznego i stalowego, w którym opisany jest proces niemal identyczny do stosowanego obecnie. Kilka lat później, w 1859 r., Francuz Emile Alesandre Cuche, uzyskał patent brytyjski, w którym opisał metodę obróbki powierzchni po wyjęciu z kąpieli cynkowej za pomocą strumienia zimnego lub ciepłego powietrza lub gazu w celu uzyskania gładkiej powierzchni powłoki.

Jednolity, ciągły proces technologiczny, obejmujący wyżarzanie, oczyszczanie i cynkowanie został opracowany i opatentowany w 1860 r. przez Anglika George’a Bedsona z Manchesteru. Jest to data, od której można liczyć właściwe zastosowanie cynkowania do drutów. Wcześniej zanurzano druty w kotle z cynkiem, a następnie czyszczone i w stanie mokrym nawijane na szpule. Powodowało to powstawanie licznych wad powierzchni, a uzyskana powłoka była krucha.

Dalsze udoskonalenia procesu cynkowania dotyczyło przede wszystkim obróbki po wyjściu z kąpieli cynkowej. Początkowo starano się zwłaszcza zapewnić regulację i stałość grubości warstwy cynku. Pierwsze rozwiązanie, to stalowe płytki chłodzone wodą, które usuwały nadmiar cynku. W roku 1890 Matteson opatentował w USA dźwigniowe urządzenie do zbierania nadmiaru cynku za pomocą poduszek azbestowych. W patentcie Bedsona z 1860 r. zastosowano złożę piasku lekko nasyconego olejem, przez które przechodził drut po wyjściu z kąpieli cynkowej. Piasek usuwał nadmiar cynku jednak czasami powodował pogorszenie jakości powierzchni, jednak takie rozwiązanie pozwalało istotnie zwiększyć prędkość przesuwu drutu. Piasek zastąpiono węglem drzewnym około roku 1900 w USA, choć w Europie stosowano piasek jeszcze do roku 1928. Węgiel drzewny był stosowany z dodatkiem lanoliny, oleju maszynowego i topnika (chlorek cynkowo-amonowy lub chlorek cynku) w złożach o grubości ok. 12 cm. Takie rozwiązanie pozwalało na dalsze zwiększenie prędkości przesuwu drutu przy zachowaniu gładkiej powierzchni, szczególnie przy grubszych powłokach. Było to szczególnie istotne przy cynkowaniu drutów kolczastych. Po ich wynalezieniu przez Josepha Gliddena z Delkaba w stanie Illinois (USA) w roku 1874, produkcja drutu znacząco wzrosła. Początkowo nadmiar cynku z drutów kolczastych usuwano za pomocą warstwy piasku o grubości od 7 do 15 cm, pływającej na powierzchni roztopionego cynku, jednak nie dawało to dobrych rezultatów. Dopiero zastosowanie węgla drzewnego umożliwiło uzyskiwanie dobrej jakości powłoki. W roku 1970 Australijczyk John Sciffer przedstawił tzw. AWI Gas Wiping Process, w którym złożę węgla drzewnego zostało zastąpione złożem żwiru rzeczno, w którym płonie gaz ziemny zawierający 1% siarczku wodoru. Powoduje to zamknięcie i wygładzenie powłoki cynkowej. Podobny proces, w którym wykorzystywana jest nieco inna mieszanina gazów, opatentowała belgijska firma Bekaert Wire. [84]

Inne udoskonalenia procesu technologicznego to m.in. proces bardzo krótkiego wyżarzania w temperaturze 677 °C (tzw. galvannealing), opracowany przez Amerykanina Josepha L. Hermana w 1922 r. Powłoka uzyskiwana w tym procesie jest gładka i ma grubość pośrednią pomiędzy grubością uzyskiwaną przy dokładnym zbieraniu nadmiaru cynku poduszkami azbestowymi, a powierzchnią uzyskiwaną przy przejściu drutu przez złożę węgla drzewnego. Podobny proces opatentował w 1934 r. inny Amerykanin – Julian Schueler. Zastosował on regulatory grubości powłoki w postaci metalowych prętów w kształcie litery „V”. W tzw. procesie Crapo, opracowanym przez F. Crap z Indiana Steel & Wire Company, stosuje się wstępne działanie soli (cyjanów) lub gazów (amoniaku) przed zanurzeniem w kąpieli cynkowej. Pozwala to na uzyskanie stałej grubości powłoki na przedmiotach wykonanych ze stali o różnym składzie chemicznym i stopniu uspokojenia oraz poprawia przyczepność powłoki. Wspomniany wcześniej J.L. Herman opracował w 1936 r. (patent amerykański 2 049 834) proces cynkowania, tzw. proces Hermana, w którym drut przechodzi przez dyszę, w której jest obmywany świeżym cynkiem i chłodzony wodą. Proces ten zapewnia dobrą jakość powłoki przy dużej szybkości przesuwu drutu [84].

Cynk był znany już w starożytności w Chinach, Indiach i Persji. Tlenkowo-węglanowa ruda cynku (galman) była przez Rzymian i Greków topiona wraz z miedzią dla otrzymania mosiądzu. Słowo „cynk” zostało użyte po raz pierwszy przez mnicha Valentinusa z Erfurtu w 1420 r. Sądził on, że jest to produkt półmetaliczny. Ten sam Valentinus, w 1448 r. odkrył kwas solny. W XVI i XVII w. cynk pojawił się w Europie jako produkt handlowy. Metoda produkcji metalicznego cynku przez wygrzewanie tlenku cynku bez dostępu powietrza została opracowana przez niemieckiego alchemika Margraffa w 1746 r. ale zyskała znaczenie przemysłowe dopiero w roku 1820. [138]

Cynkowanie na gorąco polega na zanurzaniu przedmiotów w kąpeli roztopionego metalu o temperaturze 450°C. Powoduje to wytworzenie na powierzchni metalu warstwy powłoki ochronnej, która jest związana strukturalnie z podłożem. Pełny proces technologiczny cynkowania na gorąco obejmuje: kąpiel odtłuszczającą, płukanie, kąpiel do trawienia, ponowne płukanie, kąpiel w roztworze topnika, suszenie w piecu, kąpiel cynkową, chłodzenie w kąpeli wodnej, suszenie. Druty stalowe są cynkowane metodą ciągłą, która jest rozwinięciem metody cynkowania ogniowego taśm stalowych, opracowanej w 1936 r. przez Tadeusza Sendzimira [138]. Aby uzyskać efekt wyrównania powłoki cynkowej i kontrolować jej grubość, w strefie wyjścia drutu z kąpeli cynkowej umieszczone jest urządzenie zgarniające. Jest duża różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych tych urządzeń: od złoża zawierającego wilgotny, lekko nasycony olejem piasek, poprzez złożę węgla drzewnego lub podobnego środka, aż po – stosowane zwłaszcza przy cynkowaniu cienkich drutów lub przy dużych prędkościach przesuwu drutu – gazowe urządzenia zgarniające [138]. Często, w nowoczesnych liniach produkcyjnych, cynkowanie jest zintegrowane z procesem produkcji drutu i stanowi po prostu końcowy etap tego procesu przed przesłaniem drutu do dalszego przetwarzania [84].

Powłoki cynkowe nakładane na gorąco na drutach stalowych są objęte normami [N-07] i [N-38]. Według [N-07] przyjęte są dwie podstawowe kategorie jakości powłok cynkowych na drucie:

- jakość A, dopuszczalna tylko w klasie wytrzymałości 1570 N/mm² i dla średnicy nominalnej drutu $0.4 \leq d \leq 3.7$ mm
- jakość B, dla wszystkich klas wytrzymałości (1570, 1770 i 1960 N/mm²) i wszystkich średnic ($0.2 \div 6$ mm) przewidzianych tą normą.

Dopuszcza się również powłokę pośredniej jakości AB, wyłącznie dla drutów o średnicy $0.4 \leq d < 1.9$ mm i klasy wytrzymałości 1570 i 1770 N/mm². Jakość cynkowania jest określona poprzez minimalną masę cynku w gramach na metr kwadratowy. W tabelicy 2.14 podano minimalne masy powłok cynkowych dla jakości A, B i AB w zależności od średnicy drutu.

Ograniczenie grubości powłok cynkowych dla wyższych klas wytrzymałościowych wynika z faktu, że zanurzenie w kąpeli cynkowej o temperaturze 450°C powoduje obniżenie wytrzymałości stali o $3 \div 16\%$.

Należy zaznaczyć, że późniejsza od [N-07] norma [N-38], dotycząca ogólnie drutów stalowych, a nie tylko drutów do wyrobu lin, podaje nieco inne wymagania. Wprowadza ona dodatkowe jakości C i D dla powłok cienkich¹⁾ oraz jakość A×3 będącą wielokrotnością jakości A, dla pokryć bardzo grubych. Dopuszcza też stosowanie innych wielokrotności masy powłoki. Dla podstawowych jakości pokrycia cynkiem: A, B i AB, podaje inne (na ogół większe) wartości masy pokrycia niż [N-07].

Tablica 2.14 – Minimalne masy powłok cynkowych

Średnica nominalna drutu d mm	Minimalna masa cynku g / m ²		
	jakość B	jakość A	jakość AB ¹⁾
$0.2 \leq d < 0.25$	15	–	–
$0.25 \leq d < 0.4$	20	–	–
$0.4 \leq d < 0.5$	30	75	60
$0.5 \leq d < 0.6$	40	90	70
$0.6 \leq d < 0.7$	50	110	85
$0.7 \leq d < 0.8$	60	120	
$0.8 \leq d < 1$	70	130	95
$1 \leq d < 1.2$	80	150	110
$1.2 \leq d < 1.5$	90	165	120
$1.5 \leq d < 1.9$	100	180	130
$1.9 \leq d < 2.5$	110	205	–
$2.5 \leq d < 3.2$	125	230	–
$3.2 \leq d < 3.7$	135	250	–
$3.7 \leq d < 4$	135	–	–
$4 \leq d < 4.5$	150	–	–
$4.5 \leq d < 5.5$	165	–	–
$5.5 \leq d < 6$	180	–	–

¹⁾ powłoka jakości AB jest stosowana rzadko i może dotyczyć wyłącznie drutów o średnicy $0.4 \div 1.9$ mm, w klasie wytrzymałości 1570 i 1770 N/mm²

Tablica. 2.14
Minimalne masy powłok cynkowych na drucie dla jakości A, B i AB – w zależności od średnicy, wg [N-07].

¹⁾ Cienkie powłoki cynkowe są zazwyczaj uzyskiwane poprzez usuwanie nadmiaru płynnego cynku po wyjęciu elementu z kąpeli w gazowych urządzeniach zgarniających.

Jedna z najwcześniejszych wzmianek na temat eksperymentów z cynkowaniem elektrochemicznym pochodzi od Anglika Cruickshanka, który podaje, że odkrył iż związki licznych metali, w tym cynku, „...ulegają redukcji pod wpływem siły elektrycznej z baterii galwanicznej”. Znanych jest wiele późniejszych prac badawczych, jednak brak efektywnego źródła energii elektrycznej uniemożliwiał jakiegokolwiek zastosowania na większą skalę. Dopiero Gramme w roku 1871, opracował pierwszą przydatną praktycznie wytwornicę prądu.

Pierwsze patenty dotyczące uzyskiwania powłok metalicznych metodą elektrochemiczną uzyskali: Fox (1879), Smith (1881) i Ross (1896). W roku 1892 Sherard Cowper-Coles (wynalazca procesu szerardyzacji, tj. cynkowania dyfuzyjnego) przekonał brytyjską Admiralicję aby wymagała stosowania ocynkowanych elektrochemicznie rur w kotłach okrętowych. Służyło to przede wszystkim ochronie przed korozją ale również pozwalało wykryć ewentualne wady wykonania. W 1895 r. poczta brytyjska sprawdziła możliwość wykonywania elektrochemicznie powłok o masie nawet ok. 375 g/m². Ze względu na bardzo małą prędkość osadzania rozwiązanie to nie wyszło poza laboratorium.

Przemysłowy proces cynkowania elektrochemicznego drutu został opracowany przez niemiecką firmę G. Langbein & Company, późniejszą Langbein-Pfannhauser Werke, przed I wojną światową. Początkowo uzyskiwano powłoki o masie 30-45 g/m², później – do 90 g/m². Firma ta po wojnie rozwijała dalej technikę cynkowania elektrochemicznego i do roku 1930 miała już ok. pięćdziesięciu zakładów. Większość z nich była średniej wielkości. W niektórych z tych zakładów działały instalacje pozwalające na uzyskiwanie powłok o masie do 300 g/m².

Pierwszą amerykańską instalację do cynkowania elektrotechnicznego wykonał w 1935 r. w Trenton, w stanie New Jersey Guy Meaker, który eksperymentował z tą techniką już od 1904 r. (wyniki tych eksperymentów nie są w pełni znane) [84].

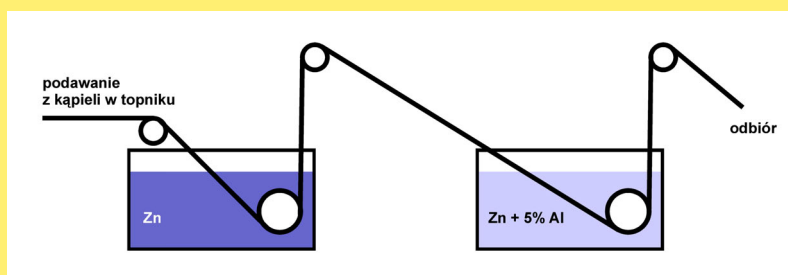
Innym sposobem nakładania powłoki cynkowej jest **cynkowanie elektrochemiczne**. Technologia ta ma kilka istotnych zalet w porównaniu z cynkowaniem ogniowym:

- umożliwia nakładanie powłoki na stalach o różnym składzie chemicznym
- pozwala uzyskiwać powłoki o dużej grubości
- uzyskiwane powłoki są bardzo jednorodne
- jest łatwiej niż przy cynkowaniu ogniowym zachować parametry technologiczne procesu

Wadami cynkowania elektrochemicznego są duże koszty budowy i eksploatacji instalacji. Niezbędne jest stosowanie bardzo dużego natężenia prądu w wannach. Prędkość przesuwu drutu podczas kąpieli jest ograniczona, a przez to również możliwości produkcyjne instalacji. Obecnie druty do wyrobu lin stalowych są cynkowane niemal wyłącznie na gorąco.

Stosunkowo nowym sposobem zabezpieczania antykorozyjnego stali, w tym również drutu jest nakładanie **powłoki cynkowo-aluminiowej o nazwie Galfan**. Jest to sposób szczególnie przydatny do zabezpieczania lin przeznaczonych na konstrukcje membranowe. W metodzie tej drut poddawany jest najpierw konwencjonalnemu cynkowaniu na gorąco, a następnie, bezpośrednio po tym, zanurzany jest w drugiej kąpieli (również na gorąco) w stopie cynku (95%) i aluminium (5%). Na rysunku 2.24 przedstawiono schematycznie przebieg tego procesu.

Pokryciem podobnym do powłoki Galfan jest powłoka Galvalens. Jest to znak handlowy firmy Fical (Usinor). Powłoka ta może być stosowana, jeżeli drut nie jest przeciągany po jej nałożeniu [84].

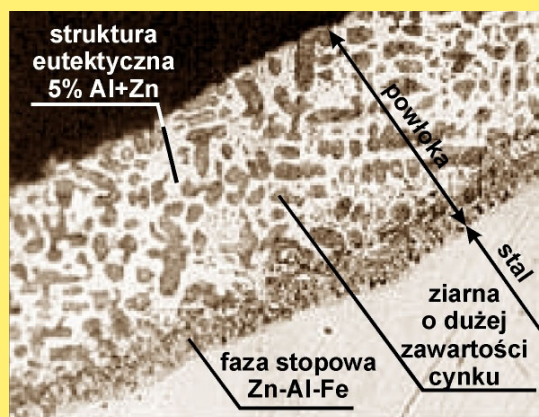


Rys. 2.24 – schematyczny przebieg procesu nakładania powłoki Galfan; opracowano na podstawie [97]

W wyniku przereagowania budowa powłoki ulega całkowitej zmianie. Cząsteczki aluminium dyfundujące przez powłokę cynkową powodują jej całkowitą zmianę w jednolitą, bardzo ciekłą, trójskładnikową fazę stopową Zn-Al-Fe. Na niej tworzy się faza o składzie odpowiadającym składowi kąpiel, zawierająca różnej wielkości wydzielienia roztworu stałego o dużej zawartości cynku i zawartości aluminium do 1.2 %. Warstwa ta ma mikrostrukturę eutektyczną¹⁾. Zawartość aluminium w fazie zwiększa się w kierunku powierzchni powłoki i wynosi powyżej 16.9 % [97][138]. Przekrój przez powłokę Galfan jest przedstawiony na rysunku 2.25.

Struktura eutektyczna jest składnikiem strukturalnym stopów – mieszaniną o stałym składzie chemicznym dwóch lub więcej faz, powstających bezpośrednio z fazy ciekłej. Eutektyk dwufazowy w układzie dwuskładnikowym, krzepnie i topi się w stałej temperaturze (temperatura eutektyczna).

¹⁾ Punkt eutektyczny na wykresie fazowym Zn-Al występuje dla 5% Al, w temp. 381°C.



Rys. 2.25 – przekrój przez powłokę typu Galfan; opracowano na podstawie [14]

Powłoka cynkowo-aluminiowa Galfan ma zalety niezwykle istotne z punktu widzenia zastosowania jej do pokrywania drutów do wyrobu lin:

- bardzo wysoka ochrona przed korozją: pokrycie Galfan pozwala zwiększyć ochronę drutu przed korozją o 3 ÷ 4 razy w stosunku do pojedynczego cynkowania ogniowego [201][97].
- powłoka bardzo dobrze znosi wszelkie dalsze operacje technologiczne, takie jak przeciąganie (nawet o bardzo dużym stopniu redukcji przekroju), zginanie, kucie itp.
- bardzo duża gładkość powierzchni
- dobra spawalność stali pokrytej tą powłoką
- dobra przyczepność powłok malarskich

W tabeli 2.15 zestawiono porównanie charakterystyk różnego rodzaju powłok metalicznych nakładanych na stal.

Tablica 2.15 – Porównanie wybranych cech powłok metalicznych

Cecha	Cynkowanie ogniowe	Cynkowanie elektrochemiczne	Galfan	Galvanneal	Galvalume	Powłoka aluminiowa	Powłoka chromianowa
5 – ocena najwyższa 1 – ocena najniższa							
łatwość kształtowania	3	5	5	3	3	2	5
odporność korozyjna (nieosłonięta)	3	3	4	2	5	5	2
ochrona „ubytkowa”	5	5	5	5	3	1	2
odporność korozyjna (po przetworzeniu)	3	3	5	3	3	2	2
przyczepność powłoki malarskiej	4	5	5	5	4	2	5
odporność korozyjna (pomalowana)	4	4	5	5	3	3	2
spawalność	4	5	3	5	2	1	2
odporność termiczna / odbicie	3	3	3	2	4	5	1
relatywny koszt	4	2	3	4	3	3	5

Tablica. 2.15
Porównanie wybranych cech najważniejszych powłok metalicznych nakładanych na stal, wg [39].

Określenie porównywanych cech powłok metalicznych:

łatwość kształtowania – odporność powłoki na operacje technologiczne związane z dalszym przetwarzaniem: przeciąganie, zginanie, walcowanie, kucie itp. bez pękania, łuszczenia się i odpadania

odporność korozyjna nieosłoniętej powłoki – możliwy czas ochrony stali w normalnych warunkach

ochrona „ubytkowa” – zdolność powłoki do stwarzania ochrony dla nieosłoniętej stali ekspozowanej w miejscach krawędzi cięcia, otworów na łączniki, zadrapań itp.

odporność korozyjna po przetworzeniu – odporność korozyjna powłoki na wyrobach poddanych przetwarzaniu po jej nałożeniu

przyczepność powłoki malarskiej – możliwość pokrywania powłoki warstwami malarskimi

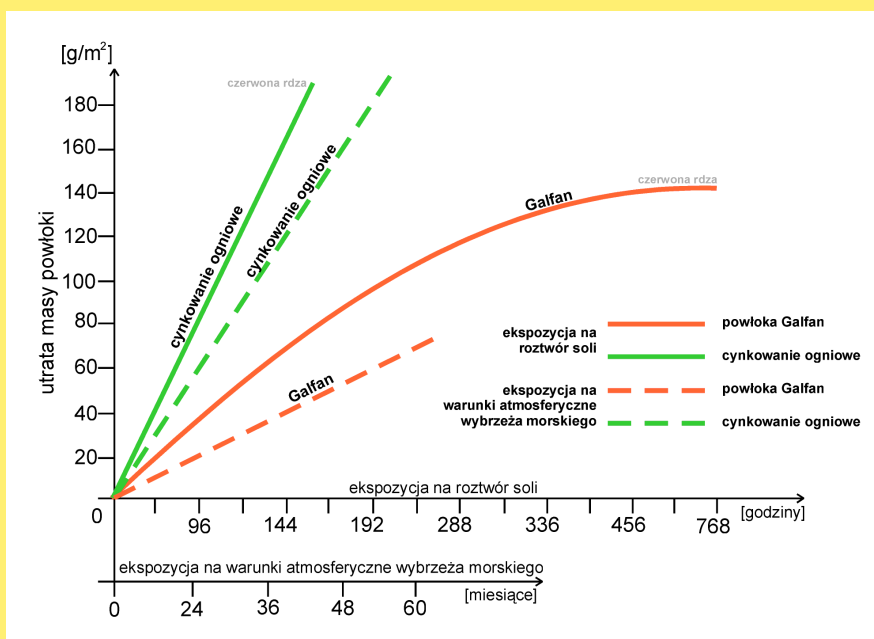
odporność korozyjna po pomalowaniu – dotyczy produktu pomalowanego w wytwórni

spawalność – możliwość zgrzewania stali pokrytej powłoką przy zachowaniu trwałości elektrody

odporność termiczna / odbicie – odporność powłoki na utlenianie w podwyższonej temperaturze i względna wartość odbicia światła od powłoki

relatywny koszt – względny koszt wykonania powłoki odniesiony do jednostki materiału

Porównanie odporności korozyjnej powłoki Galfan ze zwykłą powłoką cynkową nakładaną na gorąco przedstawia rysunek 2.26. Pokazano na nim utratę masy powłoki wyrażoną w g/m^2 , w czasie. Czynnikiem korozyjnym jest roztwór soli wywołujący przyspieszoną korozję oraz środowisko atmosferyczne wybrzeża morskiego.



Rys. 2.26 – porównanie odporności powłoki cynkowej nakładanej na gorąco i powłoki Galfan na przyspieszoną korozję wywołaną działaniem roztworu soli oraz na ekspozycję na warunki atmosferyczne wybrzeża morskiego. Opracowano na podstawie [97] i [15]

Obecnie, czołowi producenci lin na ciągłowe i błonowe konstrukcje budowlane, podają standardowo w swojej ofercie wyroby zabezpieczone powłoką Galfan. Na przykład firma Pfeifer, nie oferuje już w swoim katalogu wyrobów zabezpieczanych konwencjonalną powłoką cynkową [3].

Niewielkie dodatki aluminium (w ilości ok. 0.1%) są powszechnie stosowane podczas cynkowania ogniowego, gdyż bardzo korzystnie wpływają na uzyskiwaną powłokę. Ponieważ stwierdzono, że stosowanie powłok ze stopów cynku, zamiast z czystego metalu może znacznie podnieść ich jakość, od dawna trwały poszukiwania odpowiedniej kompozycji metali [97].

Trudność wykonywania powłok cynkowo-aluminiowych polegała początkowo na braku odpowiednich topników, gdyż topniki konwencjonalne, składające się z chlorku cynku i chlorku amonu nie umożliwiały rozkładania tlenku aluminium, przez co na powierzchni pozostawały miejsca nie pokryte cynkiem [5.50]. Chociaż znaleziono nowe, odpowiednie topniki – nie były one dostatecznie niezawodne, a w zastosowaniach przemysłowych występowały liczne ograniczenia [97][138]. Dlatego ostatecznie wdrożona została inna, dwuetapowa metoda nakładania powłoki aluminiowo-cynkowej.

Metoda ta została opracowana w roku 1980, przez badaczy z Centre de Recherches Métallurgiques w Liege (Belgia), na zlecenie ILZRO¹⁾ (International Lead Zinc Research Organization Inc.), pod nazwą Galfan. Nazwa ta została utworzona od francuskiego określenia *galvaniser fantastique* lub – w angielskiej wersji – *galvanization fantastique*.

W opracowanej metodzie na drut nakładana jest najpierw konwencjonalna powłoka cynkowa (ogniowa). Bezpośrednio po nałożeniu powłoka ta poddawana jest w drugiej kąpeli krótkotrwałemu przereagowaniu, zmieniającemu całkowicie jej budowę. W drugiej kąpeli wykorzystywany jest stop cynku (95 %) i aluminium (5 %). Najczęściej zawiera również dodatek metali ziem rzadkich: lantanu i ceru (ang. *mischmetals*), w ilości do 0.5 %. Dodatek ten jest istotnym elementem technologii Galfan. Dobre proporcje składu chemicznego oraz temperatury reakcji odpowiadają warunkom uzyskania mieszaniny eutektycznej. Dzięki takiej strukturze, powłoka wykazuje się wyjątkowo dobrym połączeniem z podłożem, wysoką ciągliwością, podatnością na dalszą obróbkę i odpornością na uszkodzenia.

Początkowe zastosowania powłoki Galfan obejmowały proste wyroby gospodarcze narażone na silną korozję: przegrody w fermach drobiu, druty w winnicach itp. Obecnie, po zebraniu odpowiedniej ilości doświadczeń, są chętnie stosowane w odpowiedzialnych zastosowaniach inżynierskich, np. do produkcji lin konstrukcyjnych dla budownictwa. W roku 1998, ilość stali pokrywanej w procesie ciągłym powłokami na bazie cynku wynosiła dla poszczególnych powłok: Galfan – 1 mln ton, Galvalume – 4 mln ton, Galvanneal – 7 mln ton, cynk (elektrochemicznie) – 15 mln ton, cynk (ogniowo) – 44 mln ton²⁾.

¹⁾ International Lead Zinc Research Organization Inc. (ILZRO) została założona w 1958 roku w USA przez firmy i instytucje zajmujące się produkcją, przetwarzaniem i zastosowaniem cynku i ołowiu, jako organizacja typu non-profit. Jej zadania to opracowywanie standardów, nowych technologii oraz prowadzenie badań i upowszechnianie informacji z zakresu zastosowania tych metali. W czasie swego istnienia organizacja uzyskała wysoką renomę międzynarodową.

²⁾ według danych ILZSG/IZA - Belgia

Minimalne masy powłok Galfan na drucie stalowym podaje norma [N-38]. Podobnie jak [N-07] dla powłok cynkowych, wyróżnia ona trzy jakości¹⁾ powłok: A, B i AB. Brak jest obecnie przepisów normowych podających, dla jakich klas wytrzymałości drutów dopuszczalne jest stosowanie poszczególnych jakości powłok. Wartości minimalnych mas powłoki Galfan w poszczególnych klasach podaje tablica 2.16. W zakresie wymagań odnośnie tych powłok, norma [N-38] odsyła do amerykańskiej normy ASTM B 750.

Oprócz wymienionych powyżej, najważniejszych powłok metalicznych stosowanych na drutach do wyrobu lin na konstrukcje membranowe, stosowane są również inne. Poniżej wymieniono niektóre z nich.

Galvaneal jest to powłoka cynkowa uzyskiwana w procesie, w którym produkt bezpośrednio po kąpeli cynkowej, przed krzepnięciem cynku, poddawany jest bardzo krótkiemu wyżarzaniu w temp. 677°C. Proces ten został wprowadzony w 1922 r. – specjalnie dla wyrobów, które poddawane są późniejszemu malowaniu [84].

Galvalume jest to powłoka aluminiowo-cynkowa o składzie: 55 % Al + 43.4 % Zn + 1.6 % Si, nakładana metodą ciągłą. Metoda ta jest stosowana od 1972, zwłaszcza do pokrywania blach na okładziny elewacyjne i dachowe (nazwa zarezerwowana amerykańskiej firmy BIEC) [5.50].

Aluminiowanie, czyli pokrywanie powierzchni stali warstwą aluminium może być przeprowadzane m.in. metodą ogniową (najbardziej ekonomiczna i najpowszechniej stosowana), elektrochemicznie lub natryskowo. Powłoka

daje dobrą ochronę korozyjną i bardzo dobry efekt estetyczny. Przewaga tej powłoki nad cynkową zaznacza się zwłaszcza w środowisku przemysłowym i morskim. Drut pokryty powłoką aluminiową może być przeciągany na zimno, do 85% redukcji przekroju [84].

Powłoki cynkowo-cynowe zostały opracowane w ostatnim okresie. Składają się z 30% cyny i 70% cynku. Nadmiar powłoki jest zgarniany za pomocą węgla drzewnego. Powłoki te mają unikalną strukturę, charakteryzującą się m.in. małą grubością fazy stopowej Zn-Fe. Najważniejszą zaletą tych powłok jest znaczna ciągliwość [84].

¹⁾ Norma [N-38] jest obecnie przyjęta przez Polski Komitet Normalizacji jako norma uznana (U). Ponieważ nie została przetłumaczona na język polski, obowiązuje tekst angielski. W tekście tym, w odniesieniu do rodzajów powłok używane jest określenie „class”. Ze względu na to, że w polskim tekście normy [N-07] używane jest określenie „jakość powłoki” – termin „class” został tutaj przetłumaczony jako „jakość”.

W USA opracowano cały szereg norm dotyczących różnych zastosowań powłoki Galfan. Oprócz wymienionej ASTM B 750, są to m.in.:

ASTM A 856/856M-98,
ASTM A 764,
ASTM A 855/855M-98,
ASTM A 925-98,
ASTM A 817-94,
ASTM A 824-95.

Tablica 2.16 – Minimalne masy powłok Galfan

Średnica nominalna drutu d mm	Minimalna masa powłoki g / m ²		
	jakość A	jakość B	jakość AB ¹⁾
0.20 ≤ d < 0.25	–	20	20
0.25 ≤ d < 0.40	–	30	30
0.40 ≤ d < 0.50	85	40	55
0.50 ≤ d < 0.60	100	50	70
0.60 ≤ d < 0.70	115	60	80
0.70 ≤ d < 0.80	130	60	90
0.80 ≤ d < 0.90	145	70	100
0.90 ≤ d < 1.00	155	70	110
1.00 ≤ d < 1.20	165	80	115
1.20 ≤ d < 1.40	180	90	125
1.40 ≤ d < 1.65	195	100	135
1.65 ≤ d < 1.85	205	100	145
1.85 ≤ d < 2.15	215	115	155
2.15 ≤ d < 2.50	230	125	170
2.50 ≤ d < 2.80	245	125	185
2.80 ≤ d < 3.20	255	135	195
3.20 ≤ d < 3.80	265	135	210
3.80 ≤ d < 4.40	275	135	220
4.40 ≤ d < 5.20	280	150	220
5.20 ≤ d < 8.20	290	–	–
8.20 ≤ d < 10.00	300	–	–
Uwagi: jakość A: zwykle powłoka ze stopu cynku jest wykonywana od razu w docelowej grubości jakość B: zwykle po wykonaniu powłoki jest ona dodatkowo przeciągana jakość AB: dwukrotnie przeciągana lub pokrywana stopem cynku z aluminium po końcowym przeciągnięciu			

Tablica. 2.16
Minimalne masy powłok Galfan na drucie dla jakości A, B i AB – w zależności od średnicy, wg [N-38].

Oznaczenia literowe | Wg normy [N-16] w oznaczeniach lin stalowych stosowane są symbole literowe opisujące cechy drutów zastosowanych do ich wykonania. Symbole te zestawiono w tablicy 2.17.

Tablica 2.17 – Symbole literowe cech drutów w oznaczeniach lin

ze względu na stan powierzchni drutu		ze względu na kształt drutu	
NAT	bez powłoki	brak	drut okrągły
		V	drut trójkątny
ZAA	drut ocynkowany klasy A	R	drut prostokątny lub płaski
		T	drut trapezowy
ZBB	drut ocynkowany klasy B	Q	drut owalny
		H	drut iksowy i okrągły w parze
		Z	drut żełowy

Tablica. 2.17
Symbole literowe w
oznaczeniach lin
stalowych opisujące
cechy drutów zasto-
sowanych do ich
wykonania,
wg [N-07]

2). Włókna szklane

Surowiec szklany | Szkło jest ciałem bezpostaciowym o właściwościach mechanicznych zbliżonych do ciała stałego, powstałym w wyniku przechłodzenia stopionych surowców, głównie mineralnych oraz innych składników nieorganicznych, bez krystalizacji składników [233].

Podstawowe surowce stosowane w produkcji szkła, dostarczające potrzebnych minerałów to: piasek kwarcowy (szklarski) – SiO_2 , boraks – B_2O_3 , skalenie – Al_2O_3 , soda itp. – Na_2O , K_2O , Li_2O , wapnienie itp. – CaO , MgO , PbO , ZnO oraz inne, dostarczające P_2O_5 , TiO_2 , ZrO_2 .

Podstawowe produkowane przemysłowo gatunki szkła to:

- szkło sodowo-wapniowe, napowszechniej stosowane
- szkło borowo-krzemowe, stosowane do wyrobu szkła laboratoryjnego
- szkło wysokoglinowe, stosowane m.in. do produkcji wyrobów żaroodpornych
- szkło ołowiowe, stosowane jako szkło optyczne oraz do wyrobów artystycznych

Szkło ma dużą wytrzymałość na ściskanie ale małą na rozciąganie i zginanie. Jest kruche. Gęstość szkła wynosi ok. 2.5 g/cm^3 – dla najpowszechniej stosowanych szkieł sodowo-wapniowych ale dla niektórych szkieł specjalnych może dochodzić do 8 g/cm^3 . Szkło charakteryzuje się małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Jest odporne na działanie kwasów (oprócz fluorowodorowego). Ma małą odporność na działanie zasad.

Formowanie szkła może się odbywać na wiele sposobów. Najstarszym jest dmuchanie za pomocą piszczeli, obecnie stosowane jedynie do produkcji wyrobów artystycznych. Wyroby płaskie ze szkła mogą być formowane poprzez wyciąganie pionowo w górę lub poziome ciągnięcie po powierzchni płynnego metalu, zwykle cyny (szkło z politurą ogniową lub float). Płaskie szkło wzorzyste jest produkowane przez walcowanie. Wyroby szklane do użytku stołowego, a także niektóre rodzaje szkieł optycznych są wytwarzane przez wytłaczanie w prasach. Poprzez automatyczne wydmuchiwanie za pomocą sprężonego powietrza formowane są wyroby przestrzenne np. baloniki żarówkowe. Rozwłóknienie strugi masy szklanej pozwala uzyskiwać wyroby liniowe, np. watę szklaną lub włókna szklane.

Najstarsze znane wyroby ze szkła pochodzą z Mezopotamii - są to znalezione w Ur paciorki, których wiek określa się na 2450 rok p.Ch. W okolicach Teb w Egipcie wyrabiano szklane naczynia już 1500 lat p.Ch. Ważnym usprawnieniem było wynalezienie przez Fenicjan piszczeli do dmuchania wyrobów (III - I w. p.Ch.). W pierwszym wieku naszej ery Rzymianie otrzymywali szkło przeźroczyste. Rozkwit technologii wytwarzania szkła i przemysłu szklarskiego w Europie rozpoczął się w 1291 r., kiedy to założono na wyspie Murano k. Wenecji pierwszą hutę szkła. Tam rozpoczęto wytwarzanie masy szklanej uszlachetnionej dodatkiem m.in. związków ołowiu i boru oraz wytwarzanie luster. Zaledwie o 19 lat później powstała pierwsza huta szkła w Polsce (w Poznaniu) – w 1310 r. Kolejnym przełomem technologicznym było zastosowanie w Anglii pierwszych pieców opalanych węglem w 1635 r. oraz wprowadzenie do konstrukcji pieca rusztu. Późniejsze ważne usprawnienia techniczne to: wprowadzenie wanny szklarskiej o ruchu ciągłym (Siemens, 1868), skonstruowanie maszyny do automatycznej produkcji opakowań szklanych (koniec XIX w.) oraz maszyny do automatycznego ciągnięcia tafli szklanych (początek XX w.). W latach trzydziestych XX w. wyprodukowano włókna szklane. W latach pięćdziesiątych wprowadzono metodę wytwarzania szkła płaskiego wysokiej jakości, tzw. float, formowanego na powierzchni płynnej cyny. Ostatnie osiągnięcia technologiczne obejmują otrzymywanie szkła o żądanych właściwościach, np. szkła odpornego na wysoką temperaturę lub jej gwałtowne zmiany.

Wyroby szklane mogą być jeszcze poddawane dodatkowym zabiegom końcowym, takim jak:

- odprężenie, tj. usuwanie naprężeń wewnętrznych poprzez ogrzanie do temperatury ok. 500°C, a następnie powolne chłodzenie
- hartowanie, tj. podgrzewanie do temp. ok. 650°C i gwałtowne ostudzenie sprężonym powietrzem
- wykańczanie: obcinanie zbędnych części, zdobienie itp.

Rodzaje szkła do produkcji włókien | Włókna szklane mogą być wykonywane z różnych rodzajów szkła, różniących się składem chemicznym, właściwościami i zakresem zastosowań.

Podstawowym materiałem do produkcji włókien szklanych jest szkło borowo-krzemowe tzw. bezalkaliczne (zaw. alkaliów $\leq 1\%$), oznaczane symbolem E. Nadaje się ono szczególnie dobrze zarówno do samego wykonywania włókien, jak i do większości zastosowań technicznych. Ponadto stosowanych jest kilka innych rodzajów szkła, przeznaczonych do specyficznych zastosowań. Ze względu na zastosowanie w budownictwie ważne jest szkło krzemowe, oznaczane symbolem S, które charakteryzuje się największą wytrzymałością na rozciąganie, zachowywaną również w podwyższonej temperaturze. Oznaczenia rodzajów szkła nie są przyjmowane jednolicie. W tablicy 2.18 przedstawiono oznaczenia rodzajów szkła do wyrobu włókien wg normy [N-17] oraz wg [204].

Tablica 2.18 – Oznaczenia rodzajów szkła do wyrobu włókien

Rodzaje szkła na włókna wg [N-17]		Rodzaje szkła na włókna wg [5.2]	
Symbol	Zastosowanie	Symbol	Zastosowanie
E	do celów ogólnych, dobre właściwości elektryczne	E	do celów ogólnych, zbrojenie kompozytów, przemysł elektrotechniczny
D	dobre właściwości dielektryczne	G	wysoka odporność chemiczna
A	wysoka zawartość alkaliów	M	wysoki moduł sprężystości
C	odporność chemiczna	S	wysoka wytrzymałość na rozciąganie
S	wysoka wytrzymałość mechaniczna	D	zastosowania techniczne – wysokie częstotliwości
R	wysoka wytrzymałość mechaniczna	Cemfil	do zbrojenia betonu oraz w środowiskach silnie alkalicznych
AR	odporność na działanie alkaliów		
E-CR	do zastosowania w środowiskach kwaśnych		

*Tablica. 2.18
Oznaczenia rodzajów szkła stosowanych do wyrobu włókien. Symbole według [N-07] oraz według [204].*

Technologia produkcji włókien szklanych | Włókna szklane są produkowane poprzez rozwłóknianie strugi masy szklanej. Produkuje się zarówno włókna odcinkowe (staplowe) jak i ciągłe (filamenty).

Produkcja włókien staplowych może odbywać się w trzech różnych procesach technologicznych:

- ciągnięcie mechaniczne, oparte o mechaniczne działanie sił rozciągających
- ciągnięcie pneumatyczne, oparte o przepływ gazu z dużą prędkością
- ciągnięcie kombinowane, wykorzystujące zarówno działanie sił rozciągających, jak i przepływ gazu odpadowego z dużą prędkością.

Filamenty szklane są produkowane w trakcie jedno- lub dwustopniowego procesu przędzenia [204]:

1. Proces dwustopniowy jest starszy od jednostopniowego. W pierwszym etapie z roztopionego szkła formowane są krople o średnicy 18 ÷ 20 mm. W drugim etapie krople te są podawane w sposób ciągły lub w regularnych interwałach czasowych do pieca z platynowymi dyszami, gdzie po ogrzaniu do temperatury 1200 ÷ 1300 °C jest ekstrudowane (tj. wytłaczane) przez dysze, a poszczególne filamenty nawijane na szpule. Prędkość przędzenia wynosi od 40 do 70 m/s.

Włókno szklane zostało po raz pierwszy wyprodukowane w roku 1842 przez producenta tkanin jedwabnych z Manchesteru, Louisa Schwabe. Wyciskał on roztopione szkło przez drobne otwory w płycie metalowej. Swoje włókna i próbki wykonanych z nich tkanin przedstawił British Association w Manchesterze [129]. Wówczas włókna te nie wzbudziły zainteresowania. Stało się tak dopiero po wyprodukowaniu włókien szklanych w 1932 r. przez firmę Owens w USA. W roku 1935 firma ta wraz z firmą Corning utworzyły wspólnie przedsiębior-

2. W procesie jednostopniowym pomijana jest faza wytwarzania kropeł, a włókna są przędzone bezpośrednio z wsadu szklanego znajdującego się w piecu. Jest on rozprowadzany systemem kanałów, najczęściej uformowanych w kształcie litery H do platynowych dysz, z których jest przędzone włókno. Proces jednostopniowy jest wydajniejszy, tańszy i mniej energochłonny.

Głównym problemem technologicznym przy produkcji włókien szklanych jest uzyskanie jednakowej średnicy i jednorodnej struktury na długości oraz uniknięcie wad powierzchniowych (karbów), które mogą spowodować wielokrotne zmniejszenie wytrzymałości włókien (przy głębokości karbu rzędu 0.2 mm – nawet trzydziestokrotne) [135].

Rodzaje włókien szklanych | Włókna szklane mogą być dostarczane jako:

- *przędza z filamentów*; teoretycznie może mieć nieskończoną długość; jest przetwarzana na szereg różnych technicznych wyrobów tekstylnych
- *włókna staplowe*; te krótkie włókna są zwykle przetwarzane na włókniny stosowane jako izolacja cieplna lub akustyczna oraz jako wyroby filtracyjne
- *mikrowłókna*; są to włókna staplowe o ekstremalnie małej, dokładnie ustalonej średnicy, z zakresu od 5 do 0.1 μm ; przetwarzane są na włókniny lub papier – przede wszystkim do celów filtracyjnych.
- *włókna optyczne*; jest to specjalny rodzaj włókien szklanych, składających się z rdzenia i osłony o różnych współczynnikach załamania światła;

Grubość włókien szklanych | Średnica włókien szklanych wynosi od kilku do ok. 20 mikrometrów, przeważnie mieści się w przedziale od 5 do 15 μm . Wszystkie włókna mają przekrój okrągły.

Stosowane są dwa sposoby oznaczania grubości włókien. W Europie podaje się bezpośrednio średnicę włókna w mikrometrach (tabl. 2.19). W Stanach Zjednoczonych i Wielkiej Brytanii stosowane są oznaczenia literowe (10 liter), którym odpowiadają wartości w mikrometrach lub calach $\times 10^{-5}$. Najmniejszą grubość mają włókna oznaczone literą B – 2.51 μm , a największą włókna oznaczone literą L – 13.97 μm . Włókna o grubości pośredniej oznaczane są kombinacją dwóch liter, np. włókno o średnicy 6 μm będzie oznaczone DE [204].

Tablica 2.19 – Podział włókien szklanych ze względu na średnicę

określenie	średnica włókna μm
bardzo grube	20
średnio grube	$20 \div 13$
włókna drobne	$13 \div 5$
mikrowłókna	$5 \div 1$
wł. submikronowe	$1 \div 0.5$
wł. ultramikronowe	$0.5 \div 0.1$

Tablica. 2.19
Podział włókien szklanych ze względu na średnicę, według [204].

Przędzenie włókien szklanych | Nitka z włókna szklanego (tzw. szkła tekstylne) składa się zwykle ze 100, 200, 400, 800, 1200, 1600 lub 2000 pojedynczych filamentów połączonych tzw. *preparacją*¹⁾. Temin ten oznacza substancję chemiczną nakładaną na powierzchnię włókien bezpośrednio w trakcie procesu przędzenia. Powoduje ona połączenie elementarnych filamentów w nitki poprzez sklejenie, zabezpiecza przed uszkodzeniem i nadaje im właściwości przędne niezbędne w dalszej obróbce [N-40]. Preparacja jest zwykle usuwana z gotowych tkanin przez obróbkę cieplną, gdyż mogłaby utrudniać ich dalsze wykorzystanie, np. pokrywanie żywicami syntetycznymi. Jest to absolutnie niezbędne w przypadku nakładania warstw na bazie silikonów. Czasami stosuje się tzw. *preparację bezpośrednią*, która nie musi być usuwana przed nałożeniem na tkaninę powłoki, gdyż zawiera substancje zgodne z żywicami i rozpuszczające się w nich.

Przędza z włókien szklanych jest poddawana skręcaniu. Ma to na celu poprawę właściwości użytkowych przędzy. Stosuje się zarówno skręcenia w kierunku Z (prawe) jak i S (lewe). Stopień skręcenia wyrażony w ilości obrotów na metr może wynosić dla od 30 do 200 [204].

Nitki ze szkła tekstylne oznaczają się symbolem zbudowanym na podstawie normy [N-17]. Oznaczenie to składa się z:

¹⁾ Stosuje się również określenie „klejonka” [N-01]

ang. size

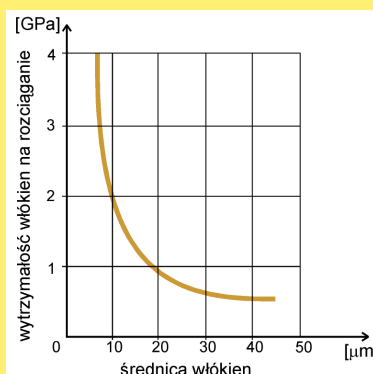
- litery oznaczające rodzaj szkła, wg tablicy 2.7
 - litery C dla nitki z filamentów lub litery D dla nitki z włókien odcinkowych
 - liczby jedno lub dwucyfrowej oznaczającej średnicę nominalną w μm
 - liczby podającej masę liniową w systemie tex
 - litery oznaczające kierunek (kierunki) skrętu
 - liczby skrętu w obrotach na metr
 - liczby składowych przędz wielokrotnych (opcjonalnie)
- Przykład oznaczenia przędzy pojedynczej z włókien ciągłych: EC9 34 Z 40

Właściwości mechaniczne włókien szklanych | Masa właściwa filamentu szklanego wynosi ok. 2.54 g/cm^3 . Zależy ona częściowo od rodzaju użytego szkła. Jest to gęstość znacznie większa niż dla włókien organicznych i bliska gęstości aluminium (2.70 g/cm^3) [204].

Najważniejszą właściwością mechaniczną włókien szklanych jest wysoka wytrzymałość na rozciąganie. Wytrzymałość włókien szklanych zależy od ich średnicy i może być wyższa niż drutów stalowych, rys. 2.27. Duży wpływ na wytrzymałość mają również wady powierzchni włókien powstające na różnych etapach produkcji, tablica 2.21.

Dla nitki składającej się z 200 pojedynczych filamentów ze szkła rodzaju E nośność na zerwanie może wynosić od 1.37 kN do 1.47 kN. Współczynnik wykorzystania pojedynczych włókien w nitce wynosi zwykle $65 \div 75 \%$ i może zależeć od rodzaju zastosowanej preparacji [204].

W tablicy 2.20 zestawiono niektóre właściwości włókien szklanych ogólnie, wg [204] oraz włókien wykonanych ze szkła produkowanego w Krośnieńskich Hutach Szkła w Krośnie, wg [135].



Rys. 2.27 – zależność pomiędzy średnicą włókien szklanych, a ich wytrzymałością. Opracowano na podstawie [135].

Tablica 2.20 – Niektóre właściwości włókien szklanych

Parametr	jednostka	włókna szklane ogólnie	włókna produkowane przez Krośnieńskie Huty Szkła, ze szkła typu:		
			E	S	T ¹⁾
średnica	μm		9 ÷ 25	10	14 ÷ 15
masa właściwa	kg/m^3	2 400 ÷ 2 700	2 520	2 490	2 720
wytrzymałość na rozciąganie	MPa		3 500	4 900	4 200
	N/tex	0.65 ÷ 0.79			
początkowy moduł sprężystości	GPa		66.5	73.5	
	N/tex	20.57 ÷ 29.4			
wydłużenie przy zerwaniu	%	2.5 ÷ 3.5	5.0	7.0	
współczynnik Poissona ν	–		0.23	0.22	
współczynnik rozszerzalności cieplnej	1/K		7.74×10^{-6}	4.68×10^{-6}	
temperatura:	$^{\circ}\text{C}$	– topnienia	800 ÷ 850		
		– mięknienia	550 ÷ 800		
relatywna wytrzymałość w splotach:	%	– pętlowych	8 ÷ 9		
		– węzłowych	30 ÷ 60		
współczynnik pracy	–	0.52			

¹⁾ polepszone właściwości mechaniczne w stosunku do szkła E (oznaczenie wg Krośnieńskich Hut Szkła)

Tablica. 2.20
Wybrane właściwości włókien szklanych:

a). ogólnie, w odniesieniu do masy liniowej, wg [204]
b). wykonanych z trzech rodzajów szkła produkowanego przez Krośnieńskie Huty Szkła w Krośnie, według [5.25]. Oznaczenia rodzajów szkła:
E – szkło bezalkaliczne
T – szkło tytanowe¹⁾
S – szkło krzemowe

Włókna szklane mają dobrą odporność na zmiany temperatury. Przy obniżeniu temperatury do -50°C ich właściwości mechaniczne nie zmieniają się. Przy wzroście temperatury do $+300^{\circ}\text{C}$ wytrzymałość włókien szklanych nieznacznie wzrasta, a w wyższej temperaturze – gwałtownie spada. Zniszczenie następuje w temperaturze $+650^{\circ}\text{C}$ [5.25]. Włókna o większej średnicy są bardziej wrażliwe na podwyższoną temperaturę. Istotny jest również okres ekspozycji [204].

Tablica 2.21 – Wpływ wad powierzchni na wytrzymałość włókien szklanych

Schemat defektów	Napężenie zrywające [MPa]	Rodzaj defektów	Głębokość wad powierzchni
	3 000 ÷ 3 500	brak wad powierzchni	–
	2 000 ÷ 2 500	mikrowady powstałe w czasie formowania	< 0.01 μm
	600 ÷ 800	submikrorysy powstałe podczas przędzenia	$\sim 0.01 \mu\text{m}$
	100 ÷ 150	mikrorysy powstałe podczas wygrzewania włókien	$\sim 1 \div 2 \mu\text{m}$

Rys. 2.21 – wpływ wad powierzchni włókien szklanych na ich wytrzymałość mechaniczną, wg [135].

Karby powierzchniowe mogą spowodować nawet trzydziestokrotne zmniejszenie wytrzymałości włókna [135].

Moduł sprężystości włókien szklanych jest znacznie większy niż dla włókien organicznych ale wyraźnie mniejszy niż stali i może wynosić około 70 GPa. Włókna szklane nie mają jednak granicy plastyczności i charakteryzują się mniejszym niż stal wydłużeniem granicznym, najmniejszym ze wszystkich znanych włókien. Inna cecha odróżniająca je od pozostałych rodzajów włókien to liniowa zależność σ – ε w pełnym zakresie naprężeń, aż do zniszczenia [204]. Porównanie zależności σ – ε dla prętów z włókien szklanych z ciągniami z innych wybranych materiałów przedstawiono na rys. 2.109.

Wysoka sztywność włókien szklanych, ok. piętnastokrotnie większa niż sztywność włókien nylonowych, w połączeniu z ich naturalną kruchością powodują, że mają one stosunkowo małą wytrzymałość na zginanie. Wielokrotne zginanie włókien szklanych może doprowadzić do ich zniszczenia.

Inne cechy włókien szklanych | Włókna szklane charakteryzują się dobrą odpornością ogniową. Są odporne na działanie większości chemikaliów., w zależności od rodzaju zastosowanego szkła. Podstawowe rodzaje, zwłaszcza rodzaj E wykazuje mniejszą odporność na alkalia. Włókna szklane nie starzeją się, tj. nie tracą z upływem czasu swoich właściwości mechanicznych pod wpływem promieniowania ultrafioletowego i warunków atmosferycznych, nie są wrażliwe na działanie drobnoustrojów, nie gniją. Nie są nasiąkliwe i nie ulegają korozji pod wpływem wody. Mają dobre właściwości tekstylne¹⁾.

Zastosowania włókien szklanych | Włókna szklane mają zastosowanie w wielu gałęziach techniki. Można spotkać następujące formy ich wykorzystania:

1. *włókna optyczne*, wykorzystywane przede wszystkim w telekomunikacji
2. *taśmy*, stosowane w silnie obciążonych urządzeniach mechanicznych, takich jak przenośniki taśmowe, w oponach, paskach klinowych itp.
3. *przędza szklana*, czasami mieszana z włóknami poliestrowymi stosowana jako izolator w urządzeniach elektromagnetycznych
4. *rowingi*, tj. wiązki prawie równoległych, łączonych bez skrętu włókien elementarnych – stosowane do wykonywania kompozytów żywicznych, zbrojenia plastików; rowingi mogą być stosowane wprost lub używane do produkcji tkanin.
5. *tkaniny*, wykonywane z przędzy lub z rowingów – są stosowane jako izolacje elektryczne, do zbrojenia plastików lub innych materiałów, jako tkaniny filtracyjne oraz powłoki membranowe
6. *włókniny szklane*, tkaniny „nietkane” (ang. non-woven), w których włókna są łączone mechanicznie lub chemicznie – stosowane jako maty do wzmacniania kompozytów, oraz jako materiał termo- i akustycznie izolacyjny („wata szklana”).

¹⁾ Terminologia dotycząca włókien technicznych i ich właściwości została omówiona w pkt. 2.2.4.

W budownictwie włókno szklane znalazło dwa podstawowe obszary zastosowań:

- w konstrukcjach membranowych – w postaci tkanin szklanych, pokrytych warstwą PTFE lub silikonem
- w konstrukcjach żelbetowych – jako ciężna sprężająca oraz jako zbrojenie zwykłe odporne na korozję. Stosuje się tu zarówno splotki z włókien szklanych jak i pręty z włókien szklanych, połączonych żywicami, głównie poliestrowymi i epoksydowymi. Szczegółowo wyroby te zostały opisane w pktcie 2.5.2

Przykładami prętów mogą być np. pręty Glaspre (firma Sireg), Jitec Glass (firma Cousin Composites), a przykładami splotek – Lightline (firma Neptco) i FiBRA (firma Mitsui). Pewnym utrudnieniem w stosowaniu ciężkich sprężających jest anizotropia mechaniczna włókien szklanych, przejawiająca się ich małą wytrzymałością na ścinanie, co utrudnia kotwienie mechaniczne [135].

Ponadto pręty z włókna szklanego znajdują zastosowanie np. przy wzmacnianiu konstrukcji drewnianych uszkodzonych przez korozję biologiczną.

Najbardziej znane, dostępne na rynku marki handlowe włókien szklanych to: Fiberglas, Araton, Beta, S-Glass (prod. Owens-Corning Fiberglas Corp. USA), Glasslon (prod. Asahi Fiber Glass, Japonia), Vetrotex (prod. Vetrotex SA, Francja), Surmat (prod. Nicofibers, USA), Polsilon (prod. Chemitex Anilana, Polska).

Włókna szklane są relatywnie drogie w produkcji, a specjalne sposoby obróbki powierzchniowej jeszcze ten koszt podnoszą. Powoduje to, że obecnie, mimo bardzo wielu zalet, wyroby z nich nie są nawet w przybliżeniu tak powszechnie stosowane w budownictwie jak wyroby z innych włókien: przede wszystkim stalowych, a w odniesieniu do konstrukcji membranowych – włókien poliestrowych.

3). Włókna węglowe

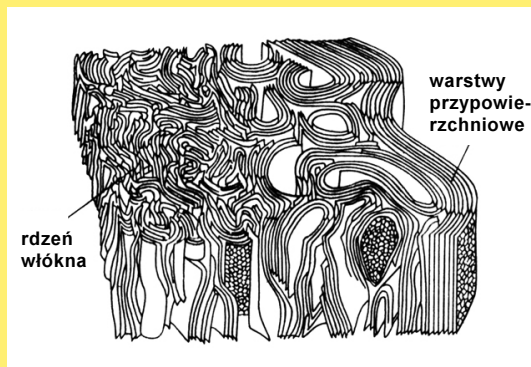
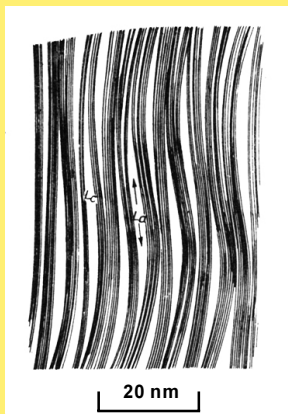
Włókna węglowe, inaczej nazywane włóknami karbonizowanymi, są to włókna otrzymywane w wyniku pirolizy i karbonizacji włókien chemicznych (sztucznych). Należą one do grupy materiałów węglowych, tj. materiałów, których wyłącznym lub dominującym składnikiem jest węgiel pierwiastkowy. [164] Wyróżnia się:

- *włókna węglowe*, zawierające 80÷98 % węgla pierwiastkowego o nie w pełni zorientowanej strukturze krystalicznej
- *włókna grafitowe*, zawierające 99 % węgla pierwiastkowego o krystalicznie zorientowanej strukturze.

Wspólnymi właściwościami wszystkich materiałów węglowych są: duża odporność termiczna, charakteryzująca się m.in. zachowaniem przez nie prawie niezmienionej wytrzymałości mechanicznej do bardzo wysokich temperatur ok. 2500°C ÷ 3000°C (w warunkach nieutleniających), bardzo wysoka odporność na gwałtowne zmiany temperatury, odporność na erozję i korozję przez ciekłe żuźle i metale, odporność na działanie kwaśnych i alkalicznych agresywnych ośrodków ciekłych i gazowych, małą gęstość. Inne właściwości materiałów węglowych można kształtować w bardzo szerokich granicach. Wynika to z możliwości kształtowania ich budowy zarówno w skali atomowej (struktura) jak i w skali nano- i mikrometrów (budowa nadcząsteczkowa).

Budowa włókien węglowych | Charakterystyczną cechą budowy włókien węglowych jest znaczny stopień orientacji pasm pakietów heksagonalnych warstw węglowych równoległe do osi włókien. Dzięki tej orientacji mogą one osiągać bardzo duże wytrzymałości mechaniczne wzdłuż osi. Taką budowę włókien węglowych można uzyskać dzięki temu, że produkuje się je w wyniku pirolizy i karbonizacji włókna polimerów organicznych (tzw. prekursorów), których wyjściowa budowa nadcząsteczkowa odznacza się już dużym stopniem orientacji łańcuchów wzdłuż osi włókna oraz dzięki temu, że procesy te przeprowadza się w warunkach sprzyjających utrzymaniu tej

uprzywilejowanej orientacji (np. zachowując stały naciąg mechaniczny włókien). Rysunki 2.28 i 2.29 pokazują budowę włókna węglowego otrzymanego z poliakrylonitrylu (używany jest skrót PAN) [164].



Rys. 2.28 – model budowy włókna węglowego [164]

Rys. 2.29 – fragment włókna węglowego otrzymanego z poliakrylonitrylu (PAN) [164]

Produkcja włókien węglowych | Jako surowce wyjściowe do produkcji włókien węglowych (prekursory) stosuje się celulozę, paki oraz – najczęściej – poliakrylonitryle (PAN). Piroliza przebiega w sposób ciągły, w temperaturze powyżej 2400°C. Pierwsze włókna węglowe otrzymywano z jedwabiu wiskozowego oraz z paków. Od 1961 r. są produkowane wysokowytrzymałe włókna węglowe na bazie poliakrylonitryli. Początkowo włókna te mogły być stosowane jedynie w matrycach z żywic polimerowych. Wkrótce potem opracowano metodę pokrywania włókien węglowych powłokami zapobiegającymi reakcji węgla z aluminium i magnezem, co umożliwiło stosowanie tych włókien w matrycach metalowych. Obecnie z włókien węglowych wykonywane są zarówno wyroby liniowe (liny) jak i powierzchniowe (tkaniny).

Początkowo do produkcji włókien węglowych stosowano włókna poliakrylonitrylowe o przeznaczeniu tekstylnym. Ponieważ jednak nie gwarantowało to uzyskiwania włókien o najwyższej jakości, obecnie wiodący producenci używają włókien specjalnie przeznaczonych o karbonizacji. Charakteryzują się one wysoką czystością, wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi i małą zmiennością tych właściwości. Proces przetwarzania włókna PAN we włókno węglowe odbywa się w trzech etapach:

- 1). w pierwszym etapie następuje obróbka wstępna – utlenianie w temp. 200 ÷ 270 °C w czasie od kilku do kilkudziesięciu godzin
- 2). etap drugi to odwodornianie – zwęglanie, które może być realizowane w sposób okresowy lub ciągły. W tym etapie wiązka włókien PAN w postaci rowingu prowadzona jest w przez system rolek w komorze, w której jest utrzymywana określona temperatura. Zapewniany jest stały naciąg włókien, zby zapobiec ich kurczeniu i poprawić orientację liniową.
- 3). w etapie trzecim prowadzona jest dalsza obróbka cieplna włókien – proces grafityzacji, w celu poprawy ich właściwości sprężystych.

Właściwości sprężyste włókien węglowych | Właściwości sprężyste włókien węglowych zależą od jego budowy przestrzennej, w szczególności od wzajemnego uporządkowania warstw węglowych w pakiecie, jak również od ich orientacji względem podstawowej osi włókna.

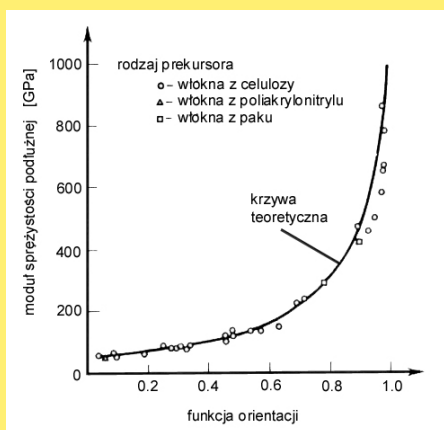
Rys. 2.30 przedstawia zależność modułu sprężystości podłużnej włókien węglowych od funkcji orientacji, określającej odchylenie pakietu heksagonalnych warstw węglowych od osi włókna. Krzywa teoretyczna została wyznaczona dla monokryształu grafitu. Rys. 2.31 przedstawia zależność modułu sprężystości podłużnej włókien węglowych od temperatury obróbki prekursorów. Moduł sprężystości podłużnej rośnie monotonicznie ze wzrostem temperatury obróbki [164].

Po raz pierwszy włókna węglowe pojawiły się w połowie lat osiemdziesiątych XIX w. Wykonywał je angielski chemik Joseph Wilson Swan. Były one wykonane z prekursorów celulozowych i przeznaczone do zastosowania w lampach elektrycznych. Ze względu na bardzo małą wytrzymałość mechaniczną nie zostały one jednak wprowadzone do użycia. Dopiero w roku 1959 rozpoczęto produkcję wytrzymałych i dostatecznie elastycznych włókien węglowych, na bazie prekursorów ze sztucznego jedwabiu wiskozowego. W roku 1961 Japończyk, A. Shindo, opracował produkcję wysokowytrzymałych włókien węglowych z prekursorów poliakrylonitrylowych.

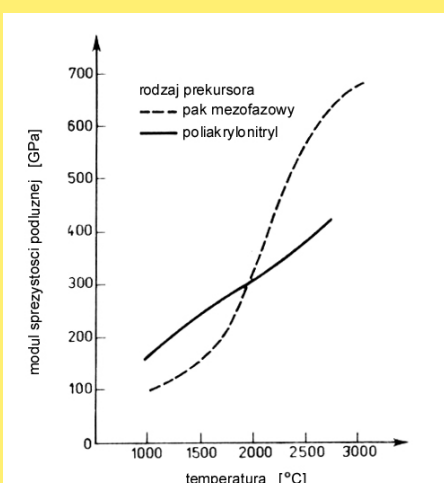
Inne czynniki mające wpływ na właściwości sprężyste włókien węglowych to – przede wszystkim – rodzaj zastosowanych surowców wyjściowych (prekursorów), makrostopowa postać materiałów, stopień rozciągnięcia włókna na określonym etapie obróbki (rys. 2.32), a także pewne dodatkowe zabiegi, jak np. napromieniowanie włókien neutronami zwiększające moduł sprężystości o ok. 10%. Zwiększenie modułu sprężystości włókien węglowych można osiągnąć też przez wprowadzenie do ich struktury niewielkiej ilości boru (ok. 1%). Dla włókien wysokomodułowych otrzymywanych z poliakrylonitrylu (typ I) jednoprocenowy dodatek boru powoduje wzrost modułu przy ich powtórным wygrzewaniu w temperaturze + 2 750°C z 415 GPa do 500 GPa [164].

Wytrzymałość włókien węglowych |

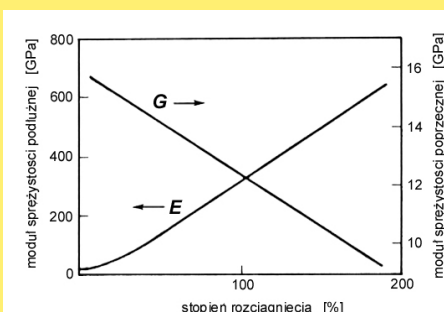
Wytrzymałość włókien węglowych jest funkcją wielu parametrów technologicznych, wymienionych w punkcie dotyczącym właściwości sprężystych. Specyficzny jest także mechanizm zniszczenia włókna, polegający na pękaniu warstw węglowych w odchylnym od osi (a zatem także od kierunku działania obciążenia) krystalicie. O wytrzymałości włókien decyduje kąt odchylenia pakietów heksagonalnych warstw węglowych od osi włókna. Istnieje krytyczna wartość kąta dezorientacji. Naprężenia ścinające koncentrują się wokół takiego miejsca w fazie krystalicznej, tworząc zarodek pęknięcia. Na rysunku 2.33 przedstawiono kolejne fazy zniszczenia włókna węglowego [164].



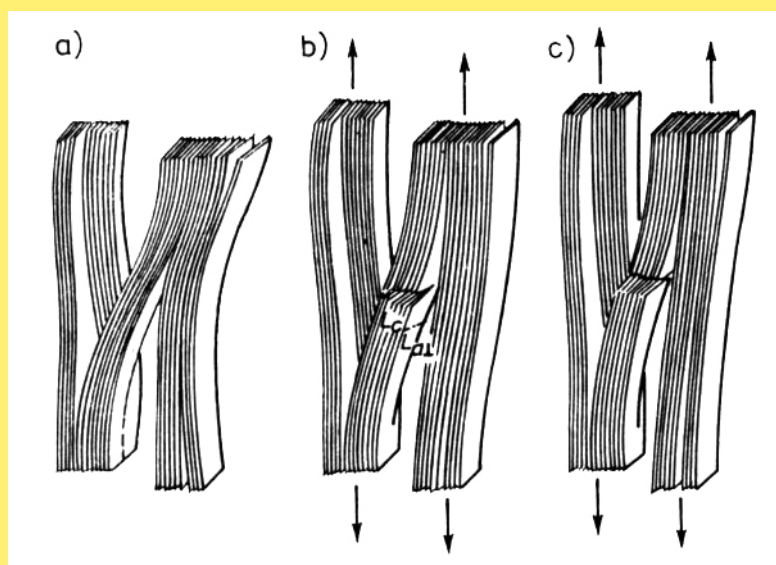
Rys. 2.30 – zależność modułu sprężystości podłużnej włókna węglowego od stopnia orientacji warstw równoległe do osi włókna [164]



Rys. 2.31 – zależność modułu sprężystości podłużnej włókna węglowego od temperatury obróbki prekursorów [164]



Rys. 2.32 – zależność modułów sprężystości podłużnej (E) i poprzecznej (G) włókna węglowego od stopnia rozciągnięcia włókien [164]



Rys. 2.33 – mechanizm zniszczenia włókna węglowego, wg [164]:

- odchylenie krystalitu od osi włókna
- pękanie warstw węglowych w odchylnym krystalicie
- działanie obciążenia powoduje całkowite rozerwanie odchylnego krystalitu

Oznaczanie włókien węglowych | Włókno węglowe jako typowy materiał kruchy o niewielkiej średnicy stwarza wiele problemów zarówno przy pomiarze właściwości mechanicznych jak i w interpretacji uzyskanych wyników. Do niedawna nie były jeszcze określone jednolite warunki prowadzenia badań właściwości mechanicznych włókien węglowych. Z tego względu ich ocena, nawet dla włókien tego samego rodzaju, uzyskana w różnych ośrodkach była różna. W roku 1999 ukazała się norma międzynarodowa [N-19] ustalająca metody określania zarówno wytrzymałości na rozciąganie jak i modułu sprężystości przy rozciąganiu. Do tych metod nawiązuje system oznaczeń przędzy filamentowych z włókna węglowego przyjęty w normie [N-18]. System ten oparty jest na znormalizowanym wzorze składającym się kolejno z:

1. dowolnego bloku opisowego
2. bloku numeru norm międzynarodowych
3. bloku wyróżnika szczegółowego, zawierającego:
 - symbol literowy włókien węglowych – CF
 - litery kodowe określające przędzę prekursorową i jej postać
 - liczby kodowej określającej przedział nominalnej wartości modułu sprężystości
 - liczby kodowej określającej przedział nominalnej wartości wytrzymałości na rozciąganie
 - liczby kodowej określającej przedział nominalnej wartości masy liniowej
 - blok dowolnych wymagań dodatkowych (np. średnicy przędzy, liczby filamentów w przędzy, obróbki powierzchniowej, rodzaju preparacji itp.)

Tablica 2.22 – Budowa oznaczeń przędzy z włókien węglowych

	Blok opisowy (dowolny)	Blok numeru normy	Blok wyróżnika szczegółowego				
			Blok danych 1		Blok danych 2		
			symbol stały	prekursor	moduł sprężystości	wytrzymałość na rozciąganie	masa liniowa
<i>przykład:</i>	włókna wzmacniające	ISO 13002	CF	AC	225	35	200

*Tablica. 2.22
Sposób budowy
oznaczenia przędzy
filamentowej z włó-
kien węglowych
według [N-18].*

Oznaczenie: ISO 13002-CF-AC,225-35-200,,

W tablicy 2.22 przedstawiony został sposób budowy oznaczenia. Separatorem pomiędzy blokami danych jest przecinek. Litery i liczby kodowe używane w bloku wyróżnika szczegółowego zestawiono w tablicy 2.23.

Wartości podane w tablicy 2.23 jako granice przedziałów dla poszczególnych cech mechanicznych pozwalają zorientować się w zakresie uzyskiwanych współcześnie parametrów włókien węglowych. Wytrzymałość na rozciąganie jest nawet kilkukrotnie wyższa niż dla wysokowytrzymałych stali stosowanych do produkcji lin. Również moduły sprężystości mogą osiągać kilkukrotnie wyższe wartości.

Jednym z ważnych czynników wpływających na wytrzymałość włókien węglowych jest rodzaj i jakość użytego surowca. Defekty i zanieczyszczenia istniejące w prekursorze wpływają na obniżenie wytrzymałości. Stwierdzono, że we włóknach chemicznych organicznych – poliakrylonitrylach (PAN) występują wtrącenia dochodzące nawet do 4 μm . Defekty tej wielkości zaburzają ciągłość struktury włókien węglowych i są potencjalnym koncentratorem naprężeń.

Charakterystyczną cechą jest zmienność wytrzymałości na rozciąganie w zależności od temperatury obróbki. Występuje pewna wartość (np. dla włókien uzyskiwanych z PAN jest to przedział 1 000 ÷ 1 500°C, a dla włókien otrzymywanych z celulozy – przedział 2 800 ÷ 3 000°C), przy której włókna węglowe osiągają największą wytrzymałość. Przyczyny tego zjawiska nie są w pełni wyjaśnione.

W tabeli 2.24 zestawiono właściwości mechaniczne wybranych włókien węglowych [164].

Tablica 2.23 – Symbole kodowe stosowane w oznaczeniach przędzy filamentowych z włókien węglowych, wg [N-18]

Blok danych 1		Blok danych 2					
		przedziały modułów sprężystości		przedziały wytrzymałości na rozciąganie		przedziały mas liniowych	
litery kodowe	rodzaj przędzy prekursorowej / postać wyrobu	liczba kodowa	zakres nominalnych wartości modułów sprężystości [GPa]	liczba kodowa	zakres nominalnych wartości wytrzymałości na rozciąganie [MPa]	liczba kodowa	zakres nominalnych wartości mas liniowych [tex]
AC	włókna poliakrylonitrylowe (przędza filamentowa)	200	> 187 lecz ≤ 213	20	> 1 750 lecz ≤ 2 250	0060 lub 60	> 55 lecz ≤ 65
		225	> 213 lecz ≤ 237	25	> 2 250 lecz ≤ 2 750	0070 lub 70	> 65 lecz ≤ 70
		250	> 237 lecz ≤ 263	30	> 2 750 lecz ≤ 3 250	0190 lub 190	> 185 lecz ≤ 195
		275	> 263 lecz ≤ 287	35	> 3 250 lecz ≤ 3 750	0200 lub 200	> 195 lecz ≤ 205
		300	> 287 lecz ≤ 387	40	> 3 750 lecz ≤ 4 250	0210 lub 210	> 205 lecz ≤ 215
VC	włókna wiskozowe (przędza filamentowa)	400	> 387 lecz ≤ 413	45	> 4 250 lecz ≤ 4 750	1400	> 1 350 lecz ≤ 1 450
		425	> 413 lecz ≤ 437	50	> 4 750 lecz ≤ 5 250	1500	> 1 450 lecz ≤ 1 550
		450	> 437 lecz ≤ 463	55	> 5 250 lecz ≤ 5 750	1600	> 1 550 lecz ≤ 1 650
		475	> 463 lecz ≤ 487	60	> 5 750 lecz ≤ 6 250	9 551 tex lub powyżej przedstawia się za pomocą 10k, itd.	
		500	> 487 lecz ≤ 687			10k	> 9 550 lecz ≤ 10 500
PC	włókna z paków (przędza filamentowa)	700	> 687 lecz ≤ 713			114	> 10 500 lecz ≤ 11 500
		725	> 713 lecz ≤ 737				
		750	> 737 lecz ≤ 763				
		775	> 763 lecz ≤ 787				
		800	> 787 lecz ≤ 813				

Tablica 2.24 – Właściwości mechaniczne włókien węglowych, wg [164]

Rodzaj włókna (prekursor), nazwy handlowe	Producent	Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]	Moduł sprężystości podłużnej [GPa]	Moduł sprężystości poprzecznej [GPa]	Współcz. Poissona	Gęstość [g/cm ³]	Średnica [μm]
Pak mezofazowy							
Thornel P55	Union Carbide (USA)	2.05	379			2.02	10
Thornel P755		2.05	500			2.0	10
Thornel P100		2.25	700			2.16	11
Kureha HM	Kureha (Japonia)	0.52	262				
Kureha HS		1.72	28				
PM-A			184	13.5			
PM-B			262	9.0			
PM-C			400	10.4			
Pak izotropowy							
KCF-200			80	16.4			
KCF-2700			80	18.0			
PAN (poliakrylonitryl)							
Celion GY70	Celanese (USA)	1.86	517			1.96	8.4
Celion 1000		2.83	234			1.78	7.0
Torayca M40-3000	Torayca (Japonia)	2.45	392			1.81	6.5
Torayca T500-3000		3.26	235			1.74	7.0
Grafil HMS	Courtaulds (USA)	2.62	345			1.86	7.8
Grafil HST		2.99	234			1.71	8.1
Sigrafil HM	Sigri (Niemcy)	2.0	350			1.85	6.0
Sigrafil HF		3.0	230			1.75	7.0
Manganite HMS	Hercules (USA)	2.2	365			1.82	8.0
Manganite HTS2		2.9	269			1.66	8.0
Thornel 400	Union Carbide		176	22.8	0.23		
Modmor Typ I			400	28.2	0.35		
Modmor Typ II			233	24.0	0.35		
Celuloza							
Thornel 25	Union Carbide (USA)		176	12.3	0.23		
Thornel 50		2.0	360			1.66	6.5
Thornel 75		2.52	517	13.8	0.39		5.6
Thornel 100	Hitco (USA)		680	16.9			
HMG-50		2.1	345			1.72	6
Monokryształ grafitu			1 024	8.3	0.34		

Zastosowanie włókien węglowych | Włókna węglowe znajdują zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach techniki dzięki swoim dobrym właściwościom mechanicznym, niezmiennym w dużym zakresie temperatur oraz cennym właściwościom niemechanicznym. Do tych pierwszych należą takie właściwości jak: wysoka wytrzymałość na rozciąganie, bardzo wysoki moduł sprężystości podłużnej, mała masa – duża sztywność właściwa i wytrzymałość właściwa. Do drugich – dobra tolerancja przez organizmy żywe, duża odporność na działanie promieniowania elektromagnetycznego oraz strumieni cząstek o wysokiej energii. Kompozyty węglowe są niezastąpione m.in. w technice jądrowej, medycynie (implanty) i lotnictwie.

Wyroby kompozytowe z włókien węglowych znalazły zastosowanie również w budownictwie. Są to przede wszystkim taśmy do naprawy i wzmacniania konstrukcji oraz pręty zbrojeniowe i liny.

4). Włókna borowe

Włókna borowe zostały opracowane przez amerykańską firmę Texaco. Ich wytrzymałość przewyższa wytrzymałość włókien węglowych. Włókna borowe znalazły swój obszar zastosowań przede wszystkim w technice wojskowej. Wykorzystywany jest głównie jako zbrojenie kompozytów z matrycą z żywic epoksydowych lub z matrycą metalową (ang. MMC - Metal Matrix Composite). Ograniczenie stosowania włókien borowych wynika z ich większego – w porównaniu z innymi włóknami – kosztu oraz pewnych ograniczeń technologicznych. Najważniejsze z nich to:

- konieczność osadzania na drutach wolframowych, używanych jako substrat reakcji, co jest rozwiązaniem kosztownym
- włókna nie mogą być zginane pod zbyt małym promieniem
- bor reaguje z matrycą metalową w temperaturze ok. 600°C, konieczne jest więc pokrywanie go specjalnymi powłokami przez zastosowaniem jako zbrojenia w kompozytach typu MMC.

Gęstość włókien borowych wynosi 1.85 g/cm³. Wytrzymują temperaturę do 3000 °C [129]. Wartości parametrów wytrzymałościowych są następujące [164]:

- wytrzymałość na rozciąganie ok. 4.0 GPa
- moduł sprężystości podłużnej ok. 420 GPa

Pierwsze spektakularne zastosowanie włókien borowych miało miejsce w roku 1969, kiedy firma General Dynamics wyposażyla produkowany przez siebie samolot F-4 w stery wykonane z kompozytów borowo-epoksydowych [161].

5). Włókna krzemowe (SiC)

Są to włókna ceramiczne, tzn. otrzymywane w procesie spiekania składników w wysokich temperaturach. Mają one bardzo dobre właściwości mechaniczne, zwłaszcza moduł sprężystości podłużnej. Włókna krzemowe znajdują zastosowanie głównie jako zbrojenie do wykonywania kompozytów znajdujących zastosowanie w technice lotniczej, kosmicznej i wojskowej.

W tablicy 2.25 podano charakterystyki wytrzymałościowe włókien SiC o nazwie Nicalon (prod. Nippon Carbon Co.). Włókna te charakteryzuje bardzo wysoka odporność termiczna – do 1300°C, a dla włókien Hi-Nicalon – aż do 1700°C. Znane są również włókna Tyranno firmy Ube.

Włókna Nicalon są pierwszymi włóknami krzemowymi. Uzyskał je japoński naukowiec Setsuko Yajima, w 1976 r.



włókna SiC - Nicalon

Tablica 2.25 – Charakterystyka włókien SiC – Nicalon

Odmiana	Gęstość	Średnica włókna	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości podłużnej
	g/cm ³	μm	GPa	GPa
Ceramic Grade	2.97	2.55	3.0	220
Hi	7.77	2.74	2.8	270
Type-S	24.1	3.1	2.6	410

*Tablica. 2.25
Charakterystyka
wytrzymałościowa
włókien SiC – Nica-
lon (prod. Nippon
Carbon Co.)*

2.2.4. Właściwości włókien technicznych

2.2.4.1. Wiadomości wstępne

Terminologia | W odniesieniu do włókien technicznych (i ogólnie włókien tekstylnych¹⁾) stosowane są następujące specyficzne określenia, związane z długością, ilością i układem włókien. Definicje tych określeń, podawane w różnych źródłach, różnią się nieco między sobą. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich, mające zastosowanie w odniesieniu do wyrobów stosowanych w konstrukcjach membranowych. Definicje określeń – w oparciu o [N-01][N-30][60][204]:

Włókno (włókno tekstylne¹⁾) – giętki element o względnie małej grubości, o wysokiej wartości stosunku długości do grubości, średnicy lub przekroju poprzecznego, przydatny do zastosowań tekstylnych

ang. *textile fibre*



Włókno odcinkowe (nieciągłe, staplowe) – włókno tekstylne o małej średnicy i niewielkiej (ograniczonej) długości

ang. *staple fibre*



Filament – włókno tekstylne o małej średnicy i bardzo dużej długości, uważane za ciągły

ang. *filament*

Monofilament – pojedynczy filament, który jest wystarczająco mocny, aby funkcjonować jako nitka w przemysłowych procesach włókienniczych lub jako jednostka w innych zastosowaniach

ang. *monofilament*

Multifilament – wyrób włókienniczy składający się z równoległych, nie połączonych ze sobą (przez skręt lub preparację) filamentów

ang. *multifilament*

Rowing – wiązka równoległych lub prawie równoległych pasm lub filamentów, połączonych ze sobą bez zamierzonego skrętu

ang. *roving*

Folia tekstylna – ciało tekstylne o postaci folii, której molekuly są z reguły zorientowane w kierunku wzdłużnym

ang. *textile film*



Przędza – wyrób włókienniczy składający się alternatywnie z:

ang. *yarn*

a). pewnej liczby włókien odcinkowych, utrzymywanych razem dzięki skrętowi; są to *przędze z włókien odcinkowych*

ang. *spun yarn*

b). określonej liczby filamentów, utrzymywanych razem dzięki skrętowi; są to *przędze z włókien ciągłych (filamentowe)*.

ang. *filament yarns*

Szczególnym przypadkiem są przędze o skręcie zerowym (multifilamenty).

Nitka – ogólne określenie liniowych wyrobów włókienniczych, ze skrętem lub bez, wykonanych z włókien odcinkowych lub filamentów. Wyroby bez skrętu obejmują multifilament i rowing, wyroby ze skrętem – przędzę. Czasami, potocznie, określenia „nitka” i „przędza” są stosowane zamiennie.

ang. *yarn*

Nitka pojedyncza²⁾ – nitka nieskręcona lub ze skrętem nadanym jej w jednej operacji. Nitka pojedyncza jest w zasadzie monofilamentem lub przędzą.

ang. *single yarn*

¹⁾ Określenie „tekstylny” oznacza tu: „mający zastosowanie do produkcji wyrobów liniowych i powierzchniowych z włókien”. Włókna techniczne są podgrupą włókien tekstylnych stosowaną do wykonywania tekstyliów przemysłowych.

²⁾ Specyficzny typ ogólnego określenia „nitka”

*Nitka łączona (łączona wieloskładowa)*¹⁾ – nitka utworzona z dwóch lub więcej nitek składowych łączonych ze sobą bez wzajemnego skręcenia

ang. *multiple wound yarn*

*Nitka wielokrotna (wielozłożeniowa)*¹⁾ – ogólne określenie nitki utworzonej przez skręcenie ze sobą w jednej operacji dwóch lub więcej nitek. Stosuje się określenia szczegółowe: nitka podwójnie złożona, nitka potrójnie złożona itd. Zamiast terminów: „złożenie”, „składanie” stosuje się także termin „nitkowanie”.

ang. *folded yarn*
multifold yarn

*Nitka kablowana (wielostopniowa)*¹⁾ – nitka utworzona przez skręcenie ze sobą w jednej operacji składania dwóch lub więcej nitek, z których co najmniej jedna jest nitką wielokrotną

ang. *cabled yarn*

*Jedwab*¹⁾ – ogólne określenie nitki składającej się z jednego filamentu lub z większej liczby filamentów, skręconej lub nieskręconej

ang. *filament yarn*
(określenie „rayon” – „sztuczny jedwab”, oznacza włókna wiskozowe)

*Jedwab tasiemkowy*¹⁾ – płaski filament, którego składowe charakteryzujące się dużą wartością stosunku szerokości do grubości są wycinane z folii tekstylnej lub wytłaczane w postaci tasiemek

ang. *tape yarn*

Kabel filamentowy – wielka liczba filamentów stanowiących zespół bez istotnego skrętu, zazwyczaj przeznaczony na pocięcie i / lub rozciąganie połączone z rozrywaniem i następnie zastosowanie w postaci włókien odcinkowych lub taśmy przędnej

ang. *tow*

Preparacja (klejonka) – substancja chemiczna наносzona na powierzchnię włókien elementarnych w procesie ich formowania, w celu ich sklejenia i zabezpieczenia przed uszkodzeniem

ang. *size*
textile size
coupling size
plastic size

Masa liniowa – masa na jednostkę długości nitki (włókna)

ang. *linear density*

Skręt – określony jest przez kierunek skrętu, liczbę skrętu i kąt skrętu

ang. *twist*

Oznaczanie nitek | Do oznaczania nitek stosuje się zwarty, symboliczny opis techniczny, podający ich najważniejsze cechy. Zasady oznaczania nitek podaje norma [N-21]. Stosowane są trzy rodzaje oznaczeń:

- oznaczenie na podstawie masy liniowej nitki pojedynczej
- oznaczenie na podstawie masy liniowej wynikowej
- oznaczenie skrócone

W oznaczeniu podaje się w ustalonej kolejności cechy nitek, rozdzielone odpowiednimi symbolami. W tablicy 2.26 przedstawiono kolejność podawania tych cech dla różnych rodzajów nitek. W oznaczeniach skróconych można pominąć kierunek i/lub liczbę skrętu (w oznaczeniach nitek bezskrętowych należy zachować symbol skrętu zerowego *t0*) oraz liczbę włókien w przędzy wielowłóknowej.

Przykłady oznaczeń nitek wg [N-21]:

- 1). w systemie pojedynczo-wynikowym
 - nitka pojedyncza, przędza z włókien odcinkowych
40 tex Z 660
 - nitka pojedyncza, przędza wielowłóknowa skręcona
133 dtex f 40 S 1000; R 136 dtex¹⁾
 - nitka łączona o identycznych składowych
40 tex S 155 × 2 t0
 - nitka łączona o różnych składowych
(25 tex S 420 + 60 tex Z 80) t0

Przedstawiony tu system oznaczeń jest stosowany również w przemyśle budowlanym. Symboliczny zapis pozwala jednoznacznie zidentyfikować najważniejsze cechy nitek. Przykładowo, oznaczenie:

2100 dtex f 220 Z 80

oznacza: titer całkowity 2100 dtex, składający się z 220 filamentów. Nitka posiada 80 skrętów na metr w kierunku Z (skręt prawy).

¹⁾ Masa liniowa wynikowa (dla końcowego produktu) może być opcjonalnie podana jako informacja dodatkowa. Umieszcza się ją na końcu oznaczenia, oddzieloną średnikiem.

- nitka złożona o identycznych składowych
34 tex S 600 × 2 Z 400; R 69.3 tex¹⁾
- nitka złożona o różnych składowych
(25 tex S 420 + 60 tex Z 80) S 360; R 89.2 tex¹⁾
- nitka kablowana o identycznych składowych
20 tex Z 700 × 2 S 400 × 3 Z 200; R 132 tex¹⁾
- nitka kablowana o różnych składowych
(20 tex Z 700 + 2 S 400 + 34 tex S 600) Z 200; R 96 tex¹⁾

2). w systemie wynikowo-pojedynczym

- nitka pojedyncza, przędza jednowłóknowa skręcona
R 17.4 dtex f1 S 800; 17 dtex²⁾
- nitka pojedyncza, przędza wielowłóknowa skręcona
R 136 dtex f 40 S 1000; 133 dtex²⁾
- nitka złożona o identycznych składowych
R 69.3 tex Z 400/2 S 600; 34 tex²⁾
- nitka złożona o różnych składowych
R 89.2 tex S 360 / (S 420 + Z 80); 25 tex + 60 tex²⁾
- nitka kablowana o identycznych składowych
R 132 tex Z 200/3 S 400/2 Z 700; 20 tex²⁾
- nitka kablowana o różnych składowych
R 96 tex Z 200/(S 600 + S 400/3 Z 700); 34 tex+20 tex × 3²⁾

3). skrócone

w systemie oznaczeń skróconych opuszczane są pewne fragmenty zapisu symbolicznego, w celu jego skrócenia i uproszczenia; masa liniowa nitki oraz ilość włókien z reguły pozostają – określa to norma [N-21].

Tablica 2.26 – Kolejność podawania cech w oznaczeniach nitek, wg [N-21]

	Nitki pojedyncze	Nitki łączone	Nitki złożone	Nitki kablowane
	2	3	4	5
oznaczenie pojedynczo-wynikowe (na podstawie masy liniowej nitki pojedynczej)	• masa liniowa¹⁾ • (symbol $f^{2)}$) • (liczba skręconych włókien)³⁾ • kierunek skrętu lub symbol $t_0$⁴⁾ • liczba skrętu	a). <i>nitki łączone o identycznych składowych</i> • oznaczenie nitki pojedynczej wg kolumny 2 • znak mnożenia × • liczba pojedynczych nitek składowych • symbol t_0 b). <i>nitki łączone o różnych składowych</i> • oznaczenia poszczególnych nitek pojedynczych wg kolumny 2, w nawiasie, połączone znakiem + • symbol t_0	a). <i>nitki złożone o identycznych składowych</i> • oznaczenie nitki pojedynczej wg kolumny 2 • znak mnożenia × • liczba nitek skręconych ze sobą • kierunek skrętu nitki złożonej • liczba skrętu nitki złożonej b). <i>nitki złożone o różnych składowych</i> • oznaczenia poszczególnych nitek pojedynczych wg kolumny 2, w nawiasie, połączone znakiem + • kierunek skrętu nitki złożonej • liczba skrętu nitki złożonej	a). <i>nitki kablowane o identycznych składowych</i> • oznaczenie nitki złożonej wg kolumny 4 • znak mnożenia × • liczba nitek złożonych • kierunek skrętu w kablowaniu • liczba skrętu w kablowaniu b). <i>nitki kablowane o różnych składowych</i> • oznaczenia poszczególnych nitek pojedynczych wg kolumny 2 lub złożonych wg kolumny 4, w nawiasie, połączone znakiem + • kierunek skrętu w kablowaniu • liczba skrętu w kablowaniu
oznaczenie wynikowo-pojedyncze (na podstawie masy liniowej wynikowej)	• symbol $R^{5)}$ • masa liniowa wynikowa • symbol f • (liczba skręconych włókien)³⁾ • kierunek skrętu • liczba skrętu		a). <i>nitki złożone o identycznych składowych</i> • symbol $R^{5)}$ • masa liniowa wynikowa • kierunek skrętu nitki złożonej • znak „łameane”: / • liczba nitek pojedynczych w nitce złożonej • kierunek skrętu nitki pojedynczej • liczba skrętu nitki pojedynczej b). <i>nitki złożone o różnych składowych</i> • symbol $R^{5)}$ • masa liniowa wynikowa • kierunek skrętu nitki złożonej • znak „łameane”: / • kierunek i liczba skrętu nitek pojedynczych, w nawiasie, połączone znakiem +	a). <i>nitki kablowane o identycznych składowych</i> • symbol $R^{5)}$ • masa liniowa wynikowa • kierunek skrętu w kablowaniu • znak „łameane”: / • liczba nitek złożonych w nitce kablowanej • oznaczenie identycznych składowych nitek złożonych wg kolumny 2 b). <i>nitki kablowane o różnych składowych</i> • symbol $R^{5)}$ • masa liniowa wynikowa • kierunek skrętu w kablowaniu • znak „łameane”: / • kierunki i liczby skrętu nitek użytych w kablowaniu, w nawiasach, połączone znakiem +, oddzielone znakiem / od oznaczenia pojedynczych nitek

¹⁾ przed skręceniem, ²⁾ dla przędzy ciągłych (filamentowych), ³⁾ dla przędzy jednowłóknowych – cyfra 1, ⁴⁾ dla przędzy bezskrętowych,

⁵⁾ symbol R oznacza masę liniową wynikową, tj. końcowego produktu.

¹⁾ przed skręceniem, ²⁾ dla przędzy ciągłych (filamentowych), ³⁾ dla przędzy jednowłóknowych – cyfra 1, ⁴⁾ dla przędzy bezskrętowych,
⁵⁾ symbol R oznacza masę liniową wynikową, tj. końcowego produktu.

¹⁾ Patrz przypis nr 1 na stronie poprzedniej.

²⁾ Masa liniowa pojedynczej nitki – opcjonalna informacja dodatkowa na końcu oznaczenia, oddzielona średnikiem.

Skręcanie włókien | Włókna techniczne nie są wykorzystywane bezpośrednio ale uformowane w postaci liniowego wyrobu włókienniczego jakim jest przędza. Wynika to albo z ich ograniczonej długości, jak to jest w przypadku wszystkich włókien odcinkowych albo ze zbyt małej nośności pojedynczego włókna wynikającej z wielkości przekroju poprzecznego (poza włóknami nieorganicznymi). Luźny strumień włókien

jest przetwarzany – po wstępnym uporządkowaniu – w geometrycznie stabilną przędzę (rys. 2.34). Obecnie jest znanych ponad dwadzieścia różnych systemów technologicznych wytwarzania przędzy.

Włókna zachowują w przędzy stabilność na skutek działania dwóch rodzajów sił, uzyskiwanych w wyniku procesu przędzenia [118]:

- sił tarcia
- sił adhezji.

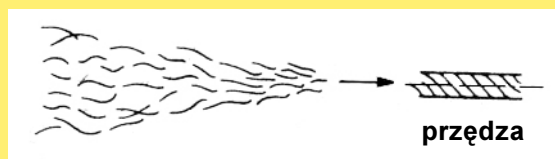
1. Przyleganie włókien na skutek działania sił *tarcia* można uzyskać przez odpowiednie ułożenie włókien, zapewniające ich wzajemny docisk (rys. 2.35).

Podstawowym sposobem jest skręcanie włókien wokół osi podłużnej. Możliwe są dwa kierunki skrętu włókien w przędzy: S – jeżeli kierunek skrętu jest zgodny z kierunkiem pochylenia środkowej części litery S (lewy), oraz Z – jeżeli kierunek skrętu jest zgodny z kierunkiem pochylenia środkowej części litery Z (prawy).

Rysunek 2.36 przedstawia zasadę oznaczania kierunków skrętu włókien w przędzy.

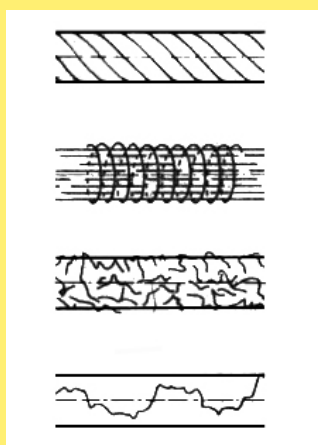
2. Przyleganie włókien na skutek sił *adhezji* uzyskuje się poprzez zastosowanie na etapie formowania przędzy odpowiedniego kleju lub spoiwa (czasami nazywanego preparacją lub klejonką) co powoduje powstanie sił spójności utrzymujących włókna razem.

Przędze mogą być skręcane jedno- i wielokrotnie. Noszą wówczas nazwę nici lub przędzy skręcanej. Rysunek 2.37 przedstawia przykład takich przędz. Skręcanie wielokrotnie również może się odbywać w kierunku S lub Z. W wyniku skręcania przędz pojedynczych wzrasta masa liniowa przędzy skręcanej, zarówno na skutek łączenia przędz, jak i na skutek skurczu przędzy skręcanej. W czasie skręcania przędze skręcają się dookoła osi nici, w wyniku czego tracą lub zyskują



Rys. 2.34 – Przetwarzanie luźnego strumienia włókien w przędzę [118]

przyleganie włókien spowodowane przez:



skręcanie

owijanie

**pilśnienie
(filcowanie)**

migrację

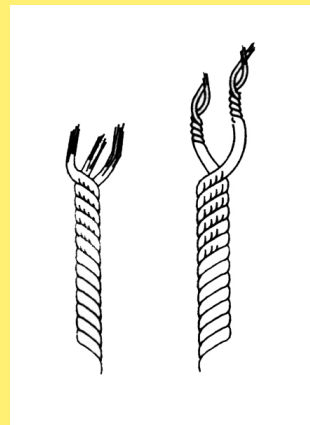
Rys. 2.35 – Sposoby zapewniania przylegania włókien w przędzy na skutek działania sił tarcia [118]



Rys. 2.36 – kierunki skrętu w przędzy [118]:
a). Z (prawy)
b). S (lewy)

dodatkowe skręty. Strata skrętu następuje wówczas, gdy kierunek skrętu przedzdy skręcanej jest przeciwny do kierunku skrętu przedzdy pojedynczej (Z/S, S/Z). Dodatkowy skręt powstaje wówczas, gdy kierunki skrętu przedzdy pojedynczej i skręcanej są zgodne (S/S, Z/Z) [118].

Skręcanie wielokrotne przedzdy jest stosowane m.in. w celu podniesienia jej wytrzymałości na rozciąganie. Zarówno przy skręcaniu zgodnym z pierwotnym skrętem jak i w przeciwnym następuje wzrost siły potrzebnej do zerwania przedzdy, a po osiągnięciu pewnego maksimum – jej spadek. W przedzdy wykorzystanie nośności pojedynczych włókien wynosi najczęściej od 45 % do 60 %.



Rys. 2.37 – jedno- i wielokrotne skręcanie przedzdy (nici) [199]

Istotnym parametrem przedzdy, mającym wpływ na właściwości i wygląd tkaniny jest **liczba skrętu**. Oznacza ona liczbę obrotów na jednostkę długości nitki (zwykle na 1 m). Liczba skrętu wpływa na jej wytrzymałość, ściśliwość, rozciągliwość i połysk.

Poza liczbą skrętu nitki na jednostkę jej długości, można skręt charakteryzować **kątem skrętu**. Jest to kąt, jaki tworzą włókna na powierzchni nitki z jej osią. Proces tworzenia przedzdy z włókien staplowych jest niemożliwy poniżej pewnej wartości współczynnika skrętu. Powyżej tej minimalnej wartości, która zależy od długości, grubości i warunków tarcia włókien, wytrzymałość przedzdy rośnie na początku dość gwałtownie, gdyż zmniejsza się jej wytrzymałość na rozciąganie, ze względu na wyslizgiwanie się włókien. Jednocześnie występuje wzrost kąta skrętu, co prowadzi do zmniejszenia się wytrzymałości przedzdy, początkowo więc będzie ona rosła, w wyniku wpływu pierwszego czynnika, a następnie malała, gdyż wpływ drugiego czynnika stanie się decydujący. Współczynnik skrętu dający maksymalną wytrzymałość przedzdy na rozciąganie niekoniecznie odpowiada maksymalnej wytrzymałości tkaniny, gdyż w tkaninie przedza jest dodatkowo ściśnięta i jej wewnętrzne naprężenia zwiększają się. Współczynnik skrętu odpowiadający maksymalnej wytrzymałości nitki prowadzi do otrzymania twardej, zwartej przedzdy. Z tych powodów przedze z włókien staplowych wytwarza się z niższym współczynnikiem skrętu.

Dla przedzdy z włókien ciągłych wpływ skrętu na jej wytrzymałość jest odwrotny, tzn. wzrost kąta skrętu powoduje zmniejszenie się wytrzymałości, gdyż nie występuje wyslizgiwanie się pojedynczych włókien [143].

Wytrzymałość przedzdy rzadko osiąga połowę sumy wytrzymałości pojedynczych włókien składowych, z kilku następujących powodów:

- niektóre włókna przenoszą większą część obciążenia z powodu ich większej wytrzymałości lub niedoskonałości struktury przedzdy; jeśli kilka z tych zbyt obciążonych włókien zerwie się przedwcześnie, to obciążenie rozłoży się na pozostałe, prowadząc do zmniejszenia wytrzymałości nitki
- włókna w skręconej przedzdy leżą pod kątem do jej osi i tylko część naprężenia przenoszona jest wzdłuż osi włókna
- przedza zrywa się w najsłabszym miejscu, tak że nieodłącznie występująca nierównomierność jej struktury prowadzi do obniżenia jej wytrzymałości
- w nitce niskoskrętowej może pojawić się zjawisko wyslizgiwania się włókien, zamiast ich zrywania

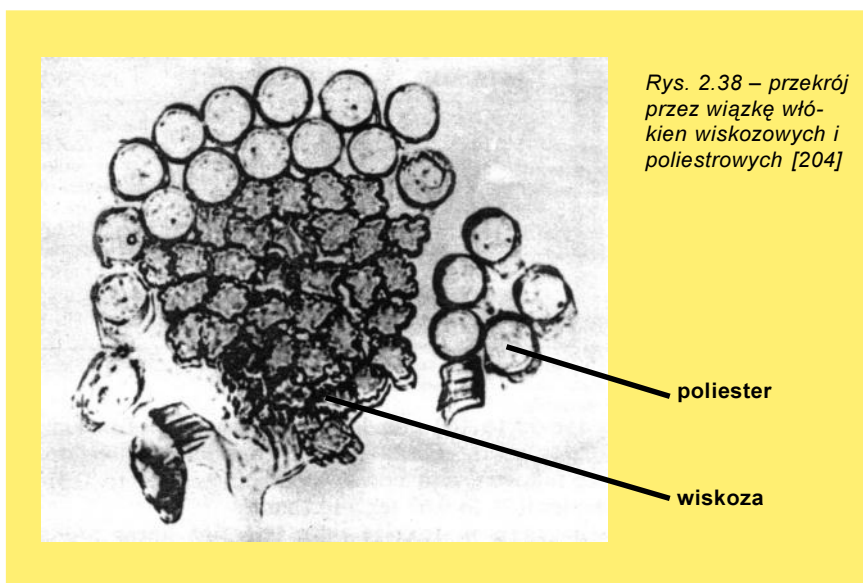
Podział właściwości włókien | Włókna techniczne mogą być klasyfikowane ze względu na bardzo różne właściwości, decydujące o ich przydatności do określonych zastosowań. Właściwości te można podzielić na jedenaście grup: geometryczne, powierzchniowe, mechaniczne, termiczne, chemiczne, optyczne, elektryczne, magnetyczne, akustyczne, biochemiczne, fizjologiczne [204].

Poniżej omówiono szerzej właściwości geometryczne i mechaniczne włókien technicznych, jako mające najistotniejsze znaczenie ze względu na zastosowania w budownictwie.

2.2.4.2. Właściwości geometryczne włókien

Długość włókien | Długość włókien może zmieniać się w dość szerokim zakresie. Włókna odcinkowe naturalne mają długość od 1.5 do 400 cm. Włókna odcinkowe chemiczne mają długość $30 \div 60$ mm (dla włókien podobnych do bawełny), $55 \div 150$ mm (dla włókien podobnych do wełny), a dla pozostałych rodzajów mogą być znacznie dłuższe.

Przekrój włókien | Włókna techniczne mogą mieć przekrój o bardzo różnym kształcie. W przypadku włókien chemicznych zależy on od kształtu dysz formujących włókno. Produkowane są włókna o kształtach trójkątnych, gwiaździstych, wielokątnych, zębatych, wielopłatkowych, nerkowych, puste w środku i inne [204]. Na rysunku 2.38 przedstawiono przekrój przez wiązkę włókien wiskozych i poliestrowych, o wyraźnie różniących się kształtach przekroju poprzecznego. Ogólnie jest on jednak zwykle zbliżony do kształtu kołowego. Kształt przekroju poprzecznego włókna ma wpływ na jego właściwości mechaniczne, powierzchniowe itp. Zwłaszcza w przemyśle tekstylnym odpowiedni kształt przekroju pozwala uzyskać włókna o odmiennych walorach estetycznych (np. połysk) i użytkowych (np. skłonność do pillingu).



Rys. 2.38 – przekrój przez wiązkę włókien wiskozych i poliestrowych [204]

poliester

wiskoza

Ponieważ dla większości włókien bezpośredni pomiar średnicy jest trudny, wyznacza się ją na podstawie masy liniowej włókna ze wzoru (2.3) [204]:

$$r = \sqrt{\frac{T_{tex}}{\pi \rho}} \cdot 10^{-3} \quad [m] \quad (2.3)$$

gdzie: r – promień włókna okrągłego odpowiadający jego masie liniowej
 T_{tex} – masa liniowa włókna [tex]
 ρ – masa właściwa włókna [kg/m³]

2.2.4.3. Właściwości mechaniczne włókien

Masa liniowa włókien | W technice włókienniczej nie stosuje się jednostek tradycyjnie stosowanych w budownictwie, gdyż ze względu na małe rozmiary nie można dokładnie zmierzyć przekroju włókien. Dlatego też od dawna stosuje się metodę ważenia włókien o określonej długości, czyli określania ich masy liniowej. Znając masę liniową oraz masę właściwą włókien, można obliczyć ze wzoru (2.3) ich średnicę a następnie przekrój poprzeczny. Masa liniowa włókien (przędzy, nitki) wyrażona w określonym systemie nazywana jest **numerem włókna** (przędzy, nitki) lub **titrem**.

Istnieje kilkadziesiąt tradycyjnych systemów numeracji włókienniczej. Posługują się one jednostkami masy i długości stosowanymi w przeszłości

dla określonych włókien i na określonych obszarach. Szczególnie dużo takich systemów jest stosowanych w krajach anglosaskich. Dzieli się one na systemy bezpośrednie (jedn. masy / jedn. długości) i pośrednie (jedn. długości / jedn. masy).

Tablica 2.27 – Zamiana tradycyjnej numeracji włókienniczej na numerację w systemie Tex, wg [N-15] [204]

Systemy bezpośrednie numeracji przędzy					
System	Symbol skrótowy wg [N-15]	Jednostka			Współczynnik przeliczeniowy na Tex
		masy	długości	numeracji nitki	
Tex	Tt	1 gram	kilometr	g / km	1
Denier	Td	1 gram	9 000 m	g / 9 000 m	0.1111
Jutowy, konopny, lniarski (suche przędzenie)	Tj	1 funt ³⁾	14 400 jardów ⁴⁾ (spyndle)	lb / 14 400 yd	34.45
Jedwabniczy		1 dram ¹⁾	1 000 jardów ⁴⁾	dr / 1000 yd	1.938
Wełniarski Aberdeen		1 funt ³⁾	14 400 jardów ⁴⁾	lb / 14 400 yd	34.45
Wełniarski American Grain		1 gran ²⁾	20 jardów ⁴⁾	gr / 20 yd	3.543
Systemy pośrednie numeracji przędzy					
System	Symbol skrótowy wg [N-15]	Jednostka			Współczynnik przeliczeniowy na Tex
		długości	masy	numeracji nitki	
Bawełniarski (ang.)	Ne _c	840 jardów ⁴⁾ (hank)	1 funt ³⁾	840 yd / lb	590.5
Bawełniarski (kontynent.)		1 kilometr	1 kilograma	km / 0.5 kg	500
Bawełniarski (bump yarn)		1 jard ⁴⁾	1 uncja ²⁾	yd / oz	31 000
Lniarski (mokre lub suche przędzenie)	Ne _L	300 jardów ⁴⁾ (lea)	1 funt ³⁾	300 / lb	1 654
Metryczny	Nm	1 kilometr	1 kilogram	km / kg	1 000
Jedwabniczy		840 jardów ⁴⁾ (hank)	1 funt ³⁾	840 / lb	590.5
Wełniarski czesankowy	Ne _w	560 jardów ⁴⁾ (hank)	1 funt ³⁾	560 yd / lb	885.8
Wełniarski Alloa		11 520 jardów ⁴⁾ (spyndle)	24 funty ³⁾	11 520 yd / 24 lb	1 033
Wełniarski American cut		300 jardów ⁴⁾ (cut)	1 funt ³⁾	300 yd / lb	1 654
Wełniarski American run		100 jardów ⁴⁾	1 uncja ⁵⁾	100 yd / oz	310.0
Wełniarski Dewsbury		1 jard ⁴⁾	1 uncja ⁵⁾	yd / oz	31 000
Wełniarski Galashiels		300 jardów ⁴⁾ (cut)	24 uncje ⁵⁾	300 yd / 24 oz	2 480
Wełniarski Hawick		300 jardów ⁴⁾ (cut)	26 uncje ⁵⁾	300 yd / 26 oz	2 687
Wełniarski West of England		320 jardów ⁴⁾ (snap)	1 funt ³⁾	320 / lb	1 550
Wełniarski Yorkshire		256 jardów ⁴⁾ (skein)	1 funt ³⁾	256 yd / lb	1 938
Wełniarski Yorkshire		1 jard ⁴⁾	1 dram ¹⁾	yd / dram	1938
Azbest (amer.)		100 jardów ⁴⁾ (cut)	1 funt ³⁾	100 yd / lb	4 960
Azbest (ang.)		50 jardów ⁴⁾	1 funt ³⁾	50 yd / lb	9 921
Szkło (amer. i ang.)		100 jardów ⁴⁾	1 funt ³⁾	100 yd / lb	4 960

¹⁾ 1 dram (dr) = 1.77 g

²⁾ 1 gran, ang. *grain* (gr) = 0.0648 g

³⁾ 1 funt (lb) = 453.6 g

⁴⁾ 1 jard (yd) = 0.914 m

⁵⁾ 1 uncja *handl.* (oz) = 28.35 g

Obecnie przyjęty jest międzynarodowy system numeracji nazywany **systemem Tex** [N-20]. Posługuje się on jednostką titru:

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ gram (masy włókna)} / 1 \text{ kilometr (długości włókna)}.$$

Rozpowszechniona jest – szczególnie dla włókien syntetycznych – jednostka pochodna: decytex (**dtex**) równa 1/10 tex. Jeden decytex wyraża w gramach masę 10 km włókna.

Zamiana tradycyjnych jednostek numeracji włókienniczej na numerację w systemie Tex jest przedstawiona w tablicy 2.27 [N-15] [60].

Wytrzymałość włókien | Wytrzymałość włókien jest określana jako maksymalna siła powodująca ich zniszczenie w danym stanie naprężeń (rozciąganie, skręcanie, zginanie itp.)

Ze względu na wspomniane powyżej problemy z określaniem przekroju poprzecznego włókien, ich wytrzymałość jest podawana jako siła odniesiona do masy liniowej. Jednostką, w której wyraża się obecnie wytrzymałość włókien jest **N/tex**, oraz **N/dtex**. Wcześniej stosowano tradycyjne jednostki siły: *gramy* (g) i *pondy*¹⁾ (p) oraz masy liniowej: *deniery* (den), czasami w połączeniu z systemem Tex. Prowadziło to do wyrażania wytrzymałości włókien w takich jednostkach jak: g/den, p/den, p/tex, kp/tex, p/dtex.

Często stosowany przelicznik wynosi [204]: 1 g/den = 0.0883 N/tex

Stosowane jest także określenie *wytrzymałość względna*, oznaczające w procentach wartość odniesioną do wytrzymałości podstawowej. Stosowane jest często przy oznaczaniu wytrzymałości włókien w określonych warunkach, np. wytrzymałość włókien mokrych w odniesieniu do wytrzymałości włókien suchych.

Wartości wytrzymałości dla najważniejszych naturalnych organicznych włókien technicznych zestawiono w tablicy 2.1, dla włókien chemicznych – w tablicach 2.10 i 1.11, a dla włókien nieorganicznych – w tablicach 2.13, 2.20, 2.24 i 2.25.

Cechy sprężyste włókien | Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla włókien tekstylnych przedstawiono na rys. 2.39. Poniżej podano definicje podstawowych pojęć stosowanych przy opisie sprężystej pracy włókien [204]. Wartości cech sprężystych zestawiono w tablicach cytowanych powyżej.

Przez *wydłużenie przy zerwaniu* włókna rozumiemy zwiększenie jego długości w procentach długości początkowej w momencie zniszczenia, w danym stanie naprężeń.

Krzywa pracy (wykres naprężenie – odkształcenie) jest to linia przedstawiająca zależność pomiędzy wielkością siły rozciągającej we włóknie, a jego odkształceniem.

Praca zniszczenia (*L*) jest definiowana jako obszar OAPB na rysunku 2.39 i wyrażana w dżulach (J).

Współczynnik pracy (*F*) jest definiowany zależnością (2.4), oznaczenia według rysunku 2.39:

$$F = \frac{\text{praca zniszczenia}}{\text{wytrzymałość} \times \text{wydłużenie przy zniszczeniu}} = \frac{L}{\overline{OC} \times \overline{OB}} \quad (2.4)$$

Współczynnik pracy jest zawsze mniejszy od jedności. Jest to wielkość bezwymiarowa. Wartości współczynnika pracy dla podstawowych włókien zostały podane w tablicy 2.1 i 2.10.

Znając wytrzymałość włókna wyrażoną w [N/tex] można – dla orientacji – wyrazić ją w [MPa], korzystając ze wzoru:

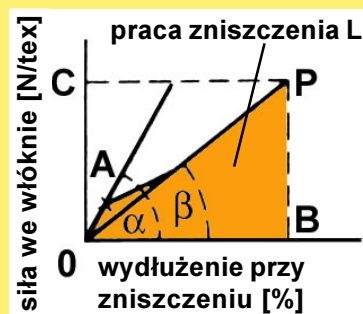
$$f_{MPa} = \rho \times f_{N/tex}$$

gdzie:

f_{MPa} – wytrzymałość włókna w [MPa]

$f_{N/tex}$ – wytrzymałość włókna w [N/tex]

ρ – gęstość materiału włókna w [kg/m³]



Rys. 2.39 – zależność naprężenie–odkształcenie dla włókien tekstylnych [5.2]

¹⁾ Pond (p) jest jednostką siły w układzie technicznym, odpowiadająca co do wartości jednemu gramowi siły (G): 1 p = 1 G. Obydwie jednostki są obecnie nielegalne.

Początkowy moduł sprężystości jest definiowany jako tangens kąta α ($\angle AOB$ na rysunku 2.25).

Sztywność średnia jest definiowana zależnością (2.5), oznaczenia według rysunku 2.39:

$$100 \text{ tg } \beta = 100 \times \frac{\text{wytrzymałość}}{\text{wydłużenie przy zniszczeniu}} \quad (2.5)$$

Współczynnik ciągliwości jest określony zależnością (2.6), oznaczenia według rysunku 2.39:

$$\text{współczynnik ciągliwości} = \frac{\overline{OC} \times \overline{OB}}{2 \cdot 100} \quad (2.6)$$

Sprężystość (współczynnik sprężystego powrotu) jest definiowany jako stosunek (2.7):

$$\text{sprężystość} = \frac{\text{wydłużenie sprężyste}}{\text{wydłużenie całkowite}} \quad (2.7)$$

Wytrzymałość skrętna włókien jest najczęściej wyrażana poprzez tzw. krytyczny kąt skręcania γ (2.8):

$$\text{tg } \gamma = \frac{r \cdot d_c}{\pi} \quad (2.8)$$

gdzie: r – średnica włókna [cm]
 d_c – krytyczny kąt obrotu

Index LOI | Index LOI (ang. Limiting Oxygene Index) określa minimalną zawartość tlenu w otoczeniu włókna, aby możliwe było jego spalanie. Przy wartościach $\text{LOI} \geq 0.2683$ włókno nie ulegnie zapalniu w otoczeniu powietrza. Index ten wyznacza się z zależności (2.9):

$$\text{LOI} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.9)$$

gdzie: V_1 – objętość tlenu
 V_2 – objętość azotu

Wartość $\text{LOI} = 0.2683$ wyznaczono dla powietrza o przeciętnej zawartości azotu $V_2 = 78.09\%$ i tlenu $V_1 = 20.95\%$

2.3. Wyroby liniowe z włókien technicznych – liny włókienne

2.3.1. Wiadomości wstępne

Podstawowe określenia | Według normy [N-31], wyróżnia się następujące rodzaje wyrobów liniowych z włókien technicznych (nazywanych inaczej wyrobami powroźniczymi):

Sznurek¹⁾ – wyrób powroźniczy o średnicy $1.5 \text{ mm} \leq d \leq 4.0 \text{ mm}$

ang. twine

Sznur – wyrób powroźniczy o średnicy $4.0 \text{ mm} < d \leq 8.0 \text{ mm}$

Linka – wyrób powroźniczy o średnicy $8.0 \text{ mm} < d \leq 20.0 \text{ mm}$

Lina²⁾ – wyrób powroźniczy o średnicy $d > 20 \text{ mm}$

ang. rope

Ponadto stosowane są m.in. następujące określenia wg [N-31] i [N-32]:

Rdzeń – element wypełniający lub nośny wyrobu powroźniczego, biegnący w środku wzdłuż osi wyrobu i nie połączony z żyłami przez skręcanie lub splatanie, służący do przytrzymywania spletek

ang. core

Splotka – wyrób otrzymany w wyniku połączenia i skręcenia razem kilku nitek lub grup nitek złożonych lub złożonych i pojedynczych, skręcanych razem w jednej lub więcej operacji składania (czasami używane jest też określenie żyła)

ang. strand

Lina kablowana – lina wykonana przez skręcenie trzech lin skręconych w kierunku odwrotnym do skrętu tych lin

ang. cabled rope

¹⁾ Norma [N-32] definiuje sznurek jako: „wyrób składający się z jednej lub więcej nitek skręconych lub przewijanych w postaci struktury o ciągłej długości”.

²⁾ Norma [N-32] definiuje linę jako: „wyrób tekstylny o średnicy nie mniejszej niż 4 mm, na ogół składający się z trzech lub czterech spletek kablowanych splatanych razem, z rdzeniem lub bez”.

Lina kombinowana¹⁾ – lina wykonana przez połączenie nitki z włókien naturalnych lub chemicznych z drutami stalowymi (galwanizowanymi lub nie) w jeden wyrób powroźniczy

ang. combined rope

Numer referencyjny – przybliżona średnica liny zmierzona przy zerowym naprężeniu

ang. reference number

Skok liny – długość jednego pełnego obrotu splotki²⁾ lub odległość między dwoma kolejnymi punktami przeplotu tej samej splotki³⁾, mierzona równolegle do osi liny, wyrażona w mm.

ang. lay

Średnica liny – średnica koła opisanego na przekroju poprzecznym liny, mierzona w pod zadany obciążeniem i przyjętą metodą

ang. diameter

Skręt liny – liczba obrotów splotki na 1 m długości liny

ang. twist

Kąt skrętu liny – Kąt pochylenia splotek w stosunku o osi liny; może być wyrażony tangensem w radianach

ang. angle of lay

Naprężenie pomiarowe – siła przyłożona do liny w chwili pomiaru jej podstawowych właściwości (np. gęstości liniowej, średnicy)

ang. tension for measurement

Obciążenie zrywające – maksymalna siła, jaką lina jest zdolna wytrzymać podczas rozciągania

ang. breaking load

Współczynnik zrywu – obciążenie zrywające odniesione do masy liniowej liny

ang. breaking factor

Współczynnik obliczeniowy – współczynnik do obliczania obciążenia zrywającego liny na podstawie obciążenia zrywającego jej części składowych

ang. realization factor

Surowce | Do wykonywania lin włókiennych należy używać nowych, nie używanych włókien naturalnych lub chemicznych. Spośród włókien naturalnych stosuje się włókna pochodzące z: manili, sizalu, konopii, bawełny, lnu i kokosu. Spośród włókien chemicznych, do wykonywania lin stosuje się włókna: poliamidowe (nylonowe), poliestrowe, polipropylenowe, polietylenowe i winylowe.

Według normy [N-33] liny z włókien naturalnych mogą być wykonywane wyłącznie z manili lub sizalu, o gęstości ok. 1.35 kg/m³. Pozostaje to w pewnej sprzeczności z innymi normami, które wymieniają również włókna konopne i lniane – [N-24] [N-35] [N-25]. Według tej samej normy [N-33] liny z włókien chemicznych mogą być wykonywane z wymienionych wyżej włókien oprócz włókien winylowych. Powinny one spełniać wymagania podane w tablicy 2.28.

Tablica 2.28 – Włókna chemiczne stosowane do wyrobu lin wg [N-33]

Włókno	Przybliżona gęstość kg/dm ³	Rodzaj nitki
Poliamid	1.14	multifilament
Poliester	1.38	multifilament
Polipropylen	0.91	monofilament multifilament folia
Polietylen	0.96	monofilament

Tablica. 2.28
Włókna chemiczne stosowane do wyrobu lin według normy [N-33].

Znakowanie lin | Liny włókienne są znakowane kolorową nitką lub tasiemką umieszczoną w każdej splotce, w taki sposób aby była możliwa do rozpoznania pomimo zabrudzenia, zamoczenia lub wypłowienia w czasie użytkowania. Jeżeli numer referencyjny liny wynosi więcej niż 12, do znakowania używa się tasiemki o szerokości min. 3 mm, znakowaną numerem referencyjnym odpowiedniej normy i identyfikatorem producenta. Kolory stosowane do oznaczania lin, określone przez normę [N-33] podano w tablicy 2.29.

Tablica 2.29 – Znakowanie lin

Materiał	Kolor
Manila	czarny
Sizal	czerwony
Poliamid	zielony
Poliester	niebieski
Polipropylen	pomarańczowy
Polietylen	brazowy

Tablica. 2.29
Znakowanie lin włókiennych kolorową nitką lub tasiemką, według [N-33]. Według [N-24] kolor zielony jest stosowany do znakowania lin konopnych.

¹⁾ Norma [N-32] używa określenia: „lina łączona”

²⁾ Dla lin kręconych używane jest też równoważne określenie „skok skrętu liny”

³⁾ Dla lin plecionych używane jest też równoważne określenie „skok splotu liny”

2.3.2. Budowa lin włókiennych

Ze względu na budowę wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje lin włókiennych:

- liny kręcone
- liny plecione
- specjalne

ang. twisted rope
ang. braided rope
plaited rope

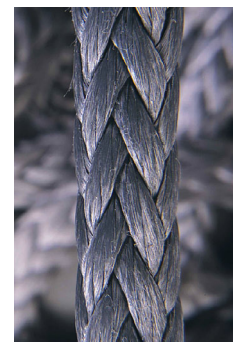
Liny kręcone | Liny kręcone powstają przez wzajemne skręcenie nitek¹⁾, które mogą być pojedyncze, wielokrotne lub kablowane — w splotkę²⁾, a następnie splotek w linę. Liny te mogą być z rdzeniem lub bez niego. Schemat budowy liny włókiennej kręconej przedstawia rys. 2.40.

Liny trójsplotkowe są bezrdzeniowe, a liny czterosplotkowe najczęściej mają centralny rdzeń [N-33].

Liny kręcone mogą mieć jeden z dwóch kierunków skrętu: S (lewoskrętne) lub Z (prawoskrętne). Sposób oznaczania tych kierunków przedstawiono na rys. 2.41. Jeżeli nie podano inaczej, liny powinny mieć skręt Z, ich splotki skręt S i ich nitki skręt Z [N-33]. Zwykle nitki w splotce mają skręt przeciwny niż splotki w linie, co powoduje stabilność budowy liny.

Ze względu na ilość i układ splotek w linie wyróżnia się liny kręcone:

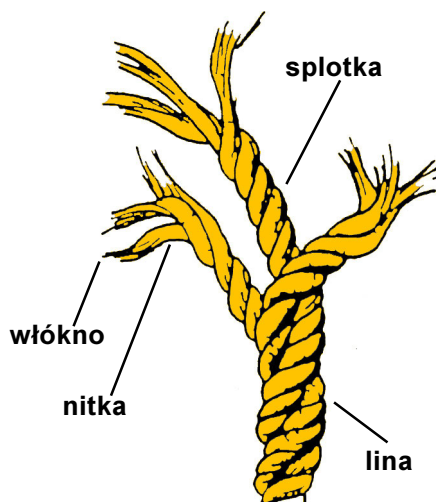
- trójsplotkowe, bez rdzenia (rodzaj A³⁾)
- czterosplotkowe, z rdzeniem (rodzaj B³⁾)
- kablowane, dziewięciosplotkowe – trzy warstwy splotek (rodzaj C³⁾)



lina włókienna [5.66]

Największa lina włókienna jaka została kiedykolwiek wyprodukowana była to lina z włókna kokosowego o obwodzie 47 cali (119 cm), tj. o średnicy 38 cm, wykonana w roku 1858 dla brytyjskiego liniowca Great Eastern przez Johna i Edwina Wright z Birmingham. Składała się z czterech splotów, każdy długości 3780 jardów (3455 m).

Najdłuższa lina włókienna jaka została kiedykolwiek wyprodukowana bez łączenia, była to lina o długości 10 000 sążni tj. 11.36 mili (18 288 m), o obwodzie 6.5 cala (16.5 cm) wykonana w 1874 r. z manili przez firmę Frost Brothers z Londynu, która później weszła w skład British Ropes Ltd. (obecnie Brindon Ltd.) [233].



Rys. 2.40 – budowa lin włókiennych kręconych; na podstawie [176]

Schemat przekroju poprzecznego lin trójsplotkowych i czterosplotkowych wg [N-24] przedstawia rysunek 2.42.a) i b). Widok liny kręconej trójsplotkowej przedstawia rys. 2.42.c).



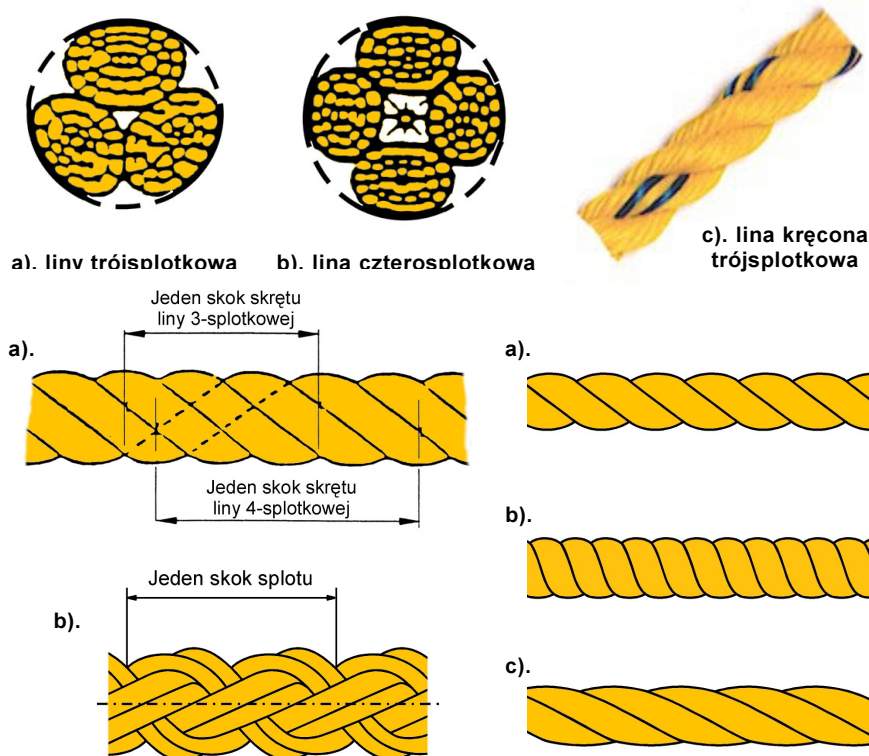
Rys. 2.41 – kierunki skrętu lin włókiennych; na podstawie [94]

¹⁾ Stosowana bywa nazwa zwyczajowa „skrętka”, nie używana w normach.

²⁾ Stosowana bywa nazwa zwyczajowa „żyła”, nie używana w normach.

³⁾ Oznaczenia literowe rodzajów lin przyjmowane są w normach dotyczących każdego typu lin (zależnie od materiału), na podstawie normy [N-33].

Dla lin kręconych i plecionych określony jest maksymalny skok skrętu splotek, jako wielokrotność numeru referencyjnego liny. Wartości te podano w tabelicy 2.30. Sposób pomiaru skoku skrętu przedstawia rys. 2.43.a). Na rysunku 2.44 przedstawiono przykłady lin o różnym skręcie.



Rys. 2.42 – schemat przekroju poprzecznego lin:
a). trójspłotkowych
b). czterospłotkowych według [N-24]
c). widok liny kręconej trójspłotkowej. Wg materiałów firmy Wall Rope Inc. [233]

Rys. 2.43 – sposób określania:
a). skoku skrętu lin kręconych
b). skoku splotu lin plecionych według [N-34]

Rys. 2.44 – liny o różnym skręcie:
a). podstawowym (ang. standard twist)
b). gęstym (ang. hard twist)
c). luźnym (ang. soft twist) według [204]

Tabela 2.30 – Maksymalny skok skrętu lin wg [N-33]

Surowiec liny	Maksymalny skok liny		
	trójspłotkowa	czterospłotkowa	ośmiospłotkowa
Manila	$3.5 \times rn$	$4.5 \times rn$	–
Sizal	$3.5 \times rn$	$4.5 \times rn$	–
Poliamid	$3.5 \times rn$	–	$3.8 \times rn$
Poliester	$3.5 \times rn$	–	$3.8 \times rn$
Polipropylen	$3.7 \times rn$	$4.8 \times rn$	$4.0 \times rn$
Polietylen	$3.6 \times rn$	$4.8 \times rn$	–

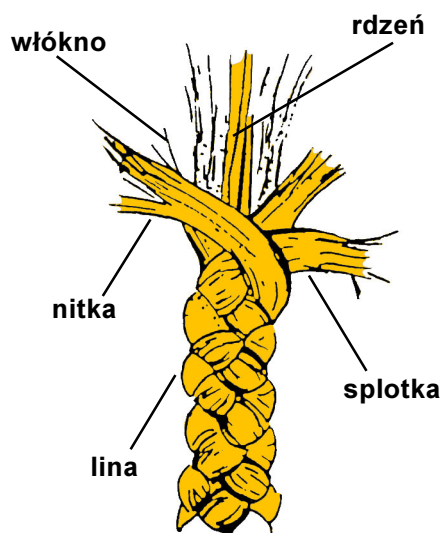
rn oznacza numer referencyjny (średnicę nominalną) liny

Tabela 2.30
Maksymalny skok skrętu lin włókiennych kręconych i plecionych, według [N-33].

Liny plecione | Liny plecione¹⁾ powstają przez wzajemne splatanie parzystej lub nieparzystej liczby nitek, które mogą być pojedyncze, łączone lub wielokrotne. Liny te mogą być z rdzeniem lub bez niego.

Splotki w linach plecionych są też nazywane sekcjami plecionymi [N-24]. *Splotka (sekcja pleciona)* jest to element na obwodzie lin plecionych składający się z nitek (pojedynczych, łączonych lub wielokrotnych).

Liny plecione dzieli się ze względu na ilość i układ splotek w lince. Liny mogą być plecione w jednym kierunku (plecionka spiralna) lub w przeciwnym kierunku (plecionka krzyżowa). Schemat budowy liny włókiennej plecionej przedstawia rys. 2.45.



Angielskie określenie „braided rope” jest stosowane najczęściej do lin 12-splotkowych (czasami również do lin plecionych podwójnie, które mają podobne właściwości), a określenie „plaited rope” – najczęściej do lin 8-splotkowych.

Rys. 2.45 – budowa liny włókiennej plecionej; na podstawie [176]

¹⁾ Stosowana jest też nazwa „plecionka” [N-24].

Według norm PN-EN, dotyczących lin włókiennych ogólnego przeznaczenia, liny plecione mogą być wykonywane jako:

- ośmiosplotkowe, bez rdzenia (rodzaj L¹⁾) – rys. 2.46.a).
- plecione okrężnie, z rdzeniem jeśli liczba splotek $T \geq 10$ (rodzaj E¹⁾)

Ponadto, produkowane są też liny plecione nie wymienione przez w/w normy [94][176][233]:

- dwunastosplotkowe splatane pojedynczo – rys. 2.46.b).
- szesnastosplotkowe splatane pojedynczo – rys. 2.46.c).
- czterosplotkowe, tzw. Nelson – rys. 2.46.d).
- splatane podwójnie – rys. 2.46.e).

ang. double braid
braid on braid



Rys. 2.46 – Liny plecione:
a). lina ośmiosplotkowa
b). lina dwunastosplotkowa
c). lina szesnastosplotkowa
d). lina czterosplotkowa tzw. Nelson
e). lina pleciona podwójnie
Poz. a). b). c). d). – na podstawie katalogu firmy Wall Ropes Inc. USA [233], poz. d). – wg [94]

Liny plecione mogą być wykonywane na bardzo wiele sposobów, w zależności od ilości splotek, sposobu wykonania splotu, użytych włókien itp. Pozwala to obecnie wykonywać liny „dedykowane”, tj. wykonane specjalnie do określonych, wąskich zastosowań, np. liny holownicze, liny cumownicze, zawiesia do dźwigów, liny do osprzętu morskiego, liny dla statków rybackich, liny żeglarskie, alpinistyczne, liny dla hodowców bydła itd. Szczególne możliwości kształtowania właściwości lin daje wykonywanie ich ze splotek z różnych rodzajów włókna, np. splotki wewnętrzne – nylonowe, a splotki zewnętrzne – poliestrowe. Zapewnia to wysoką odporność na ścieranie i dużą nośność liny.

Liny specjalne | Tą nazwą określane są liny, których nie można jednoznacznie zakwalifikować jako skręcane lub plecione. Nie tworzą one jednej, spójnej pod względem budowy grupy. Można tu wymienić:

- liny o włóknach równoległych, w oplocie ochronnym
- liny plecione przestrzennie

Liny plecione przestrzennie są właściwie podgrupą lin plecionych, jednak różnią się od nich wyraźnie kształtem i przeznaczeniem. Są to liny, których przekrój poprzeczny nie jest okrągły lub płaski, jak dla zwykłych lin plecionych ale np. kwadratowy, w kształcie litery U lub T, pusty w środku lub inny.

ang. 3-D braided rope

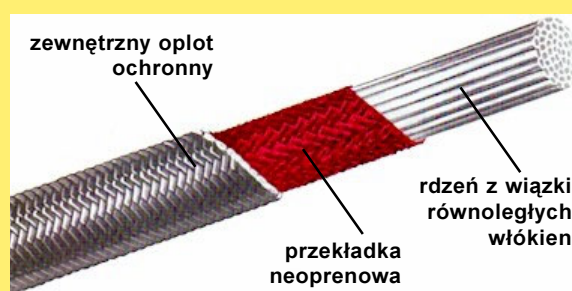
¹⁾ Oznaczenia literowe rodzajów lin przyjmowane są w normach dotyczących każdego typu lin (zależnie od materiału), na podstawie normy [N-33].

Wykonywane są przede wszystkim z wysokowytrzymałych włókien chemicznych, takich jak włókna węglowe, aramidowe lub szklane. Tego typu liny są przeznaczone dla zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i kosmicznym oraz w medycynie. Przewiduje się także ich zastosowanie w konstrukcjach mostowych. Wykonywanie lin plecionych przestrzennie wymaga zastosowania specjalnych, unikalnych urządzeń.

Liny o włóknach równoległych w oplocie ochronnym są wykonywane w celu uzyskania maksymalnej nośności dla danego rodzaju włókna oraz zminimalizowania wydłużenia podczas rozciągania. Wewnętrzna część liny – rdzeń składa się z wiązki równoległych włókien nie połączonych ze sobą poprzez skręt lub splatanie. Część zewnętrzną stanowi spleciona warstwa włókien (najczęściej innego rodzaju), dostosowana do przeznaczenia liny, np. zapewniająca wysoka odporność na ścieranie lub pewność uchwycenia przez człowieka. Obie warstwy są oddzielone elastyczną przekładką, np. neoprenową. Przykład takiej liny – Uniline prod. Wall Ropes Inc., przedstawia rys. 2.47.

Dodatkowa zaleta tego typu lin to 100 % wykorzystanie nośności poszczególnych włókien. Liny takie nie załamują się i nie skręcają. Można umieścić wewnątrz nich dodatkowy element, np. przewód elektryczny, włókno optyczne itp. Przeznaczone są do

bardzo odpowiedzialnych i wymagających zastosowań, np. na morskich platformach wiertniczych, w oceanografii, w sprzęcie ratunkowym i zabezpieczającym i podobnych. Odmianą tego typu lin są liny o rdzeniu z wiązki równoległych włókien stalowych w oplocie ochronnym (np. LST Mooring Line prod. Wall Ropes).



Rys. 2.47 – budowa liny o włóknach równoległych, w oplocie ochronnym: lina Uniline firmy Wall Rope Inc. Jest ona produkowana w zakresie średnic od 9 do 48 mm [233]

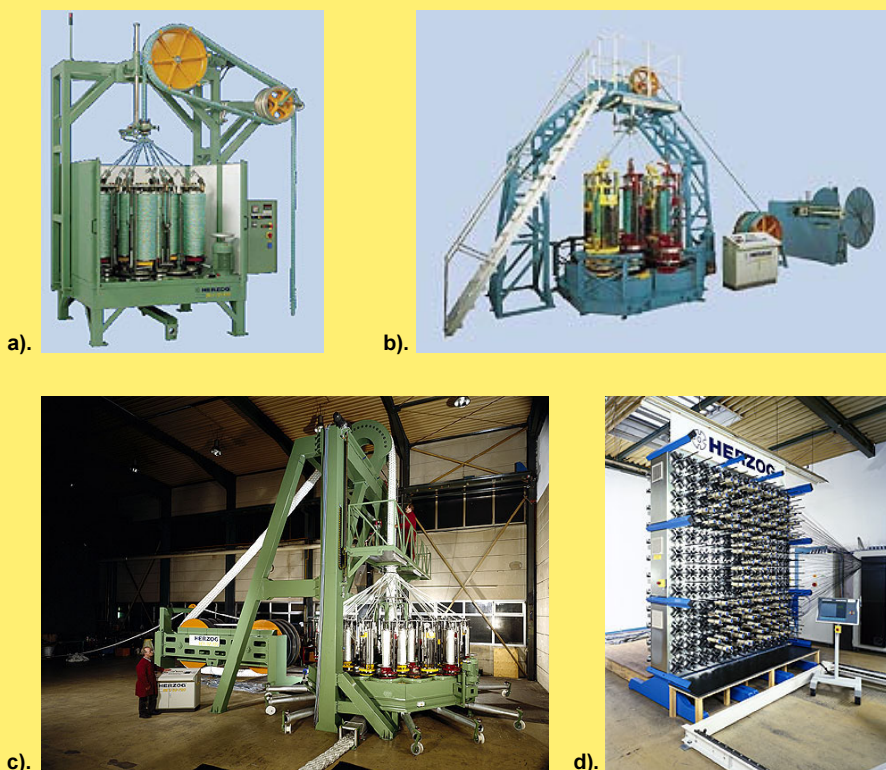
2.3.3. Wykonywanie lin włókiennych

Skręcanie i splatanie | Podczas wykonywania lin muszą być zachowane stałe parametry budowy liny: kąt skrętu, skok, regularność splotu. Wymaga to stałego, równomiernego naciągu splatanych bądź skręcanych nitek. Stosowany skok liny może wynosić, w zależności od jej średnicy, od kilku mm do 1500 mm. Kąt skrętu mieści się zwykle w granicach $35^\circ \div 65^\circ$. Minimalna osiągalna wartość to 25° . Małe kąty skrętu są niezbędne przy wykonywaniu lin z wysokowytrzymałych włókien, jak np. Dyneema, ze względu na ich wysoki moduł sprężystości i związaną z tym skłonność do „rozplatania”.

Istnieją dowody, że lin wykonywano już ok. 17 000 lat p.Ch. Egipcjanie wykonywali grube liny, wypłatając je prawdopodobnie metodą statyczną, obciążone np. drewnianym kołkiem [5.40]. W średniowiecznej Europie liny wykonywano metodą tzw. „ścieżki linowej” (ang. rope walk). Polegała ona na splataniu nitek rozciągniętych na całej długości przyszłej liny poprzez obracanie hakami, do których były przywiązane. Pozwalało to wykonywać liny o długości do ok. 300 m. Co najmniej taka długość była niezbędna w olinowaniu wysokich żaglowców. Rys. 2.48 przedstawia zasadę tej metody. Funkcjonowała ona w niezmienionej co do zasady (mimo wprowadzanych udoskonaleń i mechanizacji) formie aż do roku 1792, kiedy wprowadzono pierwsze rzeczywiste udoskonaleństwo tzw. Cordelier. Wiadomo, że w niektórych miastach (np. Bridport w Anglii, gdzie ostatnią ścieżkę zamknięto w 1970 r.) wykorzystywano wąskie ale długie uliczki odchodzące od głównych ulic jako swoiste „ścieżki linowe” [5.40]. Najdłuższa na świecie „ścieżka linowa” powstała w drugiej połowie XIX w. w brooklyńskiej fabryce firmy Wall Rope [233].



Rys. 2.48 – prosty model ilustrujący zasadę wykonywania lin na „ścieżce linowej” [153]



Rys. 2.49 – urządzenia firmy Herzog Maschinenfabrik GmbH & Co (Niemcy) do produkcji lin włókiennych o średnicy:

- a). do 45 mm
- b). do 96 mm
- c). do 300 mm
- d). lin typu 3-D wg materiałów firmowych, za [233]

Maszyny do splatania lin zwykłych są – w odróżnieniu od dawnych warsztatów ustawione pionowo, co pozwala na radykalne zmniejszenie wielkości pomieszczeń, w których produkuje się liny. Urządzenie do produkcji lin typu 3-D, ustawione poziomo, ma ok. 30 m długości.

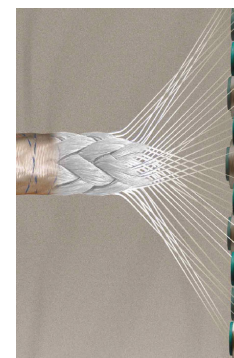
Początkowo, przez bardzo długi okres liny wyplatano poziomo, na tzw. „ścieżce linowej”, co wymagało bardzo długich stanowisk produkcyjnych (rys. 2.48). Obecnie nowoczesne maszyny do produkcji lin wykonują je w pionie, co radykalnie zmniejsza wielkość linii przestrzeni niezbędnej do produkcji. Rys. 2.49 przedstawia przykłady urządzeń czołowego światowego producenta – niemieckiej firmy Herzog. Oprócz sprzętu, bardzo ważną rolę w procesie produkcyjnym odgrywa jego właściwa organizacja. Zarówno sama budowa liny, z uwzględnieniem ilości i rodzaju włókien, ich obróbki powierzchniowej i wzajemnego ułożenia, jak i optymalna długość nitki w rolce, długość handlowa lin itp. są brane pod uwagę. Producenci sprzętu dostarczają zwykle odpowiednie oprogramowanie komputerowe do planowania procesu produkcji lin.

Obróbka lin | Liny są zwykle dostarczane w stanie naturalnym, tj. bez jakiegokolwiek impregnacji lub wykończenia powlekającego. Mogą one jednak być powlekane lub impregnowane w celu uzyskania szczególnych właściwości. Wybór rodzaju powłoki lub środka impregnującego zależy od producenta. Przyrost masy spowodowany wykończeniem nie powinien przekraczać 5 % masy liny w stanie naturalnym. [N-33]

W przypadku lin z włókien naturalnych tradycyjnie stosowanym zabiegiem jest smołowanie. Polega to na nasycaniu liny tzw. goudronem norweskim. Zabieg ten stosuje się zarówno do spletek lin włókiennych jak i do rdzeni lin włókiennych i stalowych. Zwiększa on znacznie odporność włókien na wpływ wilgoci ale obniża wytrzymałość o ok. 25 %.

W przypadku lin z włókien chemicznych stosuje się dodatki zwiększające ich odporność na działanie światła słonecznego. Może to być pigmentacja z użyciem sadzy, trójtlenku żelaza (Fe_2O_3) lub innego środka barwiącego powstrzymującego działanie promieni ultrafioletowych. Sposób ten jest stosowany stosunku do lin polipropylenowych i polietylenowych [N-33].

Stosowane jest także pokrywanie włókien jednego rodzaju polimerem innego rodzaju, w celu poprawy właściwości użytkowych, np. zwiększenia odporności na ścieranie.



splatanie liny włókiennej [12]

goudron norweski jest produktem bitumicznym otrzymywanym podczas destylacji drewna

2.3.4. Wyznaczanie podstawowych właściwości lin włókiennych

Aby możliwe było prawidłowe stosowanie lin włókiennych, niezbędne jest określenie ich właściwości fizycznych i mechanicznych. Do podstawowych właściwości fizycznych lin włókiennych zaliczamy:

- numer referencyjny
- masę liniową
- skok skrętu (splotu) liny

Do podstawowych właściwości mechanicznych lin włókiennych zaliczamy:

- wytrzymałość na rozciąganie
- wydłużenie

Metody wyznaczania tych wielkości określa norma [N-34]. Liny powinny być badane w klimacie otoczenia, lub poddane aklimatyzacji w klimacie określonym przez PN-EN 20139 przez co najmniej 48 godz. Próbkę mają standardową długość. Dla lin z włókien naturalnych wszystkich typów stosuje się próbki o długości 2000 mm, a dla lin z włókien chemicznych:

- długości 400 mm dla lin o numerze referencyjnym ≤ 10
- długości 600 (dla zrywarki z zacikiem linowym lub „cors de chasse”) lub 1800 mm (dla zrywarek pozostałych typów) dla lin o numerze referencyjnym > 10

Norma [N-33] nie podaje żadnych specjalnych wymagań odnośnie sposobu przygotowania końcówek badanych próbek lin. Zaleca jedynie, aby „...przebrać wszystkie potrzebne kroki, aby zapobiec rozkręceniu. Jeśli trzeba, usunąć lekko rozkręcone końce”.

Numer referencyjny liny jest mierzony przy zerowym naprężeniu. Pomiar polega na bezpośrednim zmierzeniu średnicy. Dla lin o numerze referencyjnym większym niż 70 dopuszczalna jest metoda alternatywna, polegająca na pomiarze obwodu liny [N-33].

Masa liniowa i skok liny są mierzone pod zadaniem naprężeniem, które zależy od numeru referencyjnego liny. Wartości naprężeń wstępnych do pomiarów wg [N-34] podano w tablicy 2.31. Dokładna procedura pomiarów jest opisana w [N-34].

Tablica 2.31 – Naprężenia pomiarowe przykładane do lin włókiennych przy pomiarze ich właściwości fizycznych wg [N-34]

Numer referencyjny liny	Naprężenie pomiarowe przykładane do lin		Numer referencyjny liny	Naprężenie pomiarowe przykładane do lin	
	Wartość nominalna daN	Tolerancja		Wartość nominalna daN	Tolerancja
4	2	$\pm 5 \%$	48	290	$\pm 5 \%$
6	4		52	340	
8	8		56	390	
10	12		60	440	
12	18		64	500	
14	24		72	650	
16	32		80	800	
18	40		88	950	
20	50		96	1 100	
22	60		104	1 300	
24	70		112	1 500	
26	85		120	1 800	
28	100		128	2 000	
30	115		136	2 300	
32	130		144	2 600	
36	160		152	2 900	
40	200		160	3 800	
44	240				

*Tablica. 2.31
Naprężenia pomiarowe przykładane do lin przy pomiarze ich właściwości fizycznych wg [N-34].*

Wydłużenie liny odpowiada mierzonemu przyrostowi długości liny, gdy naprężenie, któremu podlega, rośnie od wartości początkowej (naprężenie wstępne) do wartości równej 75 % określonej minimalnej siły zrywającej liny [N-34].

Wytrzymałość na rozciąganie jest maksymalnym obciążeniem osiągniętym podczas próby zrywania próbki roboczej na zrywarcie o stałej prędkości przesuwu ruchomego elementu.

Dla lin trzy- cztero- i ośmiosplotkowych mających siłę zrywającą ponad 30 000 daN, dla których trudno jest przeprowadzić bezpośredni pomiar ze względu na potrzebną wielkość sprzętu, można wyznaczyć siłę zrywającą całej liny na podstawie pomiaru siły zrywającej nitek. Dotyczy to lin wykonanych z jednorodnego materiału i z nitek o takiej samej masie liniowej [N-34].

Siła zrywająca liny jest wyznaczana ze wzoru (2.10):

$$F_c = F_y \cdot n \cdot r \quad (2.10)$$

gdzie: F_c – siła zrywająca liny [daN]
 F_y – średnia wytrzymałość nitek [daN]
 n – liczba nitek w linie
 r – współczynnik urzeczywistniający (współczynnik obliczeniowy wg [N-32]); wartości tego współczynnika podano w tablicy 2.21.

Dla lin wykonanych z różnych rodzajów włókien [204] podaje, w oparciu wymagania normy ISO 2307, analogiczny sposób obliczania siły zrywającej. Jest ona wyznaczana ze wzoru (2.11):

$$F_c = K \sum_{i=1}^x (F_{yi} n_i) \quad (2.11)$$

gdzie: F_c – siła zrywająca liny [daN]
 F_{yi} – średnia wytrzymałość nitek z włókien rodzaju i [daN]
 n_i – liczba nitek z włókien rodzaju i w linie
 x – liczba różnych rodzajów włókien w linie
 K – współczynnik obliczeniowy, uwzględniający materiał włókien i budowę liny; wartości współczynnika K podano w tablicy 2.32

Opisana metoda określania wytrzymałości lin jest stosowana w Europie i w Azji oraz jest przyjęta przez organizacje normalizacyjne CEN, ISO oraz instytucje certyfikujące, np. Lloyd's Registry. Różni się ona nieco od metod stosowanych w Stanach Zjednoczonych i objętych normami opracowywanymi przez Cordage Institute. W zakresie lin o małych średnicach różnica polega na innym sposobie przygotowania próbek do badań. Próbki amerykańskie są krótsze i mają zaplatane końcówki, co powoduje, że ich wytrzymałość jest zaniżona o ok. 10 %. W przypadku lin o dużej średnicy, podejście Cordage Institute do problemu określania nośności jest inne niż krytykowane przezeń podejście ujęte w normach ISO i CEN. Bazuje ono na następujących przesłankach:

- wraz ze wzrostem średnicy liny, zmniejsza się jej efektywność wynikająca z budowy liny
- przy mniejszych średnicach lin zmniejsza się współczynnik wypełnienia nominalnego przekroju poprzecznego liny przez przekrój włókien, gdyż puste przestrzenie stają się większe w odniesieniu do przekroju liny

W ujęciu amerykańskim (norma *CI 2002 Determination of Cordage Institute Minimum Breaking Strengths*) określa się długość zrywającą liny, (*ang. Breaking Length*), tj. długość, przy której ulegnie ona zerwaniu pod ciężarem własnym, korygując ją współczynnikiem korelacji gęstości (*ang. Density Correlation Factor*), co ma prowadzić do bardziej wiarygodnych wartości.



próbka liny z zaplecionymi końcówkami

Cordage Institute jest organizacją non-profit, której członkami są producenci, dostawcy, projektanci i inne osoby i instytucje związane z przemysłem powoźniczym. Opracowuje normy i zalecenia, które są powszechnie akceptowane w Stanach Zjednoczonych.

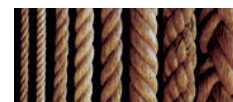
Tablica 2.32 – Współczynniki obliczeniowe do wyznaczania siły zrywającej liny na podstawie wytrzymałości nitek, wg [N-34] i [204]

Numer referencyjny liny	wg [N-34]			wg [204]			
	poliester	poliamid	polipropylen	manila, sizal, konopie	manila, sizal, konopie		
					liny 3-splotk.	liny 4-splotk.	liny 8-splotk.
40	–	–	–	–	–	–	–
44	–	0.68	–	–	–	–	–
48	0.51	0.68	0.82	–	–	–	0.9277
52	0.51	0.68	0.82	–	–	–	0.9200
56	0.50	0.68	0.82	–	–	–	0.9133
60	0.49	0.68	0.82	–	0.592	0.533	0.9077
64	0.48	0.67	0.81	–	0.589	0.530	0.9026
68	–	–	–	–	0.585	0.527	–
72	0.48	0.67	0.81	0.58	0.582	0.524	0.8933
76	–	–	–	–	0.579	0.521	–
80	0.48	0.66	0.80	0.58	0.577	0.519	0.8866
88	0.48	0.66	0.80	0.57	0.574	0.517	0.8817
96	0.47	0.65	0.80	0.57	0.572	0.515	0.8770
104	0.47	0.65	0.80	–	–	–	–
112	0.46	0.64	0.79	–	–	–	–
120	0.46	0.64	0.79	–	–	–	–
128	0.46	0.63	0.78	–	–	–	–
136	0.46	0.63	0.78	–	–	–	–
144	0.46	0.62	0.78	–	–	–	–

Tablica. 2.32
Współczynniki obliczeniowe do wyznaczania siły zrywającej liny na podstawie wytrzymałości nitek, wg [N-34] i [204]

2.3.5. Właściwości lin wykonanych z poszczególnych rodzajów włókien

Liny z manili | Najbardziej wytrzymałe liny z włókien naturalnych (około połowy wytrzymałości lin z włókien syntetycznych). Niełamiwe, lśniące i elastyczne. Są odporne na działanie wody morskiej ale wrażliwe na większość czynników chemicznych. Mogą ulegać gniciu i pleśnieniu. Wymagają dbałości i doglądania. Nośności lin z manili wg [N-23] podano w tablicy 2.33.



liny z manili

Liny z sizalu | Liny o wytrzymałości zbliżonej do wytrzymałości lin z manili. Pęcznieją i twardnieją pod wpływem wilgoci. Nośności lin z sizalu wg [N-23] podano w tablicy 2.33.

Liny linane | Liny lniane mają wytrzymałość mniejszą niż liny z manili czy sizalu, zbliżoną do wytrzymałości lin konopnych. Wytrzymałość włókien wilgotnych jest wyższa niż włókien suchych. Są dość wrażliwe na załamywanie. Nośności lin lnianych wg [N-25] podano w tablicy 2.34.

Liny konopne | Liny konopne są odporne na warunki atmosferyczne i ścieranie. Wchłaniają dużo wilgoci, pęcznieją i robią się sztywne. Podobnie jak dla lnu – wytrzymałość włókien wilgotnych jest wyższa niż włókien suchych. Nośności lin konopnych wg [N-24] podano w tablicy 2.35., a wg [N-35] – w tablicy 2.36. Ponadto, w tablicy 2.37, zamieszczono wartości nośności lin konopnych podane w [227].

Tablica 2.33 – Nośności lin z manili i sizalu wg [N-23]

Numer referencyjny ¹⁾	Liny kręcone 3-splotkowe			Liny kręcone 4-splotkowe rdzeniowe			Liny plecione 8-splotkowe			Tolerancja masy liniowej
	rodzaj A			rodzaj B			rodzaj L			
	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca		Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca		Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca		
		daN			daN			daN		
	ktex	Manila	Sizal	ktex	Manila	Sizal	ktex	Manila	Sizal	
6	29	280	255	–	–	–	–	–	–	± 10 %
8	54	534	473	–	–	–	–	–	–	
10	68	691	622	61	622	560	–	–	–	
12	105	1 050	936	95	945	842	–	–	–	± 8 %
14	140	1 430	1 260	126	1 290	1 130	–	–	–	
16	190	1 990	1 770	171	1 790	1 600	190	1 990	1 770	± 5 %
18	220	2 400	2 100	198	2 160	1 890	220	2 400	2 100	
20	275	3 190	2 790	248	2 870	2 510	275	3 190	2 790	
22	330	3 590	3 340	297	3 230	3 010	330	3 590	3 340	
24	400	4 480	3 990	360	4 030	3 590	400	4 480	3 990	
26	470	5 230	4 640	423	4 710	4 180	470	5 230	4 640	
28	530	5 980	5 220	477	5 380	4 700	530	5 980	5 220	
30	625	6 730	5 980	563	6 060	5 380	625	6 730	5 980	
32	700	7 720	6 730	630	6 950	6 060	700	7 720	6 730	
36	890	9 460	8 530	801	8 510	7 680	890	9 460	8 530	
40	1 100	11 800	10 300	990	10 600	9 270	1 100	11 800	10 300	
44	1 340	14 000	12 500	1 210	12 600	11 200	1 340	14 000	12 500	
48	1 580	16 500	14 500	1 420	14 800	13 000	1 580	16 500	14 500	
52	1 870	19 200	17 000	1 690	17 300	15 300	1 870	19 200	17 000	
56	2 150	22 000	19 500	1 930	19 800	17 500	2 150	22 000	19 500	
60	2 480	24 900	22 200	2 230	22 400	20 000	2 480	24 900	22 200	
64	2 880	28 500	25 200	2 590	25 600	22 700	2 880	28 500	25 200	
68	3 180	31 400	28 000	2 860	28 300	25 200	3 180	31 400	28 000	
72	3 620	35 100	32 100	3 260	31 600	28 900	3 620	35 100	32 100	
76	4 000	38 800	34 300	3 600	34 900	30 900	4 000	38 800	34 300	
80	4 400	42 700	38 000	3 960	38 400	34 200	4 400	42 700	38 000	
88	5 350	50 500	45 900	4 810	45 400	41 300	5 350	50 500	45 900	
96	6 400	58 800	52 500	5 760	52 900	47 200	6 400	58 800	52 500	

¹⁾ Numer referencyjny odpowiada przybliżonej średnicy w milimetrach.
²⁾ Masę liniową mierzy się pod naprężeniem rozciągającym dla pomiaru $F_{0.2}$ podanym w EN 919.

Tablica 2.34 – Nośności lin lnianych wg [N-25]

Nazwa wyrobu	Średnica nominalna wyrobu d mm	Masa liniowa wyrobu ktex	Minimalna siła zrywająca w stanie aklimatyzowanym daN	Tolerancja masy 1 m %	Maksymalna długość skrętu mm
Sznurki lniane	2,0	4.2	20	± 10	3,5 × d
	2,5	5.2	40		
	3,0	6.8	55		
	3,5	9.0	68		
	4,0	11.5	93		
Sznury lniane	5,0	20	136		
	6,0	26	200		
	7,0	34	270		
	8,0	45	340		
Metoda badania wg	zaświadczenia wytwórcy	PN-74/P-04723	PN-88/P-04718	PN-74/P-04723	PN-87/P-04721

Wartości innych wskaźników użytkowych, np. średnica rzeczywista, wydłużenie wyrobu, mogą być podane w ofercie po uzgodnieniu pomiędzy dostawcą i odbiorcą.

Tablica 2.35 – Nośności lin konopnych wg [N-24]

Numer referencyjny ¹⁾	Liny spiralne, kręcone, 3-splotkowe rodzaj A		Liny spiralne, kręcone, 4-splotkowe, rdzeniowe rodzaj B		Liny spiralne, kręcone, kablowane, 9-splotkowe, 3 warstwy splotek rodzaj C		Liny włókienne plecione okrężnie rodzaj E		Tolerancja masy liniowej
	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	
	ktex	daN	ktex	daN	ktex	daN	ktex	daN	
3	–	–	–	–	–	–	4.8	41	± 10 %
4	12	130	–	–	–	–	8.3	75	
6	27	285	–	–	–	–	18.2	165	
8	47	500	47	450	–	–	32	305	
10	74	780	74	700	–	–	49	445	
12	111	1 165	111	1 800	–	–	70	640	
14	141	1 485	141	1 375	–	–	95	860	
16	185	1 960	185	1 825	–	–	115	1 100	± 5
18	230	2 420	230	2 250	–	–	145	1 400	
20	285	3 000	285	2 780	–	–	–	–	
22	345	3 600	345	3 240	–	–	–	–	
24	410	4 270	410	3 980	–	–	–	–	
26	485	4 950	485	4 600	–	–	–	–	
28	560	5 820	560	5 410	–	–	–	–	
30	640	6 680	640	6 180	610	3 840	–	–	
32	735	7 620	735	7 090	700	4 390	–	–	
36	930	9 200	930	8 560	880	5 300	–	–	
40	1 150	10 700	1 150	9 980	1 090	6 180	–	–	
44	1 380	12 700	1 380	11 800	1 310	7 330	–	–	
48	1 660	15 200	1 660	14 100	1 560	8 740	–	–	
52	1 920	17 800	1 920	16 700	1 820	10 200	–	–	
56	2 240	20 500	2 240	19 100	2 120	11 800	–	–	
60	2 520	22 600	2 520	21 000	2 390	12 700	–	–	
64	2 920	26 000	2 920	24 200	2 770	14 900	–	–	
72	3 690	32 400	3 690	30 100	3 500	18 600	–	–	
80	4 570	39 700	4 570	36 900	4 340	22 800	–	–	
88	5 500	47 100	5 500	43 700	5 220	27 000	–	–	
96	6 550	54 800	6 550	51 000	6 220	31 500	–	–	

¹⁾ Numer referencyjny odpowiada średnicy nominalnej liny w milimetrach.
²⁾ Masę liniową mierzy się pod naprężeniem rozciągającym dla pomiaru F_0 , podanym w EN 919.

Tablica 2.36 – Nośności lin konopnych wg [N-35]

Nazwa wyrobu	Średnica nominalna wyrobu <i>d</i> mm	Masa liniowa wyrobu ktex	Minimalna siła zrywająca w stanie aklimatyzowanym daN	Tolerancja masy 1 m %	Maksymalna długość skrętu mm
Sznurki konopne	2,0	38	40	± 10	3,5 × d
	2,5	4.8	50		
	3,0	6.3	66		
	3,5	8.6	90		
	4,0	12.0	124		
Sznury konopne	5,0	17.0	172		
	6,0	25.0	216		
	7,0	32.0	345		
	8,0	48.0	358		
Linki konopne	10	75	540		
	12	108	785		
	14	147	1 070		
	16	192	1 470		
	18	243	1 760		
	20	300	2 150		
Liny konopne	22	363	2 740	± 8	
	24	432	3 330		
	26	507	3 720		
	28	588	4 410		
	30	675	4 900		
	32	768	5 390		
	36	972	6 860		
	40	1 200	8 330		
	44	1 450	9 810		
	48	1 720	11 700		
	52	2 030	13 700		
	56	2 350	16 100		
	60	2 700	18 300		
	64	3 070	21 000		
	68	3 450	23 500		
	72	3 890	27 400		
80	4 800	33 800			
Metoda badania wg	zaświadczenia wytwórcy	PN-74/P-04723	PN-88/P-04718	PN-74/P-04723	PN-87/P-04721
Wartości innych wskaźników użytkowych, np. średnica rzeczywista, wydłużenie wyrobu, mogą być podane w ofercie po uzgodnieniu pomiędzy dostawcą i odbiorcą.					

Tablica 2.37 – Nośności lin konopnych wg [5.16]

Nazwa wyrobu	Średnica nominalna wyrobu <i>d</i> mm	Masa liniowa wyrobu ktex	Największa siła zrywająca daN	Liczba nitek w linie szt	Liczba skrętów na 1 m mm
Liny konopne	25	470	3 645	78	42
	30	670	4 995	111	35
	35	920	5 875	153	30
	40	1 190	7 130	198	26
	45	1 490	8 965	249	24
	50	1 850	10 755	309	22
	55	2 230	12 720	372	20
	60	2 660	15 185	444	18

Liny bawełniane | Liny bawełniane są bardzo elastyczne, przez to przydatne w wielu zastosowaniach, np. sportowych. Wchłaniają jednak bardzo dużo wilgoci, przez co pęcznieją. Mokre mają wytrzymałość nieco wyższą niż suche. Wrażliwe na gnicie. Nośności lin bawełnianych wg [227] podano w tablicy 2.38.

Liny kokosowe | Liny z włókien kokosowych są bardzo lekkie, dzięki czemu nie toną w wodzie. Są jednak wrażliwe na gnicie i butwienie. Odporne na ścieranie. Są najsłabsze spośród lin włókiennych – ich wytrzymałość jest ok. trzykrotnie niższa niż wytrzymałość lin z innych włókien naturalnych. Są kruche i szorstkie. Mają największą rozciągliwość – wydłużenie wynosi ok. 16 %. Stosunkowo rzadko spotykane.

Tablica 2.38 – Nośności lin bawełnianych wg [227]

Nazwa wyrobu	Średnica nominalna wyrobu d mm	Masa liniowa wyrobu ktex	3-splotkowe			4-splotkowe		
			Największa siła zrywająca daN	Liczba nitek w linie szt	Liczba skrętów na 1 m mm	Największa siła zrywająca daN	Liczba nitek w linie szt	Liczba skrętów na 1 m mm
Liny bawełniane	25	465	2 450	78	38	2 020	76	50
	30	670	3 350	111	32	2 910	112	42
	35	910	4 440	153	27	3 750	152	36
	40	1 190	5 340	198	24	4 520	196	32
	45	1 560	6 800	252	21	5 850	252	28
	50	1 860	8 280	312	19	7 120	312	25
	55	2 220	9 690	378	17	8 230	376	23
	60	2 680	11 380	444	16	9 780	444	20

Liny poliamidowe | Liny z włókien poliamidowych (nylonowych) wykonywane są głównie z nylonu 6 i 6.6. Mają najwyższą wytrzymałość na rozciąganie spośród lin wszystkich lin wykonanych z „tradycyjnych” włókien chemicznych, tzn. oprócz lin z włókien o wysokiej wytrzymałości. Mają jednak mniejszy niż liny poliestrowe moduł sprężystości, co powoduje ich znaczne wydłużenie. Są wrażliwe na działanie światła słonecznego i niestabilne wymiarowo pod wpływem wilgoci. Mają umiarkowaną odporność na działanie czynników chemicznych. Charakteryzują się znaczną odpornością na ścieranie. Liny poliamidowe są stosowane jako liny holownicze, cumy, olinowanie dla statków, liny żeglarskie i alpinistyczne, zawiesia przemysłowe, linki bezpieczeństwa itp. Nośności lin poliamidowych wg [N-27] podano w tablicy 2.39.

Liny poliestrowe | Liny poliestrowe mają wytrzymałość zbliżoną do wytrzymałości lin poliamidowych. Jej nieco niższa wartość jest w wielu zastosowaniach kompensowana większą sztywnością lin poliestrowych. Charakteryzują się wysoką wytrzymałością na ścieranie (podobną do lin poliamidowych) i mniejszą elastycznością niż liny z innych włókien chemicznych. Ich wydłużenie jest znacznie mniejsze niż lin poliamidowych. Mimo że stosunkowo ciężkie, są odporne na działanie wszystkich rodzajów czynników atmosferycznych oraz chemikaliów (oprócz alkaliów w podwyższonej temperaturze). Liny poliestrowe są stosowane jako: olinowanie statków morskich, cumy, liny kotwiczne i holownicze, liny żeglarskie, liny dla rybołówstwa (również do wykonywania sieci rybackich). Podobnie jak inne liny z włókien chemicznych, liny poliestrowe charakteryzują się wyraźnie nieliniową zależnością wydłużenie-obciążenie, zależną również od historii obciążania. Nośności lin poliestrowych wg [N-26] podano w tablicy 2.40, a na rys. 2.50 – krzywą historii obciążania dla przykładowej liny poliestrowej [13].

Tablica 2.39 – Nośności lin poliamidowych wg [N-27]

Numer referencyjny ¹⁾	Liny kręcone 3-splotkowe		Liny kręcone 4-splotkowe rdzeniowe		Liny plecione 8-splotkowe		Tolerancja masy liniowej
	rodzaj A		rodzaj B		rodzaj L		
	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	
	ktex	daN	ktex	daN	ktex	daN	
4	10.5	315	–	–	–	–	± 10 %
6	22.5	735	–	–	–	–	
8	40	1 320	–	–	4	1 320	
10	62	2 040	56	1 840	–	–	± 8 %
12	89	2 940	80	2 650	89	2 940	
14	122	4 020	110	3 620	–	–	
16	158	5 200	142	4 680	158	5 200	± 5 %
18	200	6 570	180	5 910	–	–	
20	245	8 140	220	7 330	245	8 140	
22	300	9 800	270	8 820	–	–	
24	355	11 800	320	10 600	355	11 800	
26	420	13 700	378	12 300	–	–	
28	485	15 500	436	14 000	485	15 500	
30	555	17 400	500	15 700	–	–	
32	630	19 600	570	17 600	630	19 600	
36	800	24 400	720	22 000	800	24 400	
40	990	29 400	890	26 500	990	29 400	
44	1 200	35 100	1 080	31 600	1 200	35 100	
48	1 420	41 200	1 280	37 100	1 420	41 200	
52	1 660	47 900	1 490	43 000	1 660	47 900	
56	1 930	54 900	1 740	49 400	1 930	54 900	
60	2 210	62 600	1 990	56 300	2 210	62 600	
64	2 520	70 600	2 270	63 500	2 520	70 600	
72	3 190	88 200	2 870	79 400	3 190	88 200	
80	3 940	108 000	3 550	97 000	3 940	107 800	
88	4 770	128 000	4 290	116 000	4 770	128 400	
96	5 680	151 000	5 110	136 000	5 680	151 000	
104	–	–	–	–	6 660	178 500	
112	–	–	–	–	7 720	206 000	
120	–	–	–	–	8 870	235 400	
128	–	–	–	–	10 100	266 700	
136	–	–	–	–	11 400	300 100	
144	–	–	–	–	12 800	335 400	
160	–	–	–	–	15 800	414 000	

¹⁾ Numer referencyjny odpowiada przybliżonej średnicy w milimetrach.

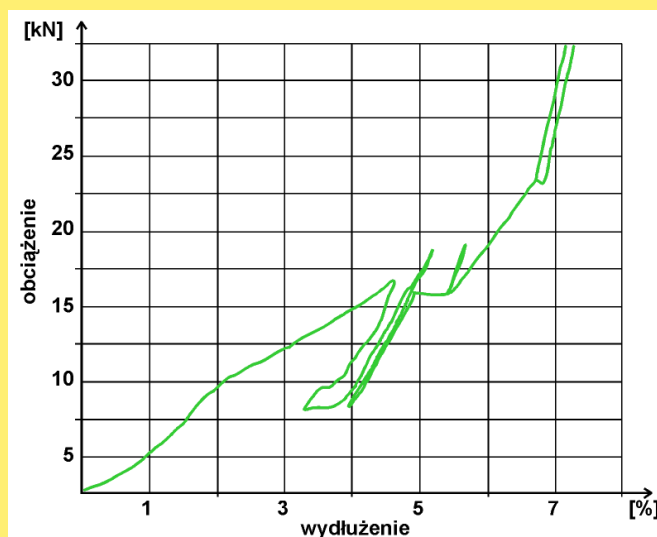
²⁾ Masę liniową mierzy się pod naprężeniem rozciągającym dla pomiaru F_0 podanym w EN 919.

Tablica 2.40 – Nośności lin poliestrowych wg [N-26]

Numer referencyjny ¹⁾	Liny kręcone 3-splotkowe		Liny kręcone 4-splotkowe rdzeniowe		Liny plecione 8-splotkowe		Tolerancja masy liniowej
	rodzaj A		rodzaj B		rodzaj L		
	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	
	ktex	daN	ktex	daN	ktex	daN	
4	11.8	290	—	—	—	—	± 10 %
6	27	554	—	—	—	—	
8	48	1 000	—	—	48	1 000	
10	76	1 560	68	1 400	—	—	± 8 %
12	110	2 230	99	2 010	110	2 230	
14	148	3 120	133	2 810	—	—	
16	195	3 980	175	3 580	195	3 980	± 5 %
18	245	4 980	220	4 480	—	—	
20	303	6 230	273	5 610	303	6 230	
22	367	7 470	330	6 720	—	—	
24	437	8 960	393	8 060	437	8 960	
26	512	10 500	460	9 450	—	—	
28	594	12 000	535	10 800	594	12 000	
30	682	13 400	613	12 100	—	—	
32	778	15 400	700	13 900	778	15 400	
36	982	19 000	883	17 100	982	19 000	
40	1 210	23 500	1 090	21 200	1 210	23 500	
44	1 470	27 900	1 320	25 100	1 470	27 900	
48	1 750	32 900	1 570	29 600	1 750	32 900	
52	2 050	38 400	1 840	34 600	2 050	38 400	
56	2 380	43 900	2 140	39 500	2 380	43 900	
60	2 730	48 900	2 460	44 000	2 730	48 900	
64	3 110	56 800	2 800	51 100	3 110	56 800	
72	3 930	70 700	3 540	63 600	3 930	70 700	
80	4 850	86 700	4 370	78 000	4 850	86 700	
88	5 870	104 000	5 290	93 600	5 870	104 000	
96	6 990	123 000	6 290	111 000	6 990	123 000	
104	—	—	—	—	8 200	142 000	
112	—	—	—	—	9 500	162 000	
120	—	—	—	—	10 900	186 000	
128	—	—	—	—	12 400	211 000	
136	—	—	—	—	14 000	240 000	
144	—	—	—	—	15 700	265 000	
160	—	—	—	—	19 400	327 000	

¹⁾ Numer referencyjny odpowiada przybliżonej średnicy w milimetrach.

²⁾ Masę liniową mierzy się pod naprężeniem rozciągającym dla pomiaru F₀, podanym w EN 919.



Rys. 2.50 – zależność wydłużenia od historii obciążania, dla przykładowej liny poliestrowej. Obciążenie zmieniało się w zakresie od 10 do 30 % siły zrywającej linę. Opracowano na podstawie [13]

Liny polipropylenowe | Liny polipropylenowe są najlżejsze spośród włókien chemicznych – ich gęstość jest mniejsza od gęstości wody, dzięki czemu nie toną. Charakteryzują się dobrą odpornością chemiczną i odpornością na działanie czynników atmosferycznych. Są dość wrażliwe na zmiany temperatury. Ich wytrzymałość jest niższa niż lin poliamidowych i poliestrowych ale wyższa niż lin polietylenowych. Są bardziej elastyczne od lin poliestrowych. Nie są zbyt odporne na ścieranie. Są relatywnie najtańsze spośród lin z włókien chemicznych. Liny polipropylenowe są wykorzystywane jako liny bezpieczeństwa na statkach, liny zabezpieczające w barierkach ochronnych, linki cumownicze i holownicze, linki dla narciarzy i dla nart wodnych, zawiesia. Nośności lin polipropylenowych wg [N-28] podano w tablicy 2.41.

Tablica 2.41 – Nośności lin polipropylenowych wg [N-28]

Numer referencyjny ¹⁾	Liny kręcone 3-splotkowe		Liny kręcone 4-splotkowe rdzeniowe		Liny plecione 8-splotkowe		Tolerancja masy liniowej
	rodzaj A		rodzaj B		rodzaj L		
	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	
	ktex	daN	ktex	daN	ktex	daN	
4	8	275	–	–	–	–	± 10 %
6	17	590	–	–	–	–	
8	30	1 040	–	–	–	–	
10	45	1 530	40	1 380	–	–	± 8 %
12	65	2 170	58	1 950	–	–	
14	90	2 990	81	2 690	–	–	
16	115	3 700	103	3 330	115	3 700	± 5 %
18	148	4 720	133	4 250	–	–	
20	180	5 690	162	5 120	180	5 690	
22	220	6 820	198	6 140	–	–	
24	260	7 970	234	7 170	260	7 970	
26	305	9 220	274	8 300	–	–	
28	355	10 500	319	9 440	355	10 500	
30	405	12 000	364	10 800	–	–	
32	460	13 200	414	11 900	460	13 200	
36	585	16 600	526	14 900	585	16 600	
40	720	20 100	648	18 100	720	20 100	
44	880	24 100	792	21 700	880	24 100	
48	1 040	28 000	936	25 200	1 040	28 000	
52	1 220	32 400	1 100	29 200	1 220	32 400	
56	1 420	37 100	1 280	33 400	1 420	37 100	
60	1 630	42 400	1 470	38 200	1 630	42 400	
64	1 850	48 000	1 670	43 200	1 850	48 000	
72	2 340	60 300	2 110	54 200	2 340	60 300	
80	2 900	74 100	2 610	66 700	2 900	74 100	
88	3 510	88 900	3 160	80 100	3 510	88 900	
96	4 170	105 000	3 750	94 500	4 170	105 000	
104	–	–	–	–	4 900	120 000	
112	–	–	–	–	5 700	139 000	
120	–	–	–	–	6 500	160 000	
128	–	–	–	–	7 400	180 000	
136	–	–	–	–	8 400	203 000	
144	–	–	–	–	9 400	226 000	
160	–	–	–	–	11 500	277 000	

¹⁾ Numer referencyjny odpowiada przybliżonej średnicy w milimetrach.

²⁾ Masę liniową mierzy się pod naprężeniem rozciągającym dla pomiaru F_{∞} podanym w EN 919.

Liny polietylenowe | Liny polietylenowe lekkie, o gęstości niższej niż gęstość wody, dzięki czemu nie toną. Są odporne na działanie czynników chemicznych oraz warunków atmosferycznych, nienasiąkliwe. Wrażliwe na zmiany temperatury. W temperaturze 90°C kurczą się do 40 %. Cechy wytrzymałościowe lin polietylenowych są gorsze niż innych lin z włókien chemicznych. Mają małą odporność na ścieranie. Liny polietylenowe są relatywnie tanie. Nośności lin polipropylenowych wg [N-29] podano w tablicy 2.42.

Liny wykonywane z kilku różnych rodzajów włókien | W wielu praktycznych zastosowaniach stosowane są obecnie liny, które są wykonywane z kilku, zwykle dwóch, rodzajów włókien. Ma to na celu dostosowanie ich właściwości do konkretnego celu. Są to zwłaszcza liny sportowe, specjalne liny dla hodowców bydła, liny do zastosowań przemysłowych itp. Zwykle stosuje się w linach kręconych jeden rodzaj włókna wewnątrz splotki, a inny na zewnątrz, a w linach plecionych – splotki z jednego rodzaju włókna w warstwie wewnętrznej, a z drugiego – w warstwie zewnętrznej. Umożliwia to np. podniesienie wytrzymałości na ścieranie lub elastyczności przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, zwiększenie odporności na promieniowanie UV, uzyskanie powierzchni dogodnej do uchwycenia gołą dłonią itd. Istnieje wielka różnorodność produkowanych lin tego rodzaju. Nie są one znormalizowane i każdy producent produkuje specyficzne, własne rodzaje takich lin. Z tego względu nie zamieszczono odpowiednich tablic nośności.

Tablica 2.42 – Nośności lin polietylenowych wg [N-29]

Numer referencyjny ¹⁾	Liny kręcone 3-splotkowe		Liny kręcone 4-splotkowe rdzeniowe		Tolerancja masy liniowej
	rodzaj A		rodzaj B		
	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	Masa liniowa nominalna ²⁾	Minimalna siła zrywająca	
	ktex	daN	ktex	daN	
4	8	196	–	–	± 10 %
6	18	392	–	–	
8	33	686	–	–	
10	49	1 070	44	963	± 8 %
12	72	1 510	65	1 360	
14	95	2 050	86	1 840	
16	128	2 750	115	2 480	± 5 %
18	161	3 400	145	3 060	
20	200	4 190	180	3 770	
22	243	4 980	219	4 480	
24	295	5 980	266	5 380	
26	328	6 800	295	6 120	
28	393	8 050	354	7 240	
30	460	9 300	414	8 370	
32	525	10 500	472	9 450	
36	660	13 200	594	11 900	
40	785	16 000	706	14 400	
44	950	19 250	855	17 300	
48	1 150	22 400	1 040	20 200	
52	1 350	25 900	1 220	23 300	
56	1 570	29 800	1 410	26 800	
60	1 800	33 800	1 620	30 400	
64	2 050	38 300	1 840	34 500	
72	2 590	48 100	2 330	43 300	
80	3 210	59 200	2 890	53 300	
88	3 880	71 100	3 490	64 000	
96	4 610	83 800	4 150	75 400	

¹⁾ Numer referencyjny odpowiada przybliżonej średnicy w milimetrach.

²⁾ Masę liniową mierzy się pod naprężeniem rozciągającym dla pomiaru F_{50} podanym w EN 919.

Liny z włókien o wysokiej wytrzymałości | Do lin z włókien o wysokiej wytrzymałości zaliczamy liny aramidowe, liny z polietylenu o wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE), z poliestru LCP oraz liny z włókien PBO.

Liny aramidowe charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie i ścieranie, świetną odpornością na wysokie temperatury, stabilność wymiarów, bardzo małym wydłużeniem. Są bardziej elastyczne przy zginaniu niż włókno szklane ale nieco mniej niż liny poliamidowe czy poliestrowe. Nie korodują, są odporne na większość oddziaływań chemicznych i atmosferycznych. Są wrażliwe na działanie promieniowania UV. Liny te są wykonywane z takich włókien jak Kevlar, Twaron (tablica 2.43), Technora. Mimo wysokiej ceny znajdują bardzo wiele zastosowań.



liny z włókien aramidowych Twaron [5.65]

Tablica 2.43 – Nośności lin z włókien aramidowych Twaron, produkcji firmy Teijin¹⁾

Budowa liny			Siła zrywająca [kN]						
			50	100	250	500	1 000	2 000	5 000
Równoległa	średnica [mm]		7.1	10.2	16.1	23.3	33.6	47.6	77.0
	masa [kg/m]		0.04	0.08	0.20	0.41	0.83	1.67	4.35
Skręcana	średnica [mm]		7.7	11.2	17.6	25.6	37.1	52.5	85.3
	masa [kg/m]		0.05	0.10	0.24	0.41	1.08	2.16	5.71
Pleciona	średnica [mm]		8.6	12.4	19.5	28.1	41.6	58.9	95.0
	masa [kg/m]		0.06	0.12	0.31	0.64	1.40	2.80	7.30

Tablica 2.44 – Nośności lin z włókien o wysokiej wytrzymałości produkcji firmy Liros²⁾

Nazwa wyrobu, charakterystyka	Średnica mm	Wytrzymałość na rozciąganie daN	Nazwa wyrobu, charakterystyka	Średnica mm	Wytrzymałość na rozciąganie daN
Liny z włókien UHMWPE (Dyneema)			Liros – Dyneema-Trim <i>Rdzeń: włókna Dyneema SK75 Opłot: włókna poliestrowe, 16 splotkowy</i>	4	400
Liros – 100 % Dyneema	8	3 800		5	600
	10	4 700		6	1 000
	12	5 900		8	1 500
Liros – Racer 2001 <i>Rdzeń: włókna Dyneema SK75, z dodatkową powłoką Opłot: włókna poliestrowe, 32 splotkowy</i>	6	2 200	Liros – High-Trim <i>Rdzeń: włókna Dyneema SK75, wstępnie naciągnięte Opłot: włókna poliestrowe, 8 splotkowy</i>	4	800
	8	3 800		5	1 100
	10	5 000		6	2 000
	12	7 200	Liny z włókien aramidowych		
	14	9 500	Liros – Aramid <i>Rdzeń: włókna aramidowe Opłot: włókna poliestrowe (Diolen), splot 1:1</i>	2	160
Liros – Regatta 2000 <i>Rdzeń: włókna Dyneema SK75 Opłot: włókna poliestrowe, 32 splotkowy</i>	2	240		2.5	210
	2.5	310		3.5	500
	3	500		5	800
	4	750		6	1 000
	5	1 050		8	2 000
	6	2 200		10	2 600
	8	3 800		12	3 600
	10	5 000		14	5 200
	12	7 200	Liny z włókien LCP (Vectran)		
	14	9 500	Liros – Vectran-Olympic <i>Rdzeń: włókna Vectran z dodatkową powłoką Opłot: włókna poliestrowe, 32 splotkowy</i>	6	1 500
	16	11 500		8	2 700
	18	14 800		10	3 700
	20	18 000		12	5 200
				14	6 800
Liros – Spi	6	750		16	8 400
<i>Rdzeń: włókna Dyneema SK75 Opłot: włókna poliestrowe, 16 splotkowy</i>	8	1 050	Liny z włókien PBO (Zylon)		
	9	2 000	Liros – Hiloal <i>Rdzeń: włókna Zylon Opłot: włókna poliestrowe, 32 splotkowy</i>	6	3 000
				8	6 000
	6	1 050		10	8 000
	8	2 000		12	13 000
Liros – Dynamic				14	15 000
<i>Rdzeń: włókna Dyneema SK75, z dodatkową powłoką Opłot: włókna poliestrowe, 16 splotkowy</i>	6	1 050			
	8	2 000			
	10	3 600			
	12	4 750			
Liros – Dyneema-Elastic	8	3 000			

¹⁾ Dane wg katalogu firmy Teijin (Japonia), za [37]

²⁾ Dane wg katalogu firmy Liros (Niemcy), za [233]

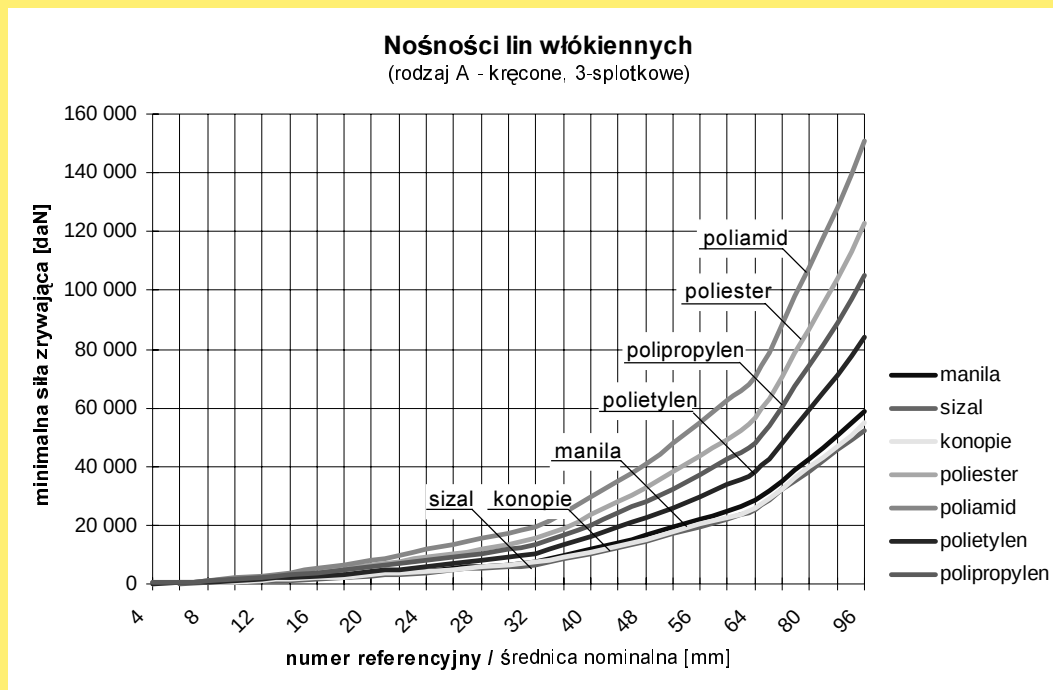
Liny z polietylenu UHMW są stosunkowo nowym produktem. Wykonuje się je z takich włókien jak Spectra czy Dyneema. Charakteryzują się małą gęstością, dzięki czemu nie toną. Są około pięciokrotnie bardziej wytrzymałe niż liny z poliamidu czy poliestru. Mają bardzo małe wydłużenie. Są bardzo odporne na działanie czynników chemicznych.

Liny z poliestru LCP są wykonywane z włókien o nazwie Vectran. Charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, bardzo małym wydłużeniem, brakiem pełzania, znakomitą odpornością cieplną. Ze względu na wrażliwość na promieniowanie UV włókna muszą być pokrywane powłoką ochronną. Nie zaleca się ich do stosowania w bardzo długim okresie czasu.

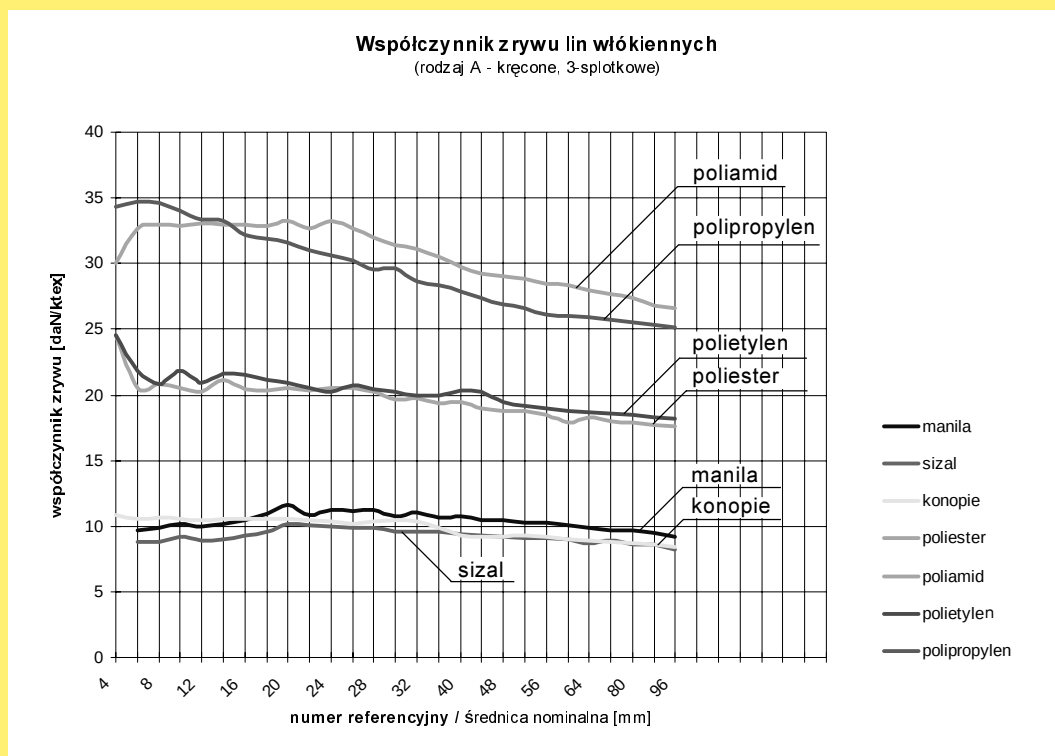
Liny z włókien PBO są wykonywane z włókien o nazwie Zylon. Materiał ten ma najwyższą wytrzymałość i najmniejsze wydłużenie spośród wszystkich włókien o wysokiej wytrzymałości. Nie wykazują pełzania. Mają najwyższą odporność na wysokie temperatury i czynniki chemiczne. Bardzo odporne na ścieranie, również w wysokich temperaturach. Ze względu na dużą wrażliwość na promieniowanie UV nie nadają się do zastosowań stałych.

Liny z włókien o wysokiej wytrzymałości nie są objęte przepisami normowymi, dlatego dane wytrzymałościowe dla takich lin można podać jedynie w oparciu o informację producenta. W tabelicy 2.44 zestawiono nośności lin z włókien o wysokiej wytrzymałości produkowanych przez znaną niemiecką firmę Liros. Ponieważ są to liny przeznaczone głównie do wykorzystania w żeglarskim, ich średnice są stosunkowo małe i nie przekraczają 20 mm. Liny z włókien o wysokiej wytrzymałości rzadko są obecnie produkowane standardowo jako wyroby o większych średnicach. Wyjątkiem są np. liny z włókien Twaron.

Porównanie nośności lin | Dla lin włókiennych, których cechy wytrzymałościowe są objęte normami, przedstawiono na rys. 2.51 zależność nośności liny od jej średnicy. Na rys. 2.52 przedstawiono zależność współczynnika zrywu liny od jej średnicy, tj. siłę zrywającą odniesioną do masy liniowej, co pozwala porównać właściwości lin wykonanych z materiałów o różnych gęstościach. Porównanie przeprowadzono dla lin o podstawowej budowie – kręconych, trójsplotkowych (rodzaj A wg norm przedmiotowych).

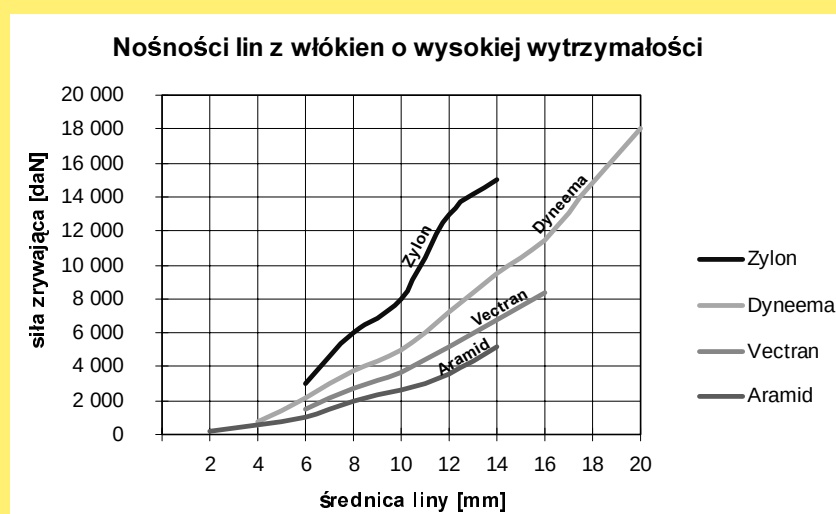


Rys. 2.51 – porównanie nośności lin włókiennych wykonanych z różnych materiałów



Rys. 2.52 – współczynnik zrywu dla lin włókiennych wykonanych z różnych materiałów

Dla lin wykonanych z włókien o wysokiej wytrzymałości przeprowadzono porównanie nośności lin pochodzących od jednego producenta, w zakresie średnic 2 ÷ 20 mm. Wszystkie z porównywanych lin wykonane są w oplocie zewnętrznym z włókien poliestrowych. Wykresy nośności dla poszczególnych średnic przedstawiono na rys. 2.53.



Rys. 2.53 – porównanie nośności lin wykonanych z włókien o wysokiej wytrzymałości

Porównanie przeprowadzono dla lin produkowanych przez firmę Liros (Niemcy), o nazwach handlowych:

Liros – Hiload dla lin z włókien Zylon

Liros – Regatta 2000 dla lin z włókien Dyneema SK75

Liros – Vectran Olympic dla lin z włókien Vectran

Liros – Aramid dla lin z włókien aramidowych

2.4. Wyroby liniowe z włókien technicznych – liny stalowe

2.4.1. Wiadomości wstępne

Rodzaje cięgien stalowych | Ze stali wykonuje się następujące rodzaje cięgien stosowanych w konstrukcjach budowlanych:

- cięgna z prętów stalowych (okrągłych lub min. dwusymetrycznych)
- łańcuchy stalowe
- liny stalowe

Najpóźniej pojawiły się liny stalowe. Od chwili pojawienia się w pierwszej połowie XIX w. były one traktowane jako alternatywa dla stosowanych wówczas lin z włókien naturalnych. O wszechstronnej przydatności lin stalowych zadecydowały specyficzne cechy drutów, z których je wykonywano, przede wszystkim zwiększona w stosunku do innych wyrobów z żelaza wytrzymałość i „wiotkość” umożliwiająca duże odkształcenia.

Liny stalowe znajdują obecnie zastosowanie we wszystkich niemal dziedzinach budownictwa oraz ogromnej ilości zastosowań przemysłowych. Stąd też ich wielka różnorodność, wynikająca z dostosowywania ich cech do specyficznych potrzeb. Poniżej omówiono liny stalowe mające zastosowanie w budownictwie, a zwłaszcza w konstrukcjach membranowych.

Wprowadzenie lin, wykonywanych w postaci wiązki cienkich drutów z metalu, jako elementu konstrukcyjnego jest zasługą francuskiego inżyniera, wynalazcy i naukowca – Marca Séguina. Miało to związek z gwałtownym rozwojem budowy żelaznych mostów wiszących, który nastąpił w drugiej połowie XVIII w. i na początku XIX w.

Pierwszy most wiszący z żelaznymi łańcuchami, Winch Bridge, powstał w 1741 r. nad wąwozem rzeki Tees w Anglii. Miał 70 stóp, tj. 21 m rozpiętości. Pomost leżał bezpośrednio na dwóch łańcuchach. Pierwszy praktyczny most wiszący, zawierający wszystkie główne elementy mostów współczesnych wybudował w roku 1796 Amerykanin, James Finley, nad rzeką Jacobs Creek w pobliżu Uniontown, w Pensylwanii. Cięgna nośne tego mostu wykonano z łańcuchów. Na początku XIX w. w Pensylwanii istniała już znaczna liczba mostów wiszących. Cięgna nośne wykonywane z łańcuchów były preferowane również przez Brytyjczyków, którzy zrealizowali w pierwszym dwudziestolecu XIX w. wiele mostów wiszących w Anglii.

Nowy kierunek rozwoju techniki mostowej bardzo zainteresował rząd francuski, który wysłał do Anglii Louis Marie Henri Naviera, późniejszego profesora analizy i mechaniki w École Polytechnique w Paryżu, w celu studiowania sztuki budowy mostów wiszących. Dwie podróże Naviera do Anglii, które odbył w latach 1821 i 1823, zaowocowały sprawozdaniem dla École des Ponts et Chaussées w Paryżu, zatytułowanym „Mémoire sur les Pontes Suspendus”¹⁾, wydanym w 1823 r. Zawiera ono nie tylko przegląd historyczny w tej dziedzinie ale także opis najważniejszych istniejących konstrukcji mostowych i metod teoretycznego ich obliczania. Sprawozdanie Naviera zawiera wzmiankę o możliwości zastosowania lin z drutów, zamiast łańcuchów jako cięgien nośnych mostów wiszących. Starannie wykształcony i mający dostęp do najnowszych osiągnięć nauki Séguin, podążył za sugestią Naviera.

W roku 1822²⁾ Séguin wybudował pierwszy eksperymentalny obiekt wiszący o konstrukcji z lin metalowych. Była to kładka przez rzekę Cance, w pobliżu jego fabryki papieru w rodzinnym Annonay. Kładka miała rozpiętość 18 m i 0.5 m szerokości. Kosztowała zaledwie 50 ówczesnych franków. Niezwykle niski koszt wykonania był – obok dobrych właściwości użytkowych – bardzo silnym argumentem na rzecz kontynuowania badań. W następnym roku powstała druga eksperymentalna kładka o rozpiętości 30 m i szerokości 1.65 m na rzekę Galaure w pobliżu St-Vallier.

Sukces, jaki odniosła kładka w St-Vallier, spowodował, że Séguin został zaproszony przez genewskiego uczonego, Marc Auguste Picteta, do udziału w pierwszym projekcie komercyjnym. Był to most dla pieszych pomiędzy St-Antoine a Tranchées w Genewie³⁾. Wykonany przez niego rysunek koncepcyjny zachował się do dziś w archiwum miasta Genewa. Autorem rysunków detali (również zachowanych) był szwajcarski inżynier Henri Dufour. Oddany do użytku 1 sierpnia 1822 r. most miał rozpiętość 90 m, przy szerokości równej 2 m. Wagił 8 ton, a jego nośność określono na 165 osób o średniej masie 65 kg (rys. 2.54). Koszt jego budowy był niezwykle niski – 16 350 franków szwajcarskich (196 franków poniżej planowanego budżetu). Kolejna ważna realizacja to dwuprzęsłowy most na Renie w Tourmon, o rozpiętości każdego z przęseł 85 m, który był pierwszym dużym mostem wiszącym w Europie kontynentalnej. Został otwarty 22 stycznia 1824 r., po 18 miesiącach budowy (rys. 2.55). Przebudowany (podniesiony ze względu na ruch statków) w 1847 r. służy do chwili obecnej. Po sukcesie tego obiektu, Séguin zrealizował wielką ilość mostów o podobnej konstrukcji. W maju 1841 r. ich ilość podsumowano na siedemdziesiąt pięć. Wytrzymałość drutu w linach nośnych pierwszych mostów wiszących wynosiła ok. 600 MPa.

Wyniki swoich badań oraz doświadczenia z pierwszych realizacji Séguin opisał w pracy „Les ponts en fil de fer et la traction des câbles métalliques”, wydanej w roku 1824 i – ponownie – w 1826 r. Dzieło to, cechujące się wielką precyzją sformułowań i przystępnością było przez długi czas wykorzystywane w wytrzymałości materiałów [81] [220].

¹⁾ Pełny tytuł sprawozdania brzmi: Navier, C.L.M.H. „Rapport à Monsieur Becquey, conseiller d'état, directeur général des ponts et chaussées et des mines; et mémoire sur les pontes suspendus”, Imprimerie Royal, Paris, France 1823 [70].

²⁾ Wcześniej – w roku 1816, producenci drutu z Filadelfii, Josiah White i Erskine Hazard, wykonali tymczasową kładkę dla swoich pracowników nad rzeką Schuylkill (Fairmount, w Pensylwanii). Był to most wiszący o rozpiętości 124 m, do którego konstrukcji zastosowano produkowane przez nich druty. Nie było to jednak świadome wykorzystanie zwiększonej wytrzymałości materiału w drucie i nie zajmowali się oni dalej tą kwestią. Fakt ten mógł być znany Séguinowi, gdyż informację o nim opublikowało czasopismo „Le Moniteur”, z 8 grudnia 1821 r. [81] [220].

³⁾ Marcel Prade w książce „Ponts Monuments Historiques” wymienia most Passerelle de Saint-Fortunat-sur-Eyrieux, koło Eyrieux we Francji, wykonany w 1821 – jednak ta data jest kwestionowana jako nieprawdopodobna.

Marc Séguin (1786 – 1875), którego stryjczym dziadem i opiekunem był Joseph de Montgolfier, pionier lotów balonowych, zaznaczył się jako przemysłowiec i wybitny autor wielu innowacji i wynalazków oraz prac naukowych. Jego pierwszym przedsięwzięciem przemysłowym była założona przed 1820 r. fabryka papieru nad rzeką Cance w pobliżu jego rodzinnego miasta St. Marc, Annonay – później znana jako słynna firma „Canson et Montgolfier”. Był inicjatorem, projektantem i udziałowcem pierwszej we Francji linii kolejowej dostępnej komercyjnie do

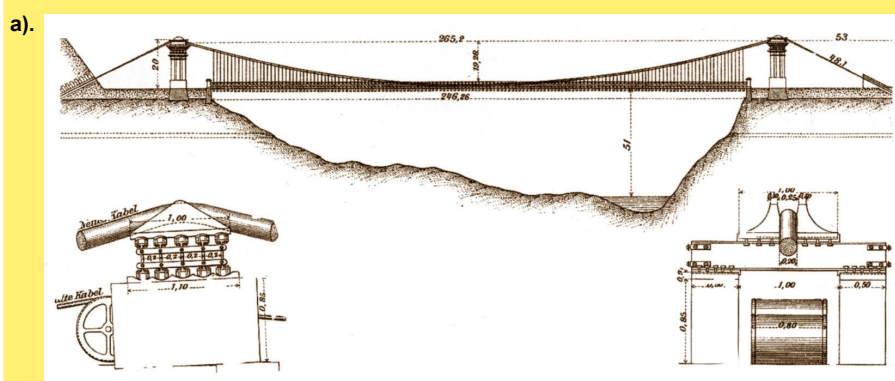


Rys. 2.54 – most dla pieszych zbudowany przez Séguina w roku 1823 pomiędzy St-Antoine a Tranchées w Genewie [233]



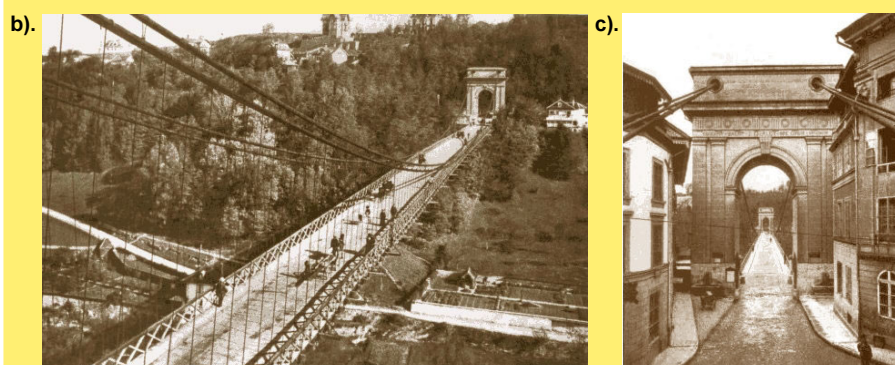
Rys. 2.55 – dwu-przęsłowy most na Renie w Tournon, otwarty 22.01.1824. [233]

przewozu towarów, otwartej w 1827 r. pomiędzy Saint Etienne a Andrézieux (18 km). Następnie, wraz z braćmi, akademikiem E. Biotem, hrabią Alexisem de Noailles oraz wynalazcą i producentem ołówek drewnianych – Armandem Humblot-Conté, założył „La Compagnie du chemin de fer de Saint Etienne à Lyon”, która wybudowała i uruchomiła w 1831 roku pierwszą francuską pasażerską linię kolejową Saint Etienne – Lyon. Podczas budowy tej linii, w latach 1827 – 1829, wybudował najdłuższy wówczas tunel na świecie: 1298 m. Miał również swój wkład techniczny w rozwój kolei. Opracował m.in. rurowy wymiennik ciepła, zastosowany w pierwszych lokomotywach Georgesa Stephensona (którego zresztą poznał osobiście podczas podróży do Anglii w 1825, podczas której wizytował budowaną wówczas pierwszą linię kolejową z Darlington do Stockton), wprowadził w 1827 r. drewniane podkłady kolejowe (wcześniej stosowano metalowe lub kamienne kostki). Séguin wniósł również wkład w rozwój budownictwa z betonu. W pracy z 1825 roku, która nie zachowała się do dzisiaj, zaproponował – niemal 70 lat wcześniej niż F. Hennebique – zastosowanie betonu zbrojonego. W tym samym roku opracował i zastosował po raz pierwszy beton hydrauliczny (fundamenty mostu w Tournon) oraz betoniarkę poziomą. W późniejszym okresie życia zajmował się naukowo astronomią. Urodzony pod rządami Ludwika XVI, zmarł w wieku 89 lat w czasach III Republiki.



Rys. 2.56 – most Grand Pont Suspendu (Pont de Zaehringen) nad rzeką Sarine we Fryburgu, zrealizowany w 1834 r. przez Josepha Chaleya:

- a). widok mostu i szczegół prowadzenia kabla [1.5]
- b). widok mostu z góry (zdjęcie wykonane z dachu sąsiedniego budynku) [233]
- c). widok na portyk mostu [233]



Grand Pont Suspendu został w latach 1922-23 rozebrany i zastąpiony wieloprzęsłowym żelbetowym mostem łukowym, zaprojektowanym przez szwajcarskiego inżyniera Richarda Coraya.

Budowa lin stalowych | W odróżnieniu od lin włókiennych, liny stalowe nie są wykonywane jako plecione ale wyłącznie jako kręcone. Wyjątkiem są tu liny o zwiciu kablowym (czasami klasyfikowane odrębnie od lin, jako kable prefabrykowane), które charakteryzują się równoległym układem włókien. Na rysunku 2.57. przedstawiono ogólny schemat budowy liny stalowej skręcanej. Podstawowe elementy budowy takiej liny to:

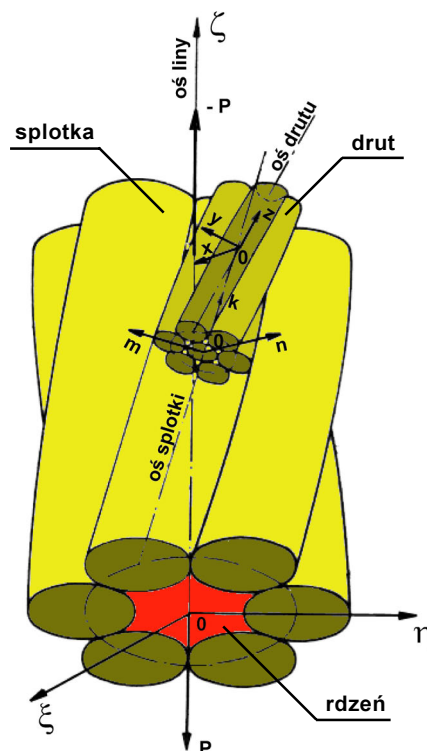
- drut
- splotka

Cechą charakterystyczną lin stalowych jest występowanie *rdzenia*, wokół którego są okręcone splotki. Może on być wykonany z metalu (z drutu lub z całej splotki) albo z włókien organicznych: naturalnych bądź chemicznych. Rdzeń zapewnia stabilność układu drutów w splotce oraz kształtu splotki i liny.

Klasyfikacja lin stalowych | Liny stalowe są klasyfikowane ze względu na różnorodne kryteria. Można je podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- kryteria związane z budową liny
- kryteria związane z materiałem liny

Ogólny schemat klasyfikacji i podziału lin stalowych przedstawiono na rys. 2.58.



Rys. 2.57 – ogólny schemat budowy liny stalowej skręcanej. Opracowano na podstawie [227].

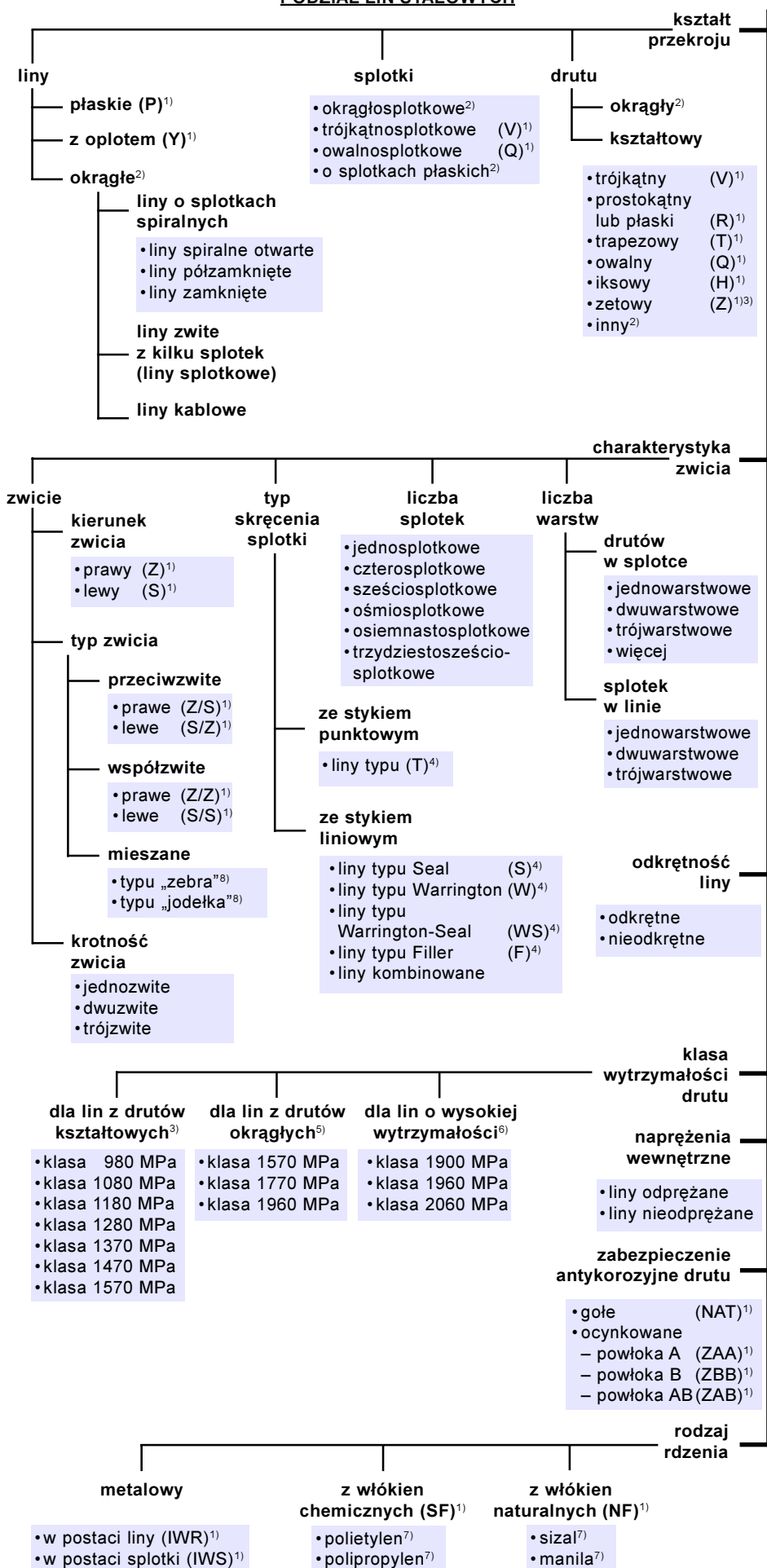
Liny z drutów zostały uznane za rozwiązanie idealne do mostów o dużych rozpiętościach w 1834 r. za sprawą Josepha Chaleya. Ten były żołnierz napoleoński o burzliwym życiu początkowo był lekarzem, później jednak zmienił zainteresowania i podjął współpracę z Séguinem, uczestnicząc w realizacji dwóch mostów. Następnie porzucił swojego mistrza, podejmując własną działalność. W roku 1830 przedstawił we Fryburgu w Szwajcarii swój projekt mostu nad rzeką Sarine, który wygrał z projektami konkurencyjnymi, w tym z projektem dawnego współpracownika Séguina – płk. Henri Dufoura. Ukończony w 1834 roku Grand Pont Suspendu (nazywany też Pont de Zaehringen) był pierwszym mostem wiszącym o konstrukcji linowej, którego rozpiętość przekroczyła rozpiętość mostów wiszących wykorzystujących łańcuchy jako ciężna nośne. Wynosiła ona 265.2 m, przy szerokości 7.5 m. Cztery liny nośne, o długości 374 m każda miały średnicę ok. 14 cm i składały się z 1056 drutów (rys. 2.56). Całkowity ciężar mostu wynosił 300 ton. Po sukcesie we Fryburgu Chaley zaprojektował w następnych latach wiele mostów wiszących. Jeden z nich – Pont de la Basse-Chaine nad Marną w Anger, o rozpiętości 102 m, zapisał się tragicznie w historii mostownictwa. W roku 1850, podczas przemarszu oddziału wojska rytmicznym, marszowym krokiem – most zawalił się, powodując śmierć 226 żołnierzy. Spowodowało to wprowadzenie we Francji moratorium na budowę mostów wiszących i na pewien czas zatrzymało ich rozwój w Europie.

Liny stosowane przez Séguina i Chaleya były to tzw. „girlandy”, czyli liny o budowie kablowej. Liny skręcane zostały wprowadzone do użycia w 1834 r. przez Wilhelma Alberta, wyższego urzędnika w kopalniach węgla w Clausthal w Harzu, w Niemczech. Były one skręcane ręcznie, z trzech splotek, każda składająca się z trzech drutów, w sposób analogiczny jak wykonywano liny włókienne. Nie posiadały jeszcze rdzenia włókiennego. Nazwano je „linami Alberta”. Ich pierwszym zastosowaniem były kopalniane urządzenia transportowe. Albert nie opatentował swojego pomysłu i udostępnił go powszechnie nie oczekując (i nie otrzymując !) jakiegokolwiek wynagrodzenia. Szybki rozwój górnictwa węgla kamiennego był jednym z czynników powodujących wielką presję na znalezienie zamiennika dla powszechnie wówczas stosowanych lin konopnych. Niezależnie od Alberta, angielski wynalazca, Andrew Smith, pracował nad zastosowaniem lin stalowych w ożaglowaniu statków. Skręcał on liny techniką „ścieżki linowej”, stosowaną przy wytwarzaniu lin włókiennych. W 1840 r. liny te zastosowano w nowo otwartej kolejce Blackwall Railroad w Londynie. W konstrukcjach mostowych liny skręcane zastosowano dopiero w 1896 r.

Wprowadzenie rdzeni włókiennych (konopnych lub z innego elastycznego materiału) do lin stalowych oraz opracowanie pierwszego urządzenia do ich wytwarzania jest zasługą Szkota, Roberta Newalla. Dowiedział się on o linach Alberta od swojego przyjaciela i późniejszego wspólnika, Lewisa Gordona, który studiując górnictwo odwiedził kopalnię w Harzu. Newall uzyskał patent na „...pewne udoskonalenia w budowie liny z drutów i urządzenie do ich wykonywania” 17 sierpnia 1840 r., rys. 2.74.

Dalszy postęp w budowie lin miał związek z rozwojem transportu szynowego w Ameryce i układaniem podmorskich linii telegraficznych. Tramwaje napędzane poruszającą się w kanale pod jezdnią liną, wymagały liny o kształcie jak najbardziej zbliżonym do okrągłego, a jednocześnie elastycznej i wytrzymałej. Jednocześnie na potrzeby kabla transatlantyckiego opracowywano nowe rozwiązania przekroju lin oraz sposoby ich zabezpieczania przed korozją. W tym okresie powstały liny typu Seale, Filler i Warrington [77] [180] [220].

PODZIAŁ LIN STALOWYCH



¹⁾ oznaczenie wg [N-16]

²⁾ brak oznaczenia wg [N-16]

³⁾ oznaczenie wg [N-08]

⁴⁾ oznaczenie wg nieobowiązującej obecnie normy PN-68/M-80200, stosowane jeszcze w normach dotyczących poszczególnych rodzajów lin

⁵⁾ wg [N-07]

⁶⁾ wg [N-09]

⁷⁾ wg [N-22]

⁸⁾ wg [5.44]

Niniejszy podział nie wyczerpuje wszystkich wariantów wykonania lin; nie obejmuje np. lin specjalnych dla dźwigów, dla górnictwa, rybołówstwa itp.

Rys. 2.58 – podział lin stalowych.
Opracowano na podstawie [N-05] [N-07] [N-08] [N-09] [N-13] [N-16] [N-22]

2.4.2. Rodzaje lin stalowych

Poniżej omówiono rodzaje lin stalowych ze względu na poszczególne kryteria klasyfikacyjne.

Poniżej podano angielskie odpowiedniki określeń dotyczących rodzajów lin stalowych, w oparciu o [N-05] i [5.44]:

2.4.2.1. Budowa liny

1). Kształt przekroju poprzecznego drutów

Ze względu na kształt przekroju poprzecznego drutów, wyróżniamy liny:

- z drutów okrągłych
- z drutów kształtowych (rys. 2.22):

trójkątnych (V)	owalnych (Q)
prostokątnych (R)	iksowych (H)
trapezowych (T)	zetowych (Z)

ang. shape of wire cross-section

2). Kształt przekroju poprzecznego spletek

Ze względu na kształt przekroju poprzecznego spletek, wyróżniamy liny:

- okrągłosplotkowe – najbardziej uniwersalne w zastosowaniach. Zbudowane są z 3 do 36 spletek z okrągłych drutów, rozmieszczonych w różnych osiowo-symetrycznie wokół rdzenia, przez co ich obrysem zewnętrznym jest okrąg, rys. 2.59.a).
- trójkątnosplotkowe – liny trójkątnosplotkowe składają się ze spletek o kształcie trójkątnym. Splotki zbudowane są z drutów rozmieszczonych wokół rdzenia uformowanego z trzech lub więcej okrągłych drutów, rys. 2.59.b).
- owalnosplotkowe – liny owalnosplotkowe składają się ze spletek o kształcie owalnym. Splotki owalne zbudowane są z drutów rozmieszczonych wokół owalnej taśmy rdzeniowej lub wokół grupy (zwykle 4) okrągłych drutów ułożonych równolegle, rys. 2.59.c).

ang. shape of strands

ang. round strand ropes

ang. triangular strand ropes

ang. oval strand ropes

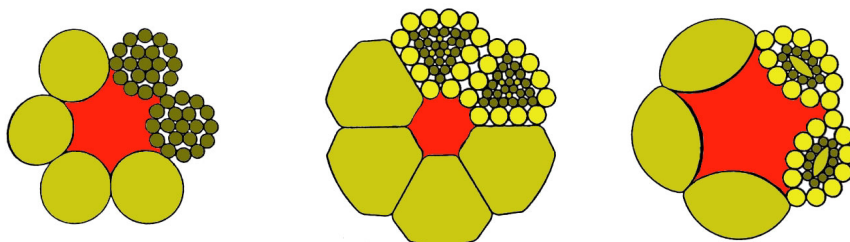
Niektóre typy lin, zwłaszcza odpornych na skręcanie, zbudowane są z kombinacji spletek owalnych układanych na spletkach trójkątnych lub odwrotnie. Ze względu na swój kształt, liny trójkątno- i owalnosplotkowe mają mniejszy rdzeń i większy przekrój metaliczny niż liny okrągłosplotkowe o tej samej średnicy. Liny te mają gładszą powierzchnię od lin okrągłosplotkowych, dzięki czemu przy nadają się dobrze do zastosowania w urządzeniach z ruchomymi elementami, gdyż wykazują mniejsze zużycie na skutek ścierania i mniejszą utratę kształtu na skutek docisku.

ang. flattened strand ropes

(łączne określenie lin trójkątno- i owalnosplotkowych)

- o spletkach płaskich – przekrój poprzeczny splotek ma w przybliżeniu kształt prostokąta lub równoległoboku

ang. ribbon strand



a). lina okrągłosplotkowa b). lina trójkątnosplotkowa c). lina owalnosplotkowa

Rys. 2.59 – podział lin stalowych ze względu na kształt przekroju poprzecznego (opis w tekście).
Opracowano na podstawie PN-68/M-08200

3). Kształt przekroju poprzecznego lin

Ze względu na kształt przekroju poprzecznego lin, wyróżniamy liny:

- płaskie (P) – kilka lin lub spletek okrągłych, połączonych w szereg, rys. 2.60.g).
- z oplotem (Y), rys. 2.60.f).
- okrągłe:
 - a). o spletkach spiralnych
 - liny spiralne – składają się z samych drutów okrągłych, rozmieszczonych wokół rdzenia. Są to liny o najprostszej budowie, wykorzystywane wyłącznie w zastosowaniach statycznych, gdzie lina pozostaje nieruchoma w czasie eksploatacji – przede wszystkim w budownictwie, rys. 2.60.a).

ang. shape of rope

ang. flat ropes

ang. braided ropes

ang. round ropes

ang. spiral strands ropes

ang. single strand ropes, (concentric strand ropes)

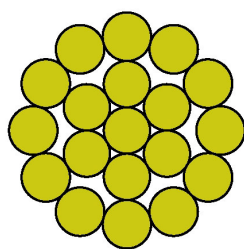
- liny półzamknięte
- liny zamknięte – co najmniej jedna warstwa zewnętrzna jest wykonana z drutów kształtowych typu Z lub S (rys. 2.22), a warstwy wewnętrzne z drutów okrągłych lub z drutów okrągłych i trapezowych, rys.2.60.c),d),e).
- b). zwite z kilku splotek – kilka splotek zwitych razem spiralnie w jedną lub więcej warstw wokół rdzenia, rys. 2.60.b)
- c). liny kablowe – wiązka równoległych drutów lub lin, często w osłonie zewnętrznej, zazwyczaj prefabrykowana na placu budowy. Są to liny przeznaczone do przenoszenia bardzo dużych sił, np. w mostach wiszących. Budowa kablowa pozwala uniknąć efektu wydłużenia liny pod obciążeniem na skutek „rozprostowywania się” skręconych drutów; rys. 2.61.

ang. half-lock coil ropes

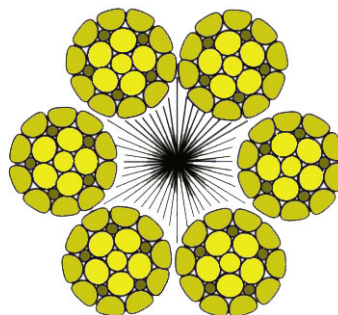
ang. full-lock coil ropes

ang. stranded ropes

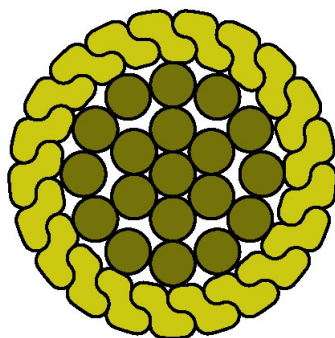
ang. cable laid ropes



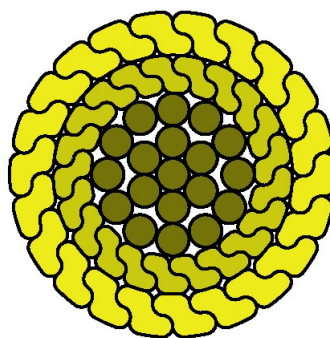
a). lina spiralna 1×19



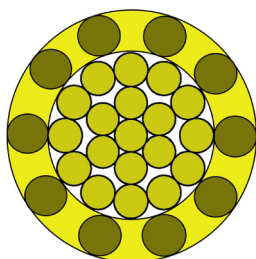
b). lina splotkowa FWR 6×21



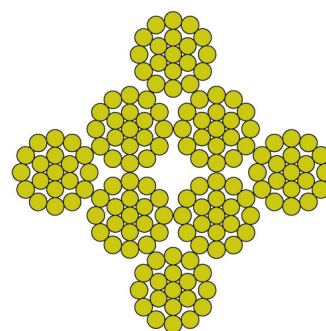
c). lina zamknięta 19+Z



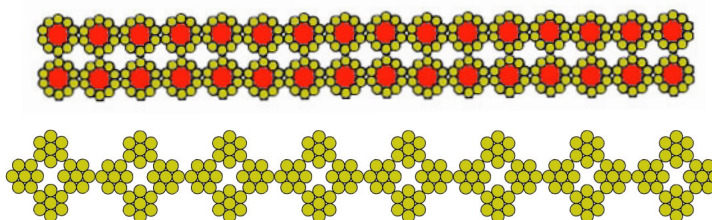
d). lina zamknięta 19+Z+Z



e). lina zamknięta Power-Loc HLC



f). lina z opłotem



g). liny płaskie

Rys. 2.60 – podział lin stalowych okrągłych ze względu na kształt przekroju poprzecznego (opis w tekście):

- a). lina spiralna 1×19
 - b). lina splotkowa FWR 6×21¹⁾
 - c). lina zamknięta 19+Z
 - d). lina zamknięta 19+Z+Z
 - e). lina zamknięta Power-Loc HLC, firmy Wire Rope Industries
 - f). lina stalowa z opłotem (Y)
 - g). liny płaskie P 32×10 P8[4(6+1)+NF]
- Opracowano na podstawie [19], [40], [3], oraz [N-16].

Przeciętne średnice lin spiralnych wynoszą zwykle do 70 mm [2.1]. Największe obecnie urządzenia produkcyjne pozwalają wyprodukować pojedynczą splotkę o średnicy 115 mm, a linę 6 lub 8 splotkową – o średnicy 178 mm.

Dla lin o średnicy do 51 mm, możliwe jest wyprodukowanie jednego odcinka liny długości 8 800 m [40].

Liny wielozwite są obecnie produkowane o średnicach do 250 mm [162].

Liny zamknięte są produkowane od 1886 r. Największa obecnie lina zamknięta ma średnicę 180 mm [178].

Średnica lin kablowych produkowanych w wytwórni może wynosić 305 mm [40], a prefabrykowanych na placu budowy – może przekraczać 1 m [162].

¹⁾ Lina ma warstwę zewnętrzną wykonaną z drutów kształtowych owalnych; jest to lina przeznaczona do stosowania w dźwigach samojezdnych.



a). widok fragmentu liny kablowej



b). przekrój przez linę kablową

Rys. 2.61¹⁾ – lina kablowa – ciągnio nośne mostu wiszącego Tsing Ma w Hong Kongu:

a). widok fragmentu liny z węzłem do mocowania wieszaków

b). przekrój poprzeczny przez linę; widoczny jest równoległy układ drutów

4). Liczba warstw drutów w splotce

Ze względu na liczbę warstw drutów w splotce, wyróżniamy liny:

- jednowarstwowe, rys. 2.62.a).
- dwuwarstwowe, rys. 2.62.b).
- trójwarstwowe, rys. 2.62.c).
- o ilości warstw większej niż trzy, rys. 2.62.d),e).

5). Liczba warstw splotek w linie

Ze względu na liczbę warstw splotek w linie, wyróżniamy liny:

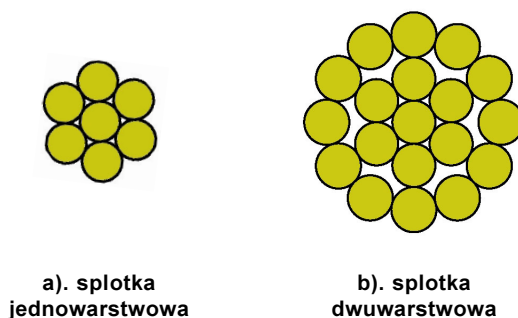
- jednowarstwowe – jedna warstwa splotek w linie, rys. 2.63.a).
- dwuwarstwowe – dwie warstwy splotek w linie, rys. 2.63.b).
- trójwarstwowe – trzy warstwy splotek w linie

6). Liczba splotek w linie

Ze względu na liczbę splotek w linie, wyróżniamy liny:

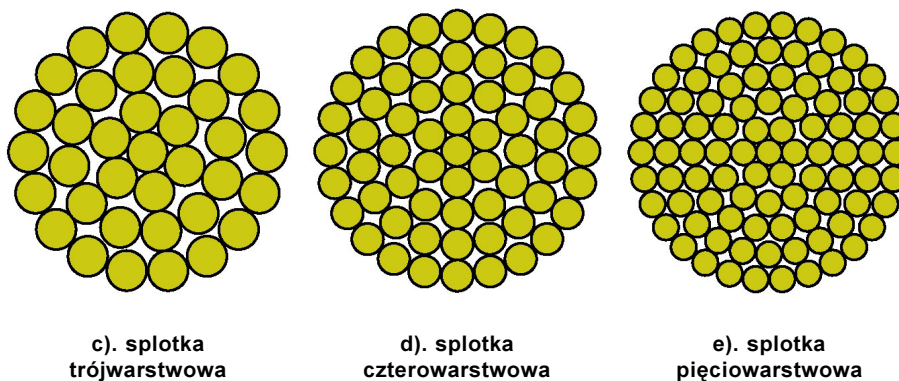
- jednosplotkowe, rys. 2.62
- czterosplotkowe, rys. 2.63.a)
- sześćsplotkowe, rys. 2.60.b).
- ośmiosplotkowe
- osiemnastosplotkowe
- trzydziestosześćsplotkowe

Najprostsze splotki jednowarstwowe mogą składać się z dwóch, trzech lub czterech drutów. Charakteryzują się one brakiem drutu środkowego. W terminologii angielskiej są one określane jako „Centerless Grouping”. Najczęściej splotki jednowarstwowe składają się z siedmiu drutów, rys. 2.62.a).



a). splotka jednowarstwowa

b). splotka dwuwarstwowa



c). splotka trójwarstwowa

d). splotka czterowarstwowa

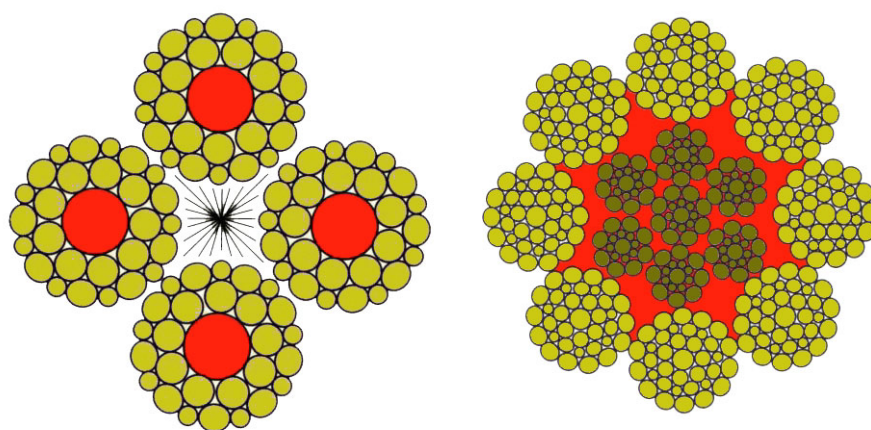
e). splotka pięciowarstwowa

Rys. 2.62 – podział lin stalowych ze względu na liczbę warstw drutów w splotce:

- a). splotka jednowarstwowa 1×7
- b). splotka dwuwarstwowa 1×19
- c). splotka trójwarstwowa 1×37
- d). splotka czterowarstwowa 1×61
- e). splotka pięciowarstwowa 1×91

Opracowano na podstawie [3]

¹⁾ Fotografia autora.



a). lina jednowarstwowa

b). lina dwuwarstwowa

Rys. 2.63 – podział lin stalowych ze względu na liczbę warstw splotek w linie:

a). lina jednowarstwowa

b). lina dwuwarstwowa

Opracowano na podstawie [18]

7). Typ skrócenia

Jeżeli splotka jest zbudowana z dwóch lub więcej warstw drutów skróconych wokół rdzenia, druty poszczególnych warstw mogą leżeć na wypukłościach drutów warstwy dolnej (styk punktowy) lub w żłobkach utworzonych pomiędzy drutami tej warstwy (styk liniowy). Zależy to od tego, czy druty kolejnych warstw mają kierunek równoległy, czy też nie.

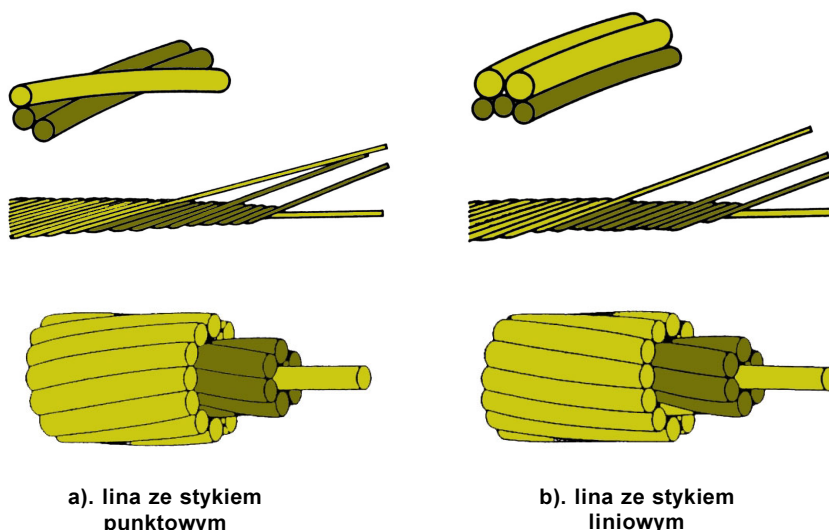
Ze względu na typ skrócenia, wyróżniamy liny:

- ze stykiem punktowym¹⁾ – liny, wykonane z drutów mających jednakową średnicę, są ułożone w kilku warstwach, przy czym kierunek zwicha każdej następnej warstwy jest przeciwny do poprzedniej, rys. 2.64.a). Liny o tego rodzaju budowie mają zakres zastosowań ograniczony w stosunku do lin ze stykiem liniowym. W elementach ruchomych mogą być stosowane jedynie małe średnice. Liny ze stykiem punktowym o większych średnicach mogą być używane wyłącznie w zastosowaniach statycznych.
- ze stykiem liniowym – liny wykonane są z drutów ułożonych w kilku warstwach, o równoległym przebiegu, rys. 2.64.b). Liny te są preferowane w większości zastosowań, w których lina jest ruchoma. Druty są w nich lepiej podparte. Mają one większą stabilność kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego w czasie eksploatacji, większą wytrzymałość zmęczeniową.

ang. type of stranding

ang. cross-laid ropes, non-parallel lay ropes

ang. equal laid ropes, parallel lay ropes



a). lina ze stykiem punktowym

b). lina ze stykiem liniowym

Rys. 2.64 – podział lin stalowych ze względu na typ skrócenia (opis w tekście):

a). lina ze stykiem punktowym

b). lina ze stykiem liniowym

Opracowano na podstawie [176] i [N-05].

W grupie lin ze stykiem liniowym wyróżniamy liny typu:

Seal (S) – druty w poszczególnych warstwach mają jednakowe średnice, różne pomiędzy warstwami, rys. 2.65.a).; liny te charakteryzują się zwiększoną elastycznością w stosunku do lin wykonanych z jednakowych drutów

Thomas Seale uzyskał patent na linę własnej konstrukcji 7 kwietnia 1885 (patent amerykański nr 315 077).

¹⁾ są to liny typu T, wg PN-68/M-08200

Warrington (W) – w zewnętrznej warstwie znajdują się druty o dwóch różnych średnicach, rys. 2.65.b).; liny te mają zwiększoną szczelność, zbliżoną do szczelności ostatniego rzędu lin zamkniętych

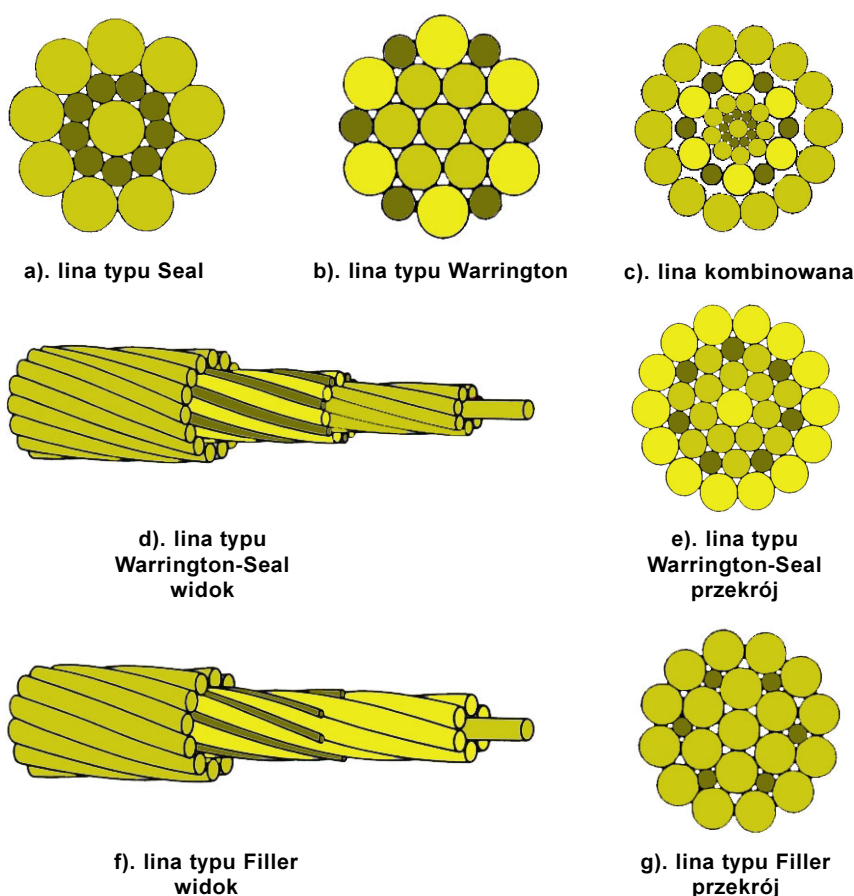
Warrington-Seal (WS) – lina jest zbudowana z warstw drutów o jednakowej średnicy i warstw drutów o różnych średnicach, rys. 2.65.d).e).; lina łączy zalety lin obu rodzajów

Filler (F) – lina jest zbudowana z warstw drutów o jednakowych średnicach, między którymi, w wolnych przestrzeniach umieszczono druty wypełniające o mniejszej średnicy rys. 2.65.f).g).; liny te charakteryzują się zwiększonym polem przekroju poprzecznego i lepszym podparciem drutów w warstwie zewnętrznej, w stosunku do lin o tej samej średnicy, zbudowanych z jednakowych drutów

kombinowane – liny, w których w poszczególnych warstwach występuje styk liniowy i punktowy; w czasie jednej operacji splatane są dwie lub więcej warstwy o powyższej budowie, rys. 2.65.c).

Lina typu Warrington została opracowana przez angielską wytwórnię lin Warrington Wire Rope Works Ltd. w ostatnim dziesięcioleciu XIX w.

Linę typu Filler opracował Amerykanin, James Stone, uzyskując 3 grudnia 1889 r. patent amerykański nr 416 189.



Rys. 2.65 – liny stalowe ze stkiem liniowym (opis w tekście):

- lina typu Seal
- lina typu Warrington
- lina kombinowana
- lina typu Warrington-Seal – widok
- lina typu Warrington-Seal – przekrój
- lina typu Filler – widok
- lina typu Filler – przekrój

Opracowano na podstawie [4][162].

7). Kierunek zwicia

Ze względu na kierunek zwicia, wyróżniamy liny:

- prawe, typu Z
- lewe, typu S

kierunek zwicia dla lin stalowych jest określany analogicznie jak dla lin włókiennych, rys. 2.41. Zdecydowana większość lin jest produkowana jako liny prawe (Z). Liny lewe (S) mają ograniczony zakres zastosowań.

ang. direction of lay

ang. right-hand, right lay

ang. left-hand, left lay

8). Typ zwicia

Ze względu na typ zwicia, wyróżniamy liny:

- przeciwwzite – kierunek zwicia splotki jest odwrotny niż kierunek zwicia liny; w linach przeciwwzitych momentowi rozkręcającemu splotki w linie przeciwdziała moment rozkręcający druty w splotkach; lina przeciwwzita jest sztywniejsza i ma mniejszą wytrzymałość zmęczeniową niż lina współzwita; wyróżniamy liny:

ang. type of lay

ang. regular lay rope,
ordinary lay rope,
cross lay rope

przeciwwzite prawe (Z/S) – kierunek zwicia liny prawy, a splotki lewy

ang. *right lay – regular lay rope*



Rys. 2.66 – lina stalowa o zwiciu Z/S. [40]

przeciwwzite lewe (S/Z) – kierunek zwicia liny lewy, a splotki prawy

ang. *left lay – regular lay rope*



Rys. 2.67 – lina stalowa o zwiciu S/Z. [40]

– współzwite – kierunek zwicia splotki jest taki sam jak kierunek zwicia liny; wyróżniamy liny:

ang. *lang lay¹⁾ rope*

współzwite prawe (Z/Z) – liny i splotki mają kierunek zwicia Z

ang. *right lay – lang lay rope*



Rys. 2.68 – lina stalowa o zwiciu Z/Z. [40]

współzwite lewe (S/S) – liny i splotki mają kierunek zwicia S

ang. *left lay – lang lay rope*



Rys. 2.69 – lina stalowa o zwiciu S/S. [40]

– mieszane – część splotek ma kierunek zwicia zgodny z kierunkiem zwicia liny, a część – przeciwny; wyróżniamy liny typu:

„zebra” – w tej linie trzy splotki są prawe (Z), a trzy lewe (S). Splotki te są umieszczane w linie na przemian. Kierunek zwicia liny typu „zebra” może być prawy (Z) lub lewy (S). Zakres zastosowań tego typu lin jest bardzo ograniczony [40].

ang. *Zebra, alternate-lay*



Rys. 2.70 – lina stalowa typu „zebra”, o zwiciu Z. [40]

„jodełka” – lina ta jest kombinacją splotek prawych (Z) i lewych (S). Zwykle składa się ona z dwóch par splotek prawych i dwóch pojedynczych splotek lewych, rozdzielających te pary. Kierunek zwicia liny typu „jodełka” może być prawy (Z) lub lewy (S) [40].

ang. *Herringbone, twin-strand*



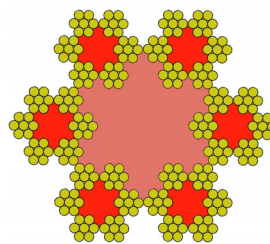
Rys. 2.71 – lina stalowa typu „jodełka”, o zwiciu S. [40]

¹⁾ angielskie określenie lin współzwitych „lang lay rope” pochodzi od nazwiska Johna Langa, który uzyskał w roku 1880 patent na linę o takiej budowie

9). Krotność zwicia

Ze względu na krotność zwicia, wyróżniamy liny:

- jednozwite – druty skręcone w splotkę stanowiącą linę, rys. 2.62
- dwuzwite – druty skręcone w splotki, a splotki w linę, rys. 2.63
- trózwite – druty skręcone w splotki, splotki w liniska, a liniska w liny, rys. 2.72



Rys. 2.72 – lina trózwita (opis w tekście). Opracowano na podstawie [227].

10). Odkrętność

Ze względu na odkrętność wyróżniamy liny:

- odkrętne – liny mające tendencję, przy swobodnym zwisie pod obciążeniem, do obracania się wokół własnej osi
- nieodkrętne – liny mające tendencję do obracania się wokół własnej osi, przy swobodnym zwisie pod obciążeniem

ang. *balancing*

ang. *ropes with low torsional stresses*

2.4.2.2. Materiał liny

1). Klasa wytrzymałości drutu

Ze względu na klasę wytrzymałości drutu wyróżniamy liny w klasie wytrzymałości:

- dla lin ogólnego przeznaczenia z drutów okrągłych: 1570, 1770, 1960 MPa
- dla lin ogólnego przeznaczenia z drutów kształtowych: 980, 1080, 1180, 1280, 1370, 1470, 1570 MPa
- dla lin o dużej wytrzymałości: 1900, 1960, 2060 MPa

ang. *material*

ang. *tensile grade*

2). Naprężenia wewnętrzne

Ze względu na naprężenia wewnętrzne wyróżniamy liny:

- odprężane – liny poddane zabiegowi odprężania, polegającego na nadaniu splotkom przed skręceniem ich w linę wstępnej deformacji śrubowej o takim skoku, jaki ma mieć zwita lina; jest to tzw. deformowanie splotek zmniejszające naprężenia wewnętrzne¹⁾. Liny odprężane są prawie całkowicie zabezpieczone przed odkręcaniem się: splotki w linie i druty w splotkach zachowują swoje położenie w linie po zdjęciu opaski zabezpieczającej z końca liny lub po przecięciu liny. Liny odprężane są łatwiejsze w operowaniu, mają dłuższy okres eksploatacji, są odporniejsze na załamania i zapętlenia. W przypadku pęknięcia drutu w warstwie zewnętrznej, wykazuje on tendencję do przylegania do liny – nie odstaje. W linach odprężanych obciążenie jest bardziej równomiernie rozłożone na splotki niż w linach nieodprężanych.
- nieodprężane – liny nie poddane zabiegowi odprężania; są to liny rozkręcające się: splotki w linie i druty w splotkach nie zachowują swojego położenia w linie; zdjęcie opaski zabezpieczającej z końca liny lub po przecięciu liny powoduje gwałtowne rozkręcenie splotek i drutów oraz utworzenie się tzw. „miotły” z rozkręconych drutów, rys. 2.73.

ang. *internal stresses*

ang. *trulay ropes, ropes with low internal stresses*



Rys. 2.73 – odkształcenia liny nieodprężonej po zdjęciu opaski zabezpieczającej koniec. [40]

¹⁾ W roku 1884 C.C. Colby opatentował maszynę i metodę nadawania drutowi lub skrętce kształtu spiralnego. Wynalazek ten wyprzedził jednak swój czas i przez pewien okres pozostawał w zapomnieniu. Obecnie zdecydowana większość produkowanych lin stalowych jest poddawana zabiegowi odprężania [85].

3). Zabezpieczenie antykorozyjne drutu

ang. protective coating

Ze względu na zabezpieczenie antykorozyjne drutu wyróżniamy liny:

- z drutów gołych
- z drutów ocynkowanych
 - jakość powłoki A – tylko w klasie wytrzymałości 1570 MPa
 - jakość powłoki B – dla wszystkich klas wytrzymałości
 - jakość powłoki AB – tylko w klasie wytrzymałości 1570 i 1770 MPa

ang. bright steel

ang. galvanized

4). Rodzaj rdzenia

ang. core

Ze względu na rodzaj rdzenia wyróżniamy liny:

- z rdzeniem z włókien naturalnych (NF)
 - z rdzeniem z manili
 - z rdzeniem z sizalu
- z rdzeniem z włókien chemicznych (SF)
 - z rdzeniem z polietylenu
 - z rdzeniem z polipropylenu
- z rdzeniem metalowym
 - z rdzeniem w postaci liny (IWR)
 - z rdzeniem w postaci splotki (IWS)

ang. natural fibers core

ang. man-made fibers core

ang. metal core

Rdzenie główne z włókien naturalnych i chemicznych powinny być wykonane z całkowicie nowych, mocnych włókien. Powinny być skręcone z co najmniej trzech splotek. Każdy zwój powinien być ciągły na swojej długości. Do rdzenia stosuje się natłustki, które nie powinny zawierać kwasów i wilgoci.

2.4.3. Oznaczenia lin stalowych

Zgodnie z normą [N-16] stosowane są dwa rodzaje oznaczeń lin stalowych: pełne i skrócone.

Oznaczenie pełne | Pełne oznaczenie lin stalowych wg [N-16] powinno określać właściwości liny według kolejności, w której są poniżej wymienione:

- wymiar liny
 - dla lin okrągłych – średnica nominalna, w milimetrach
 - dla lin z oplotem – średnica okręgu opisanego na linie, w milimetrach
 - dla lin płaskich – wymiary prostokąta, w którym wpisano linę łącznie z szyciem, w milimetrach
- stan powierzchni (obróbki) drutu – sposób zabezpieczenia antykorozyjnego druty wyrażony symbolem literowym¹⁾
- budowa liny (kształt przekroju poprzecznego splotki i liny, typ skręcenia splotki) wyrażony symbolem literowym¹⁾
- klasa wytrzymałości drutu – w N/mm² (MPa)
- kierunek zwicia i typ zwicia – wyrażony symbolem literowym¹⁾
- minimalne obciążenie niszczące – wartość nominalna w kN lub numer związanej normy międzynarodowej
- masa jednostkowa – wartość nominalna wyrażona w kg/100m lub numer związanej normy międzynarodowej

Przykłady oznaczeń pełnych:

18 NAT 6(9+9+1)+NF 1770 ZZ 190 121
18 NAT 6(9+9+1)+NF 1770 ZZ ISO 2408

Oznaczenie skrócone | Według [N-16] dopuszczalne jest stosowanie skrótów oznaczeń, pod warunkiem że właściwości są podawane w takiej samej kolejności, jak dla oznaczeń pełnych.

Przykłady oznaczeń skróconych:

18 NAT 6 × 19 + Seale + NF 1770 ZZ 190
18 NAT 6 × 19 + Seale + NF

¹⁾ Oznaczenia literowe stosowane w oznaczeniach lin stalowych podano na rys. 2.58, w pktcie 2.4.2 oraz przy omawianiu właściwości drutów stalowych

Oznaczenie wg PN-68/M-80200 | Wymieniona norma została wycofana w 1999 r. i zastąpiona normą międzynarodową [N-16] ale pozostaje wciąż w użyciu szereg norm dotyczących poszczególnych lin¹⁾, które posługują się przyjętym w niej sposobem oznaczania. Oznaczenia te wciąż są też stosunkowo szeroko stosowane w praktyce.

Oznaczenie liny stalowej wg PN-68/M-80200 powinno zawierać:

- część słowną
- oznaczenie konstrukcji
- rodzaj styku drutów w splotach
- liczbę rdzeni i ich materiał
- kierunek zwicia liny i splotek
- liczbę splotek
- wzajemny układ zwicia i splotek
- stan naprężeń wewnętrznych w linie
- odkrętność liny
- klasę jakości
- rodzaj pokrycia drutów
- nominalną wytrzymałość na rozciąganie
- numer normy

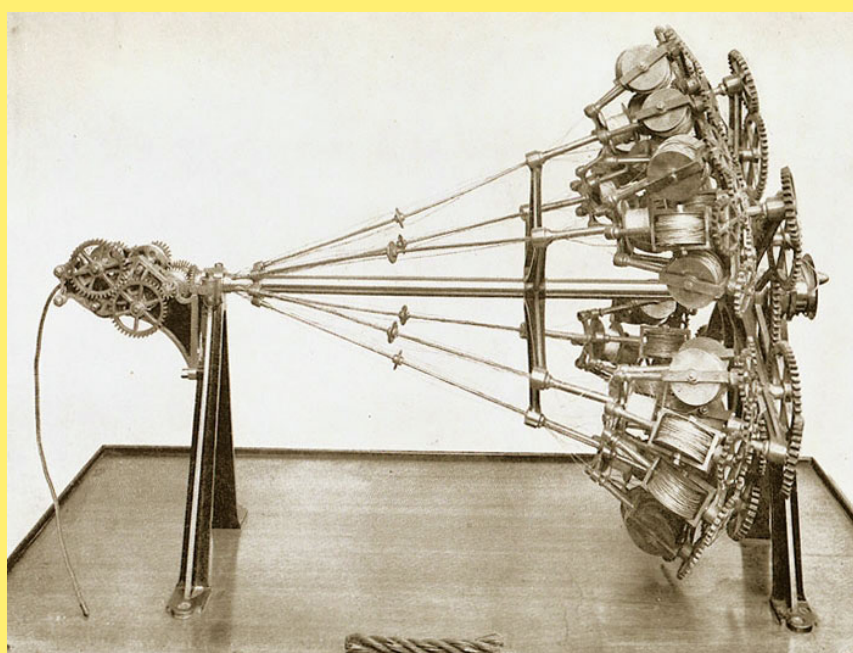
Przykład oznaczenia:²⁾

Lina 10.0 — T6 × 24 + 7A_o — Z/s — II — G — 160, PN-69/M-08212

oznacza ono linę o średnicy nominalnej $d = 10.0$ mm, konstrukcji T6×24 z 7 rdzeniami organicznymi A_o, prawą, przeciwwitą (Z/s), nieodprężaną, klasy jakości II, z drutu ocynkowanego warstwą grubą (G), o nominalnej wytrzymałości drutu na rozciąganie $R_m = 160$ kG/mm², okrągłą, okrągłosplotkową, z drutów o jednakowej średnicy, dwuzwitych, sześciopłatkowych jednowarstwowych, ujętą w normie PN-69/M-08212.

2.4.4. Produkcja lin stalowych

Mimo upływu ponad stu sześćdziesięciu lat, podstawowe zasady wytwarzania i ogólna budowa maszyn do produkcji lin są bardzo podobne jak w pierwszej maszynie opracowanej przez Roberta Stirlinga Newalla w 1840 r., rys. 2.74.



Rys. 2.74 – model oryginalnej maszyny R.S. Newalla do produkcji skręcanych lin stalowych, na którą otrzymał w dniu 17 sierpnia 1840 r. patent brytyjski. W linach produkowanych za pomocą tej maszyny zastosowano po raz pierwszy rdzeń włókienny, co również było przedmiotem patentu. [77]

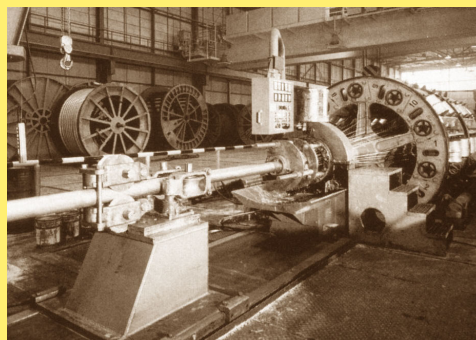
¹⁾ Normy o numerach PN/M-80202 + PN/M-80234

²⁾ Niektóre symbole literowe stosowane w oznaczeniach lin wg PN-68/M-08200 podano na rys. 2.58

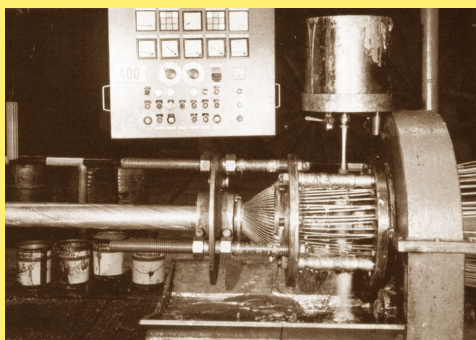
Współczesne maszyny do produkcji lin stalowych, nazywane splotarkami lub liniarkami, występują w dwóch odmianach: maszyn planetarnych i maszyn rurowych. Są to sterowane komputerowo urządzenia, o znacznych wymiarach i masie, rys. 2.75. Umożliwiają one wykonywanie splotek i lin o dużych średnicach [40][162]:

- 115 mm dla splotki
- 178 mm dla liny 6 lub 8 splotkowej
- do 250 mm dla lin wielozwitych
- 305 mm dla lin kablowych

Maksymalna długość lin zależy od ich średnicy i może wynosić do ok. 9 km dla lin o średnicy 51 mm. Produkcja lin zamkniętych wymaga stosowania dużych i skomplikowanych urządzeń. Z tego powodu są one produkowane w stosunkowo niewielu krajach, przede wszystkim w wysoko uprzemysłowionych krajach o długiej i silnej tradycji produkowania lin: w Niemczech, Francji, Wielkiej Brytanii [178].



Rys. 2.75 – współczesne stanowisko do produkcji lin stalowych (maszyna planetarna). [40]



W maszynach planetarnych szpule z drutem obracają się wokół osi podłużnej urządzenia. Maszyny tego typu są najpowszechniej wykorzystywane przy produkcji lin.

W maszynach rurowych – szpule umieszczone są nieruchomo wewnątrz długiego cylindra, wraz z którym się obracają. Ten rodzaj urządzeń stosuje się najczęściej do wykonywania splotek typu 1×7 [85].

Podczas skręcania liny są smarowane od wewnątrz i od zewnątrz¹⁾. Zapewnia to zmniejszenie tarcia pomiędzy drutami w splotce i splotkami w linie, które przy wszelkich jej zagięciach (nawet po małej krzywiznie) przesuwają się względem siebie. Jest to szczególnie ważne w zastosowaniach mechanicznych. Smarowanie poprawia ponadto odporność korozyjną lin. Rdzenie włókienne w linach są poddawane specjalnej obróbce w celu usunięcia nadmiaru wilgoci. Ponadto są one impregnowane odpowiednimi natłustkami [N-22]. Ponieważ wewnętrzne naciski w linie powodują wyciskanie smaru zarówno z rdzenia jak i pomiędzy drutów, konieczne jest systematyczne powtarzanie smarowania w czasie eksploatacji.

Druty w splotkach mogą być łączone. Dla drutów o średnicy powyżej 0.4 mm powinny być łączone przez zgrzewanie elektryczne stykowe lub lutowanie lutem twardym. Dla mniejszych średnic dopuszczalne jest również skręcanie. Wolne końce lin są zabezpieczane przed rozkręceniem przez założenie opasek zaciskowych lub oplecenie cienkim drutem [N-13].

Dla konstrukcji z liniowym stykiem drutów niezbędne jest, aby wszystkie druty splotki były splecione w czasie jednej operacji [N-13]. W linach wielosplotkowych, wszystkie splotki w danej warstwie powinny być tej samej konstrukcji i tej samej długości skoku zwicia.

Stosunek powierzchni przekroju metalu do powierzchni koła opisanego na splotce jest nazywany *współczynnikiem wypełnienia* [N-05]. Wartość tego współczynnika zależy od budowy liny i np. dla lin spiralnych otwartych wynosi 0.75 [201].

W całości produkcji stali liny stanowią bardzo niewielką część. Według danych niemieckich [201] zaledwie 1‰ wyprodukowanej stali jest przetwarzany na druty, z których są wykonywane liny. Liny przeznaczone dla budownictwa stanowią małą część ogólnej produkcji lin. Większość produkcji lin jest przeznaczona na potrzeby górnictwa, dźwigów, dla żeglugi morskiej i rybołówstwa, dla wiertnictwa oraz dla kolei linowych napowietrznych i terenowych. Wśród zastosowań budowlanych największa ilość lin jest zużywana do wykonywania konstrukcji sprężonych, a następnie na ciągną w mostach podwieszonych (wanty).

Do wykonywania konstrukcji membranowych zużywana jest mała część ogólnej ilości lin wykorzystywanych w budownictwie. Liny przeznaczone do takich zastosowań nie muszą też spełniać niektórych wymagań stawianych np. linom przeznaczonym dla dźwigów, w zakresie elastyczności, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na zginanie na kołach wciągarek, odporności na ścieranie, stabilności kształtu przekroju poprzecznego itp.

¹⁾ Smary do lin powinny odpowiadać wymaganiom normy ISO 4346

ang. *seizing*

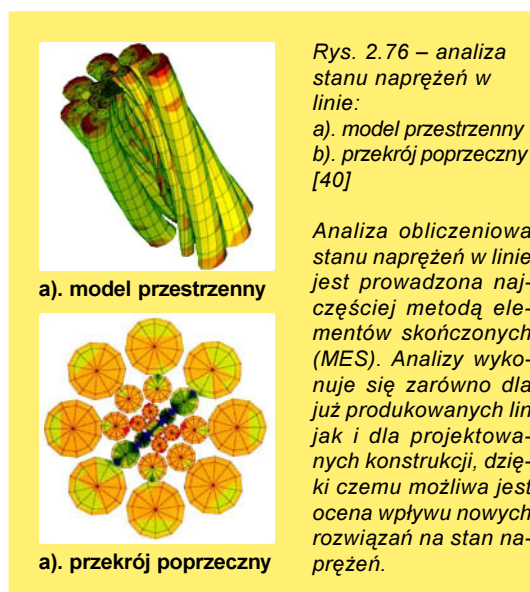
ang. *fill factor*

Niektóre rodzaje lin są wykonywane podczas kilku operacji splatania następujących po sobie (ang. *Multiple Operation Principle*). Używanie gładkiej powierzchni zewnętrznej lin o takiej budowie wymaga starannego dopasowania długości skoku i kierunku skrętu warstw [85].

Pewne wymagania w stosunku do lin na konstrukcje membranowe wynikają ze sposobu zakotwienia i sposobu wykonywania połączeń pomiędzy linami. Przy zastosowaniu zacisków mechanicznych należy stosować liny o liniowym styku drutów, gdyż są one bardziej odporne na miejscowy docisk w złączu.

Proces produkcji lin obejmuje cały szereg procesów technologicznych, mających na celu dostosowanie charakterystyki liny do jej przeznaczenia. Wyroby wiodących producentów charakteryzują się wysokim stopniem „dedykowania” liny, tzn. dostosowaniem jej do przewidywanego zastosowania. W procesie projektowania nowych rodzajów lin wykonuje się [40]:

- analizy metalurgiczne, obejmujące pełną analizę składu chemicznego stali oraz jej struktury krystalicznej, w celu optymalnego doboru drutów dla danego rodzaju liny
- komputerową optymalizację kształtu i wielkości drutów, co pozwala na uzyskanie najlepszej kombinacji kosztów i właściwości dla danego zastosowania
- specjalistyczne badania laboratoryjne niemetalicznych elementów liny: rdzeni włókiennych i chemicznych oraz smarów – w celu dobrania ich najlepszej kombinacji
- kompleksową analizę obliczeniową stanu naprężeń; pozwala to na zlokalizowanie wszystkich miejsc krytycznych w splotkach i w linie, a dzięki temu umożliwia odpowiednią korektę rozwiązania, rys. 2.76
- testy laboratoryjne, obejmujące wytrzymałość doraźną, zmęczeniową, badania reologiczne, próby zginania itp., również badania w warunkach symulujących przewidywane warunki polowe



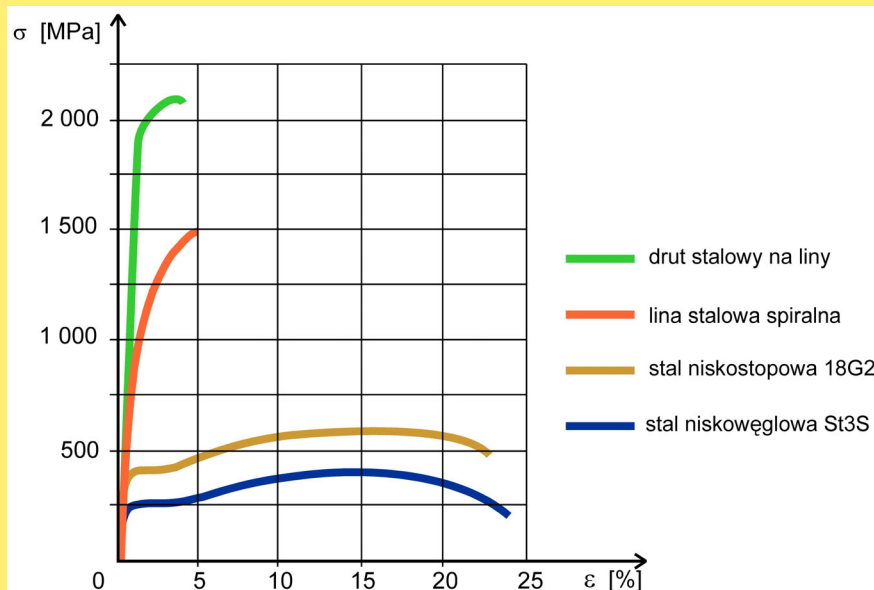
Postęp w konstrukcji lin w ostatnich latach wynika m.in. z wprowadzenia następujących innowacji technologicznych:

- opracowane sposoby zwiększania gęstości ułożenia drutów w splotkach pozwoliły uzyskać wyższy stopień wypełnienia przekroju poprzecznego metalem; dzięki temu lina ma większą wytrzymałość na rozciąganie, mniejszą podatność na ścieranie i zwiększoną elastyczność pod obciążeniem. Tego typu zabiegi (*ang. swaging*) są stosowane zarówno dla pojedynczych splotek, jak i dla całych lin
- zastosowanie wypełnień z tworzyw sztucznych (zwłaszcza termoplastycznych) oraz opracowanie specjalnych technik wytwarzania, umożliwiło maksymalizację stabilności kształtu rdzenia, ograniczyło wydłużenia lin, poprawiło podparcie drutów w splotce, podniosło elastyczność lin oraz zwiększyło szczelność ich przekroju
- zwiększył się udział lin o splotkach innych niż okrągłe w całości produkcji, dzięki czemu w wielu zastosowaniach (np. w górnictwie) niemal wyeliminowano użycie lin o tradycyjnym, okrągłym przekroju.

2.4.5. Właściwości mechaniczne i reologiczne lin stalowych

Właściwości mechaniczne lin różnią się znacznie od właściwości pojedynczych drutów, z których są zbudowane [162]. Wynika to przede wszystkim ze zmian struktury liny, tj. wzajemnego ułożenia w niej drutów i splotek, wydłużenia skoku skręcenia, częściowego spadku naprężeń powstałych przy skręcaniu liny i innych mniej istotnych czynników składających na „wyciągnięcie się” liny [106].

Opisana powyżej budowa lin powoduje, że mają one tendencję do „wyciągania” się, z czym są związane duże odkształcenia trwałe [162]. Na rys. 2.77 przedstawiono porównanie zależności $\sigma - \epsilon$ dla przykładowej liny spiralnej z zależnościami dla pojedynczego drutu do wyrobu lin oraz dla prętów ze stali St3S i 18G2.



Rys. 2.77 – porównanie zależności $\sigma - \varepsilon$ dla przykładowej liny spiralnej z zależnościami dla pojedynczego drutu do wyrobu lin oraz dla prętów ze stali St3S i 18G2. Opracowano na podstawie [162].

Moduł sprężystości liny, E , określony równaniem:
$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.12)$$

nie jest wartością jednoznacznie ustaloną, jak w przypadku konstrukcji stalowych z prętów kształtownikowych, lecz jest w dużym stopniu pojęciem umownym. Zależy od [162]:

- rodzaju liny (jej budowy)
- sposobu wcześniejszego obciążania liny, zwłaszcza od jej wstępnego przeciągnięcia
- zakresu obciążenia

Istnieją wzory teoretyczne pozwalające wyznaczyć moduł sprężystości liny stalowej w zależności od parametrów opisujących jej budowę. Przykładem może być wzór Dinnika (2.13), wg [106]:

$$E_{liny} = E \cdot \cos^4 \varphi \cdot \cos^4 \psi \quad (2.13)$$

gdzie:

E_{liny} – moduł sprężystości liny

E – moduł sprężystości drutu

φ – kąt nachylenia osi splotki do osi liny (w linach spiralnych $\varphi = 0$)

ψ – kąt nachylenia osi drutu do osi liny (w linach spiralnych $\psi = \alpha$)

Inną zależność określającą moduł sprężystości liny (2.14) zaproponowali Kuś i Misiak w pracy [134]:

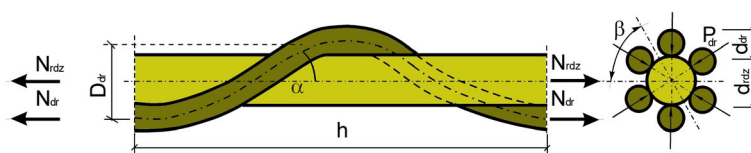
$$E_{liny} = M \cdot E \quad (2.14)$$

gdzie:

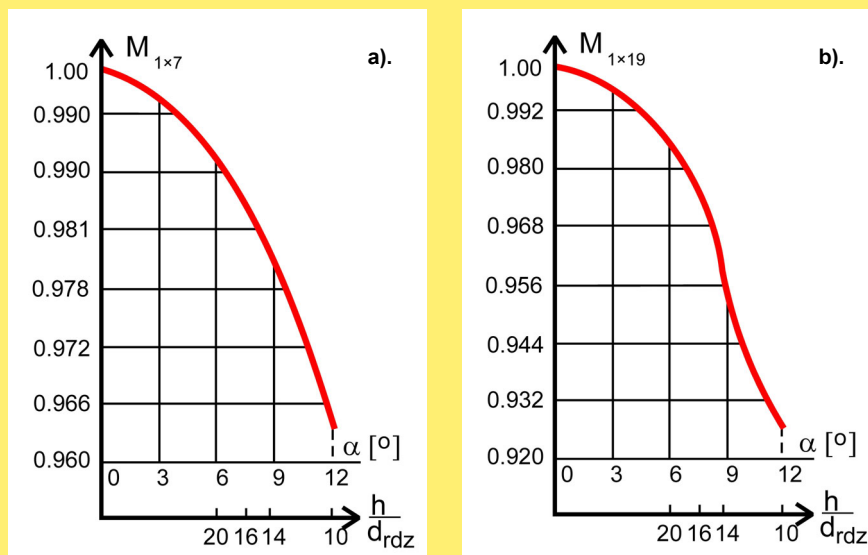
M – współczynnik wyrażający zależność modułu sprężystości liny od kąta zwicia α

Wyrażenia podające zależność $M = M(\alpha)$ dla różnych splotów wyprowadzono w pracy [2.7] na podstawie analizy teoretycznego modelu budowy liny, przedstawionego schematycznie na rys. 2.78 wg [78].

Na rys. 2.79 przedstawiono zależność współczynnika M od kąta α , dla lin typu 1×7 i 1×19, wg [78].



Rys. 2.78 – model budowy liny stalowej współzwitej 1×7. Opracowano na podstawie [78].
 N_{dr}, N_{rdz} – siła w drucie i w rdzeniu
 P_{dr} – siła docisku drutu do rdzenia



Rys. 2.79 – wykres wartości współczynnika M , wyrażającego zależność modułu sprężystości liny od kąta zwicha α lub od stosunku skoku zwicha h , do średnicy rdzenia d_{rdz} (oznaczenia – wg rys. 2.78). Wykresy dla lin o stosunku $m = d_{rdz}/d_{dr} = 1.1$ i o budowie: a). 1×7 b). 1×19

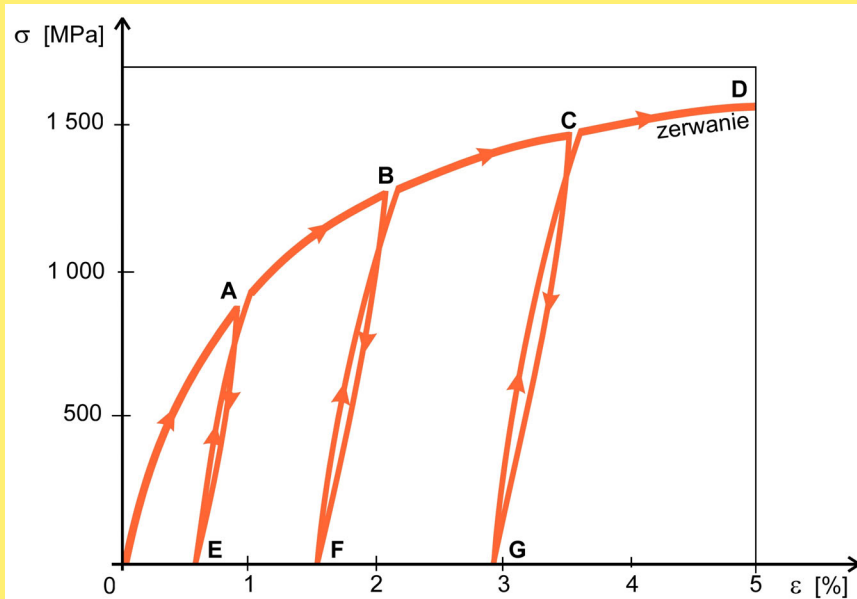
Opracowano na podstawie [78].

Model przedstawiony na rys. 2.78 jest modelem uproszczonym, jednak wykresy na rys. 2.79 dają dobry obraz poglądowy zależności modułu sprężystości liny od jej budowy. Rozbudowany model teoretyczny lin stalowych został podany w pracy [79].

Wzory (2.13) i (2.14), podobnie jak inne tego typu wzory uwzględniają głównie konstrukcję liny, pomijając wiele istotnych czynników wpływających na wartość modułu sprężystości. Z tego względu zalecane jest korzystanie z wartości wyznaczonych doświadczalnie [106].

Rysunek 2.80 przedstawia wyznaczoną doświadczalnie zależność $\sigma - \varepsilon$ dla liny poddanej kolejnym cyklom obciążania i odciążania [162].

Zależność jest określona krzywą OABCD jedynie podczas pierwszego obciążania nowej liny. Jeżeli po osiągnięciu punktu A nastąpi odciążenie liny, to powstaną w niej trwałe odkształcenia równe odcinkowi OE. Zależność $\sigma - \varepsilon$ podczas odciążania liny i podczas ponownego obciążania aż do osiągnięcia punktu A jest niemal liniowa. Po przekroczeniu przez naprężenia wartości osiągniętej uprzednio w tym punkcie zależność $\sigma - \varepsilon$ staje się ponownie nieliniowa. Podobna sytuacja występuje przy przerwaniu obciążania i odciążeniu oraz przy ponownym obciążaniu w innych punktach: B, C itd. Linie odciążania i ponownego obciążania liny: AE, BF, CG są niemal równoległe do siebie [162].



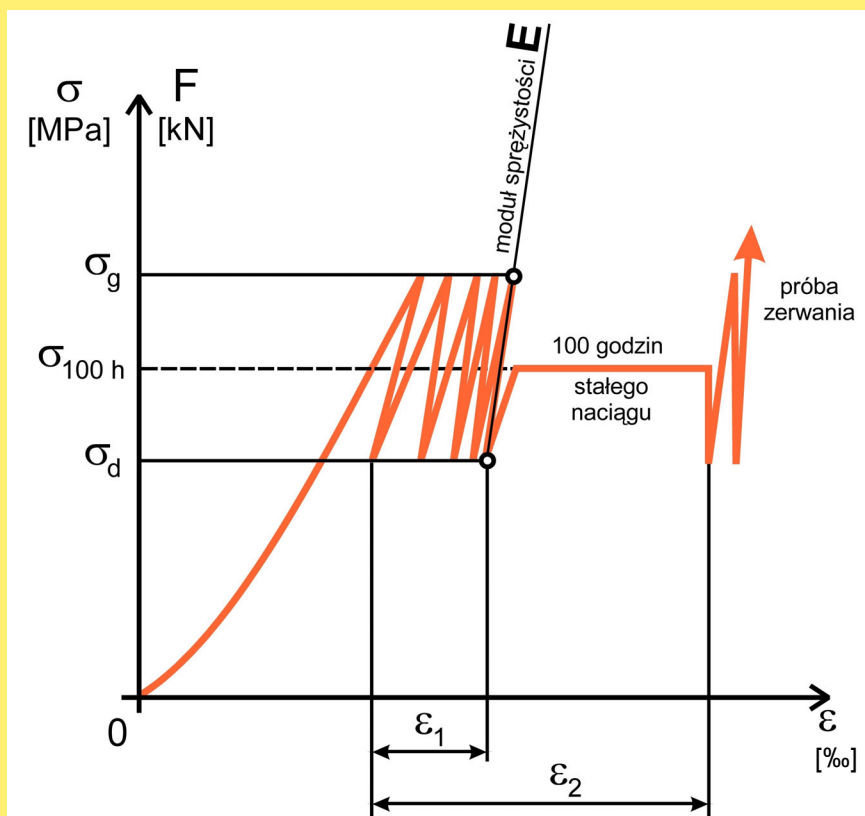
Rys. 2.80 – zależność $\sigma - \varepsilon$ dla przykładowej liny spiralnej podczas kolejnych cykli obciążania i odciążania. Opracowano na podstawie [162].

Liny stalowe produkowane dla budownictwa, z przeznaczeniem do zastosowania w konstrukcjach ciągnowych, są obecnie zawsze poddawane wstępnemu przeciąganiu, wywołującemu jej odkształcenia trwałe. Zabieg ten polega na poddaniu liny działaniu obciążenia wywołującego w drutach naprężenia równe σ_g , następnie zmniejszeniu obciążeń do poziomu wywołującego naprężenia równe σ_d i kolejno powtarzaniu tego cyklu aż do ustabilizowania się wydłużenia liny, które osiąga wartość ε_1 . Moduł sprężystości E jest określany dla odcinka zależności $\sigma - \varepsilon$ odpowiadającego temu wydłużeniu. Wykres dla wstępnego przeciągania lin przedstawia rys.2.81 [201]. Wstępne przeciągnięcie powoduje wzrost wartości modułu sprężystości nawet o 30 % [162].

Wartości sił, którymi przeciąga się linę są przyjmowane na poziomie 30 % do 40 % nominalnej wartości siły zrywającej linę. Obowiązująca norma [N-36] nie określa tej wielkości. W wydaniu z 1980 roku podana była wartość równa 40 % nominalnej siły zrywającej. Według [162] normy niemieckie określają ją jako równą $30 \div 40$ % tej siły.

Liny stalowe, oprócz opisanych odkształceń sprężystych i plastycznych wykazują również odkształcenia reologiczne, wynikające z pełzania ciągną pod stałym obciążeniem w czasie. Dla stali profilowej, pełzanie w normalnych temperaturach może być praktycznie pominięte i zaczyna występować wyraźnie dopiero w temperaturze przekraczającej 300°C . W linach pełzanie jest o ok. $20 \div 30$ % większe niż dla pojedynczych drutów, zgodnie z zależnością (2.15), wg [106]:

$$\varepsilon_{t, \text{liny}} = \frac{E_{\text{drutu}}}{E_{\text{liny}}} \cdot \varepsilon_{t, \text{drutu}} \approx (1.2 \div 1.3) \cdot \varepsilon_{t, \text{drutu}} \quad (2.15)$$



Rys. 2.81 – wykres wstępnego przeciągania liny stalowej. Oznaczenia:
 σ_g – górna wartość naprężeń podczas wstępnego przeciągania
 σ_d – dolna wartość naprężeń podczas wstępnego przeciągania
 σ_{100h} – wartość naprężeń podczas 100-godzinnej próby, w której określane jest pełzanie liny
 ε_1 – trwałe odkształcenie liny po wstępnym przeciągnięciu
 ε_2 – trwałe odkształcenie liny po próbie pełzania
 E – moduł sprężystości liny

Opracowano na podstawie [201].

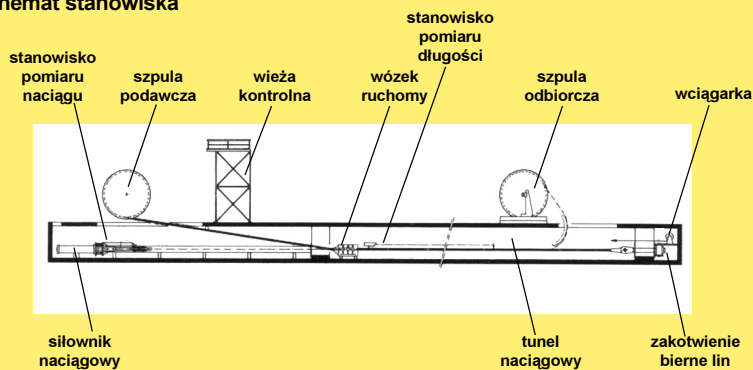
Wpływ pełzania w konstrukcjach ciągowych jest bardziej szkodliwy niż dla konstrukcji ze stali profilowej, gdyż wywołuje relaksację cięgien, tj. spadek naprężeń wywołanych siłami sprężającymi w ciągnie poddanym trwałemu i stałemu wydłużeniu. To z kolei prowadzi do redystrybucji sił wewnętrznych w ustroju [162].

Wielkość pełzania dla konkretnej liny może być wyznaczona podczas próby, w której lina po wstępnym przeciągnięciu (ustabilizowaniu odkształceń) jest pozostawiana pod obciążeniem σ_{100h} na okres 100 godzin. Całkowite odkształcenie trwałe wynosi wówczas e_2 . Schemat tej próby przedstawiono na rys. 2.81. Jako przeciętną wartość w budownictwie przyjmuje się pełzanie równe 0.35 ‰ [201]. Przeciętny spadek wartości sił sprężających, wywołany relaksacją wynosi ok. $5 \div 6 \%$ [162].

Przeciąganie wstępne lin odbywa się w specjalnych instalacjach, montowanych – ze względów bezpieczeństwa – w masywnych tunelach ochronnych. Dzięki systemowi ciągłego podawania i odbierania liny możliwe jest przeciąganie lin o długości większej niż długość tunelu. Większość czynności w takich instalacjach jest zautomatyzowana, a obsługa znajduje się w czasie przeciągania poza tunelem

Na rys. 2.82. przedstawiono schemat i widok stanowiska do wstępnego przeciągania lin w niemieckiej firmie Pfeifer. W tej instalacji naciąg lin odbywa się za pomocą wielkich siłowników hydraulicznych umieszczonych w pobliżu szpuli podającej linę.

a). schemat stanowiska



Rys. 2.82 – stanowisko do przeciągania lin w niemieckiej firmie Pfeifer, w Memmingen:
a). schemat stanowiska
b). widok wnętrza tunelu naciagowego [201] [3]

b). widok wnętrza tunelu naciagowego



Według [N-36] wartości modułu sprężystości dla drutów i lin wstępnie przeciągniętych można przyjmować następujące wartości modułu sprężystości:

- dla drutów i lin kablowych (z drutów równoległych) $E = 195 \text{ GPa}$
- dla lin spiralnych zamkniętych $E = 165 \text{ GPa}$
- dla lin spiralnych otwartych i lin splotkowych z rdzeniem stalowym $E = 145 \text{ GPa}$
- dla lin z rdzeniem niemetalowym $E = 125 \text{ GPa}$

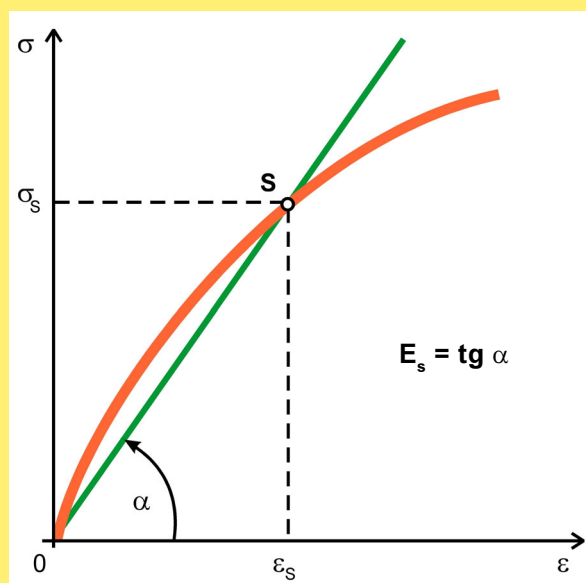
Przyjęcie jednakowej wartości E dla wszystkich lin z rdzeniem niemetalowym jest krytykowane jako zbyt uproszczenie, gdyż z badań wynika, że niektóre liny tego rodzaju mają moduł sprężystości mniejszy niż 100 GPa [162].

Dla konstrukcji membranowych, które są konstrukcjami wstępnie sprężonymi, niewłaściwe przyjęcie modułu sprężystości lin może prowadzić do znacznych różnic pomiędzy obliczonym, a rzeczywistym stanem sił i naprężeń w ustroju [162]. Z tego względu wartość modułu sprężystości powinna być wyznaczana doświadczalnie, w sposób przedstawiony na rys. 2.81. Bardzo ważne jest zapewnienie zgodności sposobu przygotowania próbek do wykonywania pomiarów ze sposobem przygotowania wszystkich lin użytych w konstrukcji. Dotyczy to zwłaszcza przeciągania lin [162]. Często jest to niemożliwe do zrealizowania w praktyce, kiedy ilość ciągów jest bardzo duża i zróżnicowana. Nawet przy realizacji bardzo dużych obiektów stosuje się docinanie lin na określoną długość na placu budowy, zamiast dostarczania gotowych, prefabrykowanych lin z wytwórni¹⁾.

Jeżeli znana jest określona doświadczalnie zależność $\sigma - \varepsilon$ dla ciągu, można dla rozpatrywanego naprężenia σ_s w ciągu wyznaczyć odpowiadające mu naprężenie ε_s . Na tej podstawie można dalej określić tzw. **sieczny moduł sprężystości** E_s , ze wzoru (2.16), wg [162]:

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} \quad (2.16)$$

Graficzną interpretację sposobu określania siecznego modułu sprężystości przedstawia rys. 2.83.



Rys. 2.83 – określenie siecznego modułu sprężystości. Opracowano na podstawie [162]

Zastosowanie siecznego modułu sprężystości liny daje dobrą zgodność pomiędzy obliczonym a pomierzonym stanem naprężeń, o ile obliczone naprężenia odpowiadają z dostateczną dokładnością założonym naprężeniom σ_s . Jeżeli nie – obliczenia należy powtórzyć, przyjmując uzyskaną wartość σ_s do wyznaczenia E_s , aż do uzyskania założonej dokładności rozwiązania.

Zastosowanie siecznego modułu sprężystości jest sposobem „ominięcia” nieliniowości materiałowej liny stalowej, widocznej na krzywej OABCD, na rys. 2.80. Posługiwanie się stałą wartością modułu sprężystości liny znacznie ułatwia obliczenia i z tego względu jest powszechnie przyjmowane.

¹⁾ Taki sposób realizacji został zastosowany np. podczas budowy hali olimpijskiej do szermierki w Seulu [224], przeciwieństwo niż przy budowie Georgia Dome, w Atlancie, gdzie wszystkie liny były wstępnie przeciągnięte i bardzo precyzyjnie przycięte w wytwórni.

Założenie takie jest jednak dostatecznie dokładne i uzasadnione, kiedy moduł sprężystości liny jest określony po jej wstępnym przeciągnięciu. Dla lin nowych, które nie były poddane temu zabiegowi, założenie takie jest błędne [162]. W takim przypadku należy opierać się na pełnej zależności (2.17):

$$E = E(\sigma) \quad (2.17)$$

W sprężysto-plastycznym modelu materiału cięgna możliwe są dwa podejścia [162]:

- uproszczone
- dokładne

W pierwszym, krzywą OABCD z rys. 2.80, zastępuje się linią łamaną składającą się z odcinków OA, AB, BC, CD. W zależności od wartości naprężenia w cięgnie jest mu przyporządkowywana odpowiednia charakterystyka materiałowa, traktowana w danym przedziale jako stała. Jest to więc zamiana charakterystyki nieliniowej na szereg charakterystyk liniowych, o ważności ograniczonej do określonego przedziału naprężeń.

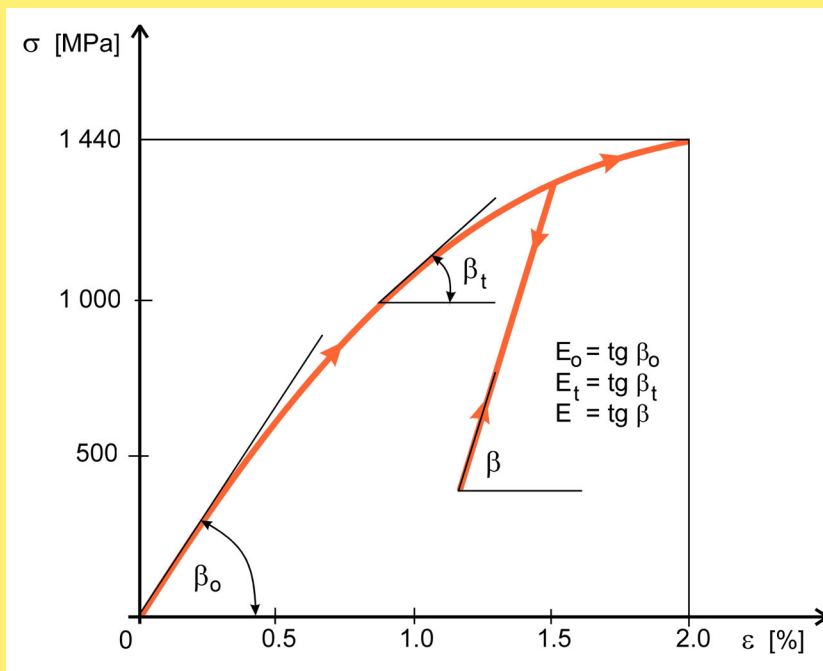
W drugim podejściu krzywa OABCD z rys. 2.80 (określona na podstawie punktów pomiarowych) jest opisywana (aprosymowana) równaniem nieliniowym (funkcją ciągłą), pozwalającym na obliczenie odpowiedniej wartości modułu sprężystości dla każdej wartości naprężeń. Jest to tzw. **styczny moduł sprężystości**, określony wzorem (2.18):

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \operatorname{tg} \beta \quad (2.18)$$

gdzie:

β – kąt nachylenia stycznej do krzywej przedstawiającej zależność $\sigma - \varepsilon$ dla liny, w punkcie odpowiadającym danej wartości naprężeń

Ponadto, określany jest *początkowy moduł sprężystości*, E_o , odpowiadający wstępnej fazie rozciągania liny oraz *stały (konwencjonalny) moduł sprężystości*, E , odpowiadający fazie odciążania i powtórnego obciążania liny. Graficzną interpretację stycznego modułu sprężystości przedstawia rys. 2.84, wg [163].



Rys. 2.84 – graficzna interpretacja stycznego modułu sprężystości liny. E_t – moduł styczny E_o – moduł początkowy E_t – moduł stały (opis w tekście) Opracowano na podstawie [163]

W pracy [163] podano przykładowe równanie (2.19), opisujące nieliniową zależność $\sigma - \varepsilon$ dla pewnej liny, dla której przeprowadzono pomiary:

$$\sigma = 2.4 \cdot 10^6 \cdot \varepsilon \cdot (0.05 - \varepsilon) \quad (2.19)$$

Zależność (2.18) jest ważna dla σ wyrażonego w [MPa], a ε – w [%].

Ustroje, dla których moduł sprężystości lin jest określony jako nieliniowa funkcja naprężenia, są rozwiązywane metodą iteracyjną. Dla pierwszego przybliżenia podstawiany jest początkowy moduł sprężystości, E_0 .

Porównanie wyników analizy statycznej ustrojów cięgowych o nieliniowej (sprężysto-plastycznej) charakterystyce materiałowej z wynikami analizy przeprowadzonej dla materiału o liniowo-sprężystej charakterystyce materiałowej, przeprowadzone w pracy [162] pokazuje, że:

- cięgna o charakterystyce sprężysto-plastycznej cechuje występowanie mniejszych sił ale większych strzałek zwisu
- związany z odkształceniami plastycznymi przyrost zwisu cięgna i spadek siły w ciągnięciu pozwala na wzrost obciążenia ponad wartość dopuszczalną dla cięgna liniowo-sprężystego; jest to rodzaj „plastycznej rezerwy nośności” dla cięgna
- cięgna o nieliniowej charakterystyce materiałowej cechuje – odwrotnie niż cięgna o charakterystyce liniowo-sprężystej – malejąca sztywność cięgna na rozciąganie, określona jako stosunek przyrostu naciągu cięgna do przyrostu przemieszczenia, są to więc cięgna o charakterystyce „miękkiej”

Niezależnie od nieliniowości materiałowej, cięgna charakteryzują się nieliniowością geometryczną, co radykalnie różni ich zachowanie od zachowania prętów prostoliniowych o stałej sztywności, podlegających prawu Hooke’a.

Liny stalowe są najczęściej przewidziane do przejmowania obciążeń statycznych. W przypadku obciążeń wielokrotnie zmiennych, jakie mogą być wywoływane w cięgnach np. przez ruch kołowy – w przypadku mostów lub przez obciążenie porywami wiatru, należy określić dopuszczalną ilość cykli obciążeń, które wytrzyma lina. Ilość ta jest zależna od szerokości zakresu, w jakim zmieniają się wartości naprężeń. Na ogół 2 miliony cykli są osiągane przez liny spiralne zamknięte dla zakresu zmiany naprężeń równego 150 N/mm^2 , a dla lin spiralnych otwartych – dla zakresu zmiany naprężeń równego 100 N/mm^2 [162].

Budowa liny ma wpływ na jej elastyczność, tzn. na możliwość zginania i dopuszczalny promień krzywizny liny. Przy zginaniu poszczególne splotki pracują w różny sposób. Druty wewnętrzne będą ściskane, a zewnętrzne – dodatkowo obciążone siłą rozciągającą. Dopuszczalny promień krzywizny jest określany w zależności od przekroju liny, jej konstrukcji, długości zwicia pojedynczego drutu. Liny składające się z wielu cienkich drutów i o małej długości zwicia są bardziej elastyczne niż liny o tym samym przekroju, składające się z małej ilości grubszych drutów i o większej długości zwicia. Najkorzystniej jest, gdy druty zewnętrzne, poprzez odpowiedni splot liny, przebiegają zarówno w ściskanej strefie wewnętrznej, jak i rozciąganej strefie zewnętrznej. Dzięki temu zostaje wyrównana i uśredniona długość zwicia liny.

2.4.6. Nośność lin stalowych

Podstawowe określenia | Według norm [N-05] i [N-13] oraz [162] i [78], stosowane są następujące określenia dotyczące nośności lin stalowych:

*minimalna siła zrywająca*¹⁾ – najmniejsza siła potrzebna do zniszczenia liny podczas próby rozciągania przeprowadzonej wg [N-37]; iloczyn kwadratu nominalnej średnicy liny, wytrzymałości drutów na rozciąganie i współczynnika empirycznego dla danej konstrukcji liny, wzór (2.21).

ang. *minimum breaking load*

*rzeczywista siła zrywająca*¹⁾ – maksymalne obciążenie, otrzymane w wyniku pomiaru przeprowadzonego zgodnie z zalecaną metodą, powodujące zniszczenie danej próbki liny

ang. *actual breaking load*

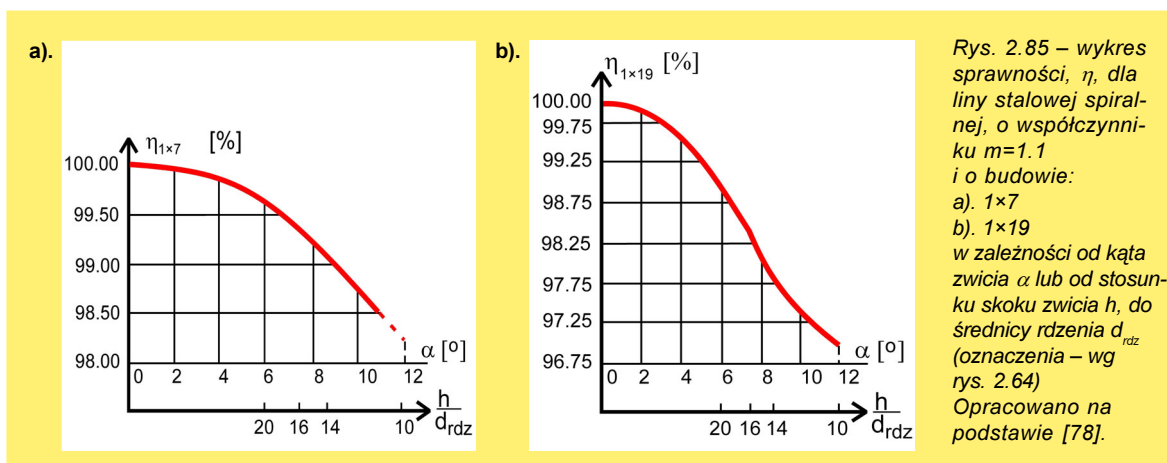
¹⁾ zamiast określenia „siła zrywająca” stosowane jest również określenie „obciążenie niszczące”

<i>nominalna siła sumaryczna zrywająca</i> – suma iloczynów nominalnych pól przekrojów poprzecznych i nominalnej wytrzymałości na rozciąganie, dla wszystkich drutów w linie; najczęściej stosuje się określenie skrócone „nominalna siła zrywająca”	<i>ang. nominal aggregate breaking load (of all the wires)</i>
<i>rzeczywista sumaryczna siła zrywająca</i> – suma obciążeń niszczących poszczególne druty w linie, otrzymanych w wyniku badania na zrywanie poszczególnych drutów rozkręconych z gotowej liny	<i>ang. actual aggregate breaking load (of all the wires)</i>
<i>nominalne straty na zwicie</i> – różnica pomiędzy nominalną sumaryczną siłą niszczącą i minimalną siłą niszczącą dla liny	<i>ang. nominal spinning loss</i>
<i>całkowite straty na zwicie</i> – różnica pomiędzy sumą obciążeń niszczących wszystkie druty w linie zmierzonych przed zwiciem i zmierzoną siłą niszczącą linę	<i>ang. total spinning loss measured</i>
<i>zmierzone, cząstkowe straty na zwicie między sumarycznymi obciążeniami niszczącymi</i> – różnica pomiędzy sumami obciążeń niszczących wszystkie druty w linie, zmierzonymi przed i po zwiciu; wielkość wynikająca z deformacji i zmiany struktury drutu spowodowanej zwiciem	<i>ang. partial measured spinning loss between the aggregate breaking loads</i>
<i>zmierzone, cząstkowe straty na zwicie</i> – różnica pomiędzy zmierzonym sumarycznym obciążeniem niszczącym i zmierzonym obciążeniem niszczącym	<i>ang. partial measured spinning loss</i>
<i>nominalny współczynnik strat na zwicie</i> – stosunek w procentach, nominalnych strat na zwicie i nominalnego sumarycznego obciążenia niszczącego	<i>ang. nominal spinning loss factor</i>
<i>zmierzony współczynnik strat na zwicie</i> – stosunek zmierzonych strat na zwicie do sumarycznego obciążenia niszczącego wszystkie druty w linie zmierzonego przed zwiciem, wyrażony w procentach	<i>ang. measured spinning loss factor</i>
<i>nominalny współczynnik zwicia</i> – stosunek minimalnego obciążenia niszczącego linę do nominalnego obciążenia niszczącego	<i>ang. nominal spinning factor</i>
<i>współczynnik zapełnienia (przekroju metalicznego liny)</i> – zależność między polami przekrojów poprzecznych wszystkich drutów i polem okręgu opisanego na linie; średnica okręgu opisanego jest równa nominalnej średnicy liny	<i>ang. fill factor</i>
<i>współczynnik do określenia minimalnego obciążenia niszczącego</i> – iloczyn współczynnika zapełnienia, nominalnego współczynnika zwicia i stałej $\pi/4$	<i>ang. conversion factor for determination of minimum breaking load</i>
Sprawność liny Nośność liny jest to inaczej rzeczywista siła zrywająca linę, N_{rz} . Nośność lin jest mniejsza niż suma nośności drutów, z których jest zbudowana, tj. od nominalnej siły zrywającej, N_n . Zmniejszenie nośności jest wyrażone współczynnikiem sprawności liny η , wg wzoru (2.20).	<i>ang. efficiency factor</i>

$$N_{rz} = \eta \cdot N_n \quad (2.20)$$

Wartość współczynnika η zależy od rodzaju liny i na ogół mieści się w przedziale $\eta = 0.75 \div 0.95$. Mniejsze wartości dotyczą lin wielozwitych z rdzeniem niemetalowym, a większe – jednozwitych lin spiralnych [162][78].

Na rys. 2.85 przedstawiono zależność współczynnika sprawności liny od kąta zwicia i stosunku długości zwicia do średnicy rdzenia dla dwóch przykładowych lin spiralnych o budowie 1×7 i 1×19 , według wyników badań przytoczonych w pracy [78].



Minimalna siła zrywająca | Zgodnie z normą [N-13], minimalną siłę zrywającą można określić ze wzoru (2.21):

$$F_0 = K' \cdot d^2 \cdot \frac{R_0}{1000} \quad (2.21)$$

gdzie:

F_0 – minimalna siła zrywająca [kN]

d – nominalna średnica liny [mm]

R_0 – klasa wytrzymałości drutów liny [N/mm²]

K' – empiryczny współczynnik minimalnej siły zrywającej danej konstrukcji liny, według tablicy 2.46

Norma [N-13] wprowadza podział lin na osiem grup, zależnie od ich budowy. W zależności od zakwalifikowania liny do określonej grupy określa się dla niej współczynnik K' oraz minimalną siłę zrywającą. Podział na grupy wg [N-13] przedstawia tablica 2.45.

Tablica 2.45 – Podział lin stalowych na grupy, wg [N-13]

Grupa	Klasa	Opis	Zakres średnic mm
1	6 × 7	do 7 drutów zewnętrznych w splotce, jedna warstwa drutów wokół drutu rdzeniowego	2 ÷ 9
2	6 × 7	8 do 12 drutów zewnętrznych w splotce, dwie lub trzy warstwy drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów	8 ÷ 52
3	6 × 37	14 do 18 drutów zewnętrznych w splotce, trzy lub więcej warstw wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów	9 ÷ 60
4	8 × 19	8 do 12 drutów zewnętrznych w splotce, dwie lub trzy warstwy drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów	22 ÷ 60
5	8 × 37	14 do 18 drutów zewnętrznych w splotce, trzy lub więcej warstw wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów	22 ÷ 60
6	17 × 7	17 lub 18 splotek w linie. Dwie warstwy splotek wokół rdzenia z włókna lub metalowego	8 ÷ 26
7	34 × 7	43 do 36 splotek w linie. Trzy warstwy splotek wokół rdzenia z włókna lub metalowego	16 ÷ 40
8	6 × 24	12 do 15 drutów zewnętrznych w splotce. Dwie warstwy drutów wokół rdzenia z włókna	8 ÷ 40

Dla lin zaliczonych do każdej z ośmiu grup ujętych w tablicy 2.45 określa się empiryczny współczynnik minimalnej siły zrywającej z tablicy 2.46. W tablicy tej podano również empiryczne współczynniki masy liny K , pozwalające wyznaczyć przybliżoną masę liny M , dla lin całkowicie smarowanych, wg wzoru (2.21). Liny niesmarowane są lżejsze.

$$M = K \cdot d^2 \quad (2.22)$$

Tablica 2.46 – Empiryczne współczynniki minimalnej siły zrywającej i współczynniki masy liny, wg [N-13]

Grupa	Klasa	Współczynnik masy liny			K_2 K_{1n}	K_2 K_{1p}	Współczynnik minimalnej siły zrywającej linę		K'_2 K'_1
		z rdzeniem					z rdzeniem		
		z włókna naturalnego	z włókna sztucznego	metalowym			z włókna	metalowym	
		K_{1n}	$K_{1p}^{2)}$	K_2			K'_1	K'_2	
		kg/100 mm ²							
1	6 × 7	0.346	0.340	0.381	1.10	1.12	0.332	0.359	1.08
2 3 ¹⁾	6 × 7 6 × 37	0.361	0.352	0.398	1.10	1.13	0.330	0.356	1.08
4 5	8 × 19 8 × 37	0.347	0.339	0.417	1.20	1.23	0.293	0.346	1.18
6	17 × 7	0.390			—	—	0.328		—
7	34 × 7	0.390			—	—	0.318		—
8	6 × 24	0.308	0.295		—	—	0.280	—	—
1) dla lin ze spłotkami z 19 lub mniej drutów – współczynnik masy o 3 % mniejszy					2) wartości dotyczą lin z rdzeniem z polipropylenu				

¹⁾ dla lin ze splotkami z 19 lub mniej drutów – współczynnik masy o 3 % mniejszy

²⁾ wartości dotyczą lin z rdzeniem z polipropylenu

Oznaczenia:

- M – przybliżona masa jednostki długości liny [kg/100m]
 K_{1n} – współczynnik masy dla lin z rdzeniem z włókna organicznego
 K_{1p} – współczynnik masy dla lin z rdzeniem z włókna polipropylenowego
 K_2 – współczynnik masy dla lin z rdzeniem metalowym
 K'_1 – współczynnik minimalnej siły zrywającej dla lin z rdzeniem z włókna
 K'_2 – współczynnik minimalnej siły zrywającej dla lin z rdzeniem metalowym

W tablicach 2.47 ÷ 2.52 podano wartości minimalnych sił zrywających dla lin grupy 1 ÷ 8 według normy [N-13]. W tablicach tych przyjęto następujące oznaczenia:

- F_{01} – minimalna siła zrywająca dla lin z rdzeniem z włókna
 F_{02} – minimalna siła zrywająca dla lin z rdzeniem metalowym
 M_{1n} – przybliżona masa lin z rdzeniem z włókna organicznego
 M_{1p} – przybliżona masa lin z rdzeniem metalowym

Wartości minimalnych sił zrywających podane w tablicach zostały obliczone przy założeniu, że siła zrywająca rdzeń metalowy jest taka sama jak siła zrywająca druty pozostałych splotek. W przypadku, gdy wytrzymałość drutu w rdzeniu metalowym jest różna niż drutów pozostałych splotek, to minimalna siła zrywająca linę powinna być uzgodniona pomiędzy wytwórcą a nabywcą.

Tablica 2.47 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin grupy 1, wg [N-13]

Średnica nominalna liny		Przybliżona masa liny		Minimalna siła zrywająca F_0 odpowiadająca klasie wytrzymałości drutu $R_0=1770 \text{ N/mm}^2$	
d	tolerancja	Lina z rdzeniem		Lina z rdzeniem	
		z włókna organicznego	metalowym	z włókna organicznego	metalowym
mm	%	kg / 100 m	kg / 100 m	kN	kN
2	+ 7	1,38	1,52	2,35	2,54
3	- 1	3,11	3,43	5,29	5,72
4	+ 6	5,54	6,10	9,40	10,17
5	- 1	8,65	9,53	14,69	15,89
6	+ 5	12,46	13,72	21,16	22,88
7	- 1	16,95	18,67	28,79	31,24
8	+ 4	22,14	24,38	37,61	40,67
9	- 1	28,03	30,86	47,60	51,47

Tablica 2.48 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin grupy 2 i 3, wg [N-13]

Średnica nominalna liny		Przybliżona masa liny		Minimalna siła zrywająca F_0 odpowiadająca klasie wytrzymałości drutu $R_0=1770 \text{ N/mm}^2$	
d	tolerancja	Lina z rdzeniem		Lina z rdzeniem	
		z włókna organicznego	metalowym	z włókna organicznego	metalowym
mm	%	kg / 100 m	kg / 100 m	kN	kN
8 ¹⁾	+ 4 -1	23,1	25,5	37,4	40,3
9		29,2	32,2	47,3	51,0
10		36,1	39,8	58,4	63,0
11		43,7	48,2	70,7	76,2
12		52,0	57,3	84,1	90,7
13		61,0	67,3	98,7	106,5
14		70,8	78,0	114,5	123,5
16		92,4	101,9	149,5	161,5
18		117,0	129,0	189,2	204,2
20		144,4	159,2	233,6	252,0
22		174,7	192,6	282,7	305,0
24		207,9	229,2	336,4	362,9
26		244,0	269,0	394,9	426,0
28		283,0	312,0	457,9	494,0
32		369,7	407,6	598,1	645,2
36		467,9	515,8	757,0	816,6
40		577,6	636,8	934,6	1 008,2
44		698,9	770,5	1 130,8	1 219,2
48		831,7	917,0	1 345,8	1 451,8
52		976,1	1 076,2	1 579,4	1 703,8
56 ²⁾		1 132,1	1 248,1	1 831,7	1 976,1
60 ²⁾		1 299,6	1 432,8	2 102,8	2 268,4

¹⁾ Lina o średnicy 8 mm jest dostępna tylko w grupie 2
²⁾ Liny o średnicy 56 i 60 mm są dostępne tylko w grupie 3

Tablica 2.49 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin grupy 4 i 5, wg [N-13]

Średnica nominalna liny		Przybliżona masa liny		Minimalna siła zrywająca F_0 odpowiadająca klasie wytrzymałości drutu $R_0=1770 \text{ N/mm}^2$	
d	tolerancja	Lina z rdzeniem		Lina z rdzeniem	
		z włókna organicznego	metalowym	z włókna organicznego	metalowym
mm	%	kg / 100 m	kg / 100 m	kN	kN
22	+ 4 - 1	167,9	201,8	251,0	296,4
24		199,9	240,2	298,7	352,8
26		234,6	281,9	350,6	414,0
28		272,0	326,9	406,6	480,1
32		355,3	427,0	531,1	627,1
36		449,7	540,4	672,1	793,7
40		555,2	667,2	829,8	979,9
44		671,8	807,3	1 004,0	1 185,6
48		799,5	960,8	1 194,9	1 411,0
52		938,3	1 127,6	1 402,3	1 656,0
56		1 088,2	1 307,7	1 626,4	1 920,5
60		1 249,9	1 501,2	1 867,0	2 204,7

Tablica 2.50 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin grupy 6, wg [N-13]

Średnica nominalna liny		Przybliżona masa liny	Minimalna siła zrywająca F_0 odpowiadająca klasie wytrzymałości drutu $R_0=1770 \text{ N/mm}^2$
d	tolerancja		
mm	%	kg / 100 m	kN
8	+ 4 - 1	25,0	37,2
9		31,6	47,0
10		39,0	58,1
11		47,2	70,2
12		56,2	83,6
13		65,9	98,1
14		76,4	113,8
16		99,8	148,6
18		126,4	188,1
20		156,0	232,2
22		188,8	281,0
24		224,6	334,4
26		263,6	392,5

Tablica 2.51 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin grupy 7, wg [N-13]

Średnica nominalna liny		Przybliżona masa liny	Minimalna siła zrywająca F_0 odpowiadająca klasie wytrzymałości drutu $R_0=1770 \text{ N/mm}^2$
d	tolerancja		
mm	%	kg / 100 m	kN
16	+ 4 - 1	99,8	144,1
18		126,4	182,4
20		156,0	225,1
22		188,8	272,4
24		224,6	324,2
26		263,6	380,5
28		305,8	441,3
32		399,4	576,4
36		505,4	729,5
40		624,0	900,6

Tablica 2.52 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin grupy 8, wg [N-13]

Średnica nominalna liny		Przybliżona masa liny	Minimalna siła zrywająca F_0 odpowiadająca klasie wytrzymałości drutu $R_0=1770 \text{ N/mm}^2$
d	tolerancja		
mm	%	kg / 100 m	kN
8	+ 6 - 1	19,7	28,1
9		24,9	35,6
10		30,8	44,0
11		37,3	53,2
12		44,4	63,3
13		52,1	74,3
14		60,4	86,2
16		78,8	112,5
18		99,8	142,4
20		123,2	175,8
22		149,1	212,8
24		177,4	253,2
26		208,2	297,2
28		241,5	344,6
32		315,4	450,2
36		399,2	569,7
40		492,8	703,4

Nośność lin stalowych o dużych średnicach | Norma [N-14] wymienia osiem klas lin stalowych o dużych średnicach. Dla każdej z klas określony jest dopuszczalny zakres średnic nominalnych. Konstrukcje i wymiary lin stalowych o dużej średnicy zestawiono w tablicy 2.53.

Tablica 2.53 – Konstrukcje i wymiary lin stalowych o dużej średnicy, wg [N-14]

Klasa	Opis	Zakres średnic nominalnych mm
6 × 19	Sześć spletek, 8 do 12 drutów zewnętrznych w splocie, dwie lub trzy warstwy drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów (jedna operacja).	$64 \leq d \leq 77$
8 × 19	Osiem spletek, 8 do 12 drutów zewnętrznych w splocie, dwie lub trzy warstwy drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów (jedna operacja).	$64 \leq d \leq 96$
6 × 37	Sześć spletek, 14 do 18 drutów zewnętrznych w splocie, trzy lub cztery warstwy drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów (jedna operacja).	$64 \leq d \leq 115$
8 × 37	Osiem spletek, 14 do 18 drutów zewnętrznych w splocie, trzy lub cztery warstwy drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów (jedna operacja).	$64 \leq d \leq 140$
6 × 61	Sześć spletek, 20 do 24 drutów zewnętrznych w splocie, cztery do sześciu warstw drutów wokół drutu rdzeniowego.	$90 \leq d \leq 140$
8 × 61	Osiem spletek, 20 do 24 drutów zewnętrznych w splocie, cztery do sześciu warstw drutów wokół drutu rdzeniowego.	$115 \leq d \leq 180$
6 × 91	Sześć spletek, 26 do 30 drutów zewnętrznych w splocie, sześć lub więcej warstw drutów wokół drutu rdzeniowego.	$103 \leq d \leq 205$
8 × 91	Osiem spletek, 26 do 30 drutów zewnętrznych w splocie, sześć lub więcej warstw drutów wokół drutu rdzeniowego.	$140 \leq d \leq 205$

¹⁾ Druty wypełniające nie stanowią odrębnej warstwy
²⁾ Drut rdzeniowy może być zastąpiony spłotką złożoną z wielu drutów. Jeżeli drut rdzeniowy zastąpiono spłotką, traktuje się ją jako pojedynczy drut i grupa lin pozostaje niezmieniona

Minimalna siła zrywająca jest określana z wzoru (2.23)

$$F_o = K_3 \cdot d^2 \quad (2.23)$$

gdzie:

F_o – minimalna siła zrywająca [kN]

d – nominalna średnica liny [mm]

K_3 – współczynnik empiryczny zależny od wymiaru liny; wartości współczynnika K_3 podano w tablicy 2.54

Minimalne wartości sił zrywających dla lin stalowych o dużej średnicy wg [N-14] podano w tablicy 2.57. We wzorze (2.23) nie występuje klasa wytrzymałości drutów liny. W normie [N-14] przyjęto do wykonywania tych lin druty w klasie wytrzymałości 1770 N/mm² i dla tej klasy wytrzymałości są określone wartości podane w tablicy 2.57.

Tablica 2.54 – Wartości empirycznego współczynnika minimalnej siły zrywającej dla lin o stalowych dużej średnicy, wg [N-14]

Średnica liny d mm	Współczynnik minimalnej siły zrywającej K_3
$64 \leq d \leq 103$	$K_3 = 0.726 - 0.00108 \cdot d$
$109 \leq d \leq 154$	$K_3 = 0.686 - 0.00078 \cdot d$
$167 \leq d \leq 205$	$K_3 = 0.652 - 0.00075 \cdot d$

*Tablica. 2.54
Wartości empirycznego współczynnika minimalnej siły zrywającej dla lin stalowych o dużej średnicy, wg [N-14]*

Nośność lin stalowych o dużej wytrzymałości | Norma [N-09] wymienia dwie klasy lin stalowych o dużej wytrzymałości. Dla każdej z klas określony jest dopuszczalny zakres średnic nominalnych. Konstrukcje i wymiary lin stalowych o dużej wytrzymałości zestawiono w tablicy 2.55.

Dla lin stalowych o dużej wytrzymałości minimalna siła zrywająca jest obliczana ze wzoru (2.21), a przybliżona masa liny – ze wzoru (2.22). Wartości współczynników K i K' są podane w tablicy 2.56. Wartości klas wytrzymałości drutu stosowane do obliczeń są podane w punkcie 2.2.3.2.

Tablica 2.55 – Konstrukcje i wymiary lin stalowych o dużej wytrzymałości, wg [N-09]

Klasa	Opis	Zakres średnic nominalnych mm
6 × 19	8 do 12 drutów zewnętrznych w splotce, dwie lub trzy warstwy drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów.	$9 \leq d \leq 52$
6 × 37	14 do 18 drutów zewnętrznych w splotce, trzy lub więcej warstw drutów wokół drutu rdzeniowego. Liniowy styk drutów.	$9 \leq d \leq 60$

Tablica 2.56 – Wartości empirycznych współczynników masy i minimalnej siły zrywającej dla lin stalowych o dużej wytrzymałości, wg [N-09]

Klasa	Współczynnik masy liny K kg / (100m•mm ²)	Współczynnik minimalnej siły zrywającej K'
6 × 19	0.398	0.356
6 × 37		

Wartości minimalnej siły zrywającej dla lin stalowych o dużej wytrzymałości wg [N-09] podano w tablicy 2.58.

Tablica 2.57 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin stalowych o dużej średnicy, wg [N-14]

Średnica nominalna mm	Minimalna siła zrywająca		Masa kg/100m
	kN	t ⁽¹⁾	
64	2 690	274	1 700
67	2 930	299	1 860
71	3 270	333	2 090
74	3 540	361	2 270
77	3 810	389	2 460
80	4 090	417	2 660
83	4 380	447	2 860
87	4 780	487	3 140
90	5 090	519	3 360
96	5 740	585	3 820
103	6 520	665	4 400
109	7 140	728	4 930
115	7 890	805	5 490
122	8 790	896	6 180
128	9 600	979	6 800
135	10 580	1 079	7 560
141	11 450	1 163	8 250
148	12 500	1 275	9 090
154	13 420	1 368	9 840
167	14 690	1 498	11 570
180	16 750	1 708	13 450
192	18 730	1 910	15 300
205	20 940	2 135	17 400

¹⁾ wartości w tonach norma określa jako „obciążenie niszczące”

Tablica 2.58 – Minimalna siła zrywająca i przybliżona masa dla lin o stalowych o dużej wytrzymałości, wg [N-09]

Średnica nominalna mm	Minimalna siła zrywająca		Masa kg/100m
	kN	t ⁽¹⁾	
9	59.4	6.06	32.239.8
10	73.3	7.47	48.2
11	88.7	9.04	57.3
12	106	10.8	67.3
13	124	12.6	78
14	144	14.7	101.9
16	188	19.2	129
18	238	24.3	159.2
20	293	29.9	192.6
22	355	36.2	229.2
24	402	41	269
26	472	48.1	312
28	547	55.8	407.6
32	715	72.9	515.8
36	904	92.2	636.8
40	1 120	114	770.5
44	1 310	134	917
48	1 560	159	1 076.2
52	1 830	187	1 248.1
56	2 120	216	1 432.8
60	2 440	249	

¹⁾ wartości w tonach norma określa jako „obciążenie niszczące”

Nośność pozostałych lin stalowych | Nominalne siły zrywające dla lin stalowych innych niż opisane w normach [N-13], [N-14] i [N-09] są podane w szczegółowych Polskich Normach odnoszących się do danego rodzaju liny¹⁾. Oprócz tego, można korzystać ze wzoru (2.20). Jednakże, zarówno dla lin objętych normami jak i dla lin nie objętych normami, zalecane jest korzystanie z wartości podawanych przez producentów. Wynika to z wielkiej różnorodności produkowanych wyrobów i różnych dodatkowych zabiegów technologicznych i udoskonaleń wprowadzanych przez nich w budowie lin.

Poniżej, w tablicach 2.59 ÷ 2.62, podano katalogowe wartości minimalnych sił zrywających dla lin o budowie najczęściej wykorzystywanej w konstrukcjach membranowych, produkowanych przez czołowych producentów światowych.

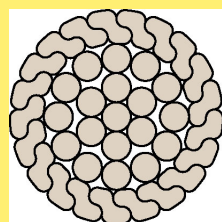
Tablica 2.59 – Minimalna siła zrywająca, masa oraz pole przekroju poprzecznego dla lin spiralnych jednosplotkowych, otwartych, nierdzewnych i z powłoką Galfan, produkowanych przez firmę Pfeifer (Memmingen, Niemcy) wg [3]

Średnica nominalna	Liny skręcane jednosplotkowe - nierdzewne					Liny skręcane jednosplotkowe – z powłoką Galfan				
	Budowa liny	Pole przekroju poprzecznego drutów	Minimalna siła zrywająca ¹⁾	Graniczna siła rozciągająca ¹⁾	Masa	Budowa liny	Pole przekroju poprzecznego drutów	Minimalna siła zrywająca ¹⁾	Graniczna siła rozciągająca ¹⁾	Masa
mm		mm ²	kN	kN	kg/m					
4	1 x 19	9.6	10.9	6.6	0.079					
6	1 x 19	21.5	24.6	15.0	0.178					
8	1 x 19	38.2	43.8	26.6	0.317	1 x 37	37.7	49.3	29.9	0.313
10	1 x 19	59.7	68.5	41.5	0.495	1 x 37	58.9	77.0	46.7	0.489
12	1 x 19	86.0	99.0	59.8	0.713	1 x 37	84.8	110.8	67.2	0.704
14	1 x 19	117	134	81.4	0.971	1 x 37	115.0	150.9	91.5	0.958
16	1 x 37	151	171	104	1.25	1 x 37	151	197	119.5	1.25
18	1 x 37	191	216	131	1.58	1 x 37	191	249	151.2	1.58
20	1 x 37	236	267	162	1.96	1 x 37	236	308	186.7	1.96
22	1 x 61	281	319	194	2.34	1 x 37	285	372	225.9	2.37
24	1 x 61	335	379	230	2.78	1 x 37	339	443	269	2.82
26	1 x 61	393	446	270	3.27	1 x 61	398	521	316	3.27
28	1 x 61	456	517	314	3.79	1 x 61	462	603	366	3.79
30	1 x 91	523	594	360	4.34	1 x 61	530	693	420	4.35
32	1 x 91	595	675	410	4.93	1 x 61	603	788	478	4.95
34	1 x 91	672	763	462	5.57	1 x 61	681	890	540	5.58
36	1 x 91	753	855	518	6.24	1 x 61	763	998	605	6.26

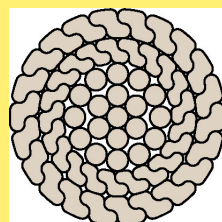
¹⁾ $k_0 = 0.9$, $Z_{R0} = \text{DIN 18800}$

moduł sprężystości $E = 130 \pm 10 \text{ GPa}$ klasa wytrzymałości $R_0 = 1450 \text{ MPa}$ – dla lin ze stali nierdzewnej
wynosi: $E = 150 \pm 10 \text{ GPa}$ drutu wynosi: $R_0 = 1670 \text{ MPa}$ – dla lin z powłoką Galfan

Tablica 2.60 – Minimalna siła zrywająca, masa oraz pole przekroju poprzecznego dla lin jednosplotkowych, zamkniętych, z powłoką Galfan, produkowanych przez firmę Pfeifer (Memmingen, Niemcy) wg [3]



lina typu VVS-1



lina typu VVS-2

Średnica nominalna	Liny skręcane jednosplotkowe zamknięte – Galfan + ocynk ¹⁾				
	Budowa liny ²⁾	Pole przekroju poprzecznego drutów	Minimalna siła zrywająca ³⁾	Graniczna siła rozciągająca ³⁾	Masa
mm		mm ²	kN	kN	kg/m
26	VVS-1	430	621	376	4.15
28	VVS-2	517	747	453	4.94
30	VVS-2	594	858	520	5.67
32	VVS-2	676	976	592	6.45
34	VVS-2	763	1100	667	7.29
36	VVS-2	855	1230	745	8.17
38	VVS-2	953	1380	836	9.11
40	VVS-2	1060	1520	921	10.1
42	VVS-2	1160	1680	1018	11.1
44	VVS-2	1280	1840	1115	12.2
46	VVS-2	1400	2020	1224	13.4
48	VVS-2	1520	2200	1333	14.6
50	VVS-2	1650	2380	1442	15.7

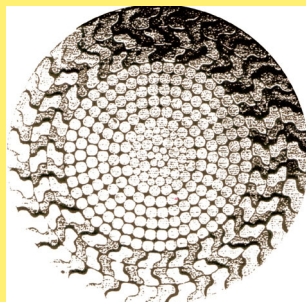
¹⁾ druty kształtowe w warstwie zewnętrznej – powłoka Galfan, druty okrągłe w warstwie wewnętrznej – powłoka cynkowa

²⁾ oznaczenia firmy Pfeifer:
VVS-1 – jedna warstwa drutów typu S
VVS-2 – dwie warstwy drutów typu S
³⁾ $k_0 = 0.9$, $Z_{R0} = \text{DIN 18800}$

moduł sprężystości: $E = 160 \pm 10 \text{ GPa}$
klasa wytrzymałości drutu: $R_0 = 1450 \text{ MPa}$

¹⁾ Są to np. normy PN/M-80202÷80234 – dla lin typu T oraz normy PN/M-80280÷80283 – dla lin o konstrukcji zamkniętej

Tablica 2.61 – Minimalna siła zrywająca, masa oraz pole przekroju poprzecznego dla lin spiralnych jednosplotkowych, zamkniętych, ocynkowanych, produkowanych przez firmę Tréfileurope (Bourg-en-Bresse, Francja) wg [4]



Średnica nominalna mm	Pole przekroju poprzecznego drutów mm ²	Minimalna siła zrywająca kN	Masa kg/m
50	1 801	2 594	15.0
53	1 977	2 921	17.1
55	2 109	3 125	18.3
58	2 370	3 510	20.0
60	2 502	3 716	21.6
63	2 769	4 125	24.0
65	2 967	4 336	26.5
68	3 228	4 757	28.3
70	3 406	4 946	30.5
73	3 691	5 371	32.3
75	3 897	5 679	34.6
78	4 293	6 322	37.1
80	4 552	6 604	40.2
83	4 851	7 138	42.2
85	5 109	7 415	44.2
88	5 433	8 088	46.9

Dla lin spiralnych jednosplotkowych, otwartych:

- klasa wytrzymałości drutu: 1 570 GPa
- moduł sprężystości: $E = 163 \text{ GPa}$
- współczynnik zwicia: $s = 0.9$
- współczynnik wypełnienia: $f = 0.73$

Dla lin spiralnych jednosplotkowych, zamkniętych:

- klasa wytrzymałości drutu: 1 570 GPa
- moduł sprężystości: $E = 165 \text{ GPa}$
- współczynnik zwicia: $s = 0.93$
- współczynnik wypełnienia: $f = 0.88$

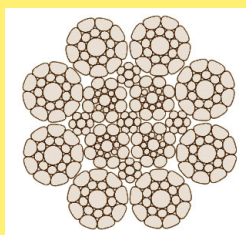
Tablica 2.62 – Minimalna siła zrywająca, masa oraz pole przekroju poprzecznego dla lin spiralnych jednosplotkowych, otwartych, ocynkowanych, produkowanych przez firmę Tréfileurope (Bourg-en-Bresse, Francja) wg [4]

Średnica nominalna mm	Pole przekroju poprzecznego drutów mm ²	Minimalna siła zrywająca kN	Masa kg/m
50	1 501	2 034	12.9
53	1 685	2 289	14.2
55	1 839	2 467	15.0
58	1 996	2 747	16.9
60	2 125	3 000	18.5
63	2 414	3 303	19.8
65	2 504	3 484	21.8
68	2 749	3 772	23.5
70	2 936	4 100	25.3
73	3 240	4 344	27.1
75	3 412	4 678	29.1
78	3 649	4 993	31.0
80	3 779	5 327	31.9
83	4 167	5 959	35.7
85	4 278	5 964	36.0
88	4 654	6 408	39.2
90	5 690	8 454	49.0
93	6 071	8 985	52.3
95	6 356	9 443	54.8
98	6 790	9 849	58.5
100	7 060	10 316	61.2
103	7 447	10 693	64.0
105	7 759	11 123	66.7
108	8 175	11 881	70.3
110	8 466	12 441	72.8
113	8 911	12 874	76.6
115	9 227	13 304	80.4
118	9 715	14 009	83.8
120	9 999	14 497	85.8
123	10 472	15 369	89.8
125	10 862	15 884	93.3
128	11 325	16 651	97.2
130	11 731	17 004	101.5
133	12 152	17 958	104.0
135	12 480	18 705	106.8
138	13 022	19 425	111.6
140	13 423	20 170	115.1
143	14 011	21 037	120.0
145	14 464	21 056	123.0
148	15 142	22 564	129.6
150	15 645	23 314	133.9

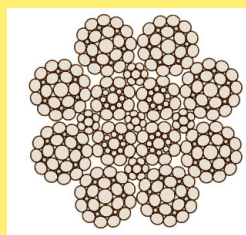
W przypadku wyrobów firmy Pfeifer, zarówno minimalna siła zrywająca, jak i graniczna siła rozciągająca odnoszą się do kompletnego wyrobu, obejmującego również końcówki lin.

Liny produkowane do zastosowań innych niż w budownictwie, mogą osiągać być produkowane z drutów o najwyższych klasach wytrzymałości i mieć złożoną budowę. W tablicy 2.63 podano przykłady trzech typów takich lin produkcji francuskiej firmy Tréfileurope.

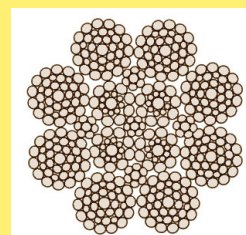
Tablica 2.63 – Minimalna siła zrywająca, średnica drutów w warstwie zewnętrznej i masa dla lin spiralnych wielosplotkowych, otwartych, ocynkowanych (ISO B), z drutu w klasie wytrzymałości 2160 MPa, produkowanych przez firmę Tréfileurope (Bourg-en-Bresse, Francja) wg [18]



lina typu 8 SIG



lina typu 8 FIG



lina typu 8 WIS

Budowa liny	Typ liny	8 SIG				8 FIG			8 WIS		
		f = 0.710 s = 0.810				f = 0.675 s = 0.855			f = 0.675 s = 0.855		
		Średnica nominalna	Średnica drutów warstwy zewnętrznej	Minimalna siła zrywająca	Masa	Średnica drutów warstwy zewnętrznej	Minimalna siła zrywająca	Masa	Średnica drutów warstwy zewnętrznej	Minimalna siła zrywająca	Masa
		mm	mm	kN	kg/m	mm	kN	kg/m	mm	kN	kg/m
8 x 19 SR (Seal, w warstwie zewnętrznej druty trójżłone, 152 druty)		6.40	0.45	41.8	0.20						
		7.20	0.50	51.6	0.25						
		8.00	0.55	62.8	0.30						
		9.00	0.60	76.8	0.37						
		10.00	0.67	98.5	0.47						
		11.00	0.75	121.6	0.58						
8 x 25 FW (spłoki typu Filler i Warrington 152 druty)		12.00	0.83	145.0	0.70						
		13.0				0.70	165.5	0.77			
		14.0				0.75	194.8	0.90			
		15.0				0.80	221.6	1.03			
		16.0				0.85	253.9	1.17			
		18.0				0.97	320.9	1.48			
		19.0				1.00	347.7	1.62			
		20.0				1.07	396.3	1.82			
8 x 36 SR (spłoki typu Warrington i Seal, 288 drutów)		22.0				1.17	484.0	2.22			
		24.0				1.30	568.0	2.64			
		25.0							1.20	622.0	2.91
		26.0							1.23	667.5	3.12
		28.0							1.33	767.9	3.63
		29.0							1.37	818.7	3.86
		32.0							1.53	1 088.7	4.75
		34.0							1.60	1 120.0	5.30
		36.0							1.70	1 250.0	5.96
		38.0							1.80	1 400.0	6.65
		40.0							1.90	1 550.0	7.36
		42.0							2.00	1 710.0	8.12
		45.0							2.13	1 960.0	9.35
		48.0							2.27	2 230.0	10.64
8 x 47 SR (spłoki typu Warrington i Seal, 376 drutów)		51.0							2.40	2 515.0	11.91
		54.0							2.55	2 810.0	13.45
		58.0							2.73	3 240.0	15.52
		60.0							2.55	3 485.0	16.70
		64.0							2.70	3 930.0	18.82
		67.0							2.83	4 320.0	20.67
		71.0							3.00	4 735.0	23.15
		74.0							3.13	5 175.0	25.30
		77.0							3.25	5 530.0	27.24
		82.0							3.47	6 165.0	31.00

f – współczynnik zapętnienia.

s – współczynnik zwicia

2.4.7. Zabezpieczenia antykorozyjne lin stalowych

Jeszcze na początku lat siedemdziesiątych XX w. inżynierowie obawiali się kruchości wodorowej¹⁾ wywołanej cynkowaniem drutów i dlatego do wyrobu lin na konstrukcje stosowano druty gołe. Ochronę lin przed korozją uzyskiwano stosując następujące systemy zabezpieczeń [178]:

- wypełnienie podczas produkcji liny przestrzeni wewnętrznych w warstwach mieszaniną mini ołowiowej oraz oleju lnianego
- po zamontowaniu i naciągnięciu liny oraz po przyłożeniu wszystkich obciążeń stałych, lina była dokładnie czyszczona, a następnie dwukrotnie malowana podkładem miniowym i ftalowym oraz dwiema warstwami powłok wykończeniowych, np. zawierających pył metaliczny, gr. ~ 50 µm
- liny usytuowane w konstrukcji w dużym zagęszczeniu, a więc trudno dostępne były malowane przed naciągnięciem, a styki lin w warstwie zewnętrznej – uszczelniane kitem

Częstym problemem w przypadku lin zabezpieczanych w ten sposób było wykruszanie wewnętrznej powłoki antykorozyjnej na skutek sprężystych i plastycznych odkształceń liny. Jednak przy starannym wykonaniu opisanych zabezpieczeń nie wymagały one odnawiania przez ok. 20 lat.

Obecnie cynkowanie jest powszechnie stosowanym sposobem ochrony korozyjnej. Niezależnie od zabezpieczenia antykorozyjnego samych drutów, które opisano w pktcie 2.2.3.2, stosowane są różne systemy zabezpieczeń antykorozyjnych gotowych lin. Dzielą się one na trzy podstawowe grupy:

- zabezpieczenia powłokowe, nakładane na powierzchnię liny po zakończeniu montażu oraz innych robót, mogących spowodować ich uszkodzenia
- elementy osłaniające nakładane na liny, których wnętrze jest następnie wypełniane iniekcją
- rozwiązania polegające na stosowaniu dla każdej splotki indywidualnej osłonki polimerowej, które zaczęto stosować w ostatnim okresie

Liny, z których wykonuje się takie elementy konstrukcji membranowych jak siatki ciągnowe oraz liny współpracujące bezpośrednio z powłokami tekstylnymi najczęściej nie mają dodatkowej osłony zewnętrznej, a ich ochrona jest zapewniona wyłącznie przez zabezpieczenie pojedynczych drutów oraz – ewentualnie – poprzez zabezpieczenie powierzchniowe liny. Powłoki malarskie są również czasami stosowane ze względów estetycznych. Takie ograniczenie sposobów zabezpieczania antykorozyjnego lin stosowanych w konstrukcjach membranowych wynika z następujących przesłanek:

- w bardzo wielu konstrukcjach membranowych liny są osłonięte przed bezpośrednim oddziaływaniem czynników atmosferycznych
- liny stosowane w konstrukcjach membranowych mają na ogół mniejszą średnicę niż liny w konstrukcjach mostowych, a ich ilość jest większa
- zastosowanie zewnętrznych elementów osłaniających bardzo utrudniłoby prawidłowe kształtowanie połączeń lin z membraną oraz połączeń pomiędzy linami (takie połączenia nie występują w innych rodzajach konstrukcji budowlanych)
- konstrukcje membranowe doznają znacznych odkształceń podczas eksploatacji, co mogłoby spowodować uszkodzenia tradycyjnych osłon zewnętrznych wypełnianych iniekcją
- zewnętrzne osłony lin, zwiększające istotnie ich grubość optyczną, powodowałyby znaczące pogorszenie estetyki konstrukcji

Liny, które pełnią rolę odciągów, wantów, wieszaków itp. mogą być zabezpieczane w sposób opisany powyżej ale stosowane są również rozwiązania wykorzystujące zewnętrzne elementy osłaniające.

Poniżej omówiono najważniejsze rodzaje uszkodzeń korozyjnych powstających w czasie eksploatacji lin stosowanych w konstrukcjach budowlanych oraz wymienione wyżej, podstawowe rodzaje stosowanych systemów zabezpieczeń zewnętrznych. Zabezpieczenia polegające na indywidualnej osłonie splotek omówione zostały – ze względu na genezę – jako zabezpieczenia antykorozyjne cięgien sprężających, gdyż są obecnie stosowane zarówno w konstrukcjach sprężonych, jak i ciągnowych.

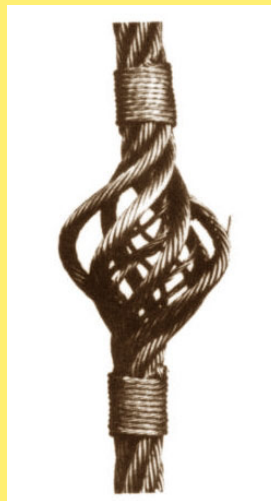
Dostawcy lin na konstrukcje budowlane zaznaczają, że należy dołożyć starań, aby zapobiec przedostawaniu się wody deszczowej do zakotwień, łożysk, zacisków itp. Zaleca się stosowanie w tym celu uszczelnień z materiałów trwale plastycznych [3].

¹⁾ pojęcie kruchości wodorowej zostało wyjaśnione przy opisie procesu produkcji drutu, w pktcie 2.2.3.2.

Uszkodzenia korozyjne lin stalowych | Obecnie dużą ilość danych porównawczych do oceny zagrożeń korozyjnych dla lin stalowych dostarczają inspekcje wykonanych i eksploatowanych od wielu lat mostów wantowych [178] [192].

W ich wyniku stwierdzono, że najczęściej występujące błędy projektowe i wykonawcze wpływające na zwiększenie zagrożenia korozyjnego to:

- ustawianie zakotwień lin nie stycznie do ich osi, co powoduje dodatkowe zginanie
- złe uszczelnienie wejść liny w osłony przed zakotwieniami
- stosowanie pierścieni ołowianych zapewniających kontakt z belkami kotwiącymi, co powoduje powstawanie ogniwa elektrycznego
- brak wymiarowania lin na zmęczenie
- zalewanie zakotwień gorącym metalem o temperaturze 425°C , co powodowało wypalenie wewnętrznej warstwy zabezpieczającej i przyspieszało korozję przy wejściu liny w zakotwienie
- usuwanie nadlewów metalu w zakotwieniach przez dłutowanie, co powodowało uszkodzenie prętów

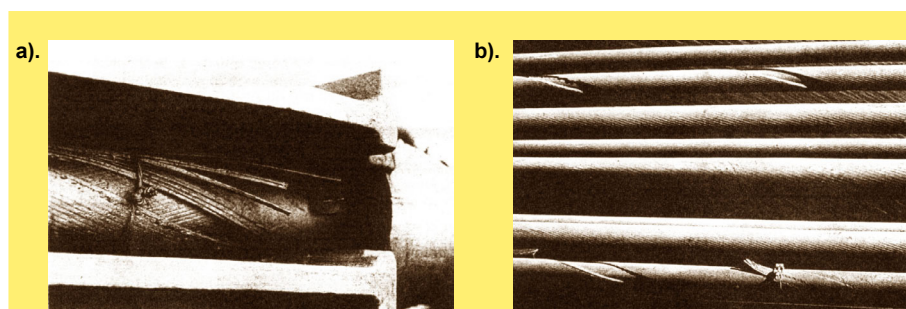


Rys. 2.86 – powstawanie tzw. „klatki” przy ściskaniu liny [79]

Ponadto stwierdzono, że w niektórych linach, przy niekorzystnym układzie obciążeń, występowało ściskanie. Powodowało to powstawanie tzw. *klatek* i rozszczelnianie liny, rys. 2.86. Obserwowano także częste drgania lin o dużej amplitudzie. Drgania te nie były wywołane odrywaniem wirów ale wzbudzeniem zakotwień [178].

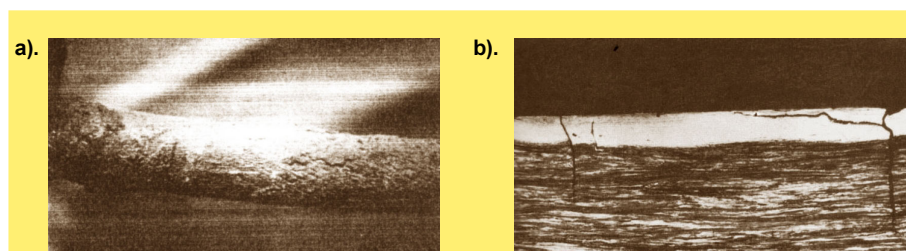
Najczęściej obserwowanym uszkodzeniem lin powstającym na skutek korozji jest pęknięcie pojedynczych drutów lub całych grup drutów. Uszkodzenia takie powstają zarówno w strefie zakotwienia jak i w przelocie ciągną. Na rys. 2.87 przedstawiono przykłady takich uszkodzeń [178].

ang. *birdcaging*



Rys. 2.87 – pęknięcia drutów w linach stalowych na skutek korozji:
a). w strefie zakotwienia
b). w przelocie [178]

Innym obserwowanym zjawiskiem jest występowanie kruchych pęknięć w zewnętrznej warstwie drutów, rys. 2.88 [192] [84].

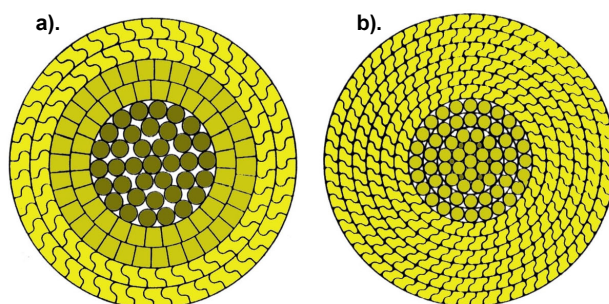


Rys. 2.88 – uszkodzenia struktury drutów w linach:
a). korozja naprężeniowa liny zamkniętej, przy zakotwieniu [192]
b). pęknięcia w twardej strukturze martenzytowej zewnętrznych warstw drutu [84]

Zabezpieczenia powłokowe lin | Współcześnie stosowane systemy zabezpieczeń powłokowych różnią się od zabezpieczeń stosowanych w przeszłości, które opisano powyżej. Możemy je podzielić na następujące grupy:

1. Zabezpieczenie wewnętrznej przestrzeni w linie:
 - a). wypełnienia aktywne:
 - proszek cynkowy z olejem poliuretanowym [3];
 - minia ołowiowa z olejem lnianym [178];
 - b). wypełnienia pasywne:
 - woski syntetyczne, trwale plastyczne [3];
2. Zabezpieczenie powierzchni liny¹⁾
 - dwie warstwy podkładu poliuretanowego z dodatkiem chromianów cynku, o grubości 50 μm (wg [3]) lub 100 μm (wg [178]) każda;
 - dwie warstwy wykończeniowe z poliuretanu z dodatkiem opiłków żelaza, o grubości 125 μm (wg [3]) lub 100 μm (wg [178]) każda;

Ponieważ chromiany cynku są kancerogenne, prowadzone są badania powłok bez pigmentów aktywnych lecz z pigmentami dającymi ochronę bierną. W Wielkiej Brytanii natomiast, stosowana jest powłoka z żywicy formaldehydowej z opiłkami aluminium, jako pigmentem aktywnym.
3. Zabezpieczenie powierzchni drutów, z których jest zbudowana lina:
 - „grube” cynkowanie ogniowe, o grubości powłoki ok. 45 μm (280 g/m²); powłoka cynkowa oprócz ochrony korozyjnej podnosi również wytrzymałość zmęczeniową liny, gdyż działa jak środek smarujący [178];
 - nakładanie powłoki Galfan – ze względu na znaczne zwiększenie trwałości powłoki w stosunku do cynkowania (wg [3] – nawet czterokrotne), uważa się obecnie, że liny z taką powłoką nie wymagają dodatkowej ochrony [3];
4. Dodatkowe zabiegi zwiększające ochronę antykorozyjną:
 - przeciąganie lin, oprócz stabilizacji właściwości mechanicznych liny i podniesienia wartości modułu sprężystości podłużnej, wpływa również na „zamknięcie się” liny, co powoduje jej dodatkowe uszczelnienie
 - obniżenie zawartości pierwiastków stopowych: fosforu, siarki i miedzi, w stalach stosowanych do wyrobu lin powoduje podniesienie ich wytrzymałości zmęczeniowej
 - zmiany w budowie lin zamkniętych polegają na zwiększeniu ilości warstw z drutów kształtowych typu Z lub S, wyeliminowaniu stosowanych dawniej warstw drutów trapezowych i ograniczeniu do minimum ilości warstw z drutów okrągłych (ograniczeniem jest tu minimalna wielkość drutów kształtowych, które są możliwe do wykonania) i ułożenia ich w układzie Filler; zmiany te powodują znaczny wzrost szczelności liny; na rys. 2.89 przedstawiono typowe przekroje lin zamkniętych stosowanych w mostach wawowych dawniej i obecnie



Rys. 2.89 – typowe przekroje lin zamkniętych stosowanych w mostach wawowych dawniej (a) i obecnie (b)
Opracowano na podstawie [192]

Zewnętrzne elementy osłaniające liny | Rozwiązanie to jest zaadaptowane z rozwiązań stosowanych do osłony kabli sprężających w budownictwie betonowym, gdzie od dawna stosowane są kable w postaci wiązki splotek, układane w rurach osłonowych, wypełnianych następnie zaczynem cementowym, rys. 2.90.

Dla lin, które można osłaniać dodatkowymi elementami zewnętrznymi, pełna ochrona obejmuje:

- cynkowanie ogniowe (w tańszej wersji splotki nie są cynkowane);
- jako standardowa ochrona jest stosowana osłona z rur polietylenowych (PE), wypełnionych zaczynem cementowym.

Warianty tego sposobu zabezpieczeń obejmują: owijanie rury PE dodatkową taśmą ochronną, zastąpienie zaczynu cementowego smarem lub woskiem oraz zastąpienie rury PE rurą stalową nierdzewną.

Zastosowanie wiązki splotek w konstrukcjach ciągnowych miało miejsce po raz pierwszy w wawowych mostach podwieszonych. Nastąpiło to poprzez zaadaptowanie systemów rozwiniętych pierwotnie dla budownictwa sprężonego [178]. Pierwszy współczesny most wawowy został wybudowany w 1955 r. w Szwecji, przez cie-

¹⁾ system ochrony przyjęty w Niemczech, [3] [178]

Podstawowym rozwiązaniem w tej grupie są osłony z rur polietylenowych (PE), nakładanych na ciągnio wykonane w postaci wiązki splotek (analogicznie jak kabel sprężający) lub wiązki drutów w układzie kablowym, rys. 2.91, które następnie wypełnia się zaczynem cementowym, rys. 2.92.

Rury PE stwarzają dobrą ochronę przed działaniem czynników korozyjnych. Ich słaba strona jest wrażliwość na działanie promieniowania UV. Odporność na działanie tego promieniowania jest uzyskiwana poprzez dodatek ok. 2 % sadzy, o cząsteczkach nie większych niż 0.1 mm. Przeprowadzane od wielu lat w różnych krajach testy wykazały, że rury polietylenowe zapewniają ponad 25 letnią ochronę dla lin.

śninę Strömsund [5. 14] [5. 55]. Pierwszym mostem, w którym zastosowano tego typu liny był wybudowany w 1978 roku most Rande w Hiszpanii, o długości 320 m. Zastosowano w nim kable firmy Freysinet [34].



Rys. 2.90 – wiązki nieosłoniętych splotów sprężających 7-drutowych, ułożone jako kable sprężające konstrukcję żelbetową mostu podwieszanego: Most Milenijny we Wrocławiu, sploty firmy BBR (stan przed naprężeniem).¹⁾

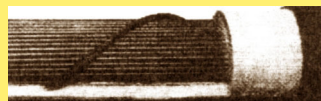
Pewne problemy związane z zastosowaniem osłon z rur polietylenowych wynikają z faktu iż:

- nagrzewają się one do dość wysokiej temperatury pod wpływem promieniowania słonecznego, rys. 2.93
- ulegają deformacji, tj. zginaniu i owalizacji przekroju poprzecznego rur w wyniku nawijania i rozwijania na szpule podczas transportu i instalacji, rys. 2.94. Powoduje to powstawanie zmiennych w czasie naprężeń wewnętrznych, rys. 2.95.

Zmniejszenie nagrzewania powierzchni rur osłonowych (a w konsekwencji ciągnię) oraz poprawę estetyki czarnych osłon można uzyskać stosując dodatkowe taśmy ochronne, którymi owija się rury. Spośród siedmiu rodzajów taśm testowanych na Uniwersytecie w Stuttgarcie, największą wytrzymałość wykazywała taśma z folii poliestrowej zbrojonej włóknem szklanym – Filament Tape prod. firmy 3M (No. 890). Najlepszą odporność na działanie warunków atmosferycznych wykazywała taśma z polifluorowinyli (PVF) – Tedlar Tape, również produkcji firmy 3M (No. 838) [178].

Wypełnienie rur osłonowych z PE zaczynem cementowym następuje po przyłożeniu pełnego obciążenia stałego. Aby zapewnić odpowiedni i stały dystans pomiędzy liną a rurą osłonową – lina jest owijana spiralnym drutem o żądanej średnicy, rys. 2.91. Wypełnienie następuje poprzez wtłaczanie zaczynu pod ciśnieniem przez specjalnie przygotowane rurki, rys. 2.92.

Osłona zewnętrzna lin z rur polietylenowych została zastosowana po raz pierwszy w moście Papineau Le Blanc, w Kanadzie, w 1969 r. [178].

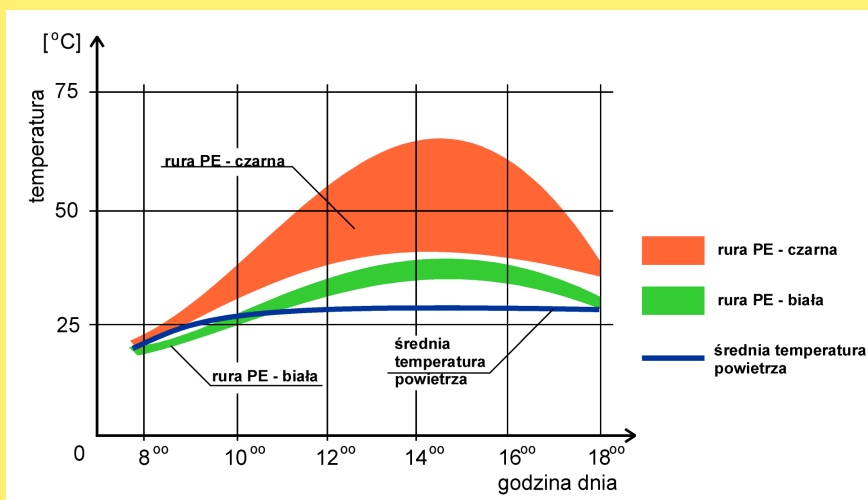


Rys. 2.91 – lina kablowa, z owiniętym wokół drutem dystansowym [178]

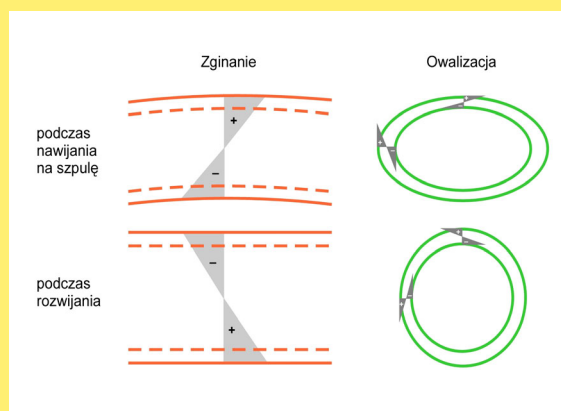


Rys. 2.92 – widok zakotwienia liny w rurze osłonowej, po iniekcji zaczynem cementowym. Widoczna jest końcówka rurki do iniekcji [178]

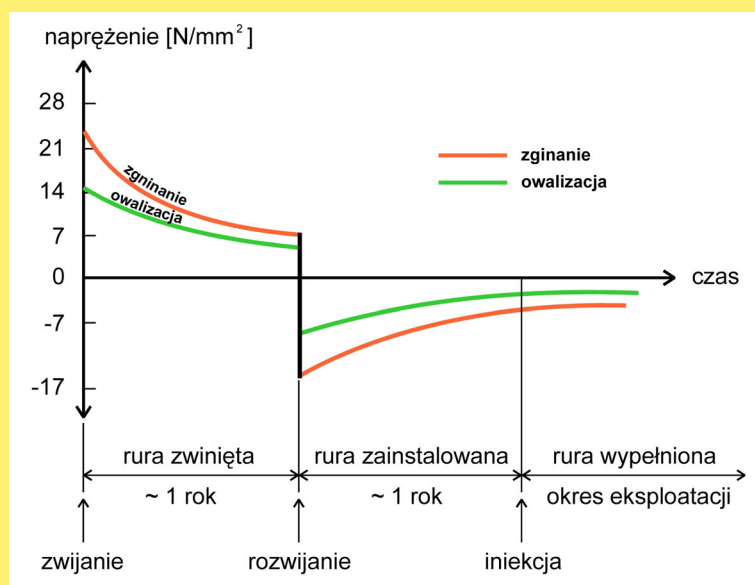
¹⁾ Fotografia autora, czerwiec 2003.



Rys. 2.93 – zmiany temperatury powierzchni rury osłonowej PE, w ciągu dnia, wywołane promieniowaniem słonecznym. Opracowano na podstawie [178]



Rys. 2.94 – formy deformacji przekroju rur osłonowych PE w wyniku nawijania i rozwijania na szpule w czasie transportu i instalacji oraz rozkład wywołanych tym naprężeń. Opracowano na podstawie [178]



Rys. 2.95 – zmiany w czasie naprężeń powstających w rurze osłonowej PE w wyniku zginania oraz owalizacji przekroju poprzecznego. Opracowano na podstawie [178]

Właczany zaczyn cementowy zawiera dodatki poprawiające jego właściwości. Są to gotowe produkty specjalistycznych firm, np. Icoment, Conbex. Pod wpływem obciążeń zmiennych w stwardniałym zaczynie rozwija się siatka rys, jednak dzięki bardzo małej przepuszczalności pary wodnej przez rurę polietylenową nie pogarsza to ochrony korozyjnej. Po zmniejszeniu obciążenia rysy zamykają się [178].

Zaczyn cementowy stwarza dobrą ochronę dla drutów ze względu na swój odczyn alkaliczny. Jednakże nie należy stosować go w bezpośrednim kontakcie z drutami ocynkowanymi, ze względu na możliwość występowania w drutach kruchości wodorowej. Z tego powodu spłotki ocynkowane umieszczane w rurach osłonowych przewidzianych do wypełnienia zaczynem muszą mieć dodatkową koszulkę osłaniającą, np. poliestrową.

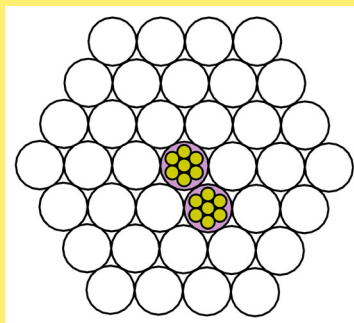
Najstarszy znany test odporności rur PE był przeprowadzony w roku 1941, w miejscowości Perrine na Florydzie, przez firmę American Bell Telephone Company. Próbką była wystawiona na działanie promieniowania słonecznego. Badania prowadzono w związku z wprowadzaniem polietylenowych osłon na kable telefoniczne [178].

Ostony zewnętrzne z rur PE, wypełnionych zaczynem cementowym, stanowią bardzo dobrą i tanią ochronę lin. Są więc z tego powodu chętnie stosowane, jeżeli nie ma przeszkód w stosowaniu elementów zewnętrznych.

Indywidualne zabezpieczenia antykorozyjne splotek | Obecna tendencja rozwojowa w zabezpieczaniu antykorozyjnym lin polega na stosowaniu splotów ocynkowanych w osłonie polimerowej. Jest to rozwiązanie stosowane zarówno do konstrukcji sprężonych jak i do konstrukcji ciągnowych. Możliwe jest stosowanie pojedynczych splotów oraz wiązek splotów. Schemat cięgna wykonanego w postaci wiązki splotów w indywidualnych osłonach przedstawia rys. 2.96. Wiązki splotek mogą następnie być osłonięte rurą ze stali nierdzewnej lub polietylenu o dużej gęstości (HD), pełniących funkcję osłony estetycznej i aerodynamicznej. Rury osłonowe wykonuje się jako zamknięte lub odejmowalne (dwuczęściowe) [178] [34].

Możliwe są trzy rodzaje indywidualnej ochrony antykorozyjnej splotek:

- zastosowanie osłony polimerowej, np. z polietylenu o wysokiej gęstości (HDPE), otaczającej szczelnie całą splotkę i przylegającej do drutów; przykłady takich splotek pokazano na rys. 2.97
- umieszczenie splotki w okrągłej polimerowej otoczce wewnętrznej, wewnątrz której wolna przestrzeń jest wypełniona żywicą ochronną; przykłady takich splotek pokazano na rys. 2.98
- połączenie obu powyższych rozwiązań; przykłady takich splotek pokazano na rys. 2.99



Ponieważ osłony z rur PE lub ze stali nierdzewnej nie mają właściwości magnetycznych, możliwe jest wykonywanie badań kontrolnych za pomocą sprzętu wykorzystującego indukcję magnetyczną. W Polsce magnetyczna metoda badania lin objęta jest w Polsce normą [N-39].

Rys. 2.96 – schemat cięgna zbudowanego ze splotów sprężających w indywidualnych osłonach
Opracowano na podstawie [34]

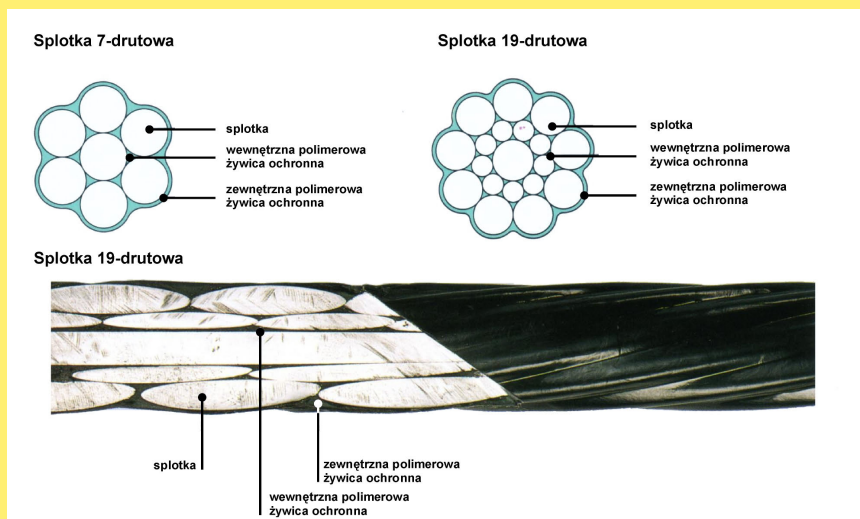
Zastosowanie osłony polimerowej pozwala uzyskać bardzo wysoką szczelność osłony. W testach na penetrację wody (rys. 2.100) uzyskiwano wynik zerowy nawet przy ciśnieniach równych 19.6 bar [31]. Osłony polimerowe cechują się również wysoką odpornością na działanie środowiska agresywnego. Rysunek 2.101 przedstawia porównanie wyników próby przeprowadzonej w roztworze soli w czasie 2000 godzin na prętach osłoniętych oraz prętach w osłonie polimerowej.

W rozwiązaniach, w których splotka jest umieszczona wewnątrz osłony wypełnionej żywicą, stosowana jest dodatkowa warstwa tzw. *czynnika beztarciowego*. Jest to substancja o małej wartości współczynnika tarcia i lepkości. Warstwa ta umożliwia sprężanie splotu umieszczonego w betonie bez dodatkowej osłony, już po zabetonowaniu konstrukcji – jak w kablobetonie. Dzięki temu, w przypadku zastosowania cięgien do konstrukcji sprężonych, możliwe jest uzyskiwanie złożonego stanu sprężenia nawet w elementach o niewielkich wymiarach, co było niemożliwe w tradycyjnej technice kablobetonowej bazującej na rurach osłonowych i iniekcji po sprężeniu [31].

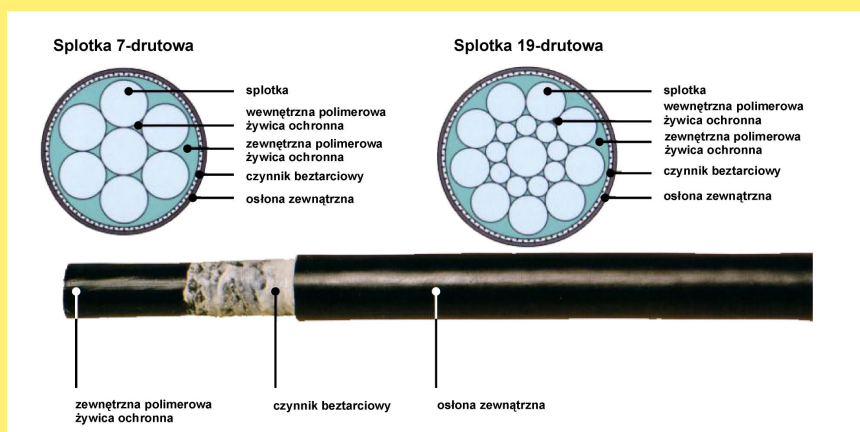
ang. frictionless agent

Efekt działania czynnika beztarciowego wykorzystywany jest również w przypadku stosowania wiązek splotów jako cięgien. Umożliwia to uzyskanie pełnej niezależności każdej splotki, która może być indywidualnie napinana i kotwiona, a także demontowana i wymieniana [34].

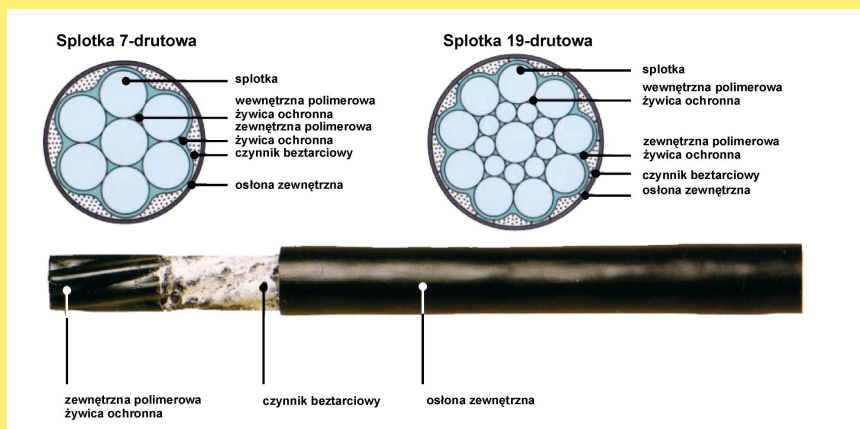
Sploty w osłonie polimerowej do konstrukcji sprężonych oraz na cięgna nośne (odciąg, wanty) są produkowane przez kilka wiodących firm światowych, np. Freyssinet (Francja) czy Fudo (Japonia). Są to przeważnie sploty 7-drutowe, a od niedawna – 19-drutowe. W tablicy 2.64 zestawiono dane splotek produkowanych przez wymienione wyżej firmy. Pewnym ograniczeniem w stosowaniu takich cięgien jest ich dość wysoka cena.



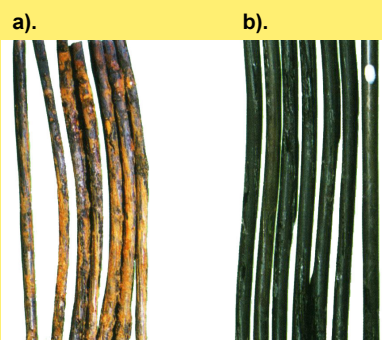
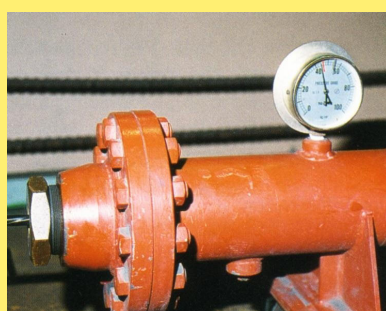
Rys. 2.97 – sploty sprężające z osłoną polimerową ściśle przylegającą do powierzchni drutów: splotka Supro/S, firmy Fudo Building Research (Japonia). W osłonie typu S mogą być wykonywane splotki 7-drutowe SWPR 7A i SWPR 7B oraz 19-drutowe SWPR 19 (patrz tab. 2.54). Mogą one być dodatkowo chronione osłoną typu SUB (patrz rys. 2.100) Opracowano na podstawie [31]



Rys. 2.98 – sploty sprężające z osłoną polimerową, w której wolne przestrzenie wypełnione są żywicą ochronną: splotka Supro/SUA, firmy Fudo Building Research (Japonia). Bezpośrednio pod osłoną znajduje się czynniki beztarcio- wy. Rodzaje splotów – wg tab. 2.54. Opracowano na podstawie [31]



Rys. 2.99 – sploty sprężające z osłoną polimerową ściśle przylegającą do powierzchni drutów, umieszczone w dodatkowej osłonie, w której wolne przestrzenie wypełnione są żywicą ochronną: splotka Supro/SUB, firmy Fudo Building Research (Japonia). Bezpośrednio pod osłoną znajduje się czynniki beztarcio- wy. Rodzaje splotów – wg tab. 2.54. Opracowano na podstawie [31]



Rys. 2.100 – próba szczelności polimerowej osłony splotów sprężających [31]

Rys. 2.101 – porównanie stanu splotów sprężających po teście 2000 godzin w roztworze soli: a). nieosłonięte b). osłonięte wg [31]

Tablica 2.64 – Sploty w osłonie polimerowej do konstrukcji sprężonych oraz na ciągną nośne, produkowane przez firmy Fudo (Japonia) i Freyssinet (Francja) wg [31] i [34]

Producent, norma	Oznaczenie splotki	Średnica nominalna splotki	Nominalna wytrzymałość na rozciąganie	Nominalne pole przekroju poprzeczne -go	Masa jednostkowa splotki	Siła zrywająca charakteryst.	Graniczna siła rozciągająca	Obciążenie przy wydłużeniu o 1%	Minimalne wydłużenie przy obciążeniu max	Grubość osłony zewnętrznej	Masa wosku (czynnika beztarciowego)
		mm	N/mm ² (MPa)	mm ²	kg/m	kN	kN	kN	%	mm	g/m
Fudo Building Research Co. Ltd., Japonia	SWPR 7A (splotka 7-drutowa)	9.3	1730 ¹⁾	51.61	405	88.8	75.5 ²⁾			- 6)	-
		10.8		69.68	546	120	102 ²⁾				-
		12.4		92.90	729	160	136 ²⁾				-
		15.2		138.7	1 101	240	204 ²⁾				-
JIS G 3536	SWPR 7B (splotka 7-drutowa)	9.5	1860 ¹⁾	54.84	432	102	86.8 ²⁾			1.0 6)	-
		11.1		74.19	580	138	118 ²⁾				-
		12.7		98.71	774	183	156 ²⁾				23 ⁴⁾ / 35 ⁵⁾
		15.2		138.7	1 101	261	222 ²⁾				27 ⁴⁾ / 41 ⁵⁾
	SWPR 19 (splotka 19-drutowa)	17.8	1860 ¹⁾	208.4	1 652	387	330 ²⁾			1.2 6)	32 ⁴⁾ / 48 ⁵⁾
		19.3		243.7	1 931	451	387 ²⁾				35 ⁴⁾ / 53 ⁵⁾
		20.3		270.9	2 149	495	422 ²⁾				-
		21.8		312.9	2 482	573	495 ²⁾				39 ⁴⁾ / 59 ⁵⁾
Freyssinet, Francja Euronorm 138-79	Strand Fe-7S 1770-15.7-Relax 2 EU 138/6	15,70	1770	150	1 180	265.0	225.0 ³⁾	233.0	3.5	1.5	12

¹⁾ wartość podana nie wprost – wyliczona na podstawie katalogu producenta

²⁾ obciążenie przy wydłużeniu 0.2 %

³⁾ obciążenie przy wydłużeniu 0.1 %

⁴⁾ dotyczy splotu w osłonie SUPRO/SUA

⁵⁾ dotyczy splotu w osłonie SUPRO/SUB

⁶⁾ grubość osłony bezpośrednio na splotce – 0.4 mm (dla wszystkich typów splotek Supro)

2.4.8. Ciągna z prętów stalowych

Elementy rozciągane w konstrukcjach mogą być wykonywane nie tylko z lin ale również z prętów o pełnym przekroju. Chociaż ciągna te mają – w porównaniu z linami o takim samym polu przekroju poprzecznego mniejszą nośność, to inne ich zalety powodują, że są to elementy chętnie stosowane.

Dotyczy to zwłaszcza odciągów, wieszaków i innych elementów, które nie są obciążone na długości, a jedynie na końcach i które nie mają założonej krzywizny kształtu. Do zalet ciągien z prętów należą:

- stabilność wymiarowa
 - wyższy niż dla lin moduł sprężystości
 - łatwość kształtowania węzłów
 - łatwość wprowadzania naciągu wstępnego
- Poniżej omówiono dwa przykładowe rodzaje ciągien z prętów produkowanych jako rozwiązania systemowe. Niezależnie od gotowych wyrobów stosuje się powszechnie ciągna z gładkich prętów stalowych dobieranych indywidualnie przez projektanta, napinanych tradycyjnymi śrubami rzymskimi lub nakrętkami napinającymi.

Ciągna systemu Detan | System cięgowy Detan produkowany przez niemiecką firmę DEHA składa się z następujących elementów:

- ciągną
- końcówka widlasta
- elementy mocujące
- złączka pośrednia z podwieszeniem

Elementy systemu mogą być wykonane jako gołe, ocynkowane lub ze stali nierdzewnej. Na rysunku 2.102 przedstawione są pręty Detan zakończone końcówką widlastą, w różnych standardach wykonania.



Rys. 2.102 – ciągna z prętów stalowych systemu Detan, produkowane przez firmę DEHA Ankersysteme (Niemcy). Pręty wykonane są jako czarne, ocynkowane lub nierdzewne. Na przecie widoczne są płaskie powierzchnie służące do przytrzymywania pręta w celu zapobiegania obracaniu podczas dokręcania końcówki, wg [9]

Tablica 2.65 – Charakterystyka prętów systemu ciągnowego Detan, produkowanych przez firmę DEHA Ankersysteme (Gros-Gerau, Niemcy), wg [9]

Średnica mm		20	25	26.5	32	36	40	50	75
pręty standardowe	Charakterystyczna siła zrywająca kN	–	506	569	828	1 049	1 295	2 022	4 311
	Umowna granica plastyczności kN	–	410	460	670	850	1 050	1 639	3 495
pręty ze stali nierdzewnej	Charakterystyczna siła zrywająca kN	314	491	–	804	–	1 257	–	–
	Umowna granica plastyczności kN	251	393	–	643	–	1006	–	–

W wersji podstawowej pręty Detan są wykonane ze stali St 52-3 (wg oznaczeń niemieckich). Pręty przed nagwintowaniem są spęczniane, co zapobiega zmniejszeniu przekroju czynnego. Elementy złączne: blachy węzłowe, tarcze itp. są projektowane i wykonywane indywidualnie w nawiązaniu do pozostałych elementów konstrukcji, przy zachowaniu koordynacji wymiarowej podanej przez producenta. Pręty Detan są w zasadzie przewidziane jako ciągnia „bierne” i system nie obejmuje elementów pozwalających na wprowadzanie naciągu wstępnego. W tablicy 2.65 podano charakterystyki wytrzymałościowe prętów systemu ciągnowego Detan [9].

Ciągnia z prętów systemu Macalloy | Firma McCalls Special Products, z Sheffield, produkuje dwa systemy ciągien z prętów stalowych:

- pręty systemu Macalloy 460
- pręty systemu Macalloy Guy Link

Pręty Macalloy 460, są to pręty z wysokowytrzymałej stali węglowej stosowane na elementy ciągnowe, w budownictwie powszechnym. Pręty są zakończone końcówką widelcową. Zakres zastosowań tych prętów jest zbliżony do zakresu zastosowań ciągien Detan.

Właściwości mechaniczne prętów Macalloy 460:

- wytrzymałość na rozciąganie 610 MPa
- minimalna granica plastyczności 460 MPa
- minimalne wydłużenie 19 %
- moduł sprężystości podłużnej 205 GPa

Pręty Macalloy 460 są produkowane w zakresie średnic od 10 do 100 mm, o maksymalnej długości 11.8 m. W tablicy 2.66 podano charakterystyki wytrzymałościowe prętów.

Tablica 2.66 – Charakterystyka prętów systemu ciągnowego Macalloy 460, produkowanych przez firmę McCalls Special Products, Sheffield (W. Brytania), wg [21]

gwint		M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90	M100
średnica nominalna pręta	mm	9	11	15	19	22	28	34	39	45	52	60	72	81	87	97
nominalne pole przekroju pręta	mm ²	64	95	177	284	380	616	908	1195	1590	2124	2827	4072	5281	5945	7390
siła zrywająca	kN	33.2	48.4	91.2	143	207	330	483	665	875	1209	1596	2329	2969	3358	4206
umowna granica plastyczności	kN	25.0	36.5	68.8	108	156	249	364	501	660	912	1204	1756	2239	2533	3172
nominalna masa pręta	kg/m	0.5	0.75	1.4	2.2	3.0	4.8	7.1	9.4	12.5	16.7	22.2	32.0	41.5	46.7	58.0
nośność obliczeniowa wg ENV1993-1-1 (EC3)	kN	26.5	38.7	73.0	155	165	264	387	532	700	967	1277	1863	2375	2687	3364

Pręty *Macalloy Guy Linking* opracowano w 1984 r., jako wysoko-wytrzymałe pręty ze stali nierdzewnej dla budownictwa powszechnego (rys. 2.103). Zakres ich stosowania i charakterystyka są podobne jak dla prętów Macalloy 460.



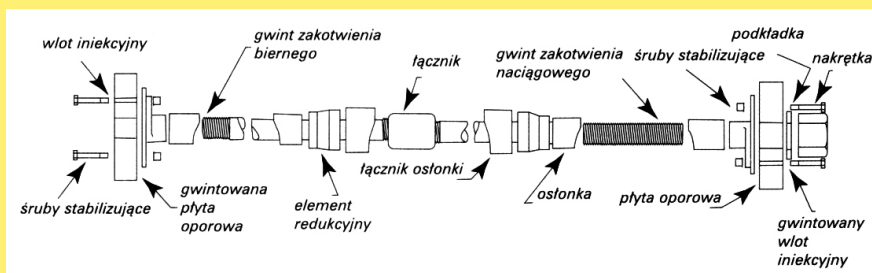
Rys. 2.103 – ciężka prętowa ze stali nierdzewnej systemu Macalloy Guy Linking, wg [21]

Pręty sprężające systemu Macalloy | Pręty Macalloy są prętami sprężającymi ze stali stopowej, z charakterystycznym wyciskaniem na zimno gwintem, rys. 2.104. Są to pręty o bardzo dużej nośności, zbliżonej do nośności lin o tej samej średnicy nominalnej. Produkowane są w zakresie średnic $20 \div 77$ mm. Ich standardowa długość wynosi do 11.8 m (maksym. 17.8 m) i można je przedłużać za pomocą specjalnych łączników tulejowych. Pełny system obejmuje elementy przedstawione na rys. 2.105.

Szczególną cechą tych prętów jest łatwość wprowadzania naciągu wstępnego: oprócz prasy hydraulicznej możliwe jest zastosowanie standardowych, cechowanych kluczy dynamometrycznych. Pręty Macalloy zostały opracowane pierwotnie dla zastosowań w betonowych konstrukcjach sprężonych. Obecnie są stosowane również jako wszelkiego rodzaju elementy ciągnowe w konstrukcjach stalowych, kotwach gruntowych itp. W tabelicy 2.56 podano charakterystyki wytrzymałościowe prętów Macalloy [26]



Rys. 2.104 – widok pręta sprężającego Macalloy z płytą oporową, wg [26]



Rys. 2.105 – elementy systemu prętów sprężających Macalloy, wg [26]

Tablica 2.67 – Charakterystyka prętów sprężających systemu Macalloy, produkowanych przez firmę McCalls Special Products, Sheffield (W. Brytania), wg [26]

Średnica mm	6	8	10	12	16	20	24	27	30	36	42	48	52	56	60
Graniczna siła rozciągająca kN	7.5	13.6	21.5	31.3	58.2	90.9	131	170	208	303	372	486	570	662	759

2.5. Wyroby liniowe z włókien technicznych – liny kompozytowe

2.5.1. Wiadomości wstępne

Określenia | Kompozyt jest obecnie definiowany jako materiał łączący dwie heterogeniczne fazy¹⁾, niezależnie od ich rodzaju i pochodzenia. Jedną z faz stanowi *matrycę*, w której umieszczone są włókna pozostałych faz (przynajmniej jednej), tworzące *zbrojenie*.

Sformułowana powyżej definicja pozwala zakwalifikować jako kompozyty wiele materiałów, w również bardzo tradycyjnych, jak np. glina zmieszana ze słomą. W praktyce budowlanej, termin *kompozyt* ma jednak węższe znaczenie i obejmuje wyroby składające się z włókien szklanych, węglowych lub aramidowych, umieszczonych w żywicy organicznej. W takim znaczeniu będzie stosowany w dalszej części tego rozdziału.

Współczesna, „fazowa”, definicja materiałów kompozytowych ukształtowała się w latach 60., kiedy do produkcji kompozytów stosowano już wiele rodzajów włókien i różne matryce.

W tym okresie zaczęto też zwracać uwagę na oddziaływanie pomiędzy fazami tworzącymi kompozyt i główną rolę w badaniach nad kompozytami zaczęli odgrywać chemicy [161].

Szybki rozwój materiałów kompozytowych rozpoczął się w latach czterdziestych XX w. i był napędzany przez trzy główne czynniki [161]:

1. nowe konstrukcje wojskowe: samoloty, helikoptery i rakiety preferowały użycie lekkich i wytrzymałych materiałów. O ile elementy wykonywane z metalu spełniały wymagania wytrzymałościowe, to ich znaczny ciężar powodował powstawanie licznych ograniczeń.
2. przemysł produkujący polimery rozwijał się bardzo szybko i poszukiwał nowych rynków dla ekspansji swoich wyrobów. Nowe wyroby powstające w laboratoriach umożliwiały spełnienie różnorodnych wymagań i nadawały się do wielu zastosowań.
3. odkryto niezwykle wysoką teoretyczną wytrzymałość pewnych materiałów, np. włókien szklanych. Pojawiło się wówczas pytanie: jak można wykorzystać te teoretyczne możliwości do spełnienia wymagań postawionych przez potrzeby wojska.

Kruczość pierwszych wysokowytrzymałych włókien – włókien szklanych spowodowała, że zastosowano polimerową „matrycę”, która umożliwiała utrzymywanie w gotowym wyrobie włókien w ich pierwotnej postaci. Produkcję włókien szklanych rozpoczęto w 1935 r. Na początku lat trzydziestych opracowano nowe polimery: żywice fenolowe, mocznikowe i anilinowo-formaldehadowe. Wkrótce potem, w 1936 r. – nienasycone żywice poliestrowe. Żywica epoksydowa została opatentowana w roku 1938, w Szwajcarii, przez P. Castana, który wkrótce potem sprzedał swój patent firmie Ciba. Pierwsze laminaty z włókien szklanych wyprodukowano w USA w roku 1942. Historycy zajmujący się rozwojem materiałów kompozytowych wyróżniają cztery generacje kompozytów [161]:

- 1-sza generacja (lata 40.): polimery zbrojone włóknami szklanymi – GFRP (ang. Glass Fibre Reinforced Polymers).
- 2-ga generacja (lata 60. i 70.): kompozyty wykorzystujące włókna węglowe, borowe i aramidowe. Kompozyty tej generacji są nazywane wysokowytrzymałymi kompozytami ery post-sputnikowej. Nazwa ta oddaje przyczyny ich pojawienia się: zapotrzebowanie na materiały dla przemysłu kosmicznego, który zaczął się gwałtownie rozwijać po wystartowaniu pierwszego sztucznego satelity Ziemi w 1957 r. Szczególne wymagania stwarzała konieczność powrotu statków kosmicznych do atmosfery, podczas którego ich elementy nagrzewają się do temperatury powyżej 1500°C. **Cięgna kompozytowe stosowane w budownictwie są wykonywane wyłącznie z kompozytów pierwszej i drugiej generacji.**
- 3-cia generacja (lata 70. i 80.): kompozyty w matrycy metalowej – MMC (Metal Matrix Composites) i kompozyty w matrycy ceramicznej – CMC (Ceramic Matrix Composites). Podobnie jak kompozyty drugiej generacji, również trzecia generacja kompozytów rozwinęła się w związku z zapotrzebowaniem przemysłu kosmicznego, który zaczął wykorzystywać statki kosmiczne wielokrotnego użycia. W nowych kompozytach zastosowano włókna o wysokiej odporności termicznej. Były to opracowane w 1976 r. (S. Yajima) włókna ceramiczne SiC, o nazwie Nicalon. W połączeniu z matrycą metalową, np. aluminiową, tworzyły one materiał, którego właściwości, a zwłaszcza współczynnik rozszerzalności cieplnej mogą być niemal dowolnie regulowane poprzez zawartość włókien. Stosowane są też inne włókna (np. Al_2O_3) oraz inne matryce (np. miedź). Wysięgnik anteny teleskopu Hubble'a jest wykonany z kompozytu grafitowo-aluminiowego. W kompozytach ceramicznych, typową matrycą jest tlenek glinu. Jako zbrojenia używa się np. włókien SiC. Jest to typowy kompozyt stosowany na implanty medyczne oraz narzędzia do drewna i metalu. Obecnie wypiera go CMC ze zbrojeniem z włókien z tlenku cyrkonu. Zastosowanie włókien grafitowych stworzyło nową klasę kompozytów ceramicznych: kompozyty węglowo-węglowe. Charakteryzują się one bardzo wysoką odpornością termiczną i twardością, dzięki czemu są stosowane np. jako hamulce w samolotach. Celem, któremu są obecnie podporządkowane prace badawcze nad kompozytami ceramicznymi jest zbudowanie w pełni ceramicznego silnika samochodowego.
- 4-ta generacja (lata 90.): materiały hybrydowe i nanokompozyty. Materiały hybrydowe łączą w sobie składniki organiczne i nieorganiczne, w skali molekularnej. Uwagę na te materiały, mające swoje pierwowzory w naturze, zwróciły badania prowadzone nad biomineralizacją. Materiały hybrydowe można odnaleźć w skorupach mięczaków, w kościach, w drewnie oraz w wielu innych wytworach organizmów żywych. W kościach, będących znakomitymi naturalnymi kompozytami, kolagenowe włókna białkowe tworzą fazę matrycy, która jest zbrojona małymi, pręcikowymi kryształami hydroksyapatytów, o przeciętnych wymiarach $5 \times 5 \times 50$ nm. Hydroksyapatyt jest substancją nieorganiczną, kryształem na bazie fosforanu wapnia, obudowie $Ca_{10}(HPO_4)_6(OH)_2$. Strukturę taką usiłuje się naśladować w kompozytach MMC (drobne cząsteczki włókien SiC w matrycy aluminiowej) i CMC (drobne cząsteczki włókien z tlenku cyrkonu w matrycy z tlenku glinu). Głównym celem prac nad materiałami hybrydowymi jest doprowadzenie do spontanicznego połączenia się molekuł w trwałą strukturę - cząsteczkowego samorganizowania. Nanokompozyty jest to koncepcja budowy materiału „atom po atomie” (w skali mniejszej niż 100 nm). Badania nad tymi materiałami pochłaniają obecnie wiele wysiłku badawczego i wielkie środki finansowe. Główny problem polega na niemożności ekstrapolowania z mikro- do nanoskali oraz na występowaniu efektów kwantowych [183].

¹⁾ Faza jest to jednolita część układu odgraniczona powierzchnią rozdziału (granicą faz) od innych części układu.

Materiały kompozytowe pierwszej i drugiej generacji, często określane angielskim skrótem FRP (Fiber Reinforced Polymers), znajdują od dawna zastosowanie w wielu gałęziach budownictwa. Pierwsze próby zastosowania krótkich włókien szklanych jako zbrojenia betonu miały miejsce jeszcze w latach trzydziestych XX w., jednak nie przeniesiono tych koncepcji na zastosowanie zbrojenia z długich włókien przez następne dwadzieścia lat. W latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego stulecia U.S. Army Corps of Engineers był bardzo zainteresowany tego typu zastosowaniami i powstała cała seria obszernych raportów. Badania doświadczalne i zastosowania były wprawdzie bardzo ograniczone, jednak przyjmuje się ten okres za początek stosowania kompozytów na bazie włókien szklanych w budownictwie. Silny impuls do rozwoju prac nad zastosowaniem ciągłych kompozytowych w budownictwie pojawił się w latach siedemdziesiątych. Wiązało się to z wystąpieniem problemu korozji we wcześniejszych betonowych konstrukcjach sprężonych. Zapoczątkowane wtedy prace nad zastosowaniem kompozytów wykorzystujących włókna aramidowe i węglowe. Od tego czasu opracowano cały szereg różnych rozwiązań materiałowych, które znajdują bardzo różnorodne zastosowania [83] [121]. Obecnie kompozyty znajdują zastosowanie w budownictwie zarówno w formie wyrobów liniowych – ciągłych, jak i w formie wyrobów powierzchniowych: różnego rodzaju paneli, elementów powłokowych itp.

Wyroby kompozytowe stosowane w budownictwie | Spośród wyrobów kompozytowych w budownictwie stosowane są przede wszystkim wyroby liniowe: pręty (okrągłe i płaskie) i splotki oraz wyroby powierzchniowe: płyty, panele i elementy powłokowe.

Podział wyrobów kompozytowych stosowanych w budownictwie, ze względu na ich zastosowanie oraz rodzaj włókien, przedstawia tablica 2.68. Podano w niej nazwy handlowe najbardziej znanych wyrobów. Niektóre nazwy są znakami handlowymi obejmującymi grupę wyrobów, wykonywanych z różnych rodzajów włókien.

Tablica 2.68 – Podział wyrobów kompozytowych stosowanych w budownictwie

Zastosowanie	Kompozyty		
	szklane	węglowe	aramidowe
1. Ciężna nośne, wanty, odciąg		CFCC BBR Carbon NACC	Parafil
2. Ciężna sprężające	Lightline Glasspree FiBRA Jitec Glass Polystal (nie prod.)	CFCC Leadline NACC FiBRA Carbopree Carbon Stress	Arapree Technora FiBRA Aratec
3. Zbrojenie niesprężone – pręty	Glasspree Jitec Glass	Leadline Carbopree	Arapree Technora Aratec
4. Zbrojenie niesprężone – siatki płaskie i przestrzenne	NEFMAC	NEFMAC	NEFMAC
5. Kotwy gruntowe		CFCC Leadline	Arapree Technora FiBRA
6. Siatki zbrojące grunt	NESTEM NEFMAC	NEFMAC NOMST	NEFMAC
7. Siatki do naprawy i wzmacniania konstrukcji		Replark FORCA Tow Sheet Torayca Cloth Carbodur	FITS

Opracowano na podstawie informacji o wyrobach zawartych w [13] [72] [83] [114] [121] [135]

Najciekawsze wyroby powierzchniowe z kompozytów to:

- płytki z kompozytów węglowych stosowane jako nakładki do wzmacniania konstrukcji
- prefabrykowane panele z kompozytów węglowych i betonu lekkiego, do wykonywania ścian podziemnych (zwłaszcza tuneli) techniką analogiczną do wykonywania ścian szczelinowych ale bez konieczności układania betonu *in situ* (system NOMST – Nippon Steel)

- prefabrykowane elementy powłokowe-kratownicowe do wykonywania mostów (system SPACES – Wlk. Brytania)
- prefabrykowane elementy krat i płyt pomostowych stosowanych w środowisku silnie korozyjnym, np. morskich platform wiertniczych

W dalszej części omówiono cięgna kompozytowe, jako elementy znajdujące zastosowanie w konstrukcjach membranowych. Produkowane wyroby najczęściej były opracowane jako cięgna do sprężania konstrukcji betonowych, a stosowanie ich również jako wanty (cięgna podwieszające), odciąg czy kotwy gruntowe wynika z podobieństwa rozwiązań technicznych i charakteru pracy. Ponieważ ilość zastosowań cięgien kompozytowych w betonowych konstrukcjach sprężonych przewyższa ilość pozostałych ich zastosowań, większość opracowań na temat tych cięgien oraz powstające przepisy projektowania – odnoszą się przede wszystkim do konstrukcji sprężonych.

Pomysł sprężania elementów konstrukcyjnych za pomocą cięgien o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie jest bardzo stary. Przykładami jego zastosowania są drewniane beczki i koła, ściskane stalowymi obręczami. Egipcjanie stosowali tę technikę przy budowie statków [42]. Za ojca współczesnych konstrukcji sprężonych jest uważany E. Freyssinet, który swoje pionierskie eksperymenty przeprowadzał w latach 1926-29 [103]. Pierwsze zastosowania sprężania miały miejsce w konstrukcjach mostowych. Jednym z pierwszych mostów, w których zastosowano sprężanie jest istniejący do dzisiaj trójprzęsłowy (25.2+69.0+23.4 m) most w pobliżu miejscowości Aue w Saksonii, zaprojektowany przez Dischingera i zrealizowany w latach 1936-37. W 1962 r. (z opóźnieniem ze względu na wojnę) wykonano regulację naciągu kabli, powtórzoną następnie w 1983 r. Realizacja podobnego mostu (55.35+80.5+55.35 m) w Poznaniu, została wstrzymana po wybuchu II wojny światowej, mimo że kable sprężające były już zainstalowane. Wykorzystano je natychmiast przy budowie podtorza suwnicy w zakładach zbrojeniowych [42].

Aby sprężanie mogło przynieść oczekiwane efekty muszą być spełnione pewne warunki. Najważniejsze z nich to: zastosowanie odpowiedniej, wysokowytrzymałej stali, opracowanie efektywnych systemów naciągania i kotwienia oraz uwzględnienie strat siły sprężającej.

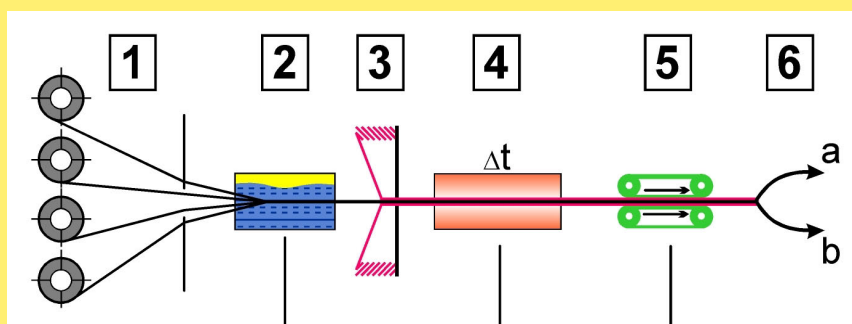
Cięgna używane do sprężania betonu zostały zastosowane po raz pierwszy jako wanty mostów w 1956 r., w moście Strömsund w Szwecji [178]. Pomysł zastosowania odciągów linowych nie był nowy. Pojawił się po raz pierwszy w roku 1617, w projekcie Wenecjanina Faustusa Verantiusa. Później wykonano zaledwie kilka mostów wantowych. Od czasu otwarcia mostu w Strömsund, to rozwiązanie konstrukcyjne zaczęło dominować w konstrukcjach mostów o średniej rozpiętości (obecnie do 856 m – most Normandie we Francji, którego budowa zostanie ukończona na początku 2005 r.). Równocześnie, w oparciu o materiały stosowane w konstrukcjach sprężonych, nastąpił rozwój kabli podwieszających. Najczęściej są one obecnie wykonywane w postaci wiązki spletek sprężających [34]. Współcześnie, spletki stalowe są coraz częściej zastępowane kompozytowymi.

Technologia wytwarzania | Podstawowe operacje technologiczne w procesie wytwarzania cięgien kompozytowych to [114]:

- prasowanie ciągłe
- splatanie
- skręcanie

ang. pultrusion

Najważniejszą operacją jest proces prasowania ciągłego. Jest ono stosowane przy produkcji wszystkich cięgien kompozytowych. Dwie pozostałe operacje są opcjonalne i występują jako uzupełnienie prasowania, przy produkcji niektórych wyrobów.



Rys. 2.106 – schemat produkcji cięgien kompozytowych w procesie prasowania ciągłego. Opis oznaczeń – w tekście. Opracowano na podstawie [13]

Prasowanie ciągłe jest to obecnie technika dobrze opanowana i bardzo wydajna [13]. Prasowanie ciągłe jest procesem umożliwiającym wytwarzanie ciągłych elementów o stałym przekroju poprzecznym. Charakteryzują się one dużą ilością włókien umieszczonych w matrycy z żywicy termoutwardzalnej. Schemat procesu prasowania ciągłego przedstawia rys. 2.105.

Produkcja cięgien kompozytowych w procesie prasowania ciągłego przebiega w następujących etapach (oznaczenia wg rys. 2.106) [13]:

- 1). rozwijanie włókien zbrojenia matrycy
- 2). przesycanie włókien żywicą o małej lepkości, w kąpieli otwartej
- 3). łączenie włókien w wiązkę, optymalizacja ich rozmieszczenia, usunięcie nadmiaru żywicy i ewentualne nawinięcie oplotu
- 4). przeciągnięcie wiązki włókien przez dyszę podgrzewaną do temperatury odpowiedniej dla danej żywicy i kształtu przekroju poprzecznego; podczas tej operacji wiązka jest równomiernie utwardzana;
- 5). prasowanie ciągłe wiązki, w celu uzyskania trwałego profilu o żądanym kształcie
- 6). odbieranie oraz cięcie (a) lub zwijanie (b) cięgien i ewentualna obróbka końcowa powierzchni

Na rys. 2.107 przedstawiony jest widok instalacji do produkcji cięgien kompozytowych, o wydajności 350 m dziennie [13].



Rys. 2.107 – widok instalacji do produkcji cięgien kompozytowych, o wydajności 350 m dziennie [13]

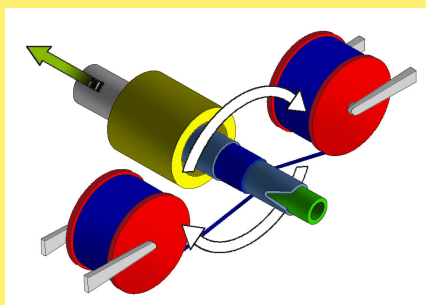
Oprócz prasowania ciągłego stosuje się jeszcze następujące, tzw. hybrydowe, techniki:

- „ciągnięcie i owijanie”, które jest stosowane jako dodatkowa operacja umożliwiająca wykonanie dodatkowych oplotów na elementach wykonanych w zwykłym prasowaniu; rys. 2.108 przedstawia schemat tego procesu
- „inteligentne prasowanie ciągłe”, różniące się od zwykłego prasowania tym, że włókna są wciskane w ścianki prasowanego elementu; technika ta jest stosowana przy wytwarzaniu powierzchniowych wyrobów kompozytowych, np. paneli modułarnych stosowanych w mostach kompozytowych itp. [13]

ang. pull-wind technique

ang. smart pultrusion

Splatanie jest stosowane w niektórych rozwiązaniach, zanim włókna zostaną poddane przesycaniu żywicą i prasowaniu. Skręcanie jest stosowane przy produkcji cięgien w formie splotki, wykonywanej z pojedynczych cięgien o mniejszych średnicach, odpowiadających drutom w linach stalowych.



Rys. 2.108 – schemat operacji „ciągnięcia i owijania”, umożliwiającej wykonanie dodatkowych oplotów na elementach wykonanych uprzednio w zwykłym prasowaniu ciągłym
Opracowano na podstawie [13]

Ekonomiczność cięgien kompozytowych | Przesłankami, które powodują atrakcyjność cięgien kompozytowych jest przede wszystkim znacznie wyższa niż w przypadku stali odporność korozyjna, a w przypadku niektórych kompozytów węglowych – wyższa niż dla stali wytrzymałość na rozciąganie. W tablicy 2.69 przedstawiono porównanie kosztu cięgien wykonanych z różnych materiałów, w przeliczeniu na jeden metr długości i jeden kiloniuuton minimalnej siły zrywającej.

Tablica 2.69 – Porównanie kosztu cięgien z różnych materiałów, wg [13]

Materiał	Koszt
	\$ / kN ³ × m
łańcuch stalowy	0.034
UHMWPE ¹⁾	0.050
poliester	0.020
splotka stalowa spiralna	0.020
FRP ²⁾	0.017
¹⁾ polietylen o wysokiej masie cząsteczkowej	
²⁾ cięgna kompozytowe	
³⁾ w odniesieniu do 1 kN minimalnej siły zrywającej	

Porównanie zostało wykonane w lutym 2002 r. przez angielską firmę DeepSea Engineering & Management Ltd., w ramach prac nad nowymi systemami cumowania przy pracach podmorskich prowadzonych na bardzo dużej głębokości [5.64]. Dane uzyskano od kilku europejskich producentów. Dotyczą one lin o długości ponad 1 500 m, średnicy powyżej 100 mm i nośności powyżej 1 000 T.

*Tablica. 2.69
Porównanie kosztu cięgien wykonanych z różnych materiałów, w przeliczeniu na jeden metr długości i jeden kiloniuuton minimalnej siły zrywającej, wg [13]*

Porównanie powyższe, przeprowadzone dla cięgien służących do cumowania obiektów przy pracach powodnych na dużej głębokości [13], nie oddaje w pełni relacji cenowych w przypadku konwencjonalnych konstrukcji lądowych.

Jak wynika z opracowania przygotowanego dla amerykańskiego Federalnego Zarządu Autostrad [114], wysoka cena cięgien kompozytowych do sprężania oraz zbrojenia betonu, w porównaniu do ceny stale udoskonalanych cięgien stalowych, jest istotnym ograniczeniem w ich stosowaniu. Dotyczy to także kompozytowych elementów powierzchniowych. Przykładem jest system kompozytowych paneli (na bazie włókien szklanych) do ochrony antykorozyjnej mostów angielskiej firmy Maunsell. Uznawany za bardzo atrakcyjny technicznie, jest jednak niemal nieakceptowalny cenowo. Jego koszt wynosi 473 \$/m², podczas gdy np. w USA koszt kompletnej konstrukcji mostu wynosi od 500 ÷ 1 000 \$/m² [114].

Czynnikiem, który sprzyja stosowaniu elementów kompozytowych jest ogromny i stale zwiększający się koszt konserwacji obiektów, zwłaszcza mostowych. Technikę sprężania zaczęto masowo stosować po II wojnie światowej. Pierwsze obiekty wybudowane w tamtym okresie już osiągnęły stopień zużycia wymagający pełnego remontu. Stopniowo taki stopień zużycia będą osiągały obiekty wykonane później. Problem ten zauważono w Niemczech już w latach siedemdziesiątych XX w. i spowodowało to podjęcie prac nad systemem prętów Polystal. Wysoki koszt jednostkowy może być zrekompensowany znacznie większą trwałością kompozytów. W Japonii, gdzie wykonuje się bardzo wiele obiektów inżynierskich w warunkach sprzyjających szybkiej korozji, często wybiera się stosowanie elementów kompozytowych nie tylko zamiast cięgien sprężających ale również zamiast zwykłej stali zbrojeniowej, niekiedy wykonywanych w formie gotowych, płaskich lub przestrzennych siatek (systemy NEFMAC i NESTEM). Stosowane są tam nawet wieloprzestrzenne, kompozypowe elementy prefabrykowane ścian szczelinowych (system NOMST).

Klasyfikacja cięgien kompozytowych | Tradycyjnie wyróżnia się następujące, podstawowe rodzaje cięgien kompozytowych:

- GFRP (ang. Glass Fibre Reinforced Polymer) – cięgna z włókien szklanych
- CFRP (ang. Carbon Fibre Reinforced Polymer) – cięgna z włókien węglowych
- AFRP (ang. Aramid Fibre Reinforced Polymer) – cięgna z włókien aramidowych

Ten bardzo uproszczony podział nie pozwala na dokładne określenie właściwości wyrobu. Ze względu na różnorodność stosowanych włókien i żywic, różne kształty przekroju poprzecznego oraz wymiary produkowanych cięgien – niezbędne stało się opracowanie odpowiedniego systemu klasyfikacji. Z drugiej strony, każdy składnik wyrobu kompozytowego może mieć specyficzne właściwości i cechy, które należałoby wyspecyfikować, co prowadziłoby do nadmiernej rozbudowy opisu.

W Japonii rozwinięty został system opisu wyrobów kompozytowych, bazujący na końcowych właściwościach wyrobu. System ten został również przyjęty, w zmodyfikowanej wersji, w amerykańskich wytycznych projektowania konstrukcji betonowych sprężanych cięgnami kompozytowymi [83].

W systemie tym określa się kolejno:

- rodzaj włókna, stosując oznaczenia wg tablicy 2.70
- przekrój poprzeczny (budowę) cięgna, stosując oznaczenia wg tablicy 2.71
- obciążenie niszczące [kN]
- stopień związania, tj. spójność budowy cięgna; wielkość ta jest określana relatywnie, w odniesieniu do umownego materiału porównawczego. W cytowanych wytycznych amerykańskich [83], materiałem takim jest cięgno kompozytowe Strawman, opracowane specjalnie do tego celu.

Tablica 2.70 – Oznaczenia rodzaju włókien w systemie klasyfikacji cięgien kompozytowych

Rodzaj włókna	Oznaczenie
włókno szklane	G
włókno aramidowe	A
włókno węglowe	C
włókno winylowe	V
różne włókna	*
* oznacza, że cięgno składa się z włókien kilku rodzajów; w oznaczeniu należy zastosować symbole wszystkich włókien, z literą oznaczającą włókno dominujące jako pierwszą, np. CG oznacza kompozyt węglowo-szklany, w którym przeważają włókna węglowe	

Tablica. 2.70
Oznaczenia rodzaju
włókien w systemie
klasyfikacji cięgien
kompozytowych,
wg [83]

Tablica 2.71 – Oznaczenia budowy cięgna w systemie klasyfikacji cięgien kompozytowych

Kategoria	Pręt okrągły ¹⁾	Splotka	Plecionka	Siatka	Pręt płaski
Symbol	R ²⁾ , D ³⁾	S ⁴⁾	B ⁵⁾	L ⁶⁾	R ⁷⁾
Konfiguracja					
¹⁾ R – pręt gładki, D – pręt karbowany					
²⁾ ang. rod					
³⁾ ang. deformed					
⁴⁾ ang. strand					
	⁵⁾ ang. braided				
	⁶⁾ ang. lattice				
	⁷⁾ ang. rectangular				

Tablica. 2.71
Oznaczenia budowy
cięgna w systemie
klasyfikacji cięgien
kompozytowych,
wg [83]

Przykładowe oznaczenie może być następujące:

GS-12/1

co oznacza splotkę kompozytową z włókien szklanych, o obciążeniu niszczącym 12 kN i relatywnej spójności budowy 1.

2.5.2. Ogólna charakterystyka cięgien kompozytowych

Matryce polimerowe | Kompozyty stosowane w budownictwie są produkowane niemal wyłącznie przy użyciu żywic termoutwardzalnych. Najczęściej stosowane są żywice [80]:

- poliestrowa (kwasu izoftalowego)
- epoksydowa (typu fenolowego)
- epoksydowo – winylowo-estrowa (novolac)

W pewnym zakresie stosuje się również modyfikowane żywice uretanowe i poliuretanowe.

Żywice te występują pod różnymi nazwami handlowymi, w zależności od producenta. Jakość i właściwości zastosowanej żywicy mają ogromny wpływ na właściwości końcowego wyrobu. Właściwości mechaniczne żywic ulegają bardzo wyraźnemu pogorszeniu wraz ze wzrostem temperatury. Cechuje je również znaczne pęcznienie. Duży wpływ na właściwości matryc żywicznych ma technologia ich wykonywania: rodzaje dodanych utwardzaczy, temperatura i ciśnienie utwardzania, kształt i wielkość wyrobu [135]. W tabelicy 2.72 zestawiono cechy wytrzymałościowe żywic polimerowych stosowanych do wyrobu cięgien kompozytowych [80].

Tablica 2.72 – Cechy wytrzymałościowe żywic polimerowych stosowanych do wyrobu cięgien kompozytowych

Charakterystyka	j.m.	żywica		
		poliestrowa	epoksydowa	epoksydowo-winylo-estrowa
gęstość	g/cm ³	1 ÷ 1.45	1.1 ÷ 1.3	1.12
wytrzymałość na rozciąganie	MPa	20 ÷ 100	55 ÷ 130	81
moduł sprężystości podłużnej	GPa	2.1 ÷ 4.1	2.5 ÷ 4.1	3.3
wydłużenie przy zerwaniu	%	1 ÷ 6	1 ÷ 9	5

Tablica. 2.72
Cechy wytrzymałościowe żywic polimerowych stosowanych do wyrobu cięgien kompozytowych, wg [80]

Właściwości wytrzymałościowe cięgien kompozytowych | Parametry wytrzymałościowe żywic stosowanych do wykonywania matryc są wielokrotnie niższe niż parametry włókien. Dlatego kompozyty nigdy nie osiągają takich wartości jak włókna stanowiące ich zbrojenie.

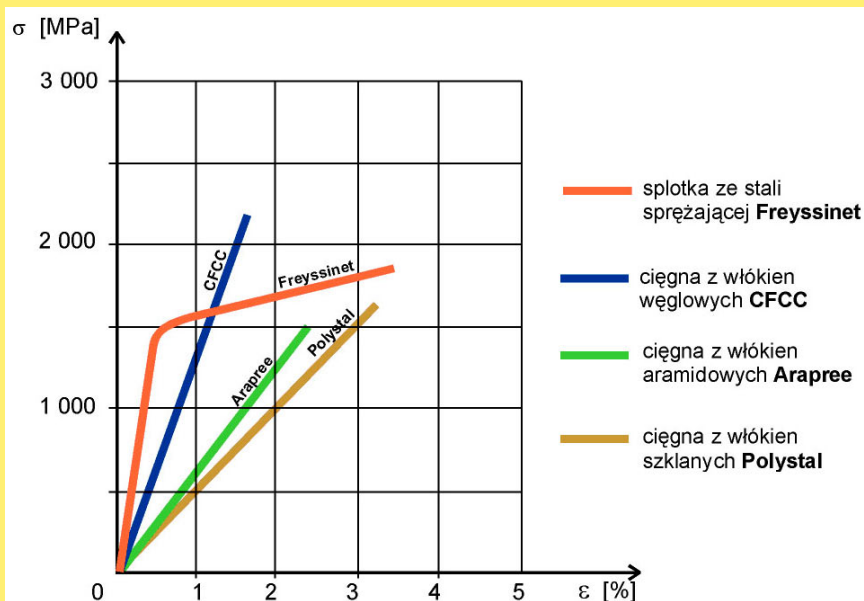
Z praktycznego punktu widzenia istotne jest porównanie właściwości wytrzymałościowych cięgien kompozytowych z właściwościami lin stalowych. Wytrzymałości cięgien kompozytowych na rozciąganie są porównywalne i wyższe niż wytrzymałości lin. Moduł sprężystości podłużnej cięgien kompozytowych jest na ogół niższy niż dla lin stalowych, dla cięgien z włókien szklanych – nawet kilkukrotnie. Wyjątkiem są kompozyty węglowe, o współczynniku sprężystości porównywalnym do lin stalowych.

Niższe wartości modułu sprężystości cięgien kompozytowych powodują, że podczas sprężania wydłużenia są większe niż dla stali, a ilość cięgien wymagana ze względu na stan graniczny użytkowania jest większa niż ilość cięgien stalowych. Jednocześnie jednak, w przypadku sprężania konstrukcji betonowych, mniejsze są straty siły sprężającej spowodowane pęcznieniem betonu i mniejsze wahania naprężeń w cięgniach spowodowane obciążeniami wielokrotnie zmiennymi [135].

W tabelicy 2.73 zestawiono cechy wytrzymałościowe wybranych cięgien kompozytowych, a na rys. 2.109 – wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla cięgien z różnych materiałów.

Tablica 2.73 – Porównanie właściwości wytrzymałościowych wybranych cięgien kompozytowych, wg [83]

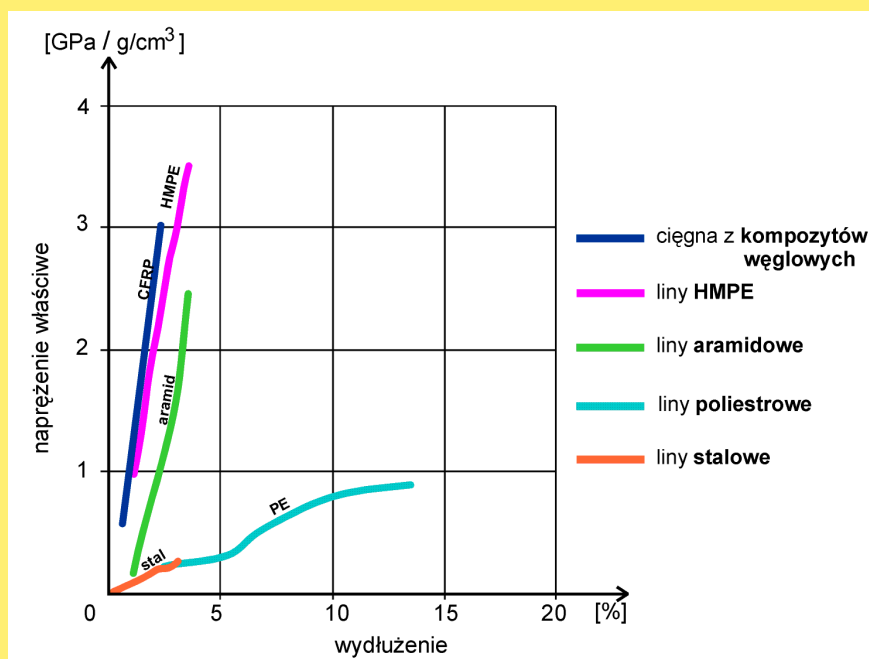
Cięgno	Typ	Średnica nominalna	Przekrój poprzeczny	Moduł sprężystości podłużnej	Siła zrywająca	Wydłużenie przy zerwaniu	Gęstość / Masa liniowa	Współcz. Poissona'a
		mm	mm ²	GPa	kN	%		
Arapree (Kajima)	f200 000	7.5	44.2	62.5	66.6	2.40	1.25 g/cm ³	0.38
Arapree (Kajima)	f400 000	10.0	78.5	62.5	115.5	2.40	1.25 g/cm ³	0.38
Arapree (Sireg)	Rod 12	12.0	78.0	60.0	109.0	2.40	130 g/m	
CFCC	1×7 12.5 φ	12.5	76.0	137.3	142.0	1.57	3.31 g/cm ³	
Carbon Stress	pręt płaski	17.5×1.65	28.9	150.0	54.0	1.60		
Carbon Stress	pręt okrągły	5.4	22.9	160.0	49.0	1.60		
Carbopree	Rod HS 10	10.0	78.0	130.0	180.0	1.80	130 g/m	
Carbopree	Rod HM 10	10.0	78.0	200.0	234.0	1.50	130 g/m	
FiBRA	FA13	12.7	127.0	68.6	176.4	2.00	1.62 g/cm ³	0.60
Glasspree	Rod 10	10.0	113.0	40.0	113.0	2.80	200 g/m	
Jitec Glass	pręt okrągły	12.0		50.0	150.0	3.50	2.15 g/cm ³	
Leadline	karbowany	7.9	46.1	150.0	104.0	1.30	1.67 g/cm ³	
NACC standard	1×7 12.5 φ	12.5	97.0	137.0	196.0			
NACC HM	1×7 12.5 φ	12.5	97.0	206.0	109.0			
Technora	oplatany spiralnie	8.0	50.2	54.0	86.2	3.70	1.30 g/cm ³	0.35
Lightline	splotka	10.5	67.6	51.8	90.8	2.50		



Rys. 2.109 – wykresy $\sigma - \varepsilon$ dla cięgien z różnych materiałów. Opracowano na podstawie [34] [114] [121].

Ciekawe jest porównanie zależności $\sigma - \varepsilon$ dla lin włókiennych i stalowych oraz cięgien kompozytowych z włókien węglowych, w którym na osi naprężeń podane jest naprężenie właściwe, tj. naprężenie odniesione do jednostki masy cięgna. Porównanie takie, dające obraz efektywności materiału cięgna, przedstawia rys. 2.110., [13]. Wynika z niego, że w odniesieniu w przeliczeniu na masę, najniższe parametry wytrzymałościowe (maksymalne naprężenie, moduł sprężystości) mają liny stalowe – poniżej lin ze zwykłych włókien chemicznych (poliestrowych), a najwyższe – kompozyty węglowe.

Dla niektórych zastosowań istotne znaczenie ma wytrzymałość zmęczeniowa cięgien. Spośród cięgien kompozytowych, wyroby na bazie włókien aramidowych są bardzo podatne na powstawanie mikropęknięć prowadzących do przedwczesnego zużycia. Trwałość wyrobów aramidowych ze względu na zmęczenie, określana w teście API-2SM wynosiła zaledwie 2 % trwałości lin z polietylenu o dużej masie cząsteczkowej (HMPE) i 5 % trwałości lin poliestrowych.



Rys. 2.110 – zależność naprężenia właściwego od odkształcenia, dla lin włókiennych i stalowych oraz cięgien z kompozytów węglowych. Naprężenie właściwe oznacza naprężenie odniesione do jednostki masy cięgna (gęstości). Opracowano na podstawie [13]

Również włókna szklane są wrażliwe na występowanie mikropęknięć pod wpływem obciążeń dynamicznych. Bardzo wysoką odporność na obciążenia wielokrotnie zmienne wykazują cięgna na bazie włókien węglowych. Przewyższają one pod tym względem zarówno stal jak i liny poliestrowe.

Zakotwienia cięgien kompozytowych | Cięgna kompozytowe cechuje mała wytrzymałość na ścinanie i ściskanie poprzeczne, a często również kruchość. Powoduje to pewne trudności w wykonywaniu ich zakotwień, zwłaszcza klinowych, szczękowych i klinowych [135]. W praktyce, dla każdego produkowanego cięgna opracowany został własny system wykonywania zakotwień, najczęściej wykorzystujący przyczepność żywicy, w połączeniu z dodatkowymi elementami mechanicznymi [83] [114].

Pręty sprężające z włókien szklanych | Problemy korozyjne ze starszymi mostami sprężonymi spowodowały, że w Niemczech, w latach siedemdziesiątych XX w. z inicjatywy rządu rozpoczęto prace nad niemetalicznymi cięgnami mogącymi w przyszłości zastąpić cięgna sprężające ze stali [114]. Wybrano kompozyty na bazie włókien szklanych, które – ze względu na swój niski moduł sprężystości – mniej nadawały się do wykonywania zbrojenia niesprężonego [83]. Efektem prac był wprowadzony w 1978 r. system HLV Polystal, opracowany przez firmy Bayer i Strabag-Bau [72].

System ten był pionierski i w pewnym sposób ukierunkował sposób kształtowania cięgien kompozytowych na długi czas. Przed jego wprowadzeniem wykonano znaczną ilość badań dla określenia jego krótko- i długotrwałych właściwości mechanicznych, w tym – możliwości występowania kruchych pęknięć. Opracowany został specjalny rodzaj zakotwień, uwzględniający małą wytrzymałość kompozytu na ścinanie i ściskanie poprzeczne.

Pierwszymi obiektami, w których zastosowano system Polystal i jednocześnie pierwszymi obiektami na świecie, sprężonymi cięgnami kompozytowymi, były dwa obiekty wykonane w Düsseldorfie: prosta kładka, a następnie, w 1986 r. – dwuprzęsłowy most drogowy, o całkowitej długości

46.9 m [72] [135]. W obu mostach zastosowano dodatkowo znaczne ilości zwykłego zbrojenia i oba są zaprojektowane jako częściowo sprężone. Następnie wykonano kładkę w Berlinie-Marienfelde, z prętami Polystal jako zewnętrznym zbrojeniem sprężającym. Później powstało wiele innych obiektów mostowych w Niemczech i w Austrii.

Szczególnie interesujący jest most Schiessbergstrasse w Leverkusen. Jest to jedyny obiekt, w którym zainstalowano system ciągłego monitorowania stanu cięgien sprężających. Wykorzystano w nim włókna światłowodowe, wprowadzone do prętów Polystal w procesie produkcji oraz system sensorów, zarówno optycznych (sensory Bragga) jak i miedzianych [114] [135]. Kompletny system takiego monitoringu, składający się dodatkowo z układu transmisji na odległość (w czasie rzeczywistym) zebranych danych i komputerowego systemu ich przetwarzania, opracowała niemiecka firma Deha Com [114].

Produkcji prętów Polystal zaprzestano z powodów ekonomicznych w połowie lat 90 [83] [114] [135].

Po wprowadzeniu prętów Polystal pojawiły się inne tego typu wyroby, które są aktualnie produkowane. Przykładem mogą być pręty Jitec Glas, francuskiej firmy Cousin Composites oraz pręty Glasspree, włoskiej firmy Sireg.

Istotną modyfikacją w rozwiązaniach cięgien kompozytowych z włókien szklanych było wprowadzenie splotek. Są to cięgna o budowie analogicznej jak splotki stalowe, w których rolę drutów pełnią cienkie pręty kompozytowe. Najczęściej mają one budowę 1×7. Najbardziej znane wyroby to: FiBRA, japońskiej firmy Mitsui (występuje również w formie pojedynczych prętów) oraz Lightline, firmy Neptco.

Pręty sprężające z włókien aramidowych | Prace nad zastosowaniem kompozytów z włókien aramidowych do sprężania konstrukcji rozpoczęły się na początku lat osiemdziesiątych XX w., w Holandii. Opracowano wówczas pierwszy system cięgien aramidowych o nazwie Arapree. Są to pręty okrągłe i płaskie, produkowane metodą prasowania ciągłego. W przypadku cięgien z kompozytów aramidowych występowały – podobnie jak w przypadku prętów Polystal – trudności w opracowaniu odpowiednich systemów zakotwień, producentom udało się jednak je rozwiązać, opracowując zakotwienia zalewane żywicą.

Cięgna te mają bardzo szeroki zakres zastosowań. Stosowane są zarówno w elementach niekonstrukcyjnych, jak i w elementach wykonywanych dla budownictwa powszechnego, aż po odpowiedzialne konstrukcje nośne [5.59]. Uważane są znakomicie nadające się zwłaszcza do sprężania prefabrykatów betonowych. We wczesnych zastosowaniach występowały pewne problemy związane z poprzeczną rozszerzalnością cieplną cięgien. Stwierdzono zarysowania betonu wzdłuż linii cięgien usytuowanych blisko powierzchni elementu. Problemy te rozwiązano stosując na cięgnach powłoki z żywicy zawierającej mikroskopijne pęcherzyki powietrza [72].

Oprócz prętów Arapree znane są pręty aramidowe o nazwach Technora, japońskiej firmy Sumitomo, Aratec, francuskiej firmy Cousin Composites oraz FiBRA, japońskiej firmy Mitsui. Pręty FiBRA, podobnie jak pręty z włókien szklanych o tej samej nazwie, występują również w formie splotki.

Cięgna z włókien węglowych do sprężania i na odciągi | Cięgna z włókien węglowych są wykonywane jako splotki lub kable z wielu mniejszych „drutów kompozytowych” (tzw. żył), tj. elementów o małej średnicy, wytwarzanych poprzez prasowanie ciągłe. Elementy te są łączone w gotowe wyroby poprzez skręcanie w splotkę lub są składane równolegle w cięgna kablowe. Splotki są wyrobami o ustalonej budowie (ilość żył, pole przekroju poprzecznego), natomiast kable mogą być składane z żądanej (choćby ograniczonej) ilości żył.

Zastosowanie włókien węglowych w konstrukcjach budowlanych ma swój początek w latach osiemdziesiątych XX w., w Szwajcarii. Podobne do niemieckich problemy z konserwacją i wzmacnianiem istniejących mostów

doprowadziły do opracowania szeregu taśm wzmacniających na bazie kompozytów węglowych (Sika). Szwajcarska tradycja stosowania systemów sprężających oraz odciągów linowych, pozwoliła rozszerzyć koncepcję wykorzystania włókien węglowych również na te dziedziny. Kluczową rolę odegrało tu Szwajcarskie Federalne Laboratorium Badawczo-Rozwojowe Materiałów (EMPA) w Dübendorf [72] [114]. Laboratorium EMPA opracowało bardzo innowacyjne zakotwienie cięgien z włókien węglowych, w którym żywica wypełniająca tuleję jest układana w wielu warstwach, z których każda ma inną sztywność. Najbardziej miękka żywica jest układana przy wejściu prętów do zakotwienia, a najtwardsza – na jego końcu. Zapobiega to koncentracji naprężeń i chroni wrażliwe na ścinanie włókna węglowe [72].

Na rynku występuje stosunkowo dużo wyrobów z włókien węglowych służących do naprawy konstrukcji. W grupie kompozytowych cięgien węglowych dostępne są jednak zaledwie trzy produkty. Są to splotki CFCC – produkcji Tokyo Rope i NACC – produkcji Nippon Steel oraz kable BBR Carbon – produkcji firmy BBR.

Pierwszym obiektem mostowym, w którym zastosowano cięgna węglowe był most Storchen w Wintherthur, w Szwajcarii, rys. 2.111. Ma on długość całkowitą 124 m. Dwa z 24 kabli zostały wykonane z kompozytów węglowych [72].



Rys. 2.111 – most wantowy Storchen (Storchenbrücke) k. Winterthur, w Szwajcarii^{*)}.



Most został otwarty dla ruchu w kwietniu 1996 r. Ma on długość całkowitą 124 m. Spośród 24 want podtrzymujących pomost – dwie zostały wykonane z cięgien węglowych BBR Carbon. Są to cięgna o budowie kablowej, składające się z 241 żył o średnicy 5 mm, składających się z ok. 24 000 pojedynczych włókien węglowych. Łączna ilość włókien w jednym kablu wynosi 400 000. Każde z włókien ma średnicę równą ok. 1/10 średnicy ludzkiego włosa. Od chwili otwarcia mostu prowadzone są badania długotrwałego zachowania cięgien z kompozytów węglowych. Most został zaprojektowany przez Holtzchi & Schurter – Consulting Engineers, Zurich.

^{*)} fotografie: BBR – Conex, [233]

Podobne kable zastosowano do sprężenia pasa dolnego w stalowej kładce dla pieszych w pobliżu Lucerny. Ciężna węglowa zastosowano m.in. w moście Box Lane w Stoke-on-Trent, w Wielkiej Brytanii oraz w kładce dla pieszych i samochodów interwencyjnych o długości 80 m, nad torami kolejowymi w Herning, w Danii [72].

Dużym i znanym obiektem sprężonym cięgnami węglowymi (CFCC) jest most Tsukude CC No.8 Hole Bridge, w Japonii, o długości całkowitej 111.0 m (75.0 m w świetle). Jest to obiekt ciekawy, gdyż po raz pierwszy zastosowano w nim ciężna węglowa zarówno jako zbrojenie sprężające wewnętrzne (umieszczone w betonie), jak i zewnętrzne (umieszczone wewnątrz skrzyni pomostu). Był on wykonywany metodą wspornikową, z obu stron jednocześnie.

Największym dotychczas wykonanym obiektem mostowym sprężanym cięgnami węglowymi jest wiadukt drogowy Ostrasse, nad torami kolejowymi na terenie fabryki BASF AG w Ludwigshafen, na przedmieściach Mannheim w Niemczech. Jego rozpiętość wynosi 81.65 m, przy szerokości 11.2 m. Do sprężania zastosowano ciężna składające się z 19 spletek CFCC $1 \times 7 \ 12.5 \ \phi$ [33].

Zastosowania cięgien węglowych obejmują nie tylko konstrukcje sprężone i wanty mostowe ale również kotwy gruntowe. Ważną dziedziną zastosowań staje się również budownictwo morskie: obiekty portowe, platformy wiertnicze i betonowe obiekty pływające [72] [121]. Ciężna z włókien węglowych są niemal niewrażliwe na korozyjne oddziaływanie środowiska morskiego¹⁾. Lista obiektów, w których zastosowano te ciężna jest bardzo duża, zwłaszcza w Japonii ale również w Europie i ma wyraźną tendencję wzrostową.

Kompozytowe pręty zbrojeniowe | Niezależnie od mniejszego niż dla stali współczynnika sprężystości oraz mniejszego wydłużenia granicznego przy zerwaniu, jakie charakteryzują pręty wykonywane z kompozytów, występuje spore zapotrzebowanie na te wyroby. Wynika to przede wszystkim z ich wysokiej odporności na korozję. Czasami jednak ważne są również inne cechy, np. neutralność elektromagnetyczna. Ta cecha została wykorzystana przy wykonywaniu toru próbnego superprzewodnikowej kolejki magnetycznej [33]. Obszerne badania konstrukcji zbrojonych prętami z włókien kompozytowych, zwłaszcza pod względem trwałości, przeprowadzono w ramach europejskiego projektu Eurocrete oraz – niezależnie – we Francji, w odniesieniu do prętów Jitec. Przedmiotem badań jest zwłaszcza nośność przekrojów na zginanie i skręcanie przy jedynie częściowym zespoleniu prętów z betonem, charakterystycznym dla zbrojenia nie mającego zdolności do dużych odkształceń plastycznych [72]. Pewnym ograniczeniem w zastosowaniach prętów kompozytowych jako zbrojenia betonu jest niemożność kształtowania ich w sposób przyjęty tradycyjnie dla stali zbrojeniowej, tj. poprzez odginanie.

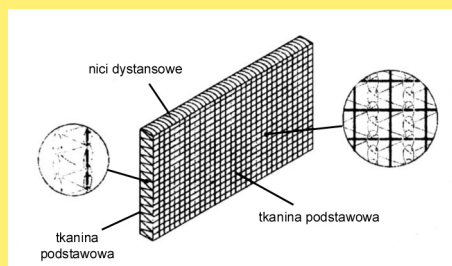
Spośród dostępnych wyrobów najbardziej znane są pręty Glasspree (Sireg) i Jitec Glass (Cousin Composites) – pręty z kompozytów szklanych, pręty Leadline (Mitsubishi) i Carbopree (Sireg) – pręty z włókien węglowych oraz pręty Technora (Sumitomo), Arapree (Sireg) i Aratec (Cousin Composites) – pręty z włókien węglowych.

Nowe formy zbrojenia z kompozytów | Ciekawą formą wyrobów zbrojeniowych wykonywanych z kompozytów są płaskie i przestrzenne siatki zbrojeniowe. Najważniejszym wyrobem są tu siatki do zbrojenia betonu pod nazwą NEFMAC oraz specjalne siatki do zbrojenia gruntu pod nazwą NESTEM – obydwa wyroby produkowane przez firmę Shimizu. Specyfika tych wyrobów polega nie tylko na ich dużej odporności na korozję ale również na małej masie. Umożliwia to układanie siatek zbrojeniowych zakrzywionych przestrzennie, które zachowują stateczność pod ciężarem własnym i mogą być pokrywane natryskowo betonem bez dodatkowego deskowania (np. ściany tuneli) [121].

Wiele zastosowań wyrobów kompozytowych ma miejsce na morzu. Już w latach pięćdziesiątych, amerykańska marynarka wojenna zdecydowała się zastosować kompozytowe elementy konstrukcyjne w kadłubach łodzi podwodnych. Wykonane po jedenastu latach intensywnej eksploatacji pomiary wykazały, że zarówno wytrzymałość tych elementów, jak i moduł sprężystości zmniejszyły się zaledwie o mniej niż 1%. Dużym odbiorcą wyrobów kompozytowych jest przemysł wydobywczy ropy naftowej z dna morza. Na platformach wiertniczych na Morzu północnym już od początku lat siedemdziesiątych XX w. stosowane są kompozytowe liny cumownicze. Ponadto, z kompozytów wykonuje się wiele elementów konstrukcyjnych platform: lądowiska dla helikopterów, podpory rurociągów, osłony zaworów itp. Na platformie wiertniczej Troll, ok. 180 ton kompozytów zostało użytych do wykonania podstawowych elementów konstrukcyjnych, a ponadto wiele innych drugorzędnych elementów również wykonano z materiałów kompozytowych. Najczęściej w takich zastosowaniach używane są kompozyty na bazie włókien węglowych. [13]

¹⁾ patrz – pkt. 2.5.4

Nową tendencją w kształtowaniu zbrojenia z kompozytów jest wykonywanie form przestrzennych z suchych włókien, po którym następuje przesączanie ich żywicą w celu utrwalenia kształtu. Umożliwia to pokonanie bariery zginania usztywnionych elementów. W Niemczech prowadzone są prace badawcze nad zastosowaniem technologii tekstylnych do kształtowania nowego rodzaju wyrobów zbrojeniowych. Poprzez odpowiednie utkanie uzyskuje się wyroby przestrzenne, które są następnie usztywniane za pomocą żywicy, rys. 2.112. Są to na razie prace badawcze i nie nastąpiło jeszcze wdrożenie takich wyrobów do produkcji [72].



Rys. 2.112 – aaa
Opracowano na podstawie [186]

Liny aramidowe Parafil | Do cięgien kompozytowych zaliczane są również powszechnie liny z włókien aramidowych, o nazwie Parafil, mimo iż nie spełniają one podanej w pktcie 2.5.1. definicji. System Parafil został opracowany w Wielkiej Brytanii, przez firmę Linear Composites, na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia. Włókna w tych wyrobach nie są połączone za pomocą matrycy żywicznej ale ułożone równolegle, w osłonie polimerowej. Liny Parafil stosowano pierwotnie jako cumy na platformach wiertniczych na północnym Atlantyku. Istotne cechy, które odróżniają ten system od pozostałych rodzajów cięgien kompozytowych, to brak możliwości uzyskania przyczepności do betonu. Mimo iż system Parafil nie był pierwotnie opracowany do zastosowania w budowlanych konstrukcjach sprężonych, wielokrotnie stosowano go do tego właśnie celu [114]. Podstawą tego zastosowania był opracowany sposób zakotwienia liny umożliwiający realizację naciągu wstępnego.

Wśród licznych zastosowań cięgien Parafil w obiektach lądowych są zarówno obiekty sprężone, np. naprawiana chłodnia wieżowa angielskiej elektrowni Thorpe Marsh, czy wykonany w konstrukcji murowanej z cegieł mały most w Tring (Wlk. Brytania) jak i ściągi mostu łukowego Oppergaard w Norwegii (łuki tego mostu są zbrojone prętami z włókien szklanych) [72].

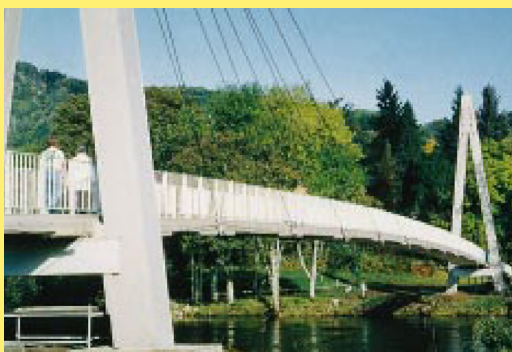
Konstrukcje całkowicie kompozytowe | Próbą pełnego wykorzystania możliwości tkwiących w wyrobach kompozytowych są konstrukcje wykonane w całości z materiałów tego rodzaju.

Konstrukcje wykonane w całości z kompozytów różnią się istotnie od analogicznych konstrukcji wykonanych z materiałów tradycyjnych, zwłaszcza ze stali. Wynika to przede wszystkim z anizotropii wyrobów uzyskiwanych w procesie prasowania ciągłego. Powoduje ona istotne trudności w kształtowaniu połączeń połączeń pomiędzy elementami. Wiercenie otworów na łączniki rozdziela włókna przenoszące obciążenie, a brak izotropii wyklucza możliwość redystrybucji sił wewnętrznych. Nie jest możliwe spawanie konstrukcji kompozytowych, a łączenie poprzez klejenie – chociaż możliwe – nie jest banalne w projektowaniu, jeżeli mają być spełnione kryteria trwałości i niezawodności [72].

Spośród kilku istniejących obiektów, najbardziej znane są mosty Aberfeld (rys. 2.113) i Bonds Mill (rys. 2.114) w Wielkiej Brytanii, PWRI¹⁾ Composit Cable Demonstration Bridge w Japonii, most Pontresina w Szwajcarii i most Kolding w Danii [72] [114]. Są obiekty eksperymentalne, służące do sprawdzenia technik realizacyjnych ale przede wszystkim do badania długookresowego zachowania konstrukcji.

¹⁾ Public Work Research Institue – rządowy ośrodek badawczy budownictwa w Japonii

Most Aberfeldy jest pierwszym na świecie mostem podwieszonym wykonanym w całości z kompozytów. Został zrealizowany w roku 1992, na polu golfowym w Aberfeldy, w Wielkiej Brytanii, w celu jego powiększenia z 9 do 18 dołków, po drugiej stronie rzeki Tay. Długość mostu wynosi 113 m, a rozpiętość w świetle – 63 m, przy szerokości 2.2 m. Pylony o wysokości 17.2 m oraz pomost są wykonane z kompozytu szklanego i poliestrowego, ciągną są aramidowe (Parafil). Pomost w głównym przęśle jest łukiem niewielkiej wyniosłości. Podczas eksploatacji mostu zaobserwowano problemy wynikające z jego niewielkiego ciężaru. Bez dodatkowego balastu most jest niedostatecznie tłumiony ze względu na drgania wywołane przez wiatr, a pod obciążeniem użytkowym (ruch pieszych) wyraźnie odkształca się. Niewielkie trwałe odkształcenia mostu przypisuje się niskiemu modułowi sprężystości i pełzaniu wian [72] [114].



Rys. 2.113 – most kompozytowy w Aberfeldy, w Wielkiej Brytanii. Fotografia za [72].

Most zwodzony Bonds Mill, k. Gloucester w Wielkiej Brytanii ma rozpiętość 8.2 m i szerokość 4.3 m. Został wykonany w 1994 r. Przewidziano na nim dwa pasy ruchu dla ciężarówek o masie 40 ton. Wysokość konstrukcyjna mostu wynosi 0.86 m. Tworzy ją sześciokomorowy dźwigar skrzynkowy, wykonany przez firmę Maunsell z płaskich paneli ACCS (Advanced Composite Construction System). Górna powierzchnia (użytkowa) jest wykonana z dwóch warstw paneli ACCS, ułożonych we wzajemnie prostopadłych kierunkach. Miejsca narażone na ścieranie lub uderzenie są obłożone wymienną sklejką wodoodporną, przyklejona i pokryta żywicą epoksydową z wypełniaczem piaskowym. Całkowity ciężar konstrukcji wynosi 4.5 tony, przy powierzchni pomostu 35 m². Most był poddany krótko- i długookresowym badaniom przez zespół z University of Surrey. W okresie użytkowania nie wystąpiły żadne problemy eksploatacyjne [72] [114].



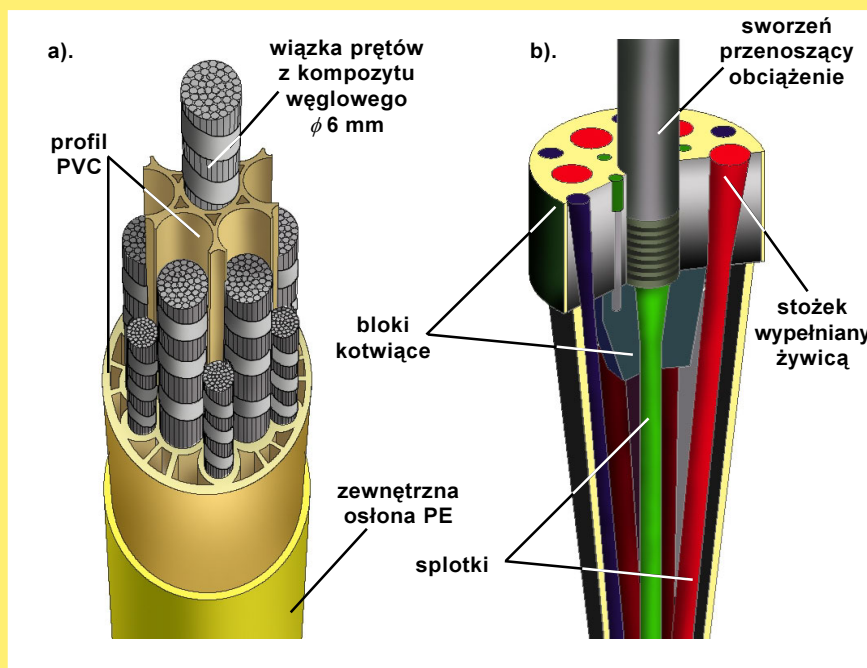
Rys. 2.114 – kompozytowy most zwodzony Bonds Mill, k. Gloucester w Wielkiej Brytanii. Fotografia za [72].

Most w Millbridge, w stanie Maine (USA) został wybudowany w 1997 r. Ma on ok. 7 m długości i tyle samo szerokości. Jest to pierwszy w świecie most ze sprężonym pomostem kompozytowym. Szesnaście cięgien sprężających z kompozytu szklanego (szkło rodzaju E), o średnicy pół cala każde, zostało umieszczonych w otworach wykonanych na szerokości pomostu [13].

Nowe konstrukcje cięgien kompozytowych | W ostatnim okresie pojawiły się ciągnia kompozytowe do specjalnych zastosowań (przede wszystkim dla instalacji podmorskich na dużej głębokości), charakteryzujące się złożoną budową przekroju poprzecznego.

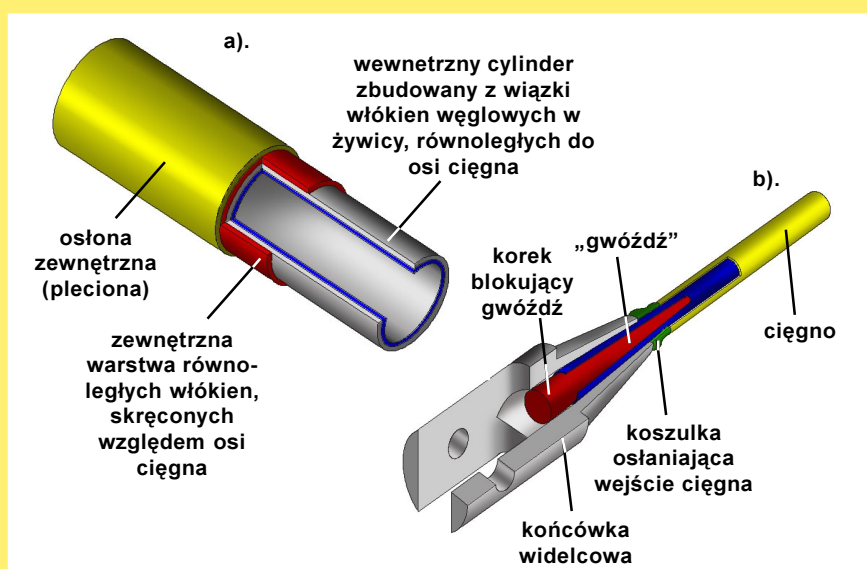
W roku 1996 rozpoczął się program badawczy Comptether. W końcu 2001 r., w wyniku tego programu opracowano ciągnie z włókien węglowych, o tej samej nazwie. Jest ono zbudowane z 781 prętów węglowych o średnicy 6 mm, skręconych w 13 skrętek po 85 i 13 prętów. Ciągnie są kotwione w stalowej głowicy za pomocą klinów stożkowych i zalewane żywicą. Ciągnie Comptether przedstawiono na rys. 2.115.

Inno rozwiązanie opracowano w wyniku rozpoczętego w 2002 r. projektu koordynowanego przez firmę Deepsea. Celem tego projektu jest opracowanie lin cumowniczych dla dużych głębokości. Zaproponowano rozwiązanie cięgnia o przekroju rurowym. Jest ono zbudowane z wewnętrznej warstwy równoległych włókien węglowych, ułożonych zgodnie z osią cięgnia oraz zewnętrznej warstwy równoległych włókien węglowych, ułożonych pod kątem do osi cięgnia. Całość jest chroniona osłoną plecioną z organicznych włókien chemicznych, rys. 2.116. W kompozycie włókna węglowe stanowią 70% przekroju, a żywica – 30%. Pusta przestrzeń wewnątrz cięgnia może być wykorzystana do prowadzenia światłowodów monitorujących jego stan. Może również być swobodnie wypełniana wodą.



Rys. 2.115 – cięgno Comptether:
a). budowa splotki
b). zakotwienie cięgna

Opracowano na podstawie [13].



Rys. 2.116 – cięgno kompozytowe do cumowania obiektów podmorskich na dużej głębokości, wg projektu firmy Deepsea:
a). budowa splotki
b). zakotwienie cięgna

Opracowano na podstawie [13].

Przepisy projektowania cięgien kompozytowych | Cięgna kompozytowe pojawiły się na rynku stosunkowo niedawno i znajdują się wciąż w okresie intensywnego rozwoju. Obecnie nie istnieją jeszcze formalne przepisy normowe, określające zasady projektowania i wykonywania konstrukcji z zastosowaniem tych elementów. owszechną praktyką jest opracowywanie wytycznych stosowania i projektowania dla poszczególnych wyrobów przez ich producentów. Charakteryzują się one sporą różnorodnością modeli teoretycznych przyjmowanych jako podstawa opracowania [114].

Pierwsze regulacje dotyczące całej grupy cięgien kompozytowych, jakie zostały opracowane w kilku krajach, mają rangę wytycznych i zaleceń do projektowania. Obejmują one wyłącznie konstrukcje betonowe zbrojone i sprężone wyrobami kompozytowymi. Wynika to z faktu, że pierwsze zastosowania cięgien kompozytowych miały miejsce w konstrukcjach betonowych i jest to wciąż podstawowy obszar ich stosowania.

Najwcześniej wytyczne projektowania cięgien kompozytowych zostały opublikowane w Japonii w 1994 r. (w roku 1997 – w wersji angielskiej). Wcześniej, w 1988 r., powstał przy Japońskim Instytucie Architektonicznym Komitet Badawczy Materiałów Kompozytowych z Włókien Ciągłych. W roku 1991 komitet ten rozpoczął prace, które doprowadziły do wykonania ok. 30 studiów eksperymentalnych finansowanych przez Ministerstwo Budownictwa. W oparciu o ich wyniki opracowano w/w wytyczne. Równolegle, w 1989 r., podobne prace rozpoczęto w analogicznym Komitecie, afiliowanym przy Japońskim Stowarzyszeniu Inżynierów Cywilnych. Komitet ten opublikował wytyczne w roku 1996, a w roku 1997 – ich angielską wersję. Podobne wytyczne zostały opracowane również w Wielkiej Brytanii oraz w USA. Opracowania te wymienione są poniżej:

Japonia

- Public Works Research Institute, Ministry of Construction, ACC Club *Design and Construction Guidelines for Prestressed Concrete Highway Bridges Using FRP Tendons*, March 1994.
- Japan Society of Civil Engineers, *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, October 1997

Wielka Brytania

- Institution of Structural Engineers, *Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fibre composite reinforcement*, Published by SETO Ltd., August 1999

USA

- American Concrete Institute, *Provisional Design Recommendations for Concrete Reinforced with FRP bars*, ACI Committee 440, Draft, January 17, 2000
- Federal Highway Administration, *Design Recommendations for Concrete Structures Prestressed with FRP Tendons*, Final Draft, August 1, 2001 [83]

W Europie trwają obecnie prace nad opracowaniem ujednoliconych zasad projektowania konstrukcji betonowych zbrojonych i sprężanych wyrobami z kompozytów. W latach 1993 – 1997 realizowany był międzynarodowy projekt EUROCRETE, w którym uczestniczyły: Wlk. Brytania, Holandia, Szwajcaria, Francja i Norwegia. W ramach projektu prowadzone były m.in. badania wytrzymałościowe, korozyjne i reologiczne, a także określano wskaźniki techniczno-ekonomiczne konstrukcji betonowych zbrojonych kompozytami. W grudniu 1997 r. rozpoczął się czteroletni projekt „Development of Guidelines for the Design of Concrete Structures, Reinforced, Prestressed or Strengthened with Advanced Composites”, tzw. „ConFibreCrete Network”. Uczestniczy w nim 11 zespołów badawczych z dziewięciu krajów. W 1996 r., w celu opracowania europejskich wytycznych projektowych, powołano grupę roboczą w ramach Międzynarodowego Komitetu Betonu (CEB). Po połączeniu CEB z Międzynarodową Federacją Konstrukcji Sprężonych (FIP), w wyniku czego powstała Międzynarodowa Federacja Konstrukcji Betonowych (FIB), grupa ta weszła w skład Komisji 9, nowej organizacji i oznaczona została jako Task Group 9.3. Pracuje ona nad wytycznymi bazując na zasadach przyjętych w Eurokodzie 2 oraz w CEB-FIP Model Code [83].

W odniesieniu do innych rodzajów konstrukcji, w których stosuje się cięgna kompozytowe, w tym do konstrukcji membranowych, nie opracowano dotychczas żadnych zaleceń projektowych. Przy projektowaniu takich konstrukcji stosowane są zazwyczaj zalecenia producenta i przyjmuje się podawane przez niego parametry wytrzymałościowe. Ponieważ ilość tego typu konstrukcji jest dotychczas relatywnie niewielka, częstą praktyką jest, producent uczestniczy w ich realizacji lub wręcz jest inicjatorem takich przedsięwzięć. W takich przypadkach w projektowaniu uczestniczy zespół zajmujący się opracowaniem i badaniem cięgien, przez co nie występuje potrzeba odwoływania się do dokumentów zewnętrznych.

Interesujące spostrzeżenie na temat sposobu rozwijania konstrukcji kompozytowych zawiera praca [114]. Jest to raport z przeglądu kompozytowych konstrukcji mostowych w Europie i w Japonii, wykonanego przez grupę inżynierów i naukowców amerykańskich na zlecenie Federalnego Zarządu Autostrad (Federal Highway Administration – FHWA). Stwierdza on, że w Stanach Zjednoczonych prace koncentrują się na badaniach podstawowych, co jest wynikiem tego, iż są one finansowane przez agencje rządowe i prowadzone przez instytucje akademickie. Natomiast w Europie i w Japonii, przemysł w ogóle, a zwłaszcza przemysł budowlany, są inicjatorami i odgrywają wiodącą rolę w badaniach i zastosowaniach kompozytów. Podkreślono zwłaszcza ścisłą współpracę pomiędzy budownictwem, przemysłem materiałów kompozytowych, przemysłem wytwórczym, środowiskiem projektantów oraz instytucjami akademickimi i rządowymi. W podtekście tego stwierdzenia pozostało stwierdzenie, że takie rozłożenie akcentów jest przyczyną względnego opóźnienia Stanów Zjednoczonych we wprowadzaniu elementów kompozytowych do budownictwa.

Specyficzną japońską formą samoorganizacji przedsiębiorstw i instytucji zajmujących się zastosowaniami cięgien kompozytowych, jest Advanced Composite Cable (ACC) Club. Został on utworzony w listopadzie 1991 r., w celu promowania kompozytowych elementów zbrojeniowych i opracowywania nowych technologii z tej dziedziny. Do klubu ACC należy 65 firm różnej wielkości. Poprzez rozbudowaną strukturę powiązań, klub zapewnia wymianę informacji i współpracę, realizując w ten sposób swoje statutowe zadania. Jednym z nich jest organizowanie grup badawczych i przygotowywanie publikacji i wykładów. Organizacja ma siedem podkomisji materiałowych, z których każda zajmuje się jednym z ważniejszych produktów na rynku japońskim. Są to grupy: CFCC, Arapree, Technora, FIBRA, Leadline, NEFMAC, NACC. Oprócz ACC powstały jeszcze dwa stowarzyszenia zrzeszające firmy zajmujące się zastosowaniem materiałów kompozytowych do naprawy i wzmacniania konstrukcji: Carbon Fiber Repair and Reinforcement Research Association (CFRRA) – 1994 r. oraz Society of Aramid Reinforcement Systems (ARS) – 1996 r. [121].

2.5.3. Charakterystyka najważniejszych produkowanych cięgien kompozytowych

W tablicy 2.74 zestawiono produkowane wyroby kompozytowe dla budownictwa. Poniżej przedstawiono krótkie charakterystyki najważniejszych, dostępnych na rynku cięgien kompozytowych.

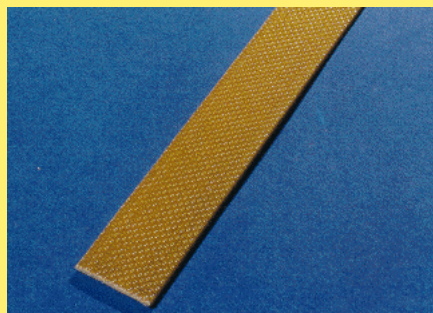
164

Tablica 2.74 – Zestawienie produkowanych wyrobów kompozytowych dla budownictwa

Nazwa wyrobu	Producent / udział w oprac.	Dostawca włókien	Rodzaj włókna	Rodzaj żywicy	Kształt
Arapree	Sireg S.p.A. Kajima Corp. Nippon Aramid Co., Ltd. AKZO Chemicals Hollandsche Beton Groep	AKZO Chemicals	AF	epoksydowa	pręt okrągły pręt płaski
Aratec	Cousin Composites		AF	epoksydowa	pręt okrągły
Carbodur	Sika		CF		taśma wzmacniająca
BBR Carbon	BBR Systems Ltd.		CF	epoksydowa	kabel
Carbon Stress	Nederlandse Draad Industrie AKZO Chemicals	AKZO Chemicals	CF	epoksydowa	pręt okrągły, pręt płaski
Carbopree	Sireg S.p.A.		CF (pak, PAN)	epoksydowa	pręt okrągły
CFCC	Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd.	Toho Rayon Co., Ltd.	CF (PAN)	epoksydowa, BMI ¹⁾	splotka
Glasspree	Sireg S.p.A.		GF	epoksydowa	pręt okrągły, pręt płaski
FIBRA	Mitsui Construction Co., Ltd., Shinko Wire Co., Ltd.	Toray Industry Inc., Du Pont	AF, GF i CF (PAN)	epoksydowa	pręt pleciony
FITS	Sumitomo Construction Co., Ltd.		CF	epoksydowa	taśma wzmacniająca
FORCA	Tonen Corp.		CF, GF, AF	epoksydowa	taśma wzmacniająca
Jitec Glass	Cousin Composites		GF	epoksydowa	pręt okrągły
Leadline	Mitsubishi Kasei Corp. Ohbayashi Corp.	Mitsubishi Rayon Co., Ltd.	CF (pak)	epoksydowa	pręt okrągły
Lightline	Neptco, Inc.		GF	epoksydowa	splotka
NACC	Nippon Steel Corp., Suzuki Metal Industry Co., Ltd. Nippon Steel Chemicals Kajima Corp.	Nippon Steel Chemicals	CF (pak, PAN)	epoksydowa	splotka
NEFMAC	Shimizu Construction, Ltd.	Dainippon Glass Industries Co., Ltd., Toray Industry Inc. Du Pont	CF (PAN), GF i AF	wyniowo-estrowa poliestrowa, epoksydowa	siatka 2D i 3D
NESTEM			GF	wyniowo-estrowa poliestrowa	siatka 2D
NOMST	Nippon Steel Corp.		CF	epoksydowa	panel 2D
Parafil²⁾	Linear Composites		AF	–	lina okrągła
Polystal	Strabag-Bau AG Bayer AG	Bayer AG	GF	poliestrowa	pręt okrągły
Replark	Mitsubishi Rayon Co., Ltd.		CF (PAN)	epoksydowa	taśma wzmacniająca
Technora	Sumitomo Construction Co., Ltd. Teijin, Ltd.	Teijin, Ltd.	AF	wyniowo-estrowa	pręt okrągły, pręt płaski
Torayca	Toray Industry Inc.		CF (PAN)	epoksydowa	taśma wzmacniająca
Oznaczenia: CF – włókna węglowe, GF – włókna szklane, AF – włókna aramidowe PAN – włókna produkowane z prekursorów poliakrylonitrylowych pak – włókna produkowane z prekursorów z paku				¹⁾ BMI = bismaleic ²⁾ Parafil nie jest ciągnem kompozytowym wg ścisłej definicji ale zwykle zalicza się go do tej grupy wyrobów	

Arapree | Cięgna Arapree zostały opracowane wspólnie przez firmy AKZO Chemicals i Hollandsche Beton Groep (HBG), w Holandii. Prawa do wytwarzania tego produktu przekazano firmom Sireg S.p.A. (Włochy) i Kajima (Japonia). Cięgna te składają się z włókien aramidowych (Twaron) umieszczonych w matrycy z żywicy epoksydowej. Produkowane są dwa rodzaje przekroju poprzecznego: prostokątny i okrągły. Pierwszy z nich nieco łatwiej jest zakotwić. Zakotwienia cięgna Arapree składają się z metalowej tulei, w której cięgno jest zalewane lub klinowane [83]. Rysunek 2.117 przedstawia pręty Arapree o przekroju poprzecznym płaskim i okrągłym. W tabelicy 2.75 zestawiono charakterystyki przekroju poprzecznego prętów Arapree produkowanych przez firmę Kajima (Japonia), a w tabelicy 2.76 – charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe prętów Arapree produkowanych przez firmę Sireg (Włochy).

a).



b).



Rys. 2.117 – widok prętów Arapree:
a). pręty płaskie produkcji firmy Kajima, wg [121]
b). pręty okrągłe produkcji firmy Sireg, wg [1]

Tablica 2.75 – Charakterystyka prętów Arapree produkowanych przez firmę Kajima [121]

Typ	Kształt przekroju poprzecznego	Wymiar nominalny	Pole przekroju poprzecznego włókien
		mm	mm ²
f 20.000	prostokątne	20 x 0.3	2.2
f 100.000		20 x 1.5	11.1
f 200.000		20 x 3.0	22.2
f 400.000		20 x 5.0	44.4
f 20.000	okrągłe	φ 2.5	2.2
f 100.000		φ 5.0	11.1
f 200.000		φ 7.5	22.2

Tablica. 2.75
Charakterystyka prętów Arapree produkowanych przez japońską firmę Kajima, wg [121].

Tablica 2.76 – Charakterystyka prętów Arapree produkowanych przez firmę Sireg [1]

Charakterystyka	j.m.	Arapree		
		Rod 5.5	Rod 7.5	Rod 10
średnica nominalna	mm	5.5	7.5	10.0
nominalne pole przekroju	mm ²	23	44	78
wytrzymałość na rozciąganie	MPa	1 400	1 400	1 400
moduł sprężystości podłużnej	GPa	60	60	60
wydłużenie przy zerwaniu	%	2.4	2.4	2.4
nośność na rozciąganie	kN	32	61	109
masa liniowa	g/m	40	75	130

Tablica. 2.76
Charakterystyka prętów Arapree produkowanych przez włoską firmę Sireg, wg [1].

Aratec | Jest to – podobnie jak pręt Jitec Glass – wyrób francuskiej firmy Cousin Composites. Jest to pręt kompozytowy, produkowany w procesie prasowania ciągłego. Rys. 2.118 przedstawia pręt Aratec w postaci handlowej – nawinięty na szpulę. W tablicy 2.77 zestawiono podstawowe właściwości mechaniczne prętów Aratec i Jitec Glass.

Tablica 2.77 – Charakterystyka prętów Aratec i Jitec Glass

Charakterystyka	j.m.	JITEC GLASS	ARATEC
gęstość	g/cm ³	2.15	1.34
maksymalne naprężenie rozciągające	MPa	1 400 + 1 600	2 000
moduł sprężystości podłużnej	MPa	45 000 + 55 000	75 000
przewodność elektryczna		nie przewodzi	nie przewodzi
współczynnik przewodności cieplnej	W/m°C	1	nie przewodzi
maksymalne naprężenie ścinające	MPa	150 + 300	

Tablica. 2.77
Charakterystyka prętów Aratec i Jitec Glass, wg danych firmy Cousin Composites [233]



Rys. 2.118 – pręt Aratec w postaci handlowej – nawinięty na szpulę, fotografia firmy Cousin Composites, wg [233]

BBR Carbon | Cięgna BBR Carbon zostały opracowane wspólnie przez Szwajcarskie Federalne Laboratorium Badawczo-Rozwojowe Materiałów (EMPA) oraz firmę BBR – znanego światowego dostawcę systemów sprężających. Są one wykonywane jako cięgna o budowie kablowej. Ich przekrój stanowią w 70 % włókna węglowe, a pozostałe 30 % stanowi matryca epoksydowa. Typowe cięgno składa się z 241 „drutów” węglowych, o średnicy 5 mm każdy. Nośność takiego cięgna wynosi 12 000 kN. Obciążenie niszczące stanowi 90% wytrzymałości.

Cięgno charakteryzuje wyjątkowo wysoka wytrzymałość zmęczeniowa: do 10 mln cykli przy zakresie zmienności naprężeń $\Delta\sigma = 250$ MPa. Ponadto cechuje je wyjątkowo wysoka odporność korozyjna i mały ciężar własny. Dzięki temu mogą nadawać się szczególnie do zastosowań w konstrukcjach takich jak obciążone intensywnym ruchem samochodowym mosty, konstrukcje na obszarach przemysłowych, konstrukcje morskie itp. Dla ochrony przed erozją spowodowaną wiatrem oraz przed promieniowaniem UV, stosuje się osłonę z polietylenu lub innego odpowiedniego materiału. Ze względu na niską nośność na ścinanie i ściskanie poprzeczne, laboratorium EMPA opracowało specjalny rodzaj zakotwienia, podobny do stosowanego przez firmę BBR dla splotów stalowych zakotwienia typu HiAm.

Obecnie są opracowywane wersje cięgien BBR Carbon przeznaczone do kotew gruntowych oraz do innych zastosowań w środowiskach silnie korozyjnych. Na rys. 2.119 przedstawiono budowę cięgna BBR Carbon.

a).



b).



Rys. 2.119 – budowa cięgna BBR Carbon:

a). widok cięgna w pobliżu zakotwienia, wg BBR – Conex [233]

b). przekrój poprzeczny cięgna, wg EMPA [233]

Carbon Stress | Są to cięgna oparte na technologii podobnej do prętów Arapree. Zostały pierwotnie opracowane przez firmę AKZO. Carbon Stress jest to obecnie nazwa handlowa tych cięgien są one produkowane przez holenderską firmę Nederlandse Draad Industrie, należącą do producenta stali – firmy Hoogovens. Cięgna te są produkowane w procesie ciągłego prasowania włókien węglowych impregnowanych żywicą epoksydową. Produkowane są pręty o kształcie okrągłym i prostokątnym. Pręt prostokątny jest powierzchniowo karbowany, dla uzyskania powierzchni o lepszej przyczepności, natomiast pręty okrągłe mają powierzchnię piaskowaną. Pręty te mają zakotwienia podobne do zakotwień prętów Arapree [83].

Carbopree | Pręty Carbopree są prętami z włókien węglowych produkowanymi przez włoską firmę Sireg metodą prasowania ciągłego. Pręty te występują w dwóch odmianach: HS (High Strength) i HM (High Modulus). Powierzchnia prętów Carbopree jest specjalnie uszorstniona, dla uzyskania lepszej przyczepności do betonu.

W tablicy 2.78 zestawiono charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe prętów Carbopree. Rysunek 2.120 przedstawia widok przykładowych prętów o różnych średnicach.



Rys. 2.120 – widok prętów Carbopree, wg [1]

Tablica 2.78 – Charakterystyka prętów Carbopree

Charakterystyka	j.m.	Carbopree HS			Carbopree HS		
		Rod HS 5	Rod HS 7.5	Rod HS 10	Rod HM 5	Rod HM 7	Rod HM 10
średnica nominalna	mm	5.0	7.5	10.0	5.0	7.0	10.0
nominalne pole przekroju	mm ²	19	44	78	19	38	78
wytrzymałość na rozciąganie	MPa	2 300	2 300	2 300	3 000	3 000	3 000
moduł sprężystości podłużnej	GPa	130	130	130	200	200	200
wydłużenie przy zerwaniu	%	1.8	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5
nośność na rozciąganie	kN	44	101	180	57	114	234
masa liniowa	g/m	40	75	130	40	65	130

Tablica. 2.78 Charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe prętów Carbopree, firmy Sireg, wg [1]

CFCC | System cięgien o nazwie Carbon Fire Composite Cable (CFCC), został opracowany przez firmy japońskie Tokyo Rope oraz Toho Rayon. Cięgno ma formę splotki wykonywanej z wielu prętów o małej średnicy – podobnie jak przy wykonywaniu lin stalowych. Pręty te są wykonywane z włókien węglowych (produkowanych z prekursorów poliakrylonitrylowych) oraz żywicy epoksydowej. Ich produkcja polega na pokrywaniu wiązki prepregów (tj. częściowo stwardniałych włókien pokrytych żywicą) odpowiednią powłoką i prasowaniu, w celu nadania im kształtu cienkiego pręta. Pręty te, po skręceniu w splotkę, są ogrzewane w piecu i dopiero wtedy tworzą gotowy wyrób. Zastosowane pokrycie stanowi ochronę przed promieniowaniem UV i uszkodzeniami mechanicznymi oraz zwiększa szorstkość powierzchni, podnosząc jej przyczepność. Cięgna CFCC były stosowane w wielu obiektach, zarówno jako cięgna sprężające, jak i jako cięgna podwieszające oraz kotwy gruntowe [83]. Cięgna CFCC zostały szerzej omówione poniżej¹⁾.

¹⁾ patrz – pkt. 2.5.4

Glaspre | Jest to rodzina lekkich prętów z włókien szklanych, o różnym kształcie przekroju poprzecznego, produkowana przez włoską firmę Sireg. Powierzchnia tych prętów jest specjalnie uszorstniona, dla uzyskania lepszej przyczepności do betonu. Rysunek 2.121 przedstawia widok przykładowych prętów Glaspre. W tablicy 2.79 zestawiono ich charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe.



Rys. 2.121 – widok prętów Glaspre, wg [1]

Tablica 2.79 – Charakterystyka prętów Glaspre

Charakterystyka	j.m.	Glaspre				
		Rod 12	Rod 16	Rod 20	Rod 25	Rod 28
średnica nominalna	mm	12	16	20	25	28
nominalne pole przekroju	mm ²	113	200	314	490	615
wytrzymałość na rozciąganie	MPa	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
moduł sprężystości podłużnej	GPa	40	40	40	40	40
wydłużenie przy zerwaniu	%	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
nośność na rozciąganie	kN	113	200	314	490	615
masa liniowa	g/m	200	330	535	815	1 022

Tablica. 2.79
Charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe prętów Glaspre, firmy Sireg, wg [1]

FIBRA | Producentem tych cięgien jest japońska firma Mitsui Construction Company. Mogą one być wytwarzane z różnych rodzajów włókien ale najczęściej są to włókna aramidowe. Splecione włókna są impregnowane żywicą epoksydową i prasowane w celu nadania kształtu. W zależności od przebiegu procesu produkcyjnego, wytwarzane są dwa rodzaje prętów:



Rys. 2.122 – widok prętów FiBRA w zwoju, wg [121]

Nazwa cięgien pochodzi od portugalskiego słowa „fibra”, oznaczającego włókno.

sztwywny i giętki. Pręty sztywne są stosowane przede wszystkim jako zbrojenie konstrukcji betonowych, a pręty wiotkie – jako ciągną sprężające. Dla cięgien FiBRA opracowano zakotwienia zalewane żywicą oraz zaciskane metalowymi klinami [83]. Rysunek 2.122 przedstawia zwinięty pręt FiBRA rodzaju wiotkiego. W tablicy 2.80 zestawiono charakterystyki różnych odmian tego cięgna.

Tablica 2.80 – Charakterystyka cięgien FiBRA

Rodzaj	Typ	Średnica nominalna	Efektywne pole przekroju	Masa liniowa	Gwarantowana nośność na rozciąganie
		mm	mm ²	kg/m	kN
Wiotki	FA 11	10.4	85	0.108	117.7
	FA 13	12.7	127	0.162	176.5
	FA 15	14.7	170	0.216	235.4
Sztywne	RA 7	7.3	42.0	0.053	62.8
	RA 9	9.0	63.0	0.080	94.1
	RA 11	10.4	85.0	0.108	125.5
	RA 13	12.7	127.0	0.162	188.3
	RA 15	14.7	170.0	0.216	251.0
	RA 18	18.0	254.0	0.324	380.0

Tablica. 2.80
Charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe cięgien FiBRA, firmy Mitsui, wg [121]

Jitec Glass | Jitec Glass jest prętem kompozytowym produkowanym – podobnie jak pręt aramidowy Aratec – przez francuską firmę Cousin Composites. Jest to pręt zbudowany z rdzenia wykonanego z wiązki równoległych włókien szklanych (szkło rodzaju E), impregnowanych żywicą termoutwardzalną. W procesie produkcji wiązka włókien jest prasowana wewnątrz zewnętrznego oplotu, dzięki czemu włókna są dobrze chronione, a powierzchnia pręta uzyskuje szorstkość zapewniającą dobrą przyczepność [233]. Pręty Jitec – gładkie oraz żebrowane przedstawiono na rys. 2.123. Tablica 2.81 przedstawia charakterystyki prętów Jitec o różnej średnicy. Właściwości mechaniczne prętów Jitec Glass zestawiono w tablicy 2.81, wraz z prętami Aratec.



Rys. 2.123 – widok przykładowych prętów Jitec Glass, wg danych firmy Cousin Composites [233]

Tablica 2.81 – Charakterystyka lin z włókien węglowych, CFCC, produkowanych przez firmę Tokyo Rope (Japonia), wg [5.23] [5584]

Średnica nominalna	Minimalny promień zagięcia	Masa liniowa	Nośność na rozciąganie	Wydłużenie przy zerwaniu
mm	mm	g/m	kN	%
1.0	50	1.5	105	3.5
2.0	100	6.1	410	
3.0	150	13.8	920	
4.0	200	24.5	1 650	
5.0	250	38.3	2 600	
6.0	300	55.1	3 700	
8.0	400	98	6 600	
10.0	500	153	10 250	
12.0	600	221	15 000	
14.0	700	300	20 000	
16.0	800	392	26 200	
18.0	900	496	33 100	
20.0	1 000	610	41 000	

Tablica. 2.81 Charakterystyka prętów Jitec Glass, fotografia firmy Cousin Composites, wg [233]

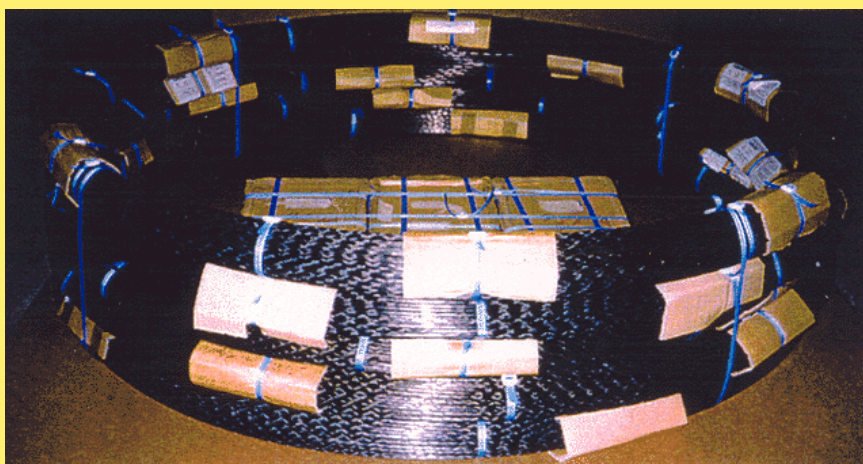
Leadline | Japońska firma Mitsubishi Kaisei Corporation opracowała system prętów z prasowanych włókien węglowych impregnowanych żywicą epoksydową pod wspólną nazwą Leadline. Są one dostępne w handlu od 1987 r. Są to pręty okrągłe, zawierające 65 % włókien węglowych w matrycy epoksydowej. Pręty różnią się formą użebrowania powierzchni. Wykonywane są pręty gładkie oraz żebrowane jedno- lub dwuskośnie i spiralnie. Moduł sprężystości podłużnej prętów Leadline wynosi 147 GPa, a wydłużenie graniczne $1.5 \div 1.5$ %. Współczynnik relaksacji wynosi $2 \div 4$ %, a współczynnik wydłużenia cieplnego w kierunku podłużnym wynosi 0.68×10^{-6} [$1/^{\circ}\text{C}$]. Gęstość pręta wynosi 1.6 g/cm^3 .

Dla prętów Leadline opracowano zakończenia klinowe, wykorzystujące aluminiowe żebrowane tuleje, w które wciskane są stalowe kliny. Całość jest zalewana żywicą [83].

Na rys. 2.124 przedstawiono widok prętów Leadline, a na rys. 2.125 – pręty te w formie handlowej (zwój).



Rys. 2.124 – widok przykładowych prętów Leadline, firmy Mitsubishi Kaisei, wg [121]

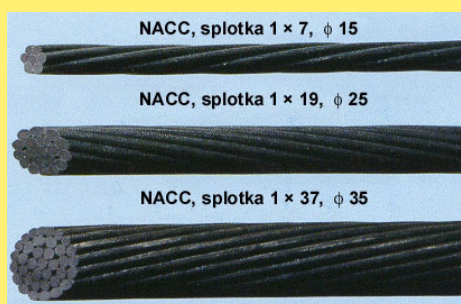


Rys. 2.125 – widok prętów Leadline, firmy Mitsubishi, w postaci handlowej, wg [121]

Lightline | Jest to splotka o budowie 1×7 , analogicznej jak dla lin stalowych. Poszczególne pręty są jedynie skręcone razem i owinięte opłotem syntetycznym lub żywicą. Pręty te są wykonywane z wiązki włókien szklanych (szkło odmiany E), prasowanych z żywica epoksydową. Producentem tych prętów jest amerykańska firma Neptco Inc. Producent nie opracował specjalnego zakotwienia dla tych prętów. Stosowane są zakotwienia żywiczne, gwintowane od zewnątrz i zabezpieczone nakrętką [83].

NACC | Jest to splotka kompozytowa podobna do CFCC (rys. 2.126). Nazwa jest skrótem od *Nippon steel Advanced Carbon fiber Composite strand*. Została opracowana przez konsorcjum firm japońskich, w skład którego weszły: Kajima, Nippon Steel, Nippon Steel Chemical, i Suzuki Metal Industry. Produkowane są dwie serie wyrobów: standardowa i o wysokim module sprężystości (HM).

Wersja standardowa jest wykonywana z włókien węglowych otrzymywanych z poliakrylonitrylu, wersja HM – z włókien otrzymywanych z paku. Współczynnik relaksacji wynosi $0.5 \div 1.0 \%$ po 1 000 godz. Dostępne są dwa rodzaje zakotwień. W obydwu splotka jest umieszczana w tulei i zalewana żywicą. Dla splotek pojedynczych tuleja jest kompozytowa, a dla splotek wielokrotnych – metalowa, z nakrętką zabezpieczającą. W tablicy 2.82. podano charakterystykę cięgien NACC.



Rys. 2.126 – przykładowe przekroje cięgien NACC, firmy Nippon Steel, wg [121]

Tablica 2.82 – Charakterystyka cięgien kompozytowych NACC

Rodzaj		Średnica nominalna	Nominalne pole przekroju	Masa liniowa	Nośność na rozciąganie	Moduł sprężystości
		mm	mm ²	g/m	kN	GPa
standard	1 × 7	12.5	97.0	166	196	137
		15.0	137.4	235	275	137
	1 × 19	21.0	263.2	449	412	127
		25.0	373.1	637	588	127
	1 × 37	30.0	538.3	863	686	118
		35.0	698.8	1 120	981	118
HM	1 × 7	12.5	97.0	182	109	206
	1 × 19	21.0	263.0	495	226	167
	1 × 37	30.0	538.3	1 010	426	147

Polystal | latach siedemdziesiątych XX w. dwie niemieckie firmy: duże przedsiębiorstwo budowlane Strabag-Bau oraz koncern chemiczny Bayern utworzyły spółkę joint venture, która podjęła prace nad kompozytowymi cięgnami sprężającymi. W wyniku tych prac, w roku 1978 został opracowany system cięgien z włókien szklanych, o nazwie Polystal [83]. Były to cięgna o przekroju okrągłym, gładkie. Włókna szklane (szkło rodzaju E) umieszczono w matrycy z żywicy poliestrowej, a wierzchnią warstwę pokryto powłoką poliamidową [135]. Zakotwienia prętów zostały opracowane w formie stalowych tulei, zalewanych żywicą. Wykonano wiele badań w celu określenia krótko- i długoterminowej pracy cięgien [72]. Cięgna te charakteryzowały się bardzo wysoką wytrzymałością w stosunku do wytrzymałości zastosowanych włókien szklanych – do 50 % [135]. Cięgna te zostały zastosowane z powodzeniem w wielu obiektach, zwłaszcza mostowych. Pomimo uzyskanego sukcesu technicznego, system nie osiągnął sukcesu komercyjnego i – po wielu próbach – producent zaprzestał na początku lat 90. jego produkcji. Właściwości cięgien Polystal wg [135] przedstawia tablica 2.83.

Tablica 2.83 – Charakterystyka prętów z włókien szklanych Polystal

Charakterystyka	j.m.	Polystal
gęstość	g/cm ³	2.0 ÷ 2.10
maksymalne napężenie rozciągające	MPa	1 520 ÷ 1 600
moduł sprężystości podłużnej	MPa	51 000 ÷ 52 000
wydłużenie przy zerwaniu	%	3.1 ÷ 3.3
wytrzymałość na ściskanie poprzeczne	MPa	140
wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe	MPa	17

Tablica. 2.83
Charakterystyka prętów z włókien szklanych Polystal, wg [135]

Strawman | Cięgna Strawman zostały opracowane w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych XX w., specjalnie na potrzeby programu badawczego amerykańskiego Federalnego Zarządu Autostrad – FHWA (Federal Highway Administration), którego celem było sformułowanie wytycznych do projektowania konstrukcji betonowych sprężanych cięgnami kompozytowymi [83]. Ich producentem jest firma Glasforms Corporation of San Jose, z Kalifornii. Cięgna Strawman są wykonywane z włókien węglowych T-750 (wytrzymałość na rozciąganie – 4.48 GPa, moduł sprężystości podłużnej – 165 GPa), które stanowią 65 % przekroju oraz żywicy Shell 9405 z utwardzaczem Shell 9470, stanowiącej 35 % przekroju. Cięgna Strawman były wykorzystywane jako cięgna porównawcze przy badaniach innych wyrobów produkowanych komercyjnie. Ich charakterystyki podano w tablicy 2.84 [83].

Tablica 2.84 – Charakterystyka prętów z włókien węglowych Strawman

Charakterystyka	j.m.	Strawman	
		wartości teoretyczne	średnie wartości doświadczalne
wytrzymałość na rozciąganie	MPa	2 935	1 862
moduł sprężystości podłużnej	GPa	108	146
wydłużenie przy zerwaniu	%	1.9	1.2

Tablica. 2.84
Charakterystyka prętów z włókien węglowych Strawman, wg [83]

Technora | Nazwa tych cięgien pochodzi od nazwy włókien aramidowych (odpowiadają one Kevlarowi 29) stosowanych do ich wytwarzania. Jest to produkt opracowany wspólnie przez japońskie firmy Sumitomo Construction Company oraz Teijin Corporation (producent wielu ważnych włókien chemicznych). Proces produkcji rozpoczyna się od tłoczenia impregnowanej wiązki prostych włókien, poprzez nieogrzewaną dyszę. Identyczna wiązka włókien jest następnie owijana spiralnie wokół pierwszej, dla uzy-

skania szorstkiej powierzchni. Następnie nakładana jest warstwa włókien podłużnych i kolejna warstwa włókien spiralnych. Następnym etapem jest wygrzewanie w piecu. Dla cięgien Technora stosowane są zakotwienia zalewane lub klinowe. Zewnętrzna powierzchnia tulei jest gwintowana i zaopatrzona w nakrętkę zabezpieczającą [83]. Rysunek 2.127 przedstawia różne rodzaje cięgien Technora. W tablicy 2.85 zestawiono charakterystyki różnych rodzajów prętów.



Rys. 2.127 – widok przykładowych cięgien Technora, wg [121]

Tablica 2.85 – Charakterystyka cięgien aramidowych Technora

Rodzaj	Średnica nominalna	Efektywne pole przekroju	Masa liniowa	Nośność na rozciąganie
	mm	mm ²	g/m	kN
Okrągły	3.0	7.07	9	1 330
	4.0	12.56	16	2 320
	6.0	28.26	37	5 090
	8.0	50.24	66	8 790
Oplatany spiralnie/ zebrowany	3.0	7.07	10	1 330
	4.0	12.56	18	2 320
	6.0	28.26	41	5 090
	8.0	50.24	73	8 790

Tablica. 2.85 Charakterystyka cięgien Technora, wg [121]

2.5.4. Cięgna kompozytowe CFCC

Japońska firma Tokyo Rope Manufacturing Co., Ltd. wprowadziła do sprzedaży – po długim okresie prób – rodzinę lin z włókien węglowych o wspólnej nazwie CFCC (Carbon Fiber Composite Cable). Są one szczególnie interesujące, gdyż były pierwszymi typowymi linami wykonanymi z kompozytów węglowych. Stosowane są od 1988 r.

Liny te są produkowane z włókien węglowych Besfight HTA, wytwarzanych przez firmę Toho Rayon Co., Ltd. (Japonia). Są to włókna wykonywane z prekursorów poliakrylonitrylowych (PAN). Podstawowe właściwości tych włókien są następujące[33]:

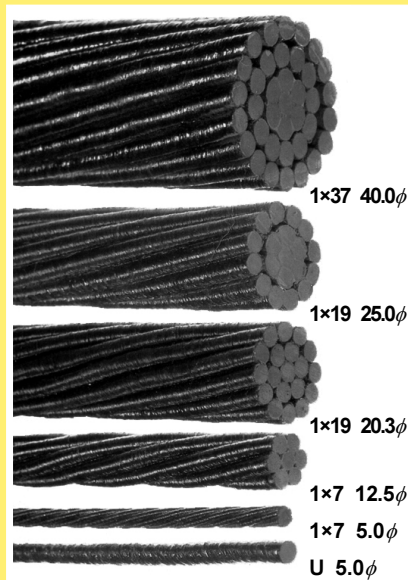
– wytrzymałość na rozciąganie: 3.63 GPa
– moduł sprężystości podłużnej: 235 GPa

– wydłużenie przy zerwaniu: 1.5 %

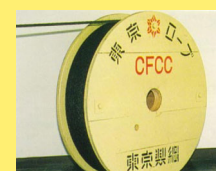
Podczas przedzenia powstaje 12 000 filamentów, z których podczas karbonizacji uzyskiwane jest włókno o średnicy 7 μm . Włókna są scalane żywicą, w celu wykonania pojedynczych żył, będących odpowiednikami drutów w linach stalowych. Stosowane są trzy rodzaje żywic, różniących się zakresem odporności cieplnej:

– modyfikowana żywica epoksydowa, do 130°C (standard)
– odporna na temperaturę żywica epoksydowa, do 180°C
– żywica amidowa (ang. *bismaleic-amid*), do 240°C

Produkowane są liny o budowie: U (pojedyncza żyła), 1×7, 1×19 i 1×37, rys. 2.128. Zakres produkowanych średnic: 1.5 ÷ 40.0 mm.



Rys. 2.128 – przykładowe przekroje poprzeczne lin z włókien węglowych, CFCC, produkowane przez firmę Tokyo Rope (Japonia). Oznaczenia – wg producenta. Poniżej – cięgno CFCC w postaci handlowej. Opracowano na podstawie [5]



W tablicy 2.86 zestawiono charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe produkowanych lin, a w tablicy 2.87 – ogólne właściwości lin na przykładzie splotki 1×7 12.5φ.

Tablica 2.86 – Charakterystyka lin z włókien węglowych, CFCC, produkowanych przez firmę Tokyo Rope (Japonia), wg [5] [33]

Budowa liny, oznaczenie		Średnica	Efektywne pole przekroju poprzecznego	Masa liniowa	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości podłużnej
		mm	mm ²	g/m	kN	kN/mm ² (GPa)
	U 3.0 φ	3.0	5.1	10	9.8	147
	U 5.0 φ	5.0	15.2	30	28	137
	1×7 5.0 φ	5.0	10.1	24	18	137
	1×7 7.5 φ	7.5	30.4	64	57	137
	1×7 10.5 φ	10.5	55.7	114	104	137 (139 ¹⁾)
	1×7 12.5 φ	12.5	76.0	151	142	137 (139 ²⁾)
	1×7 15.2 φ	15.2	113.6	226	199	
	1×7 17.8 φ	17.8	159.9	310	280	137
	1×19 20.3 φ	20.3	193.9	389	297	
	1×19 21.8 φ	21.8	222.2	445	340	137
	1×19 25.0 φ	25.0	290.9	583	446	133
	1×19 28.0 φ	28.0	387.9	750	574	
	1×37 31.5 φ	31.5	457.3	916	651	
	1×37 35.5 φ	35.5	591.2	1 185	841	
	1×37 40.0 φ	40.0	779.4	1 508	1 070	127
1) dla liny o odporności cieplnej 240°C						
2) dla liny o odporności cieplnej 180°C						

Tablica 2.87 –Właściwości liny CFCC 1×7 12.5 φ, z włókien węglowych, produkowanej przez firmę Tokyo Rope (Japonia), wg [5] [33]

Rodzaj	Właściwości		Lina 1 × 7 φ = 12.5 mm
Właściwości wytrzymałościowe	Wytrzymałość na rozciąganie ¹⁾	kN/mm ² (GPa)	2.14
	Moduł sprężystości podłużnej ¹⁾	kN/mm ² (GPa)	137
	Wydłużenie	%	1.6
	Sztywność zginania (EI)	kN·cm ²	56.9
Ogólne właściwości mechaniczne	Gęstość	g/cm ³	1.5
	Relaksacja ²⁾	%	1.3
	Współczynnik pełzania ³⁾		0.07 × 10 ⁻³
	Wytrzymałość zmęczeniowa – – zakres naprężeń Δσ ⁵⁾	N/mm ² (MPa)	780
	Współcz. wydłużenia cieplnego ⁶⁾	1/°C	0.6 × 10 ⁻⁶
Inne	Oporność właściwa	μΩcm	3 000
	Odporność na temperaturę	°C	130
	Odporność na kwasy		lepsza niż dla stali
	Odporność na zasady		prawie taka sama jak dla stali
1) w odniesieniu do efektywnego pola przekroju			
2) dla obciąż. = 0.7 wytrzymałości, 1000 godz., 20 ± 2 °C			
3) dla obciąż. = 0.6 wytrzymałości, 1000 godz., 20 ± 2 °C			
4) wg JSCE-E533, dla 1 mln godzin			
5) ilość cykli 2 × 10 ⁶ ; każde obciążenie – 75 % wytrzymałości			
6) w zakresie temperatur 20 + 200 °C			

Porównanie wartości sztywności zginania oraz wytrzymałości na ścinanie dla lin CFCC oraz lin stalowych, z włókien szklanych i włókien aramidowych przedstawiono w tablicy 2.88. Wartość sztywności zginania wyznaczono na podstawie wzoru (2.24) na ugięcie (f) jedoprzęsłowej belki wolnopodpartej o rozpiętości (l), obciążonej w środku rozpiętości siłą skupioną (P) [33]:

$$EI = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot f} \quad (2.24)$$

Tablica 2.88 –Porównanie wartości sztywności zginania EI oraz wytrzymałości na ścinanie dla lin CFCC, lin stalowych i prętów z włókien szklanych i aramidowych, wg [5] [36]

Rodzaj cięgna	Średnica [mm]	Sztywność zginania EI [kN·cm ²]	Wytrzymałość na ścinanie [N/mm ²]
lina z włókien węglowych CFCC 1×7	12.5	57.0	236
pręt z włókien aramidowych (Kevlar) AFRP¹⁾	12.0	371.0	219
pręt z włókien szklanych GFRP²⁾	12.0	420.0	151
splotka stalowa 1×7	12.4	208.0	801
lina z włókien węglowych CFCC 1×37	40.0	1 010.0	
splotka stalowa 1×37	40.0	3 950.0	
¹⁾ Aramid Fiber Reinforced Polymer ²⁾ Glass Fiber Reinforced Polymer			

Tablica. 2.88
Porównanie wartości sztywności zginania oraz wytrzymałości na ścinanie dla lin CFCC, lin stalowych, prętów z włókien szklanych i aramidowych, wg [5.22] [5.55]

Przed wprowadzeniem do produkcji, liny CFCC były przez długi okres testowane w warunkach laboratoryjnych i naturalnych. Interesujący test w warunkach naturalnych został przeprowadzony w okresie od sierpnia 1986 do lipca 1990, na platformie wiertniczej „Poseidon”, zlokalizowanej na morzu, 3 km od miejscowości Yura w Prefekturze Yamagata. Testowana była lina 1×7 12.5 f. Próbkki zostały umieszczone na poziomie lustra wody. Były one poddawane inspekcji i badane po upływie każdego kolejnego roku. Badane próbki nie uległy w zasadzie wcale wpływom korozyjnym. Stwierdzano jedynie lokalne i okresowe przyczepianie się wodorostów. Po upływie trzeciego roku nośność badanej próbki zmniejszyła się o ok. 19%. Stwierdzono jednak, że wynikało to z ubytku powierzchni przekroju poprzecznego próbki, spowodowanego intensywnym tarcieniem o elementy mocujące, na skutek ruchu wody [33].

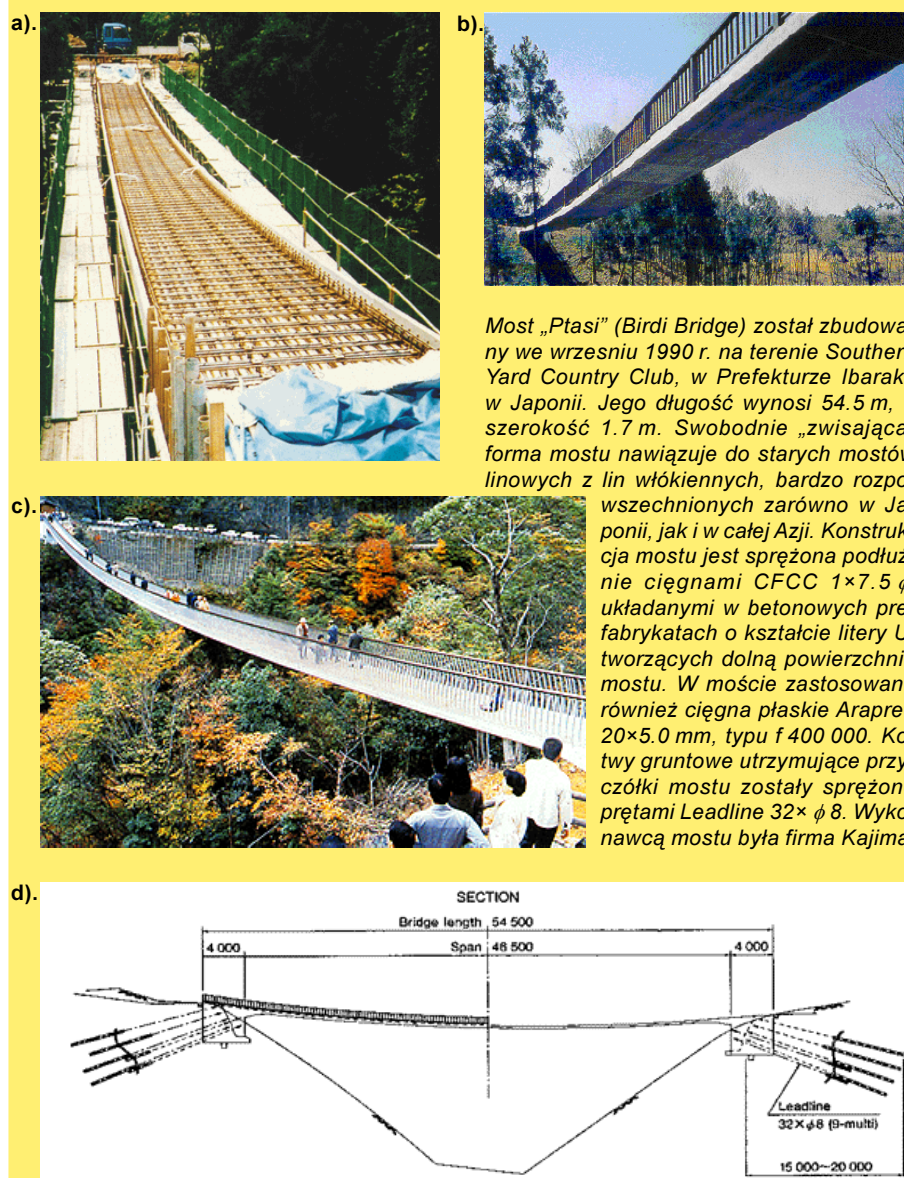
Podobny test przeprowadzono w 1988 na platformie Morskiego Laboratorium Badawczego usytuowanej przy ujściu rzeki Ohi, w Prefekturze Shizuoka (Japonia). Próbkki porównawcze umieszczono w japońskim Instytucie Badawczym Robót Publicznych. Test wykazał niemal identyczne parametry próbek obydwu serii, po ekspozycji [33].

Ze względu na przewidywane zastosowanie splotek CFCC bezpośrednio w betonie jako zbrojenia sprężającego, przeprowadzono testy określające ich przyczepność do betonu. Testy obejmowały ponad 3 500 próbek, z których każda została poddana dziesięciokrotnemu cyklowi obciążenia siłą o wartości 60% wytrzymałości na rozciąganie. Identyczne badanie przeprowadzono na analogicznych wurobach stalowych. Uzyskane wartości były zarówno dla splotek jak i pełnych cięgien (U) CFCC, 2 – 3 krotnie wyższe od wartości dla stali [33].

Ważniejsze dotychczasowe zastosowania lin CFCC, to [33]:

- most Shinmiya, na głównej drodze lokalnej k. Hakui-gun w Prefekturze Ishikawa w Japonii. Jest to pierwszy obiekt w którym zastosowano liny CFCC (1988 r.). Jego rozpiętość wynosi 6.1 m, a szerokość – 7.0 m. Poprzednio istniejący w tym miejscu most żelbetowy uległ bardzo szybko korozji, ze względu na szczególnie agresywne w tym miejscu środowisko morskie,
- most dla pieszych Tsukude CC No. 8 Hole Bridge, w Japonii (1993 r.), sprężony kablami z 6 splotów CFCC 1×7 12.5φ. Rozpiętość mostu 111.0 m, szerokość 3.6 m,
- wiadukt Ostrasse w Mannheim, Niemcy (1991 r.), nad linią kolejową na terenie zakładów BASF. Obiekt 4-przęsłowy, o rozpiętości 81.65 m i szerokości 11.2 m. Kable sprężające wykonano z 19 splotek CFCC 1×7 12.5φ. Wiadukt jest zlokalizowany w obszarze oddziaływania korozyjnego fabryki chemicznej,

- kładka dla pieszych „Most Ptasi” (1990 r.), w Prefekturze Ibaragi (Japonia); zastosowano pojedyncze splotki CFCC $1 \times 7 \ 5.0\phi$, jako zbrojenie prefabrykatów betonowych. Rozpiętość kładki: 54.5 m, szerokość: 1.7 m (rys. 2.129),



Rys. 2.129 – most „Ptasi” w Prefekturze Ibaragi w Japonii. Zastosowano w nim trzy rodzaje cięgien kompozytowych: CFCC, Arapree i Leadline.

a). most w trakcie budowy
b). i c). widok gotowego mostu
d). przekrój konstrukcji, wg [33] [121]

Most „Ptasi” (Birdi Bridge) został zbudowany we wrześniu 1990 r. na terenie Southern Yard Country Club, w Prefekturze Ibaragi, w Japonii. Jego długość wynosi 54.5 m, a szerokość 1.7 m. Swobodnie „zwisająca” forma mostu nawiązuje do starych mostów linowych z lin włókiennych, bardzo rozpowszechnionych zarówno w Japonii, jak i w całej Azji. Konstrukcja mostu jest sprężona podłużnie cięgnami CFCC $1 \times 7.5 \phi$, układanymi w betonowych prefabrykatkach o kształcie litery U, tworzących dolną powierzchnię mostu. W moście zastosowano również cięgna płaskie Arapree $20 \times 5.0 \text{ mm}$, typu f 400 000. Kotwy gruntowe utrzymujące przyczółki mostu zostały sprężone prętami Leadline $32 \times \phi 8$. Wykonawcą mostu była firma Kajima.

- sprężona belka nośna kolejki jednoszynowej, pozbawiona właściwości magnetycznych (1991 r.). Belki o długości 19.96 m, wysokości 1.2 m i szerokości $1.1/0.8 \text{ m}$ są sprężone splotami CFCC $1 \times 7 \ 7.5\phi$. Belki stanowią konstrukcje eksperymentalnej linii Nagoya-city Nambu (Japonia), o całkowitej długości 1.5 km. Analogiczne belki ale o długości 15.38 m i wysokości 1.5 m zastosowano w eksperymentalnej nadprzewodzącej magnetycznej linii kolejowej (Superconductive Magnetic Levitation Type Railway) w Miyazaki (1991 r.), o całkowitej długości 7 km,
- sprężone płyty pomostowe nabrzeża portowego Kuzuha Area w Kitakyushu, Japonia (1991 r.), o wymiarach $4.7 \times 3.8 \times 0.12 \text{ m}$. Płyty są sprężone splotami CFCC $1 \times 7 \ 12.5\phi$.

Ponadto liny CFCC zastosowano eksperymentalnie z dobrymi rezultatami, w okresie: jesień 1989 – marzec 1990 jako liny stabilizujące maszt na jachtach żeglarskich. Innym ciekawym zastosowaniem jest eksperymentalny odcinek linii wysokiego napięcia z przewodami aluminiowymi zbrojonymi włóknami węglowymi – ACFR (Aluminium Conductors Carbon Fiber Reinforced), który powstał w Japonii [33].

2.6. Wyroby powierzchniowe z włókien technicznych – tkaniny techniczne

2.6.1. Wiadomości wstępne

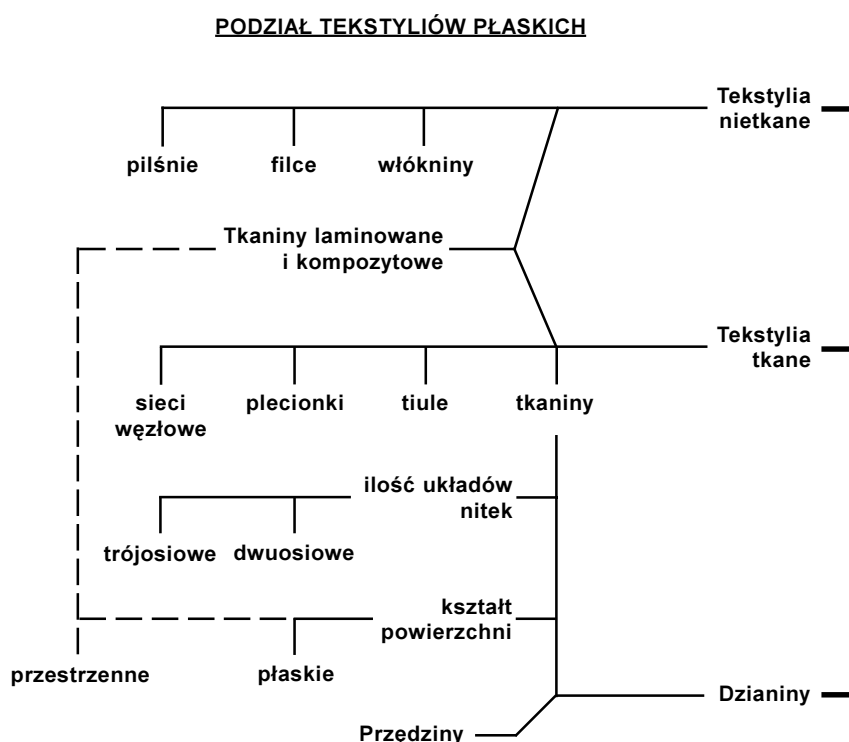
Wyroby tekstylne, które pojawiły się dla zaspokojenia jednej z najbardziej podstawowych potrzeb człowieka - ochrony jego ciała, bardzo wcześnie zaczęły pełnić również inne funkcje. Wytwarzanie i korzystanie z tekstyliów jest w każdym społeczeństwie jednym z najważniejszych elementów kultury materialnej. Korzystają z nich wszyscy członkowie społeczeństwa, bez względu na wiek, płeć, status, przekonania i zajęcie. Ich rola i znaczenie są zarówno unifikujące jak i różnicujące. Poprzez swój wzór i funkcję umożliwiają zróżnicowanie jednostek oraz identyfikację ich przynależności do grupy. Jako wyrób powstający na styku technologii i estetyki, tekstylia są odbiciem systemu wartości przyjętego w danym społeczeństwie. W terminologii funkcjonalnej tekstylia mogą być rozpatrywane jako produkty technologii, jako artefakty kulturalne, jako dzieła sztuki i jako przedmiot handlu.

Tkaniny techniczne, które powstały w wyniku rozwoju produkcji włókienniczej, nie mogą być rozpatrywane w oderwaniu od innych wyrobów tekstylnych. Metody produkcji, opis parametrów, systematyka, metody badań oraz wiele wymagań – są wspólne dla wszystkich tekstyliów. Poniżej podano podstawowe informacje ogólne o powierzchniowych wyrobach włókienniczych.

Podział tekstyliów płaskich | Powierzchniowe wyroby z włókien technicznych nazywane są też tekstyliami płaskimi lub powierzchniowymi wyrobami włókienniczymi. Poniżej podano ich definicję.

Powierzchniowe wyroby włókiennicze są to takie wyroby z włókien technicznych, które w stanie gotowym lub po rozcięciu podłużnym i rozwinięciu, tworzą płaszczyznę ¹⁾ [118].

Podstawowy podział płaskich wyrobów włókienniczych, na podstawie ich cech strukturalnych przedstawiono na rys. 2.130.



Rys. 2.130 – podział powierzchniowych wyrobów włókienniczych (tekstyliów płaskich) według cech strukturalnych. Opracowano na podstawie [118] i [199].

¹⁾ definicja ta obejmuje również wyroby trójwymiarowe, tzn. wykonywane na powierzchniach innych niż płaszczyzny, które omówiono w dalszej części pracy.

Trzy główne typy powierzchniowych wyrobów włókienniczych, to [118] [199]:

- tekstylia nietkane
- tekstylia tkane
- dzianiny

ang. non-wovens

ang. wovens

ang. knitwear

Wyróżnia się ponadto wyroby pośrednie pomiędzy tekstyliami tkaninami a dzianinami – przędziny oraz pomiędzy tkaninami a tekstyliami nietkanymi – tkaniny laminowane i kompozytowe.

Igłowanie jest to proces wzmacniania runa. Polega on przebijaniu runa, przechodzącego pomiędzy dwiema płytami, zespołem odpowiednio naciętych igieł, które w momencie przebijania pociągają za sobą pęczki włókien, przetykając nimi runo.

Tekstylia nietkane obejmują wszystkie wyroby, w których zespolenie nitek uzyskano inaczej niż poprzez przeplecenie nitek. Znajdują one zastosowanie jako materiały izolacyjne, filtracyjne, amortyzujące, a także jako materiały wzmacniające i okładzinowe [199]. Dalszy podział tekstyliów nietkanych oparty jest o technologię ich wykonywania.

Podstawowe rodzaje tekstyliów płaskich | Poniżej scharakteryzowano podstawowe rodzaje tekstyliów płaskich, według podziału przedstawionego na rys. 2.130.

Włókniny są to wyroby utworzone z luźnych włókien, zespolonych poprzez igłowanie, przeszycie, klejenie lub formowanie aerodynamiczne, rys. 2.131.a). [118].

ang. needled cloth

Filce są wyrobami otrzymywanymi z włókien nie tworzących przędzy, połączonych ze sobą w zwartą masę. Filce wykonuje się najczęściej z wełny, sierści, niekiedy z domieszką włókien bawełnianych lub wiskozowych. Związanie włókien następuje w procesie spilśniania, pod wpływem działania nacisku, tarcia, ciepła oraz zmydlania [199].

ang. felt

Pilśnie są wyrobami podobnymi do filców ale uzyskiwanymi z tkanin, poddanych procesowi spilśniania, co prowadzi do związania włókien wątku i osnowy w zwartą masę. Dzięki temu wzrasta wytrzymałość mechaniczna, ciepłochronność, gęstość i miękkość tkaniny [233].

ang. fulled cloth,
fibre slivers cloth

Tkaninę tworzą zwykle dwa, wzajemnie prostopadłe układy nitek, nazywanych odpowiednio osnową i wątkiem¹⁾, zespolonych w wyniku przeplecenia, czasami dodatkowo skręconych [118]. Tkaniny omówiono szczegółowo w dalszej części. Na rys. 2.131.c). przedstawiony jest przykład tkaniny o splocie atlasowym.

ang. fabric,
woven fabric

Tiule są to wyroby, w których jeden z układów nitek jest owijany nitkami należącymi do drugiego układu. Rysunek 2.135.b) przedstawia przykład tiulu.

ang. tulle

Plecionki są to powierzchniowe wyroby tekstylne wykazujące podobieństwo do tkanin. Jednakże nitki, połączone w wyniku przeplecenia, tworzą w plecionkach jeden układ i są usytuowane skośnie względem podłużnej osi wyrobu. Na rys. 2.135.a). przedstawiono przykład dzianiny.

ang. plaiting,
basket-work

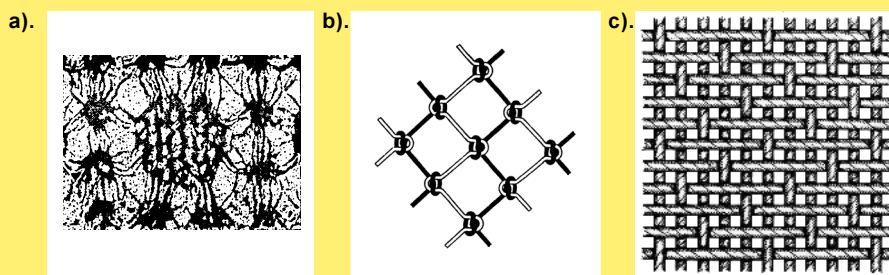
Sieć węzłowa jest wyrobem, w którym elementem łączącym dwa prostopadłe układy nitek jest węzeł. Przykład sieci węzłowej przedstawia rys. 2.131.b).

ang. knotted netting

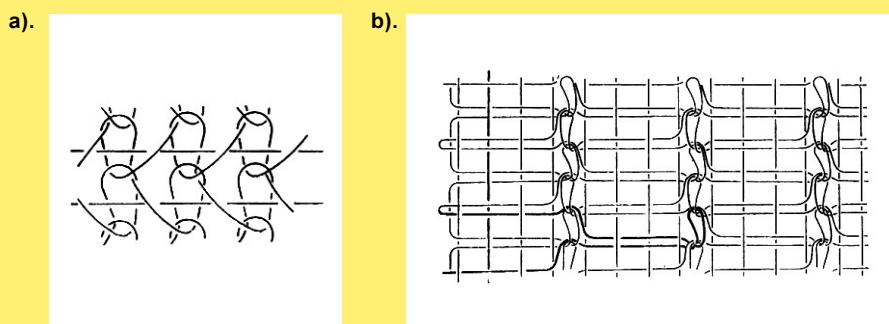
Dzianiny są to płaskie wyroby włókiennicze, w których nitki tworzą elementy strukturalne zwane oczkami dziewiarskim. Wzajemne przeplatanie się oczek zapewnia połączenie nitek. Proces ten jest bardzo złożony i relatywnie trudny do opisanie [118]. Dzianiny dzielą się zasadniczo na rządkowe (jednonitkowe) i kolumnkowe (osnowowe). W dzianinach rządkowych z jednej nitki tworzone są, w kierunku poprzecznym, leżące obok siebie oczka, natomiast w dzianinach kolumnkowych nitka przebiega w kierunku podłużnym. Rysunek 2.134 przedstawia przykład dzianin rządkowych i kolumnkowych. Dzianiny ulegają dużym odkształceniom już przy stosunkowo niewielkich obciążeniach.

ang. knitwear

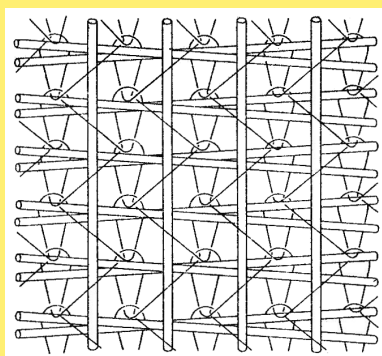
¹⁾ Patrz pkt. 2.6.2.2.



Rys. 2.131 – widok ogólny powierzchni:
a). włókniyny
b). sieci węzłowej
c). tkaniny (splot atłasowy)
Opracowano na podstawie [118]

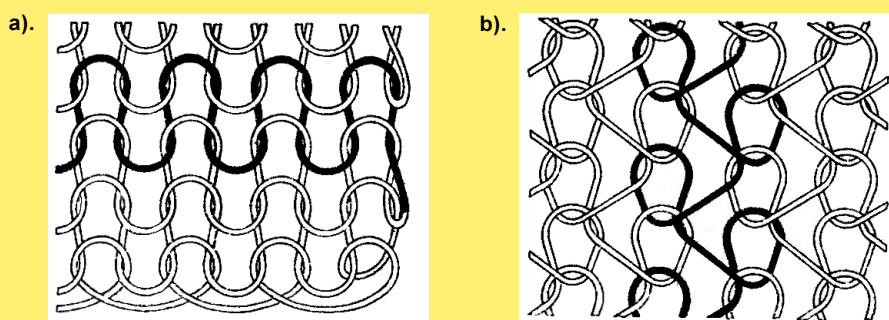


Rys. 2.132 – przykłady przędzin:
a). z wątkiem wrzucanym (w strukturze trykotu)
b). metapina
Opracowano na podstawie [118]

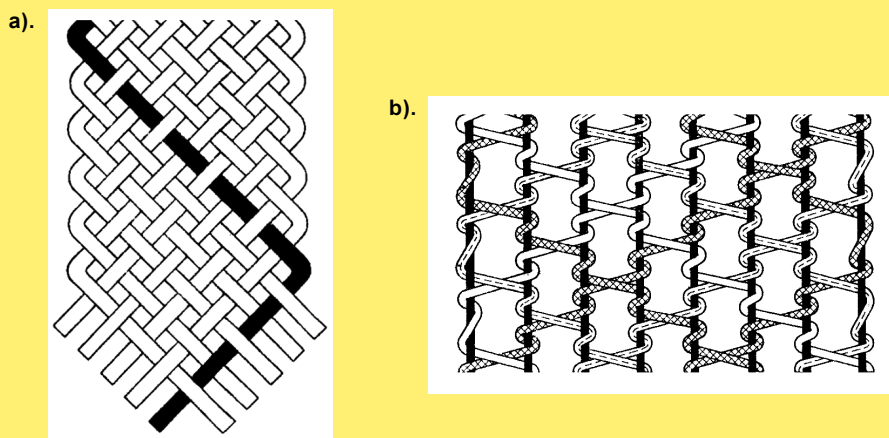


Nazwa przędzin „malimo” pochodzi od nazwiska ich wynalazcy, Heinricha Mauersberga pochodzącego z miasta Limburg-Oberfrohn. Produkcja przędzin rozwinęła się w byłym NRD i stosowano ją często w budownictwie, np. w halach pneumatycznych. Obecnie, przyjmując za kryterium wielkość powierzchni wykonanych wyrobów, mają one podrzęd-

Rys. 2.133 – przykład przędziny - malimo
Opracowano na podstawie [118]



Rys. 2.134 – przykłady dzianin:
a). rządkowa
b). kolumnkowa
Opracowano na podstawie [118]



Rys. 2.135 – widok ogólny powierzchni:
a). plecionki
b). tiulu
Opracowano na podstawie [118]

Przędziny są to wyroby utworzone z nitek, które łączą w sobie elementy strukturalne tkanin i dzianin. Przędziny powstają poprzez przeszywanie skrzyżowanych układów przędz osnowowych i wątkowych. Przykłady przędzin przedstawiono na rys. 2.132 i 2.133. Przędziny charakteryzuje liniowy układ nitek osnowowych i wątkowych. Pod wpływem działania obciążenia wykazują właściwości mechaniczne pojedynczych włókien (nitek), bez występowania interakcji pomiędzy nitkami osnowy i wątku. Dzięki temu zachowują zdolność do równomiernego odkształcania się.

ang. woven-knitted fabrics
sewed-knitted fabrics

Tkaniny laminowane i kompozytowe są wyrobami posiadającymi cechy zarówno tkanin jak i wyrobów nietkanych. Tkaniny takie składają się z wielu warstw włókien, układanych na przemian z warstwami folii i żywic. Włókna wątku i osnowy nie są przeplatane, a ich scalenie następuje poprzez wtopienie w warstwy przekładkowe. Bardzo często w tego rodzaju tkaninach stosowane są dodatkowe warstwy włókien układane w innych kierunkach niż wątek i osnowa, np. diagonalnie lub zgodnie z przewidywanym rozkładem naprężeń w czasie eksploatacji. Technologia wykonywania tkanin kompozytowych pozwala kształtować je przestrzennie, na powierzchniach zakrzywionych, bez potrzeby przygotowywania i łączenia wykrojów.

ang. laminated fabrics
composite fabrics

2.6.2. Budowa tkanin

179

2.6.2.1. Modele budowy tkanin

Tkaniny są to formy płaskie¹⁾, powstające zazwyczaj z prostokątnie krzyżujących się systemów nitek: osnowowych i wątkowych. Od niedawna są produkowane również *tkaniny trójosiowe*, tzn. o trzech układach nitek, krzyżujących się pod kątem 60° rys. 2.166. Zaczynają one znajdować coraz szersze zastosowanie w budownictwie [204].

ang. triaxial fabrics

Wspólną cechą dla wszystkich tkanin jest wzajemne połączenie (zespolecie) nitek osnowowych i wątkowych, dzięki czemu tkanina staje się wymiarowo stabilna. Zespolecie następuje w wyniku przeplecenia, czasami również dodatkowego skręcenia nici. W niektórych odmianach tkanin dodatkowo występuje skręcenie dwóch lub więcej nitek osnowy (np. sploty gazejskie) [118]. W tkaninach warstwowych, równoległe układy nitek są nakładane jedne na drugie bez przeplatania, a zespolecie następuje w wyniku przeszywania (przędziny), sklejanie bądź powlekania lub laminowania folią (tkaniny laminowane i kompozytowe). Poniżej omówiono budowę dwuosiowych tkanin płaskich.

ang. crimp

Połączenie nitek prowadzi do charakterystycznej *falistości* wewnątrz tkaniny. Powoduje to, że przy wystąpieniu obciążenia mechanicznego następuje interakcja pomiędzy dwoma układami nitek, która w istotny sposób wpływa na mechaniczne właściwości tkaniny.

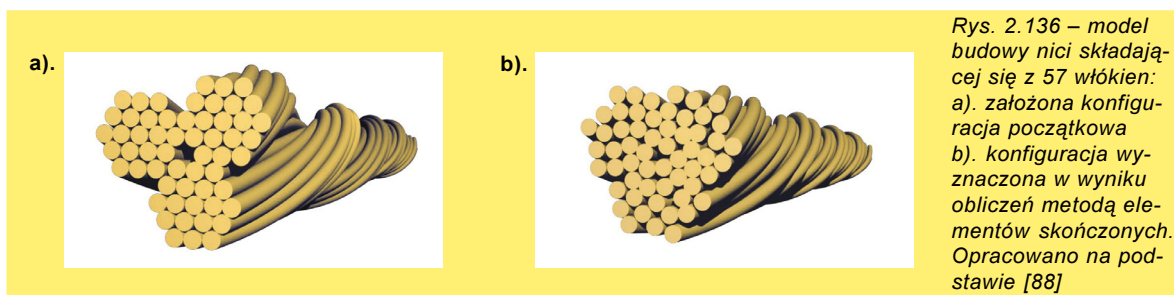
W technologii tkanin, do celów analizy strukturalnej ich właściwości, budowane są już od kilkadziesiąt lat modele opisujące ich budowę. Wyróżnia się dwa rodzaje modeli [118]:

- modele mechaniczne, tworzone na podstawie analizy warunków wykonywania tkanin i właściwości nitek, z których są zbudowane,
- modele geometryczne, opisujące obraz rzeczywistej struktury tkanin, bez analizy stanu napięcia nitek oraz bez uwzględnienia działających sił zewnętrznych;

Obydwa rodzaje modeli posługują się podstawowym uproszczeniem, polegającym traktowaniu nitek jako jednolitych obiektów sprężystych. Mimo tego jednak, opisują właściwości tkanin w stopniu dostatecznie dokładnym z punktu widzenia wielu praktycznych zastosowań technologicznych.

Model mezoskopowy budowy tkaniny | Podstawowy element budowy tkaniny – nitki (przędza) stanowią wiązki włókien o skomplikowanym układzie przestrzennym. Do niedawna nie było możliwości wykonania opisu tego

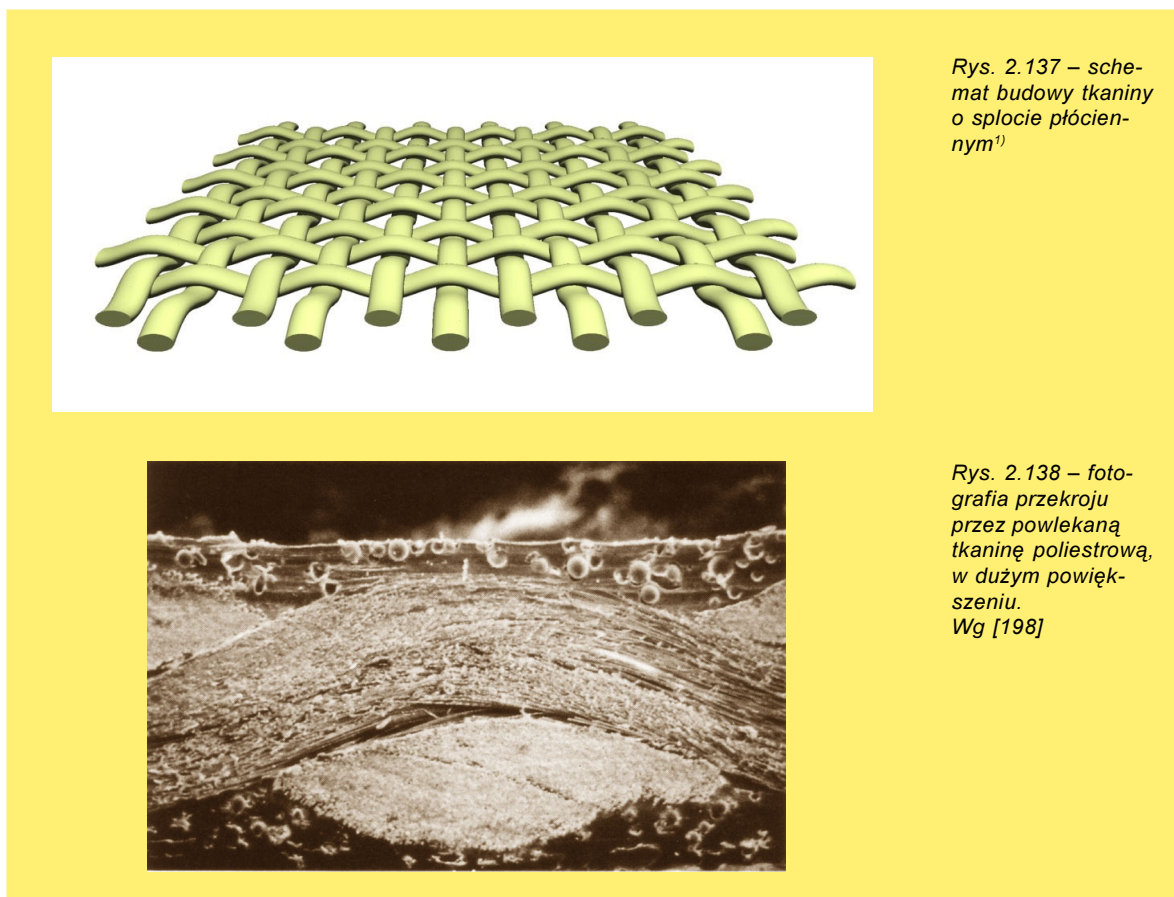
¹⁾ Wyjątek stanowią *tkaniny przestrzenne*, wykonywane na powierzchniach nie płaskich; obecnie uzyskanie takich wyrobów jest możliwe wyłącznie z tkanin kompozytowych, które są omówione w dalszej części pracy.



układu, uwzględniającego złożoność wzajemnych oddziaływań włókien i pozwalającego przewidywać ich konfigurację w tkaninie poddanej działaniu obciążeń mechanicznych. Potrzeba tak szczegółowego opisu tkanin pojawiła się w związku z rozwojem ich zastosowań w budownictwie oraz w konstrukcjach kompozytowych. Obecnie, w École Central Paris, podjęto udaną próbę budowy odpowiedniego modelu przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, przy zastosowaniu trójwymiarowych elementów belkowych. Opracowany model nazwano „modelem mezoskopowym” [88].

Model ten oparty jest na teorii dużych odkształceń. Uwzględnia również zjawisko tarcia na powierzchni elementów. Jego zastosowanie pozwala nie tylko na opis budowy geometrycznej nici (rys. 2.136) ale umożliwia również symulowanie nieliniowego zachowania tkaniny i wyznaczania jej cech wytrzymałościowych oraz zależności naprężenie-odkształcenie. Praktyczną przydatność takiego modelu trudno obecnie ocenić, gdyż został on opracowany bardzo niedawno i nie ma jeszcze opisanych przykładów jego praktycznego zastosowania w projektowaniu konstrukcji [88].

Modele geometryczne budowy tkanin | W praktyce technologii tekstyliów, najczęściej wykorzystywane są modele geometryczne, gdyż są znacznie prostsze niż modele mechaniczne, a jednocześnie wystarczające do analizy jakościowej struktury tkaniny [118].



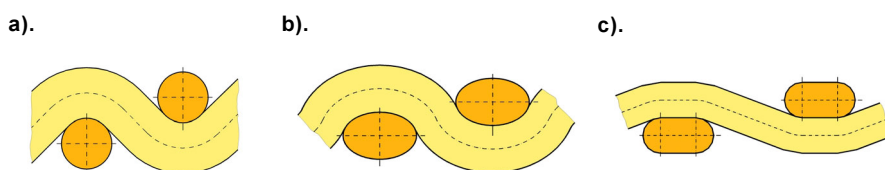
¹⁾ poszczególne rodzaje splotów omówiono w pktcie 2.6.3.3

Na rysunku 2.137 przedstawiony jest schemat budowy tkaniny o splocie płóciennym. Rzeczywiste wyroby mają geometrię dużo bardziej złożoną. Rysunek 2.138 przedstawia w dużym powiększeniu fotografię przekroju przez fragment typowej powlekanej tkaniny poliestrowej o splocie płóciennym [198]. Widoczne są wiązki włókien tworzące nici, zgrupowane w układzie osnowowym i wątkowym oraz warstwę powłoki pokrywającej obydwa układy.

Rzeczywiste struktury tkanin są odwzorowywane uproszczonymi modelami o geometrii najbardziej zbliżonej do rzeczywistej geometrii wyrobu. Najczęściej stosowane są trzy podstawowe modele [118] [143]:

- model kołowy, rys.2.139.a)
- model eliptyczny (wg Peirce'a), rys.2.139.b).
- model hipodromu (wg Kempa), rys.2.139.c).

Nazwy modeli pochodzą od założonego kształtu przekroju poprzecznego nici tworzących rzeczywistą tkaninę. W tkaninach o zagęszczeniu zbliżonym do maksymalnego, nitki mają często kształt zbliżony do trójkąta [143].



Przyjęty model geometryczny budowy tkaniny jest podstawą do sformułowania opisu matematycznego. Przykładem może być rozwiązanie oparte na modelu eliptycznym, zaproponowane przez F.Th. Peirce'a, w publikacjach: „Geometry of Cloth Structure”, Journal of Textile Institute, 28/1937, Vol.45 oraz „Geometrical principles to the Design of Functional Fabrics”, Textile Research Journal, 17/1947. Model ten był

Rys. 2.139 – modele geometryczne budowy tkanin:
a). model kołowy
b). model eliptyczny
c). model toru wyścigowego
Opracowano na podstawie [118]

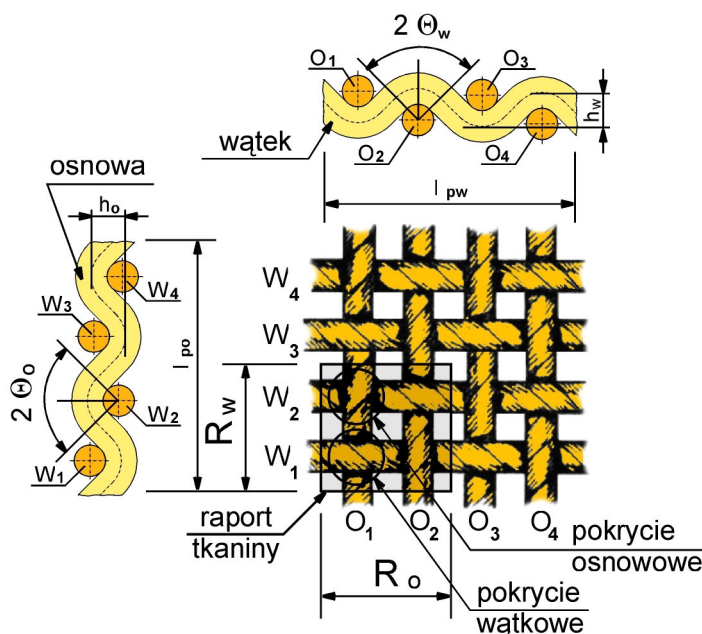
Na podstawie przyjętego modelu geometrycznego budowy tkaniny możliwe jest zdefiniowanie i opisanie równaniami zależności pomiędzy podstawowymi parametrami struktury tkaniny. Dotyczy to przede wszystkim właściwości mechanicznych tkaniny, tzn. zależności pomiędzy strzałką ugięcia, napięciem i podziałką nitek¹⁾, a także cech technologicznych, jak np. zależność grubości i powierzchni oporu tkaniny¹⁾ od jej parametrów. Sformułowane zależności matematyczne są wykorzystywane przy projektowaniu tkanin o zadanych parametrach użytkowych [143].

później uzupełniany i rozszerzany przez innych badaczy [143].

2.6.2.2. Podstawowe parametry struktury tkaniny

Splot | Sposób przeplatania nitek osnowy i wątku w tkaninie jest nazywany *splotem* [118]. Rodzaj zastosowanego splotu jest jedną z zasadniczych cech tkaniny, determinującą w dużym stopniu jej właściwości. Istnieje bardzo duża różnorodność splotów. Ich systematyka została podana w pktcie 2.6.3. Na rysunku 2.140 przedstawiono tkaninę o najprostszym splocie – płóciennym, wraz z oznaczeniami wielkości wykorzystywanych do opisu tkaniny.

ang. weave



Rys. 2.140 – widok i przekroje tkaniny o splocie płóciennym oraz oznaczenie wielkości wykorzystywanych do opisu tkaniny (omówienie – w tekście).
Opracowano na podstawie [118]

Raport tkaniny jest to jej najmniejszy powtarzalny element. Jego wymiary opisane są liczbą nitek. W przykładzie przedstawionym na rysunku, raport tkaniny wynosi:

- osnowowy $R_o = 2$
- wątkowy $R_w = 2$

¹⁾ Terminologia dotycząca parametrów opisu tkanin jest omówiona w pktcie 2.6.2.2

Nitki ułożone wzdłuż tkaniny są nazywane *osnową*, a nitki ułożone poprzecznie są nazywane *wątkiem*. Na rysunku są one zaznaczone odpowiednio pionowo i poziomo oraz opisywane $O_1, \dots, O_n$ (osnowa) i $W_1, \dots, W_n$ (wątek).

ang. warp
ang. weft

Pokrycie – jest to miejsce skrzyżowania obu nitek układu. Jeżeli w pokryciu na wierzchu występuje osnowa (np. skrzyżowanie nitek O_1 i W_2) jest to *pokrycie osnowowe*. Jeżeli w pokryciu na wierzchu występuje wątek (np. skrzyżowanie nitek O_1 i W_1) jest to *pokrycie wątkowe* [118].

Raport – jest to najmniejszy powtarzalny element tkaniny. Jego wymiary określa się występującą w nim liczbą nitek osnowy (*raport osnowowy* R_o) i wątku (*raport wątkowy* R_w) [118].

Kąt opasania – charakteryzuje wzajemne opasywanie nitek osnowy i wątku. W zależności od układu nitek wyróżniamy *kąt opasania osnową* ($2Q_o$ – na rys. 2.140) i *kąt opasania wątkiem* ($2Q_w$ – na rys. 2.140) [118].

Przebieg – jest to określenie przejścia nitki z jednej strony tkaniny na drugą. Wyróżniamy *ilość przebiegów osnowy* (p_o) oraz *ilość przebiegów wątku* (p_w) [118].

Długość pozorna nitki – jest to długość mierzona w rzucie na powierzchnię tkaniny (bez uwzględnienia jej falistości). Wyróżniamy *długość pozorną osnowy* (l_{po}) oraz *długość pozorną wątku* (l_{pw}) [118].

Długość rzeczywista nitki – jest to długość nitki wyprostowanej (poza tkaniną). Wyróżniamy *długość rzeczywistą osnowy* (l_{rzo}) oraz *długość rzeczywistą wątku* (l_{rzw}) [118].

Strzałka ugięcia nitki – jest to osiowa odległość pomiędzy falami nitki. Wyróżniamy *strzałkę ugięcia osnowy* (h_o) oraz *strzałkę ugięcia wątku* (h_w) [118].

Skok – dla danego układu nitek określa przesunięcie tego samego pokrycia na dwóch sąsiednich nitkach układu przeciwnego. Wyróżniamy *skok osnowowy* (s_o) oraz *skok wątkowy* (s_w). Skok może mieć znak + lub – [118].

Skok, dla danego układu nitek, jest też definiowany jako ilość nitek układu przeciwnego, o jaką jest oddalone pokrycie analogiczne do rozpatrywanego

Wrobienie nitek | Falistość nitek tworzących tkaninę, nazywana również ugięciem ma dwie miary: geometryczną i obliczeniową.

Miarą geometryczną falistości (ugięcia) nitki w tkaninie jest strzałka ugięcia osnowy (h_o) i wątku (h_w) opisana powyżej [118] [143].

Wrobienie (w) – jest obliczeniową miarą ugięcia (miarą odchylenia nitki od prostej). Wyraża ono względną zmianę długości nitki w wyrobie. Wrobienie wyraża się wzorem (2.25) [118] [143]

$$w = \frac{l_{rz} - l_p}{l_p} \times 100\% \quad (2.25)$$

gdzie: w – wrobienie nitek

l_{rz}, l_p – odpowiednio rzeczywista i pozorna długość nitki

Wrobienie oblicza się odrębnie dla osnowy (w_o) i dla wątku (w_w). Niekiedy wrobienie jest wyrażane w odniesieniu do długości rzeczywistej l_{rz} .

W Polsce bywa stosowany uproszczony sposób obliczania, tzw. *stopnia wrobienia nitek* ze wzoru (2.26) [143]

$$S_w = \frac{l_{rz}}{l_p} \quad (2.26)$$

gdzie: S_w – stopień wrobienia nitek

l_{rz}, l_p – odpowiednio rzeczywista i pozorna długość nitki

Średnica nominalna nitki | Nominalna średnica nitki osnowy (d_o) lub wątku (d_w) jest umowną wielkością charakteryzującą jej wymiary poprzeczne. Do jej wyznaczania najczęściej stosowany jest wzór Ashenhursta (2.27), chociaż istnieją również inne, np. Turnera, czy Issumana i Chamberlaina [118] [143].

$$d = c \cdot \eta \cdot \sqrt{\frac{T_{tex}}{1000}} \quad (2.27)$$

gdzie: T_{tex} – liczba rodzajów surowca w mieszance
 c – współczynnik stały dla określonych nitek, charakteryzujący surowiec, z którego są wykonane
 η – współczynnik korekcji średnicy przędzy, uwzględniający zmniejszenie jej przekroju poprzecznego w procesie tkania na skutek rozciągania, oddziaływania barier, ściskania w tkaninie itp.

W podstawowej postaci wzoru Ashenhursta nie występuje współczynnik η , który został wprowadzony w późniejszej modyfikacji. Jego wartość wynosi $0.85 \div 0.93$ [143]. Współczynnik c jest wyznaczany ze wzoru (2.28) [118] [143].

$$c = \frac{1.284}{\sqrt{\sum_{i=1}^m n_i \gamma_i}} \quad (2.28)$$

gdzie: m – liczba rodzajów surowca w mieszance
 n_i – udział i -tego rodzaju surowca w mieszance
 γ_i – gęstość nitki wykonanej z i -tego surowca [mg/mm^3]

Wartości współczynnika c dla różnych rodzajów surowca przedstawiono w tablicy 2.89 [143].

Tablica 2.89 – Współczynnik pomocniczy c , do wyznaczania średnicy nominalnej nitek, wg [143]

Rodzaj surowca	Gęstość nitki γ [mg/mm^3]	c
Włókna naturalne		
bawełna	0.815	1.25
wełna cienkowłóknista	0.789	1.27
wełna grubowłóknista	0.731	1.32
len przędzony na sucho (średnich numerów)	0.884	1.20
len czesankowy przędzony na mokro (średnich numerów)	1.030	1.11
jedwab naturalny surowy	0.650	1.40
jedwab naturalny gotowany	0.802	1.26
jedwab wiskozowy (osnowowy)	0.884	1.20
Włókna sztuczne		
włókna poliesterowe (PES)	0.777	1.28
włókna poliamidowe (PA)	0.753	1.30
włókna poliakrylonitrylowe (PAN)	0.582	1.48
włókna z polichlorku winylu (PVC)	0.802	1.26
włókna z alkoholu poliwinylowego (PVAL)	0.753	1.30

Tablica. 2.89
Współczynnik pomocniczy c , do wyznaczania średnicy nominalnej nitek, wg [143]

Grubość i powierzchnia oporu tkaniny | Ponieważ tkanina nie jest ciałem jednorodnym, jej grubość (G) również jest zmienna. Z tego powodu definiuje się ją jako maksymalną odległość mierzona między równoległymi płaszczyznami dotykającymi najbardziej wystających punktów na przeciwległych powierzchniach tkaniny.

Ponieważ płaszczyzny te mogą się stykać z nitkami osnowy lub wątku, wprowadzone zostało pojęcie powierzchni oporu tkaniny. Jeśli punkty kontaktu leżą głównie na nitkach osnowy, to tkanina posiada jednoukładową, osnowową powierzchnię oporu, jeśli na nitkach wątku – wątkową, a jeśli równomiernie na nitkach wątku i osnowy – dwuukładową powierzchnię oporu (osnowowo-wątkową) [143]. Liczbową wartość grubości tkaniny wyznacza się z zależności (2.29) [118] [143].

$$G = d_{op} + h_{op} \quad (2.29)$$

gdzie: d_{op} – średnica nitek układu tworzącego powierzchnię oporu
 h_{op} – strzałka ugięcia nitek układu tworzącego powierzchnię oporu

Rodzaj powierzchni oporu ma zasadniczy wpływ na jej ścieranie podczas użytkowania [118].

Zrównoważenie ugięć w tkaninie | Stopień zrównoważenia ugięć nitek w tkaninie, K_h , jest wyrażony zależnością (2.30) [143].

$$K_h = \frac{h_o}{h_w} \quad (2.30)$$

gdzie: h_o – strzałka ugięcia nitek osnowy
 h_w – strzałka ugięcia nitek wątku

Wartość współczynnika K_h ma istotne znaczenie dla wyglądu i właściwości tkaniny, określa m.in. który z układów nitek będzie bardziej widoczny, jaka będzie powierzchnia oporu tkaniny, jakie będą jej wydłużenia w kierunku osnowy i wątku.

Zależność $K_h = K_h(h_o)$ jest nieliniowa w przedziale $(0 \div \infty)$ i ma charakter wykładniczy, co wynika z powiązania wartości strzałek ugięcia nitek zależnością (2.31) [143].

$$h_o + h_w = d_o + d_w \quad (2.31)$$

Współczynnik $K_h = 0$ gdy nitki osnowy są zupełnie wyprostowane ($h_o = 0$) oraz $K_h = \infty$ gdy zupełnie wyprostowane są nitki wątku ($h_w = 0$).

Ze względu na trudności w operowaniu wielkością nieliniową, wprowadzono pojęcie *fazy struktury tkaniny* (f). Odpowiada ono podziałowi całego zakresu zmienności strzałki ugięcia ($0 \div d_o + d_w$) na osiem przedziałów o jednakowej wielkości. Przyjmując, że dla skrajnego przypadku $h_o = 0$ występuje pierwsza faza struktury tkaniny, uzyskuje się łącznie dziewięć faz struktury tkaniny zmieniających się w sposób liniowy. Oznaczone są one cyframi rzymskimi od I do IX [143].

Wzrost zagęszczenia tkaniny nitkami osnowy jest możliwy przy wzroście fazy struktury tkaniny, tzn. przy wyprostowywaniu się nitek wątku. Przy wzroście zagęszczenia nitkami wątku jest odwrotnie [143]. Grubość tkaniny jest maksymalna dla faz skrajnych (I i IX) i najmniejsza dla fazy V.

Liczność i podziałki nitek w tkaninie | Liczność nitek w tkaninie (g) jest definiowana odrębnie dla osnowy (g_o) i wątku (g_w) jako liczba nitek przypadająca na 100 mm szerokości tkaniny¹⁾.

Z licznością wiąże się pojęcie *podziałki tkaniny*, oznaczające odległość między osiami sąsiednich nitek w tkaninie, wyrażona w [mm]. Wyznacza się ją również odrębnie dla osnowy (A_o) i wątku (A_w). Obydwa te parametry są związane zależnością (2.32) [143].

Rodzaj powierzchni oporu określa się na podstawie analizy powierzchni tkaniny. W tym celu próbkę tkaniny układa się na płaszczyźnie i przetacza po jej powierzchni wątek zanurzony w barwniku kontrastującym z kolorem nitek. Próbkę jest następnie oceniana pod mikroskopem. W zależności od tego, czy zabarwionych jest wię-

cej pokryw osnowowych, czy wątkowych, określana jest powierzchnia oporu.

Pojęcie fazy struktury tkaniny wprowadził N. T. Nowikow, w pracy „О строении ткани и проектировании её с помощью геометрического метода” Текс. Пром. 55/1964, Т. 541-557

¹⁾ W odniesieniu do tkanin na membrany licznosc nitek podaje się również na 1 cm lub 1 cal szerokości tkaniny. Stosowany jest zapis, np. 9×9 (osnowa×wątek).

$$g = \frac{100}{A} \quad [\text{nitek} / 100 \text{ mm}] \quad (2.32)$$

Liczność nitek jest parametrem często mierzonym, zwłaszcza podczas technologicznej kontroli prawidłowości wyrobu [116].

Zapełnienie powierzchniowe tkaniny nitkami | Ponieważ licznosc nitek charakteryzuje tkaninę bez uwzględnienia grubości nitek, nie pozwala ona na ocenę niektórych właściwości tkaniny, np. przewiewności. Z tego powodu został wprowadzony dodatkowy parametr – *zapełnienie powierzchniowe tkaniny nitkami*. Określa ono procentowe zasłonięcie jednostki powierzchni tkaniny nitkami. Wyznaczane jest ze wzoru (2.33) [143].

$$Z = \frac{P_{rz}}{P_{tk}} \times 100 \quad (2.33)$$

gdzie: P_{rz} – powierzchnia rzutu zajmowana w tkaninie przez nitki (jednego lub obu układów)

P_{tk} – rozpatrywana jednostka powierzchni tkaniny

Zapełnienie powierzchniowe tkaniny nitkami jest zwykle wyznaczane oddzielnie dla osnowy (Z_o) i wątku (Z_w). Sumaryczne zapełnienie powierzchniowe tkaniny nitkami obu układów (Z) oblicza się jako sumę zapełnień osnowy i wątku pomniejszoną o zapełnienie tkaniny nitkami w miejscach ich wzajemnego nakładania (pokrycia) [143].

Wypełnienie tkaniny nitkami | Zapełnienie powierzchniowe dobrze charakteryzuje ażurowość tkaniny, jednakże nie uwzględnia splotu, a zatem nie informuje o rzeczywistej możliwości zagęszczenia nitek jednego z układów w wyrobie. Z tego powodu wprowadzono dodatkowy wskaźnik nazywany *wypełnieniem tkaniny nitkami*, który uwzględnia również liczbę przegieć nitki w raporcie splotu [118]. Wypełnienie tkaniny nitkami określa się dla nitek osnowy (E_o) i wątku (E_w) oraz dla nitek obu układów (E_{ow}).

Wypełnienie tkaniny nitkami jednego układu (wypełnienie liniowe) jest stosunkiem faktycznej liczności nitek (g) do liczności maksymalnej, możliwej do osiągnięcia (g_{max}), wyrażonym w procentach, wg zależności (2.34) [143].

$$E = \frac{g}{g_{max}} \times 100 \quad (2.34)$$

Zależność wypełnienia od pozostałych parametrów tkaniny wyrażają zależności (2.35) i (2.36) [118].

$$E_o = \frac{d_o \cdot R_o + d_w \cdot p_w}{R_o \cdot A_o} \times 100 \quad (2.35)$$

$$E_w = \frac{d_w \cdot R_w + d_o \cdot p_o}{R_w \cdot A_w} \times 100 \quad (2.36)$$

gdzie: oznaczenia – jak poprzednio

Maksymalne możliwe do osiągnięcia wypełnienie tkaniny nitkami obu układów (wypełnienie powierzchniowe) jest definiowane jako stosunek pola jakie zajmowałaby tkanina maksymalnie zagęszczona (pole minimalne) do pola zajmowanego faktycznie [143].

Wypełnienie E_{ow} jest również nazywane współczynnikiem trudności wykonania tkaniny. Tkanina, której wypełnienie E_{ow} zbliża się do 100 % jest niemożliwa do wykonania na krośnie. Maksymalne możliwe zagęszczenie tkaniny nitkami wynika z maksymalnych licznosci nitek osnowy i wątku. Ich wartości zależą od wielu czynników, m.in. od rodzaju surowca, rodzaju splotu, liczby przegieć nitki, strzałki ugięcia itp. i mogą być różnie obliczane, co prowadzi do różnych wyników. Najczęściej wykorzystywane są do tego celu wzory sformułowane przez Brierleya i Flückę [143].

Masa powierzchniowa i liniowa tkaniny | Masa powierzchniowa tkaniny (M_p) jest to masa 1 m² tła tkaniny (tzn. tkaniny bez pasów brzegowych – tzw. *krajkę*). Jest ona sumą mas powierzchniowych osnowy (M_o) i wątku (M_w). Wielkości te są obliczane ze wzorów (2.35) (2.36) (2.37) [118] [143].

ang. *selvage*

$$M_{po} = g_o(100 + w_o)T_{tex,o} \times 10^{-4} \quad (2.37)$$

$$M_{pw} = g_w(100 + w_w)T_{tex,w} \times 10^{-4} \quad (2.38)$$

$$M_p = M_{po} + M_{pw} = [g_o(100 + w_o)T_{tex,o} + g_w(100 + w_w)T_{tex,w}] \times 10^{-4} \quad [g] \quad (2.39)$$

gdzie: $T_{tex,o}$, $T_{tex,w}$ – masa liniowa (tex) nitek, odpowiednio osnowy i wątku
pozostałe oznaczenia – jak poprzednio

Masa liniowa tkaniny (M_l) jest to masa jednego metra bieżącego tkaniny wraz z krajkami. Wyznaczana jest z zależności (2.38) [118] [143].

$$M_l = [g_o(100 + w_o)b_uT_{tex,o} + g_w(100 + w_w)b_tT_{tex,w} + g_{kr}(100 + w_{kr})b_{kr}T_{tex,kr}] \times 10^{-6} \quad [g] \quad (2.40)$$

gdzie: b_t – całkowita szerokość tkaniny [cm]
 b_{kr} – suma szerokości krajkę [cm]
 b_u – szerokość użyteczna tkaniny [cm]
pozostałe oznaczenia – jak poprzednio

Masa powierzchniowa i masa liniowa tkaniny są to podstawowe, kompleksowe parametry służące do klasyfikacji tkanin, kontroli jakości, prawidłowości struktury oraz oceny niektórych właściwości użytkowych tkanin. Pozwalają na kontrolę procesu tkania, obrazują zużycie surowca oraz prawidłowość struktury wyrobu [118].

2.6.3. Sploty tkanin

2.6.3.1. Sposoby przedstawiania splotów

Podstawowymi parametrami splotu, które są wykorzystywane przy jego opisie są (wg oznaczeń powyżej): R_o , R_w , s_o , s_w , p_o , p_w . Uniwersalnym sposobem opisu splotu jest graficzne przedstawienie go za pomocą rysunku tkackiego [118]. Ze względu na to, że często występuje konieczność szybkiego odtworzenia splotu, na przykład przy zastosowaniu komputerów, stosowany jest również opis numeryczny [143].

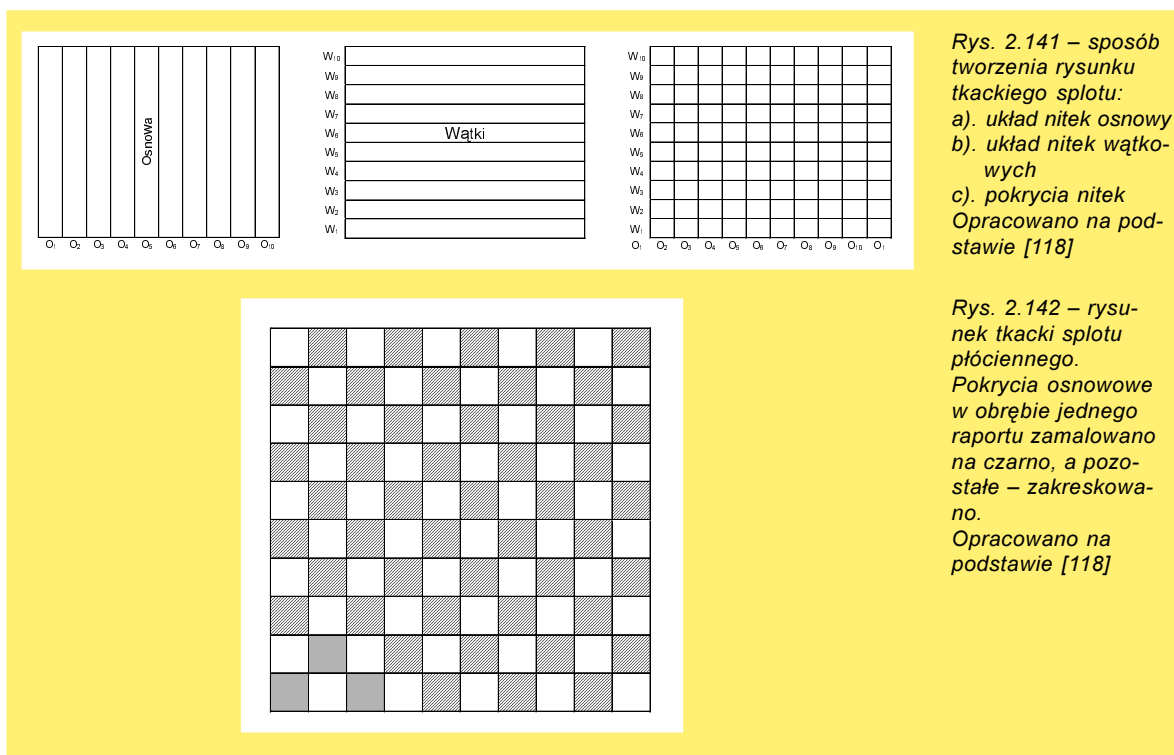
Rysunek tkacki splotu | Rysunek tkacki w symboliczny sposób przedstawia splot, upraszczając rzeczywisty wygląd tkaniny. W rysunku tym nitki są przedstawione jako część powierzchni ograniczonej dwiema sąsiednimi prostymi równoległymi. Przyjęto, że nitki każdego z układów są usytuowane stycznie jedna na drugiej. Nałożenie na siebie dwóch rysunków przedstawiających nitki obu układów daje obraz ich skrzyżowań, czyli pokryw.

Pokrycie osnowowe jest zaznaczane zawsze polem zamalowanym, a pokrycie wątkowe – polem pustym. Dodatkowo, pokrycia osnowowe w granicach jednego raportu zamalowywane są kolorem czarnym, a poza raportem – czerwonym lub kreskowaniem ukośnym [118].

Oprócz widoków powierzchni tkaniny (rzutów) wykonuje się również przekroje wzdłuż osnowy lub wątku. Dla uproszczenia tych rysunków, przyjmuje się, że układ prostopadły względem tego, wzdłuż którego wykonuje się przekrój, ma wrobień równe zero. Tkanina jest więc w każdym kierunku przedstawiona z jednoukładową powierzchnią oporu [118].

Na rysunku 2.141 przedstawiono sposób tworzenia rysunku tkackiego, a na rysunku 2.142 – rysunek tkacki splotu płóciennego¹⁾.

¹⁾ Poszczególne rodzaje splotów omówiono w pkt 2.6.3.3



Rys. 2.141 – sposób tworzenia rysunku tkackiego splotu:
a). układ nitek osnowy
b). układ nitek wątkowych
c). pokrycia nitek
Opracowano na podstawie [118]

Rys. 2.142 – rysunek tkacki splotu płóciennego.
Pokrycia osnowowe w obrębie jednego raportu zamalowano na czarno, a pozostałe – zakreskowano.
Opracowano na podstawie [118]

Oznaczenia numeryczne splotów | Symboliczne, cyfrowo-literowe oznaczenie splotów stosuje się do splotów o prostszej strukturze. Obecnie nie ma ujednoliconego w skali międzynarodowej systemu oznaczeń numerycznych splotów, chociaż prowadzone są prace zmierzające do jego opracowania [143].

Sposób oznaczania numerycznego splotów stosowany w Polsce, składa się z [118]:

- wyróżnika raportu
- wartości skoku wątkowego lub literowego kierunku rzędów

Wyróżnik raportu splotu wskazuje liczby kolejnych pokryw osnowowych (nad kreską) i wątkowych (pod kreską) dla pierwszej nitki wątku W_1 . Przykład zapisu przedstawia wyrażenie (2.41a). Dla bardziej rozbudowanych splotów zapis przyjmuje postać przedstawioną w wyrażeniu (2.41b).

$$\text{a). } \frac{n}{m} \quad \text{b). } \frac{n_1 \ n_2 \dots n_k}{m_1 \ m_2 \dots m_k} \quad (2.41)$$

Za wyróżnikiem podaje się w nawiasie wartość (lub, jeżeli są różne, kolejne wartości) skoku wątkowego. Dla niektórych splotów stosowane są odstępstwa od tej zasady, mające na celu uproszczenie zapisu lub podkreślenie ich charakteru. Literowe symbole kierunku rzędów to np. litery: Z, S, V, Y, K [118].

Przykłady zapisu numerycznego splotów [118]:

$$\begin{aligned} \frac{4}{1} (3) & \quad \text{splot atlasowy}^{1)}, \text{ pięcionitkowy, osnowowy} \\ \frac{1}{2} Z & \quad \text{splot skośny}^{1)}, \text{ trzynitkowy, wątkowy} \\ \frac{1}{1} (0,1,0) & \quad \text{splot rypsowy}^{1)} \text{ poprzeczny, czteronitkowy} \\ \frac{1}{5} V_6 K_6 & \quad \text{splot skośny}^{1)}, \text{ łamany wzdłuż wątku i osnowy} \end{aligned}$$

¹⁾ Poszczególne rodzaje splotów omówiono w pktcie 2.6.3.3

2.6.3.2. Podział splotów

Ze względu na strukturę i wygląd wyrobu, wyróżnia się pięć głównych grup splotów tkanin [118]:

- sploty zasadnicze
- sploty pochodne zasadniczych
- sploty modyfikowane i zestawne
- sploty złożone
- sploty gazejskie

Na rysunku 2.144 przedstawiony jest schemat ogólnego podziału splotów tkanin, opracowany na podstawie informacji podanych w [118].

2.6.3.3. Charakterystyka splotów

2.6.3.3.1. Sploty zasadnicze

Sploty zasadnicze tworzą grupę splotów, których zróżnicowanie jest uzyskiwane wyłącznie przez zmianę wzajemnego rozmieszczenia pokryw osnowowych i wątkowych. Muszą one spełniać trzy warunki [118]:

- 1). Raport osnowowy i raport wątkowy muszą być sobie równe, tzn. $R_o = R_w$
- 2). Skok splotu musi mieć w obrębie raportu stałą wartość, tzn. $s_o = const$ i $s_w = const$
- 3). Każda nitka w obrębie raportu może mieć tylko jedno pokrycie różniące się od pozostałych, tzn. że ilość przegieć $p_o = p_w = 2$.

Wyróżnik splotu ma wtedy budowę: $\frac{1}{m}$ lub $\frac{n}{1}$

Równocześnie spełniony jest warunek $1 + m = R$ lub $n + 1 = R$

Wśród splotów zasadniczych wyróżniamy trzy podgrupy [118]:

- splot płócienny
- sploty skośne
- sploty atlasowe

ang. plain weave
ang. twill weave
ang. atlas weave

Splot płócienny | Jest to podstawowy, historycznie najstarszy splot tkanin. Parametry tego splotu są następujące [118]:

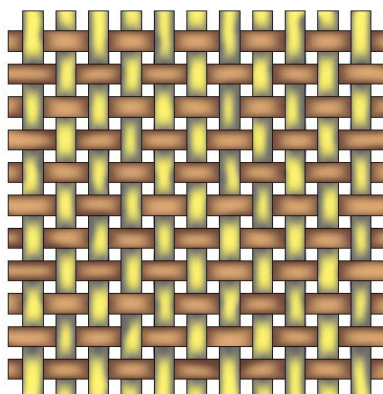
ang. plain weave

$$R_o = 2, R_w = 2, s_o = 1, s_w = 1, p_o = 2, p_w = 2$$

Splot płócienny ma oznaczenie: $\frac{1}{1}$

Oznacza to, że na pierwszej nitce wątku występuje kolejno jedno pokrycie wątkowe i jedno osnowowe. Rysunek tkacki splotu płóciennego przedstawiony jest na rys. 2.142, a na rys. 2.143 – schematyczny widok tkaniny o takim splocie.

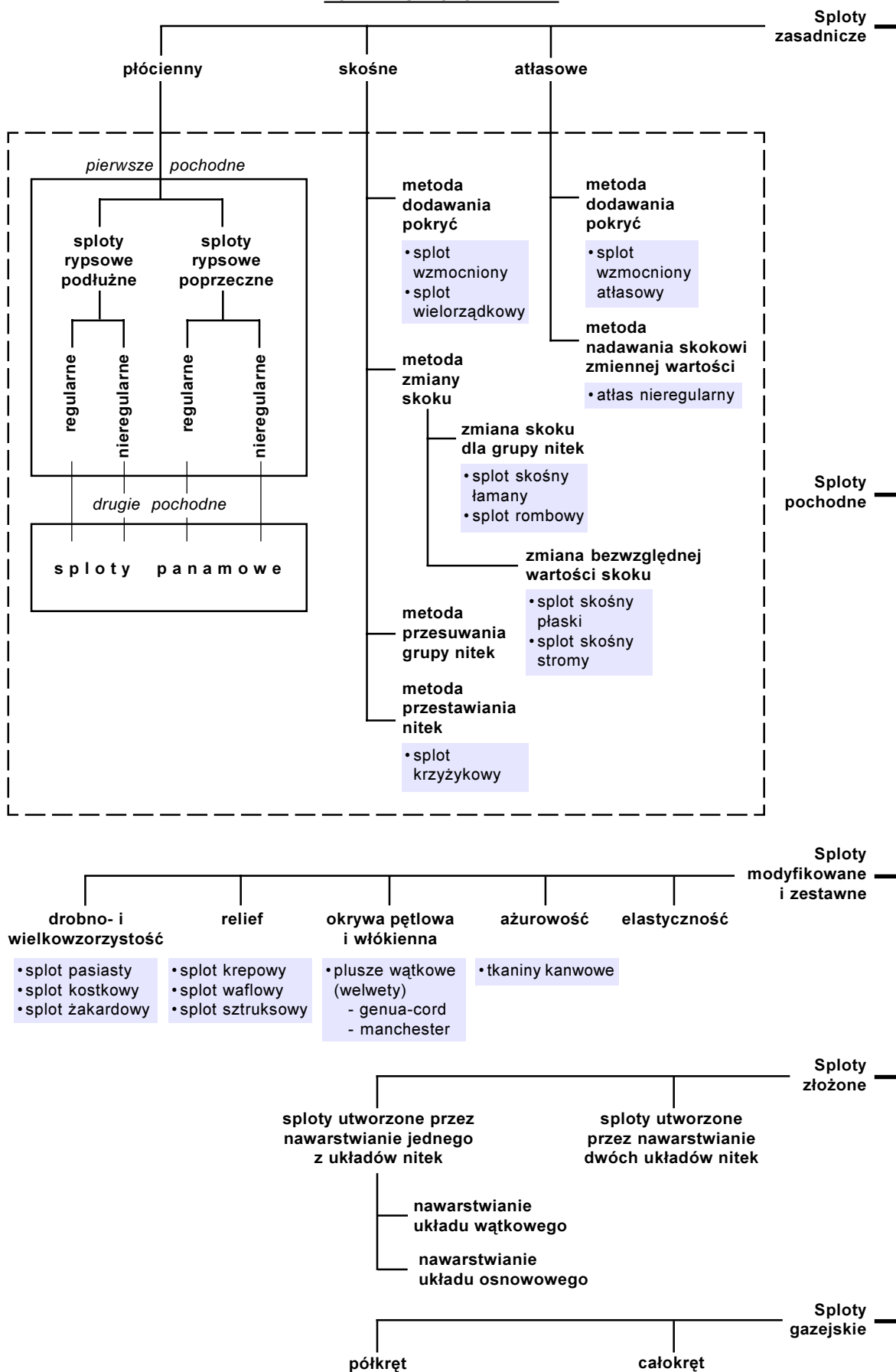
Tkaniny o splocie płóciennym mają gładką i równomierną powierzchnię, bez żadnych zgrupowań pokryw. Spośród wszystkich tkanin, przy takich samych masach liniowych i licznosciach nitek, wypełnienie jest największe dla splotu płóciennego, co wynika z występowania maksymalnej możliwej liczby przegieć nitek osnowy i wątku. Ma to odbicie w cechach użytkowych wyrobu [118]. Splot ten jest łatwy w produkcji, gdyż sterowanie nicielniami¹⁾ jest bardzo



Rys. 2.143 – schematyczny widok tkaniny o splocie płóciennym. Opracowano na podstawie [118] [198]

¹⁾ Proces produkcji tkanin jest omówiony w pktcie 2.6.7

PODZIAŁ SPLOTÓW TKANIN



Rys. 2.144 – podział splotów tkanin
Opracowano na podstawie [118]

proste. Ze względu na wymienione cechy, a także ze względu na jednorodność właściwości mechanicznych w strukturze osnowy i wątku, **splot płócienny jest jednym z podstawowych splotów stosowanych przy produkcji tkanin technicznych** [198].

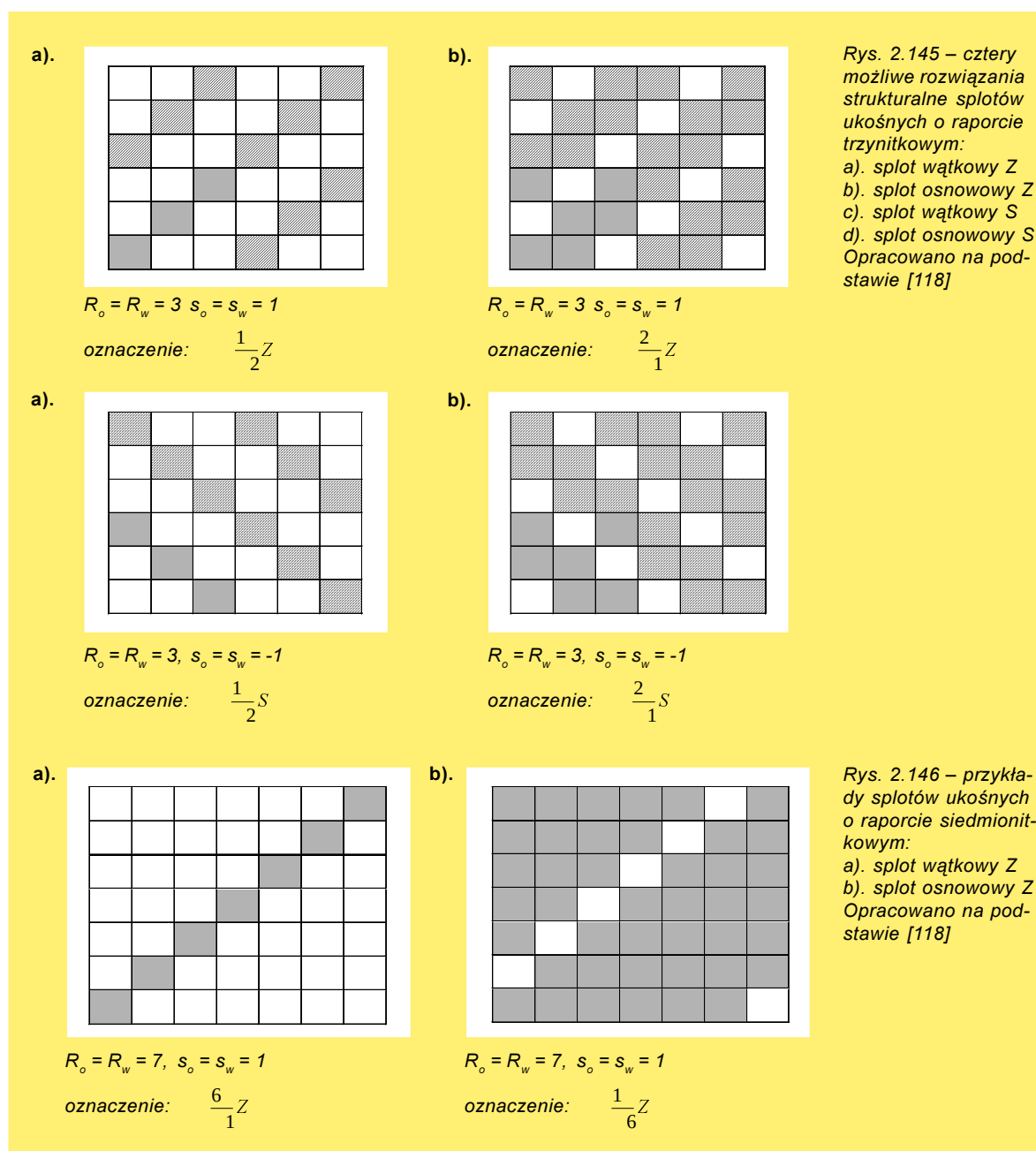
Sploty skośne | Sploty skośne charakteryzują się występowaniem zgrupowań pokryw (rządków) wzdłuż linii biegnących skośnie na powierzchni tkaniny – stąd pochodzi ich nazwa. W odróżnieniu od splotu płóciennego sploty skośne mogą występować w wielu układach. Parametry tych splotów są następujące [118]:

ang. *twill weave*

$$R_o = R_w \geq 3, s_w = 1 \text{ lub } s_w = -1$$

Gdy skok $s_w = 1$, w zapisie splotu podaje się za wyróżnikiem symbol Z, a gdy skok $s_w = -1$, podaje się symbol S.

Na rys. 2.145 przedstawiono wszystkie możliwe rozwiązania strukturalne dla splotu o najmniejszym możliwym raporcie – trzynitkowym, a na rysunku 2.146 – przykłady splotów skośnych o raporcie siedmionitkowym.



Sploty atlasowe | Sploty atlasowe charakteryzują się brakiem punktów styeczności pomiędzy pokryciami występującymi w mniejszości oraz stosunkowo długimi, nieprzeplecionymi odcinkami nitki. Dzięki temu powierzchnia tkaniny jest równomierna i bardzo gładka [118]. Na rys. 2.147 przedstawiono schematyczny widok przykładowej tkaniny o splotie atlasowym.

ang. *atlas weave*

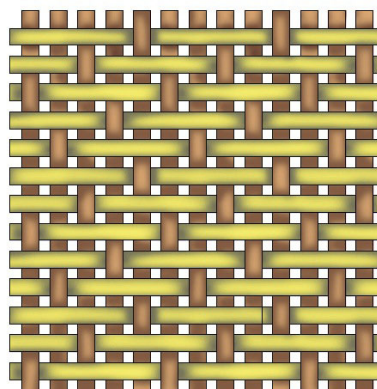
Parametry splotów atlasowych są następujące:

$$R_o = R_w \geq 5, \\ 1 < s_w < R - 1$$

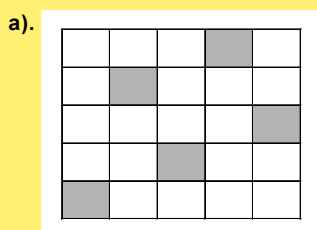
jednocześnie też, ułamek R_w/s_w jest nieskracalny.

W przypadku splotów atlasowych wartości skoku osnowowego i wątkowego mogą być sobie równe i wtedy są nazywane kwadratowymi.

Na rys. 2.148 przedstawiono rysunek tkacki dwóch zasadniczych splotów atlasowych pięcionitkowych o różnych wartościach skoku wątkowego i osnowowego, a na rys. 2.149 – rysunek splotów atlasowych kwadratowych ośmionitkowych, różniących się wartościami skoku.

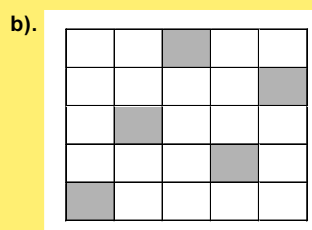


Rys. 2.147 – schematyczny widok tkaniny o splotie atlasowym. Opracowano na podstawie [118] [198]



$$R_o = R_w = 5, s_o = 3, s_w = 2$$

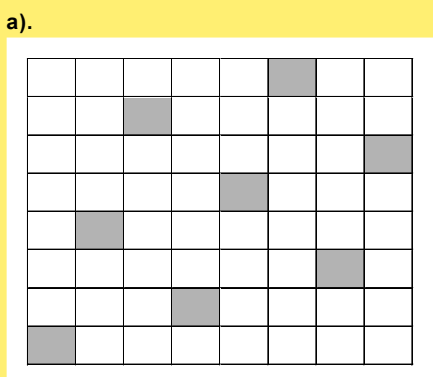
$$\text{oznaczenie: } \frac{1}{4}(2)$$



$$R_o = R_w = 5, s_o = 2, s_w = 3$$

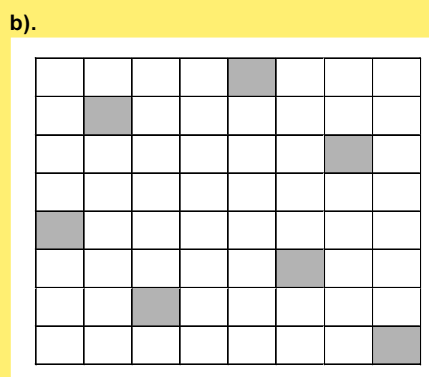
$$\text{oznaczenie: } \frac{1}{4}(3)$$

Rys. 2.148 – przykłady splotów atlasowych o raporcie pięcionitkowym:
a). splot wątkowy
b). splot osnowowy
Opracowano na podstawie [118]



$$R_o = R_w = 8, s_o = s_w = 3$$

$$\text{oznaczenie: } \frac{1}{7}(3)$$



$$R_o = R_w = 8, s_o = s_w = 5$$

$$\text{oznaczenie: } \frac{1}{7}(5)$$

Rys. 2.149 – przykłady splotów atlasowych kwadratowych o raporcie ośmionitkowym:
a). skok $s_o = s_w = 3$
b). skok $s_o = s_w = 5$
Opracowano na podstawie [118]

2.6.3.3.2. Sploty pochodne

Sploty pochodne są tworzone poprzez modyfikację splotów zasadniczych, przy czym zachowane powinny być charakterystyczne cechy tych splotów, np. układ rzędów itp. Dla każdej z trzech grup splotów zasadniczych, sposób tworzenia splotów pochodnych jest nieco inny. Z tego powodu zostały one poniżej omówione oddzielnie.

1). Pochodne splotu płóciennego

Pochodne splotu płóciennego powstają poprzez zwielokrotnianie przeplotów nitek w raporcie. W wyniku tego pojawiają się długie nie przeplecione odcinki (żebra), ułożone równoległe w postaci prążków na powierzchni tkaniny [118].

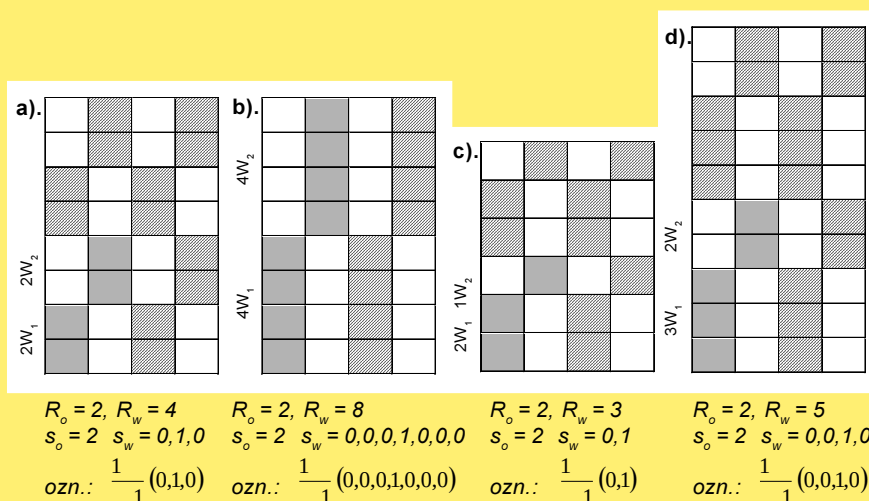
Wyróżniamy:

- pierwsze pochodne splotu płóciennego, czyli *sploty rypsowe*, jeżeli zwielokrotniony został tylko jeden z układów nitek
- drugie pochodne splotu płóciennego, czyli *sploty panamowe*, jeżeli zwielokrotnione zostały obydwa układy nitek

Sploty rypsowe | Sploty rypsowe powstają poprzez zwielokrotnienie przeplotów nitek osnowy (*ryps podłużny*) lub wątku (*ryps poprzeczny*). Nazwa splotu wskazuje na kierunek układu prążków na powierzchni tkaniny. Jeżeli przeplot został zwielokrotniony taką samą liczbą razy dla obu nitek danego układu występujących w raporcie splotu płóciennego, to otrzymujemy *ryps regularny*, a jeżeli różną liczbą razy – *ryps nieregularny*. Każdy tak otrzymany splot jest dwustronny [118].

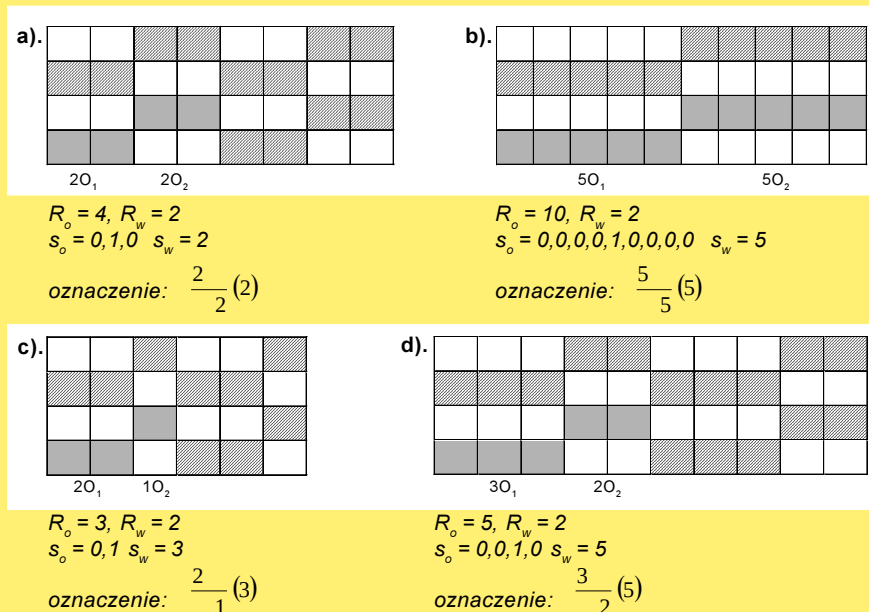
W splotach rypso- wych, jeden z raportów (R_w lub R_o) jest zawsze równy 2, czyli sposób przeplatania jednego z układów nitek jest taki sam jak w splotie płóciennym. Drugi z raportów ma najmniejszą wartość równą 3. Aby rypś mógł być regularny, najmniejsza wartość drugiego raportu musi wynosić 4.

Na rys. 2.150 przedstawiono przykłady splotów rypso- wych poprzecznych regularnych i nieregularnych, a na rys. 2.151 – przedstawiono przykłady splotów rypso- wych podłużnych regularnych i nieregularnych.



Rys. 2.150 – przykłady splotów rypso- wych poprzecznych:

- a). splot regularny czteronitkowy
 - b). splot regularny ośmionitkowy
 - c). splot nieregularny trzynitkowy
 - d). splot nieregularny pięcionitkowy
- Opracowano na podstawie [118]



Rys. 2.151 – przykłady splotów rypso- wych podłużnych:

- a). splot regularny czteronitkowy
 - b). splot regularny dziesięcionitkowy
 - c). splot nieregularny trzynitkowy
 - d). splot nieregularny pięcionitkowy
- Opracowano na podstawie [118]

Sploty panamowe | Sploty panamowe powstają w identyczny sposób jak sploty rypsowe, ale splotem wyjściowym są w tym wypadku sploty rypsowe. Dlatego sploty panamowe nazywane są drugimi pochodnymi splotu płóciennego.

W splotach panamowych zwielokrotnione są obydwa układy nitki, dlatego nie dzielą się one na podłużne i poprzeczne. W zależności od tego, jaki splot rypсовy był splotem wyjściowym przy tworzeniu splotu panamowego otrzymujemy splot panamowy regularny bądź nieregularny.

Tworzenie splotów panamowych można inaczej przedstawić bezpośrednio na podstawie splotu płóciennego. Jeżeli w splotcie płóciennym zostaną zwielokrotnione nitki obu układów (osnowy i wątku), to otrzymujemy splot panamowy. Przy czym, jeśli nitki są zwielokrotnione taką samą liczbą razy w obu układach, to powstaje splot panamowy regularny, a jeżeli w każdym z układów nitki są zwielokrotnione inną liczbą razy – powstaje splot panamowy nieregularny.

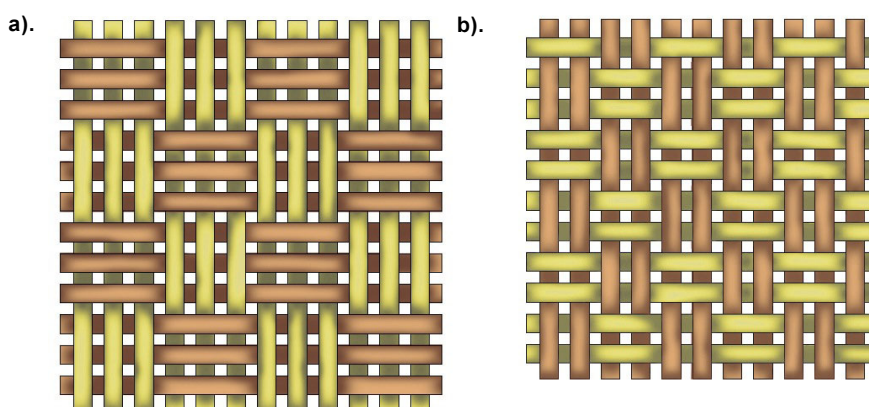
Sploty panamowe regularne są, obok splotu płóciennego, najczęściej stosowane przy produkcji tkanin technicznych używanych do wyrobu membran.

W stosunku do tkanin o splotcie panamowym, stosowanych w budownictwie, przyjął się sposób ich oznaczania niezależny od oznaczeń włókienniczych. Oznaczenie to ma następującą postać:

$$\text{panama } n_o \times n_w$$

gdzie n_o i n_w , to odpowiednio krotności zwielokrotnienia nitki w kierunku osnowy i wątku, np. panama 2×2.

Na rys. 2.152 przedstawiono schematyczny widok tkanin panamowych 2×2 i 3×3, a na rys. 2.153 – rysunek tkacki splotów panamowych regularnych i nieregularnych.

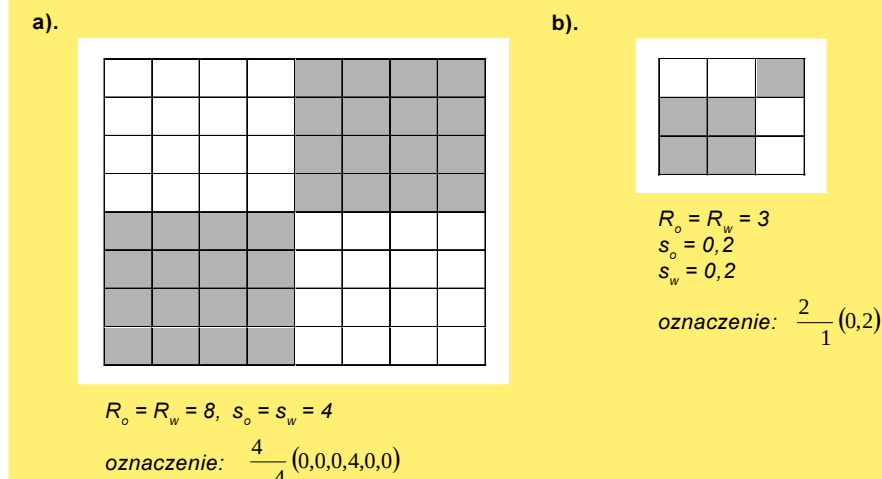


Rys. 2.152 – schematyczny widok tkanin panamowych regularnych:

a). 3×3

b). 2×2

Opracowano na podstawie [118] [198]



Rys. 2.153 – przykłady splotów panamowych:

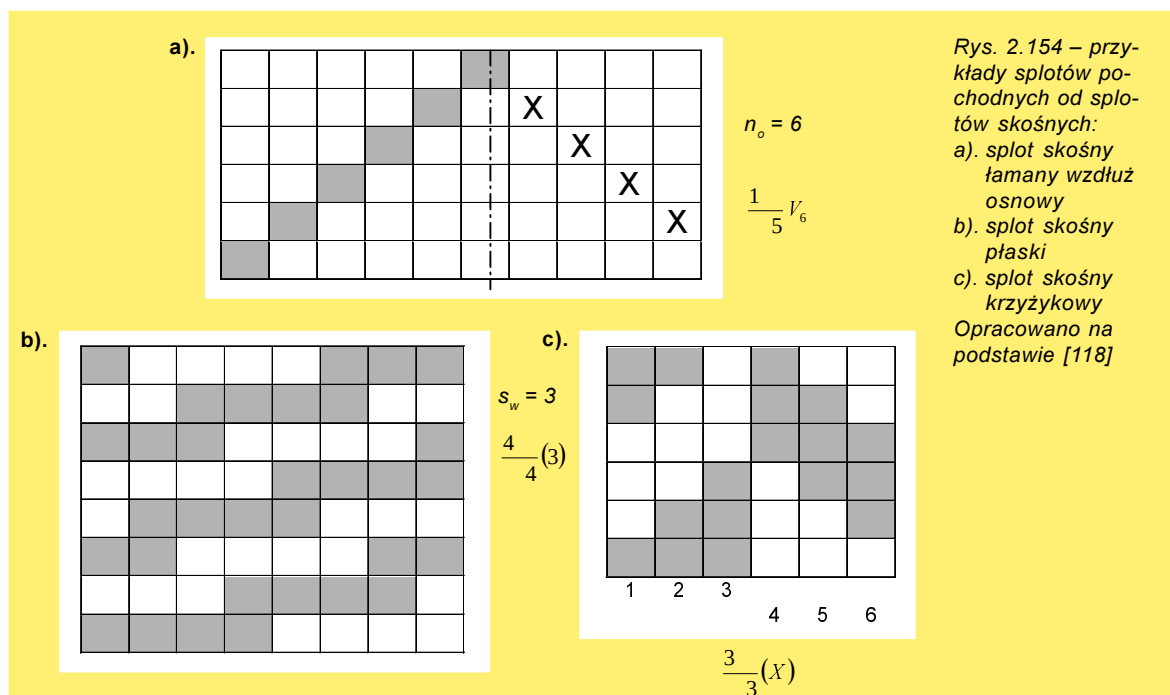
a). splot regularny, o raporcie ośmio-nitkowym (4×4)

b). splot nieregularny
Opracowano na podstawie [118]

2). Pochodne splotów skośnych

Pochodne splotów skośnych powstają czterema różnymi metodami [118]:

- poprzez dodawanie pokryw; polega to na dodaniu stycznie do istniejących już pokryw, np. osnovowych, dalszych pokryw tego rodzaju. Jeżeli dodane pokrycia przylegają do poprzednich, to otrzymany splot nosi nazwę *wzmocnionego*, a jeżeli są w pewnej odległości od nich, to otrzymany splot jest nazywany *wielorzędkowym*.
- poprzez zmianę skoku; metoda ta ma dwa warianty: pierwszy polega na zmianie skoku wybranej grupy nitek, po n ich liczbie nitek, a drugi na bezwzględnej zmianie wartości skoku dla całego układu. W pierwszym przypadku zmiana skoku może dotyczyć tylko nitek osnovy lub wątku – otrzymujemy wtedy *sploty skośne łamane*, rys. 2.154.a)., albo obydwu układów – otrzymujemy wtedy sploty *rombowe*. W drugim wariancie celem modyfikacji jest zmiana kąta nachylenia rzędków. Jeżeli zmieniony został skok wątkowy ($s_w > 1$) – otrzymujemy *sploty skośne płaskie*, rys. 2.154.b)., a jeżeli skok osnovowy ($s_o > 1$) – *sploty skośne strome*.
- poprzez przesuwanie grupy nitek; metoda ta jest stosowana najczęściej do modyfikacji splotów skośnych łamanych wzdłuż osnovy. Dzięki temu, że pokrycia są przeciwstawne („ostry przeplot”) można uzyskać wyraźną granicę pomiędzy grupami nitek. Pierwsza grupa nitek pozostaje nieruchoma, a przesuwa się ta część, w której nastąpiła zmiana rzędków. W oznaczeniu takiego splotu, za wyróżnikiem podaje się literę Y.
- poprzez przestawianie nitek; metoda ta polega na przestawieniu kolejności nitek wg schematu: $O_1, O_2, \dots, O_{0,5 \times R}, O_R, O_{R-1}, \dots, O_{0,5 \times R+1}$ gdzie raport R jest liczbą parzystą. Sploty modyfikowane w ten sposób noszą nazwę splotów krzyżkowych, rys. 2.154.c). W ich oznaczeniu, za wyróżnikiem podaje się literę X.

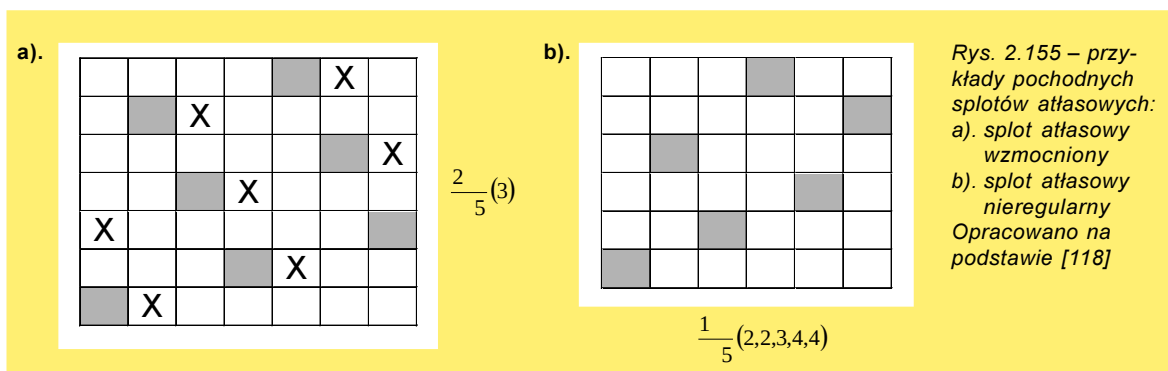


3). Pochodne splotów atlasowych

Pochodne splotów atlasowych powstają jedynie dwoma metodami [118]:

- poprzez dodawanie pokryw; metoda ta jest analogiczna jak dla splotów skośnych; uzyskany splot nosi nazwę *splotu atlasowego wzmocnionego*, rys. 2.155.a).
- poprzez nadawanie skokowi zmiennej wartości; tą metodą powstaje tzw. *atlas nieregularny*, rys. 2.155.b).

W przypadku pochodnych splotów atlasowych, należy przestrzegać zasady, aby poszczególne grupy pokryw będących w mniejszości nie miały punktów wspólnych [118].



2.6.3.3.3. Sploty modyfikowane i zestawne

Sploty modyfikowane i zestawne powstają zestawieniem różnych splotów w jedną całość. Prowadzi to zmiany właściwości i wyglądu tkaniny oraz nadaje jej powierzchni określoną fakturę. Stosowane są następujące rodzaje przekształceń prowadzących do powstania tych splotów [118]:

- drobno i wielkowzorzystość;
- relief
- okrywa pętlowa i włókienna
- elastyczność
- ażurowość

Drobno i wielkowzorzystość | Sposób ten polega na zestawieniu obok siebie, wzdłuż wyrobu, dwóch splotów. Muszą się one różnić rodzajem pokryć będących na powierzchni lub ich ułożeniem. Na powierzchni tkaniny powstaje charakterystyczny wzór, od którego pochodzi nazwa splotu [118].

Sploty pasiaste powstają poprzez zestawienie splotów skośnych, np.:

splot wątkowy $\frac{1}{3}Z$ i splot osnowowy $\frac{3}{1}S$

Aby spotęgować efekt pasiastości, należy przestrzegać występowania na granicy stykania się dwóch splotów pokryć przeciwnych (tzw. ostry przeplot) [118].

Splot kostkowy powstaje na bazie splotów atlasowych, np.:

splot wątkowy $\frac{4}{1}(3)$ i splot osnowowy $\frac{1}{4}(2)$

Splotami żakardowymi są nazywane sploty, w których raporcie liczba różne sterowanych nitki przekracza $20 \div 30$, gdyż do ich wytwarzania niezbędne jest zastosowanie mechanizmu Żakarda. Umożliwia to uzyskiwanie wielkowzorzystości, tj. efektów (np. różnej faktury) obejmujących znaczną powierzchnię [118].

Relief | Jeżeli na powierzchni tkaniny występują wyraźnie wyczuwalne, regularne bądź nie, różnice grubości, to efekt taki nazywa się reliefem [118].

Splot krepowy charakteryzuje się nieregularnym rozłożeniem małych guzełków (tzw. ziarnistość powierzchni). Można go uzyskać dwójako:

- w wyniku stosowania nitki o bardzo znacznej liczbie skrętów (powyżej wartości krytycznej)
- poprzez odpowiedni dobór splotu, np. poprzez zakłócenie określonego porządku występowania pokryć. Jednym ze sposobów jest dodanie na pewnej powierzchni splotu płóciennego dalszych pokryć osnowowych, tak by ich skupiska miały na przemian przeciwny kierunek ułożenia. Inny sposób, to nałożenie na splot skośny o wyraźnych rzędkach innego splotu o zupełnie odmiennym charakterze, np. rypowego [118].

Splot waflowy, będący typowym przedstawicielem splotów z reliefem, wykonuje się najczęściej na bazie splotu skośnego łamanego wzdłuż osnowy i wątku, do którego są dokładane po bokach raportu dalsze pokrycia osnowowe. Na skutek tego zabiegu, tkanina po zdjęciu z krosna zbiega się, tworząc na powierzchni wgłębienia i wypukłości, które upodabniają ją do powierzchni wafla [118].

Splot sztruksowy pozwala uzyskać znaczne, wyraźnie widoczne, wyoblenia tkaniny. **Sztruks podłużny** uzyskiwany jest poprzez zestawienie kolejno w odpowiednim stosunku nitek wątku o splotach: płóciennym i rypсовym podłużnym. Przy dostatecznie dużej liczności nitek osnowy, w płaszczyźnie wyrobu nie może wystąpić przeplot płócienny, co prowadzi do wyoblenia tkaniny. Efekt ten jest widoczny w postaci podłużnych wypukłych prążków. Są one utrwalane poprzez zastosowanie nitek wypełniających pomiędzy odcinkami napiętych wątków, a drugą ich grupą przeplecioną z osnową. W analogiczny sposób powstaje **sztruks poprzeczny** [118].

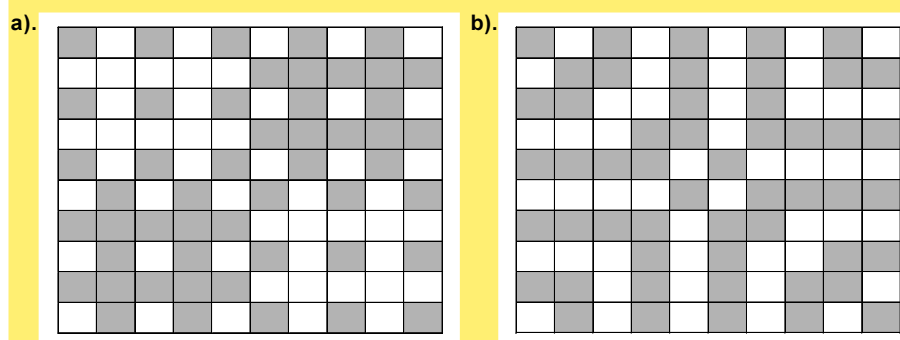
Okrywa pętlowa i włókienna | Jeżeli na pewnym obszarze splotu płóciennego zostaną dołożone pokrycia osnowowe w taki sposób, aby tylko niektóre nitki miały długie nie przeplecione odcinki, to wystąpią one w nadmiarze na powierzchni tkaniny. Powstaje w ten sposób **okrywa pętlowa**, a powstała tkanina imituje tkaninę frottową [118].

Tkanina frotté jest to tkanina z okrywą pętlową z wątku lub z osnowy typu frotté.

Tkaniny z **okrywą włókienną** są uzyskiwane w wyniku zestawienia obok siebie (analogicznie jak przy sztruksach) splotów płóciennego i np. nieregularnego rypsu podłużnego o dużej liczności wątków. Po zdjęciu z krosna nie przeplecione odcinki wątku zostają odcięte i – po przygotowaniu – zaczesane. Tkaniny takie nazywają się pluszami wątkowymi lub welwetami. Jeżeli prążki pokrywy są rozmieszczone podłużnie i są dość drobne, to tkanina nazywa się *genua-cord*, a jeśli są szerokie – *manchester* [118].

Ażurowość | Ażurowość tkaniny powstaje, jeżeli jeden lub oba układy jej nitek mają małe zagęszczenie. Poprzez zastosowanie odpowiednich splotów, można uzyskać miejscowe rozrzedzenie tkaniny, sprzyjające jej przewiewności, przy zachowaniu dość ścisłej i mechanicznie wytrzymałej struktury [118]. Tkaniny takie nazywają się *tkaninami kanwowymi* lub *imitującymi tkaniny gazejskie*. Na rys. 2.156.a). przedstawiony został przykład splotu kanwowego.

Elastyczność | Sploty elastyczne mają długie, nie przeplecione odcinki nitek zarówno osnowowych jak i wątkowych. Nitki te krzyżują się w środkowej części raportu, tworząc w tej części splot płócienny. Prowadzi to do powstania w tkaninie miejscowych wgłębień, nadających jej dużą elastyczność [118]. Można ją dodatkowo spotęgować, stosując nitki z włókien elastycznych typu spandex. Na rys. 2.156.b). przedstawiono przykład splotu elastycznego.



Rys. 2.156 – przykłady splotów:
a). kanwowego
b). elastycznego
Opracowano na podstawie [118]

2.6.3.3.4. Sploty złożone

Sploty złożone charakteryzują się występowaniem kilku warstw jednego lub obu układów nitek, np. jedna warstwa osnowowa i dwie warstwy wątkowe. Taki sposób wykonywania tkaniny ma na celu zwiększenie jej grubości (kiedy nie można tego uzyskać w inny sposób) lub izolacyjności cieplnej. Ponadto umożliwia uzyskanie niezależności wyglądu prawej i lewej strony tkaniny [118]. Sploty złożone otrzymuje się jedną z dwóch metod:

- poprzez nawarstwianie jednego z układów nitek
- poprzez nawarstwianie dwóch układów nitek

Nawarstwianie jednego z układów nitek | W splotach tego rodzaju jeden z układów nitek występuje dwu- lub wielokrotnie. Schematycznie zostało to przedstawione na rys. 2.157.

Nawarstwione mogą być nitki układu wątkowego lub osnowowego. Aby możliwe było wykonanie takiej tkaniny, splot nitek warstwy górnej powinien być lekki, a warstwy dolnej – ciężki.

Ponadto, wypełnienie powierzchniowe tkaniny obu układami wątków (osnow) powinno być większe niż 100 %. W przypadku występowania trzech warstw danego układu, dla górnych stosuje się splot lekki, dla środkowych – dwustronny, a dla dolnych – ciężki. Niekiedy stosuje się też wzajemną wymianę położenia poszczególnych warstw danego układu. Pozwala to np. uzyskiwać różne efekty kolorystyczne. Jeżeli zwielokrotnionym układem jest osnowa, to musi ona być wstępnie przygotowana, tzn. mieć dużą liczbę nitek. Uzyskuje się to poprzez odpowiedni dobór grzebienia [118].

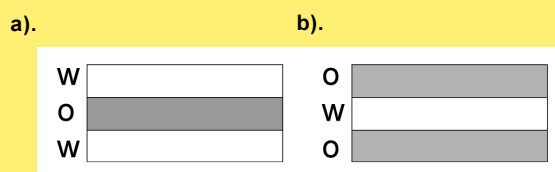
Nawarstwianie dwóch układów nitek | Sploty powstałe w ten sposób mogą mieć bardzo złożoną budowę. Nawarstwienie podstawowych układów może być podwójne lub wielokrotne.

Poniżej omówiono najprostszy sposób nawarstwiania dwóch układów nitek, polegający na łączeniu dwuwarstwowych układów wątku i osnowy, czyli niezależnych „pojedynczych tkanin” w całość. Łączenie może odbywać się za pomocą przeszywania, klejenia, zgrzewania lub sposobem tkackim – przeplatając układy wzajemnie prostopadłe, czyli osnowę i wątki należące do różnych warstw [118]. Rysunek 2.158 przedstawia zasadę wielokrotnego nawarstwiania dwóch układów nitek sposobem tkackim.

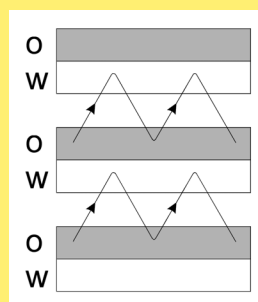
Połączenie warstw sposobem tkackim może być zrealizowane kilkoma sposobami. Są to:

- podwiązywanie warstw
- nadwiązywanie warstw rys. 2.158
- jednoczesne nadwiązywanie i podwiązywanie
- łączenie dodatkową osnową, rys. 2.159
- łączenie dodatkowym wątkiem
- pełna wymiana warstw

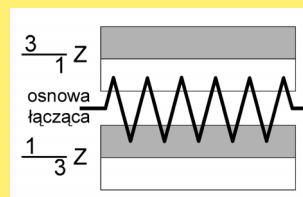
Im większa jest ilość połączeń warstw tkaniny podwójnej, tym silniejsze jest ich zespolenie i większa sztywność wyrobu. Dlatego rozwiązania strukturalne o dużej liczbie połączeń stosuje się głównie w tkaninach technicznych (np. taśmy przenośnikowe), przeciwnie niż w tkaninach odzieżowych [118].



Rys. 2.157 – przykład splotu złożonego, o:
a) dwójkowy układ wątkowy
b) dwójkowy układ osnowowy
Opracowano na podstawie [118]



Rys. 2.158 – wielokrotne nawarstwianie dwóch układów nitek sposobem tkackim, przez nadwiązywanie warstw. Opracowano na podstawie [118]



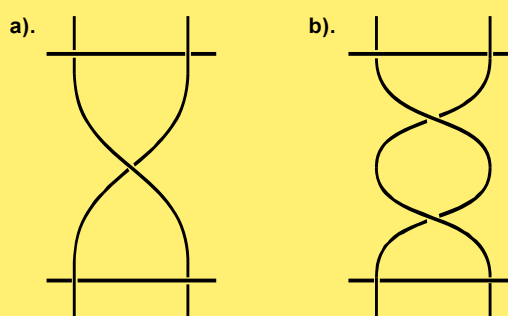
Rys. 2.159 – łączenie warstw w splotcie złożonym dodatkową osnową. Opracowano na podstawie [118]

2.6.3.3.5. Sploty gazejskie

Sploty gazejskie są stosowane do wykonywania tkanin ażurowych, tj. tkanin o małym wypełnieniu. W takich tkaninach konieczne jest zastosowanie odpowiedniego splotu w celu zapobieżenia przesuwaniu się nitki. Cechą charakterystyczną splotów gazejskich jest wzajemne okracanie sąsiednich nitki osnowy lub ich grup [118]. W zależności od stopnia okracenia wyróżnia się:

- półkręty
- całokręty

W *półkrętach*, pomiędzy kolejnymi wątkami może wystąpić tylko jedno okracenie nitki osnowy. Natomiast w *całokrętach*, muszą wystąpić co najmniej dwa okracenia [118]. Na rys. 2.160.a. przedstawiony został sposób okracania nitki osnowy wokół siebie w półkręcie, a na rys. 2.160.b. – w całokręcie.



Rys. 2.160 – sposób skręcania nitki osnowy w splotach gazejskich:
a). półkręt
b). całokręt
Opracowano na podstawie [118]

Zakres stosowania tkanin gazejskich jest obecnie znacznie ograniczony, ze względu na znaczną czaso- i pracochłonność ich wykonywania. W tkaninach odzieżowych występują głównie w krajkach tkanin produkowanych na niektórych krosnach beczółenkowych¹⁾. W zastosowaniach technicznych są stosowane do wyrobu niektórych tkanin filtracyjnych oraz gazy młyńskiej i opatrunkowej.

2.6.4. Tkaniny kompozytowe (laminowane)

Tkaniny kompozytowe (nazywane też *laminowanymi*) pojawiły się w połowie lat osiemdziesiątych XX w. Wtedy, w żeglarskim sportowym o najwyższej skali trudności, pojawiło się zapotrzebowanie na nowe materiały do wykonywania żagli. Wymagania jakie przed nimi stawiano, to [32]:

- zwiększona wytrzymałość na rozciąganie
- zwiększona odporność na ścieranie
- zwiększona odporność na rozrywanie
- stabilność wymiarowa, tj. zmniejszona rozciągliwość pod wpływem długotrwałego działania obciążenia
- zwiększona stabilność profilu wykonanego żagla
- zmniejszony ciężar jednostkowy tkaniny

Dzięki zastosowaniu metod produkcji podobnych jak przy wykonywaniu innych wyrobów kompozytowych, możliwe było uzyskanie tkanin spełniających te wymogi. Ponadto, możliwe stało się produkowanie tkanin o właściwościach zróżnicowanych kierunkowo, dostosowanych do przewidywanego rozkładu sił pod wpływem obciążenia, a także wyrobów nie płaskich, tworzących w przestrzeni zadane powierzchnie.

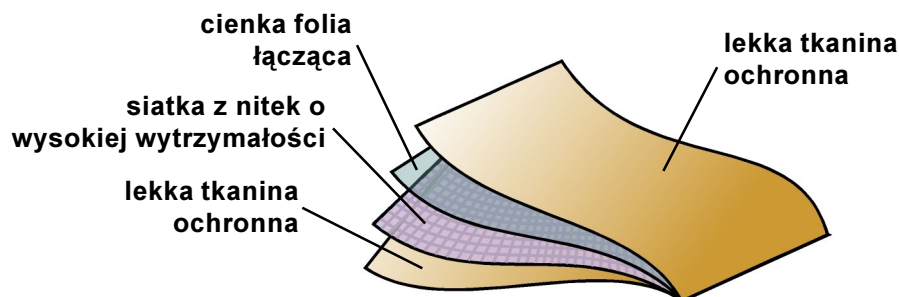
ang. composite cloth
laminated cloth

Wprowadzenie do użycia tkanin kompozytowych było poprzedzone rozwojem zastosowań włókien chemicznych do produkcji tkanin żeglarskich. Najwcześniej zastosowano nylon, jednak jego przydatność okazała się ograniczona, ze względu na znaczne wydłużenie oraz absorpcję wody. Następnym włóknem, które zastosowano do tego celu był poliester, głównie Dacron firmy DuPont. Jest on stosowany z powodzeniem do dzisiaj. Dalszy rozwój tkanin żeglarskich skierował się w stronę kompozytów przede wszystkim ze względu na właściwą wszystkim wyrobom tkanym tendencję do wydłużania się na skutek rozprostowywania pofalowanych nitki, której nie wykazują kompozyty [96]. Ponadto, osiągnięcia inżynierii materiałowej w innych dziedzinach stwarzały nadzieję na uzyskanie wyrobów o cechach lepiej dostosowanych do indywidualnych potrzeb. Najwcześniej do wykonywania tkanin kompozytowych zaczęto stosować nitki z włókien aramidowych. Później pojawiły się takie włókna jak Pentex i Spectra. Włókna węglowe zaczęto stosować w połowie lat dziewięćdziesiątych XX w. W ostatnich latach tej dekady wprowadzone zostały włókna Vectran i Zylon.

¹⁾ Metody produkcji tkanin omówiono w pkt 2.6.7

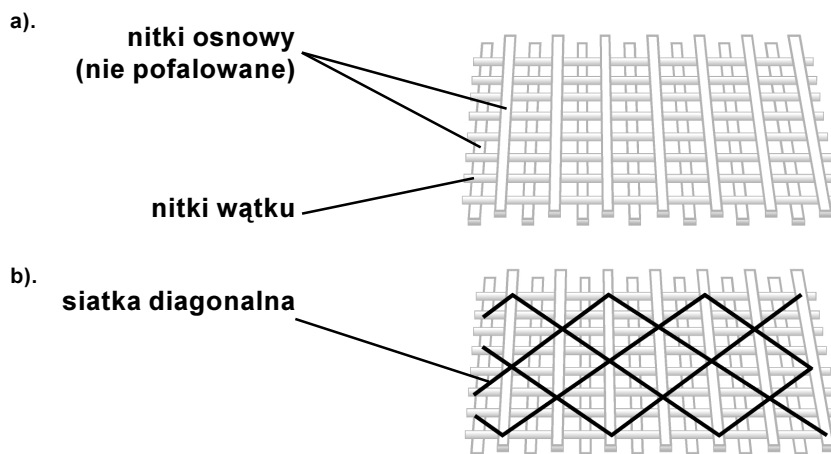
Podstawowym zastosowaniem tkanin kompozytowych jest do dzisiaj produkcja żagli. Wysoka cena stanowi obecnie wciąż przeszkodę przy zastosowaniach w innych dziedzinach, zwłaszcza takich jak budownictwo, gdzie większość obiektów, w których stosowane są tkaniny, cechuje duża powierzchnia [96].

Budowa tkanin kompozytowych | Tkaniny kompozytowe charakteryzują się budową wielowarstwową. Na rys. 2.161 przedstawiony jest podstawowy schemat budowy takiej tkaniny.



Rys. 2.161 – schemat budowy tkanin laminowanych i kompozytowych. Opracowano na podstawie [96]

Głównym elementem tkaniny kompozytywnej jest *siatka*. Jest ona wykonywana najczęściej z nitek na bazie włókien o wysokiej wytrzymałości, takich jak: Kevlar¹⁾, Twaron, Spectra, Pentex, Vectran, Zylon i włókna węglowe, często mieszanych ze sobą w różnych proporcjach [32]. W siatce, nitki tworzące warstwy osnowy i wтку (właściwie *wypełnienia*) nie są przeplecione ale ułożone bezpośrednio jedna na drugiej. Dzięki temu nitki nie są *pofalowane*, a przez to nie następuje wydłużenie tkaniny na skutek ich rozprostowywania pod działaniem obciążenia. Niekiedy, w warstwie tej umieszczane są dodatkowe nitki w postaci siatki o układzie *diagonalnym*. Umożliwiają one przenoszenie sił działających w kierunkach innych niż nitki siatki podstawowej, zapobiegają powstawaniu zmarszczek oraz zwiększają stabilność położenia nitek podstawowych. Rysunek 2.162 przedstawia typową budowę siatki stanowiącej warstwę tkaniny kompozytywnej [2].



Rys. 2.162 – schemat budowy siatki z włókien stanowiącej warstwę tkaniny kompozytywnej:
a). bez siatki diagonalnej
b). z siatką diagonalną
Opracowano na podstawie [2]

W zależności od potrzeb, ilość warstw siatek z nitek o wysokiej wytrzymałości może być różna. Poszczególne warstwy mogą być względem siebie obrócone o pewien kąt. W poszczególnych warstwach mogą być stosowane włókna z różnych materiałów. Możliwe jest również stosowanie włókien różnych rodzajów w tej samej warstwie, w zależności od jej usytuowania w gotowym wyrobie [8].

Folia łącząca umożliwia stabilizację siatki podstawowej, oraz łączy ją z pozostałymi warstwami. Zapewnia ona szczelność powłoki. Najczęściej stosowane są folie poliestrowe - Mylar i Tedlar. W zależności od technologii wykonywania tkaniny mogą one być stosowane jako gotowy wyrób z powłoką

ang. *film*

¹⁾ Firma DuPont wyprodukowała specjalną odmianę Kevlaru, o nazwie Kevlar Edge, opracowaną specjalnie do wyrobu żagli. Właściwości wytrzymałościowe tej odmiany są bardzo zbliżone (nieco wyższe) do Kevlaru 49, wydłużenie przy zerwaniu – dwukrotnie większe (3.0 %). Jest ona o ok. 30 % droższa od Kevlaru 49.

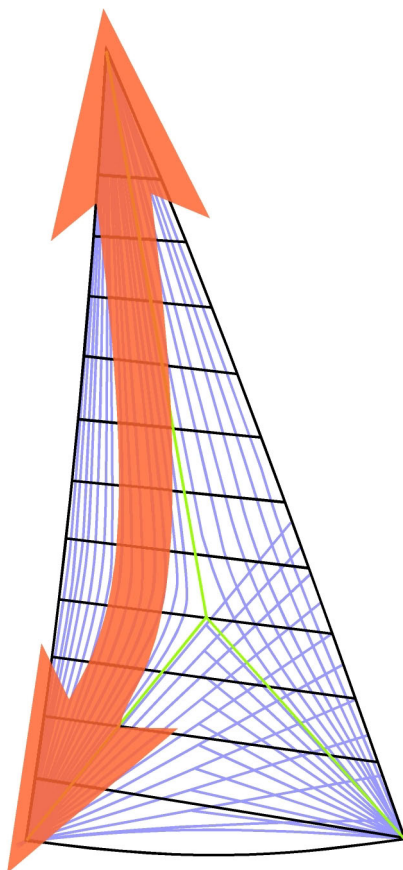
adhezyjną, na którą nakłada się siatkę z włókien lub w postaci płynnej, poprzez zanurzenie w niej siatki ustabilizowanej innymi metodami i obróbkę w autoklawie. Często, nawarstwieniu folii umieszczane są dodatkowe nitki aramidowe, zapobiegające rozdieraniu tkaniny. Warstwa ta spełnia dodatkowo funkcję ochronną przed promieniowaniem UV. Ponieważ większość włókien o wysokiej wytrzymałości jest w jakimś stopniu wrażliwa na niszczące działanie tego promieniowania, konieczne jest stosowanie odpowiednich filtrów ochronnych. Są one wprowadzane w postaci pigmentów do folii. Niemniej jednak, ochrona ta nie jest jeszcze obecnie zupełna i wszystkie tkaniny kompozytowe w pewnym stopniu podlegają degradacji pod wpływem promieniowania UV [107] [8].

Lekka tkanina ochronna jest stosowana jako warstwa zewnętrzna, głównie dla ochrony przed nadmiernym ścieraniem. Najczęściej jest to tkanina poliestrowa, chociaż stosowany jest również Pentex i Spectra. Warstwa ta nie zawsze jest stosowana, gdyż zwiększa całkowity ciężar tkaniny [32] [2].

ang. *taffeta*

Zbrojenie tkanin kompozytowych | Tkaniny kompozytowe są najczęściej wykonywane indywidualnie, dla konkretnych zastosowań, a nie jako półprodukty dla nieokreślonego odbiorcy. Z tego względu, ponieważ w takich sytuacjach znany jest kształt i sposób obciążenia przyszłego wyrobu, możliwe jest dalsze, indywidualne dostosowywanie cech tkaniny.

Częściowo ma to miejsce już podczas doboru układu warstw i materiału siatek. Jednak to nie przypisuje jeszcze ostatecznie tkaniny do wyrobu o określonym kształcie. Najważniejszym zabiegiem „indywidualizującym” tkaninę kompozytową jest zastosowanie w niej dodatkowego zbrojenia, w układzie odpowiadającym przewidywanemu rozkładowi sił wewnętrznych. Umożliwia to daleko idący wzrost efektywności wykorzystania materiału. Jako zbrojenie stosuje się nitki z włókien o wysokiej wytrzymałości – bardzo często są to włókna węglowe lub Spectra. Na rys. 2.163 przedstawiono sposób rozmieszczenia nitek zbrojących tkaninę kompozytową w przykładowym żaglu, a na rys. 2.164 – widok zbrojonej tkaniny kompozytowej z włókien aramidowych [32].



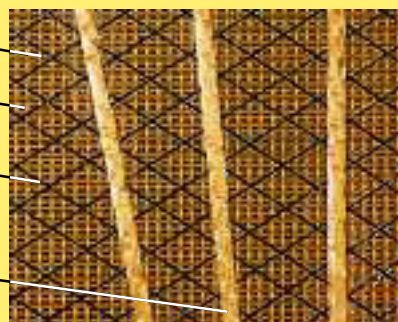
Rys. 2.163 – rozmieszczenie dodatkowych nitek „zbrojących” tkaninę kompozytową, zgodnie z przewidywanym rozkładem sił, na przykładzie żagla. Opracowano na podstawie [32]

siatka podstawowa

folia łącząca

diagonalna siatka z włókien

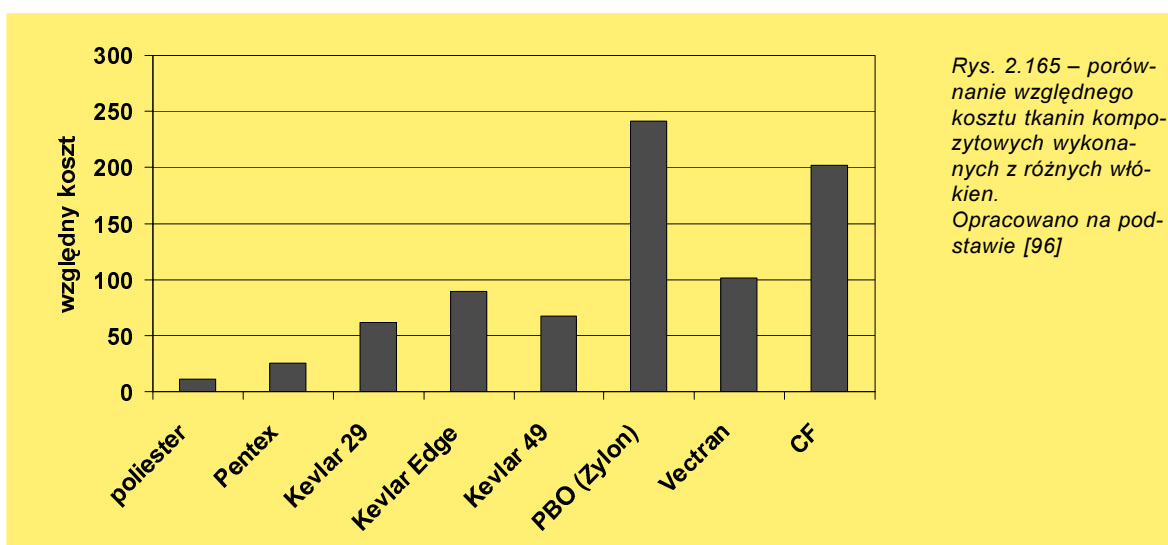
dodatkowe wiązki włókien układane wzdłuż kierunków działania sił



Rys. 2.164 – tkanina kompozytowa wzmacniana dodatkowymi nitkami rozmieszczonymi wzdłuż przewidywanych kierunków działania sił wewnętrznych. Opracowano na podstawie [32]

Przestrzenne tkaniny kompozytowe | Niektóre rozwiązania technologiczne wykonywania tkanin kompozytowych pozwalają na uzyskanie, już podczas procesu produkcji, powierzchni o dwukierunkowej krzywiznie. Możliwe jest również zachowanie ciągłości nitek zbrojących, układanych wzdłuż kierunków działania sił, na całej powierzchni wyrobu. Niektóre spośród najważniejszych systemów produkcyjnych tkanin kompozytowych omówiono w pkt. 2.6.5.

Właściwości tkanin kompozytowych | Zasadniczo wszystkie, dostępne na rynku tkaniny kompozytowe są dostarczane w formie gotowych wyrobów, tj. niemal wyłącznie żagli. Zarówno rodzaj użytych włókien, jak i ilość i orientacja warstw oraz układ nitek zbrojących są dostosowane do geometrii i wielkości wyrobu oraz jego przeznaczenia. Producenci nie udostępniają danych na temat właściwości mechanicznych samych tkanin lecz jedynie wyrobów z nich. Z tego względu nie załączono w niniejszej pracy szczegółowych danych na ten temat. Na rys. 2.165 przedstawiono porównanie względnego kosztu tkanin kompozytowych wykonanych z różnych włókien.

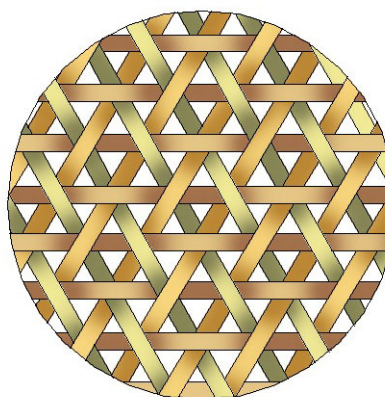


2.6.5. Tkaniny trójosiowe

Jednym z ostatnich osiągnięć w dziedzinie wytwarzania tkanin technicznych jest produkcja tkanin trójosiowych. Powstają one poprzez przeplatanie trzech układów nitek, ułożonych względem siebie pod kątem 60° . Mogą być wykonywane z włókien naturalnych lub chemicznych, zarówno ciągłych jak i staplonych. Na rys. 2.166 schematyczny widok tkaniny trójosiowej.

Tkaniny trójosiowe, dzięki swojej szczególnej budowie, charakteryzują się wysoką, niemal izotropową wytrzymałością mechaniczną, oraz stabilnością wymiarową. Ponadto cechuje je wysoka odporność na rozrywanie i przecinanie oraz strzępienie i rozplatanie.

Tkaniny trójosiowe znajdują obecnie główne zastosowanie do wyrobu podłoży i zbrojenia do kompozytów oraz taśm przenośnikowych, a także w przemyśle obuwniczym i do wyrobu tkanin dekoracyjnych. Przewiduje się, że w najbliższym czasie znajdą one szerokie zastosowanie do wyrobu balonów, spadochronów, żagli oraz **konstrukcji pneumatycznych** [204].



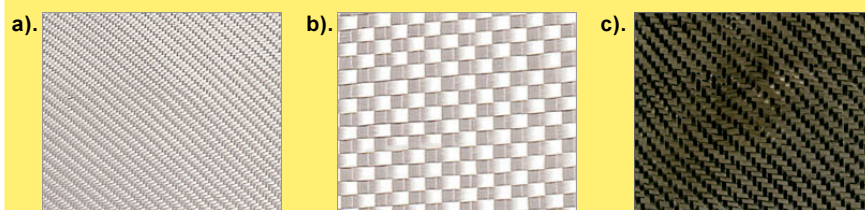
Rys. 2.166 – schematyczny widok tkaniny trójosiowej. Opracowano na podstawie [204].

2.6.6. Tkaniny z włókien nieorganicznych

Tkaniny z włókien szklanych | Z włókien szklanych wykonuje się takie wyroby włókiennicze jak tkaniny i maty oraz wyroby nietkane (o włóknach łączonych chemicznie lub mechanicznie).

Tkaniny – wykonywane z przędzy lub z rovingów – są stosowane jako izolacje elektryczne, zbrojenie kompozytów lub innych materiałów, jako tkaniny filtracyjne oraz do wykonywania powłok membranowych w budownictwie. Rysunek 2.167.a). przedstawia tkaninę z włókien szklanych o splocie skośnym, a rys. 2.167.b). – tkaninę z rovingu szklanego.

Do wykonywania tkanin stosowanych w konstrukcjach membranowych, używa się nitek o masie liniowej od ok. 1300 dtex do ponad 4000 dtex. Tkaniny mają zazwyczaj splot płócienny i masę powierzchniową (przed nałożeniem polimerowej warstwy pokrycia) ok. $300 \div 650 \text{ g/m}^2$.



Rys. 2.167 – przykłady tkanin z włókien nieorganicznych:
a). tkanina szklana o splocie skośnym
b). tkanina z rovingu szklanego
c). tkanina z włókien węglowych o splocie skośnym
Ilustracje za [233]

Tkaniny z włókien węglowych | Włókna węglowe znajdują obecnie podstawowe zastosowanie jako jedna z faz składowych (zbrojenie) kompozytów o osnowie polimerowej. Najczęściej stosowane są w postaci tkanin, mat i filców, a czasami również pojedynczych filamentów. Przykład tkaniny z włókien węglowych o splocie skośnym przedstawia rys. 2.167.c).

Tkaniny kompozytowe wykonywane z włókien węglowych znajdują obecnie zastosowanie w żeglarskim sportowym, ale nie są stosowane w budownictwie. Przyczyną jest zarówno ich bardzo wysoka cena, jak i pewne ograniczenia estetyczne (niska przepuszczalność światła)



Rys. 2.168¹⁾ – ściany osłonowe wykonane z tkaniny z drutu ze stali nierdzewnej na stacji metra Erasmus w Brukseli (proj. Ph. Sammyn)

¹⁾ Fotografia autora.

Tkaniny metalowe | Kwestia, czy wyroby tkane z drutów metalowych mogą być uważane za tkaniny, wydaje się być problemem czysto semantycznym [204]. Z jednej strony nie są to wyroby wykonywane standardowo przez przemysł tekstylny, z drugiej zaś — w procesie ich produkcji są stosowane takie same procesy technologiczne, jak przy produkcji wszelkich innych tkanin.

Z drutów wykonywane są trzy rodzaje wyrobów włókienniczych: tkaniny, sieci węzłowe i przędziny. Wyroby te wykonuje się z drutów stalowych: białych, ocynkowanych, pokrytych cyną lub nierdzewnych oraz z drutów miedzianych, mosiężnych, z brązu, z niklu a także — dla celów specjalnych — z metali szlachetnych.

Produkowane tkaniny najczęściej mają splot płócienny lub skośny. Na końcową postać wyrobu, oprócz splotu, wpływ ma też średnica i kształt przekroju poprzecznego drutu (np. okrągły lub kwadratowy), a także liczność i podziałka drutów w tkaninie.

Podstawowe obszary zastosowań tkanin metalowych to wyroby filtracyjne, sita, tkaniny do zbrojenia wyrobów gumowych itp. W budownictwie zakres stosowania tych wyrobów jest bardzo ograniczony. Jednym z przykładów może być siatka typu Rabitza. W ostatnim okresie pojawiło się jednak kilka zastosowań w związku z konstrukcjami membranowymi, w których tkanina metalowa jest użyta w sposób podobny jak tkanina z włókien organicznych. Przykładem jest konstrukcja ścian osłonowych na stacji metra Erasmus, w Brukseli, gdzie zastosowano tkaninę z drutu ze stali nierdzewnej, ukształtowaną na powierzchni stożkowej, rys. 2.168. Podobne rozwiązanie zastosowano też w elementach osłonowych schodów stadionu olimpijskiego w Atenach.

2.6.7. Produkcja tkanin

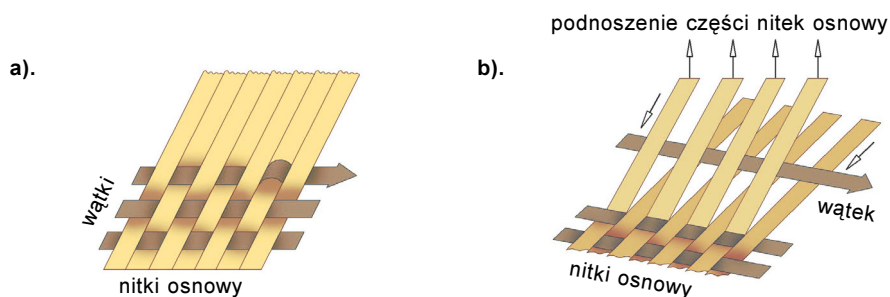
Produkcja tkanin dwuosiowych (zwykłych) | Tkaniny płaskie są od bardzo dawna wykonywane metodą przesmykową, rys. 2.169.b). Fazy wykonywania tkaniny tą metodą przedstawiono na rys. 2.170. W oparciu o metodę przesmykową są budowane współczesne krosna, których ogólny schemat budowy przedstawia rys. 2.171.

Produkcja tkaniny przebiega w następującej kolejności. Nitki osnowy są odwijane z wału i przeciągane w określonym porządku przez dwa poprzeczne pręty (krzyżulec). Dalej osnowa jest przewleczona przez struny z oczkami znajdujące się w sztywnych ramach — nicielnicach. Podniesienie lub opuszczenie określonej nicielnicy przemieszcza w płaszczyźnie pionowej nitki, które będą przeplatać tak samo. Następnie osnowa jest przewlekana przez szczeliny płaskiego grzebienia zwanego płochą. Wątek jest wprowadzany za pomocą czółenka lub w inny sposób w przesmyk. Wytworzona tkanina jest przesuwana wokół przedpiernia i nawijana na wał tkaninowy.

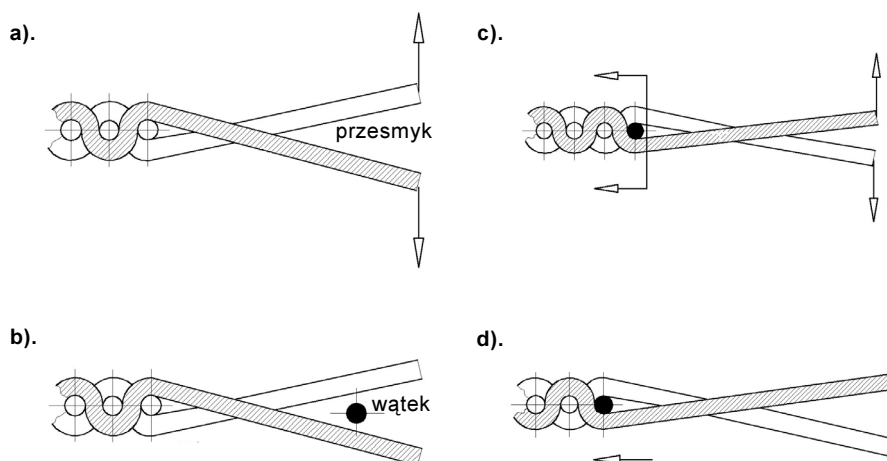
Klasycznym sposobem wprowadzania wątku do przesmyku (wątkowania) jest przerzucenie czółenka, na którym jest nawinięta nitka wątkowa. Jest to jednocześnie jego główna wada technologiczna, gdyż operacja ta powoduje bardzo duże obciążenia dynamiczne mechanizmów krosna, ogranicza prędkość tkania oraz jest przyczyną zakłóceń ciągłości procesu, ze względu na częste zrywanie silnie obciążonych nitek [118].

Z tego względu, rozwinięto cały szereg konstrukcji krosien bezczółenkowych: chwytakowych, dyszowych, pneumatycznych i rapierowych. Pozwalają one zwiększyć wydajność wątkowania około 2 – 3 razy oraz poprawić jakość tkaniny. Opracowywane są również konstrukcje krosien wielopresmykowych, w których w każdym cyklu otwartych zostaje otwartych wiele przesuniętych względem siebie przesmyków i wprowadzanych jest wiele wątków. Konstrukcje te są jednak jeszcze niedoskonałe.

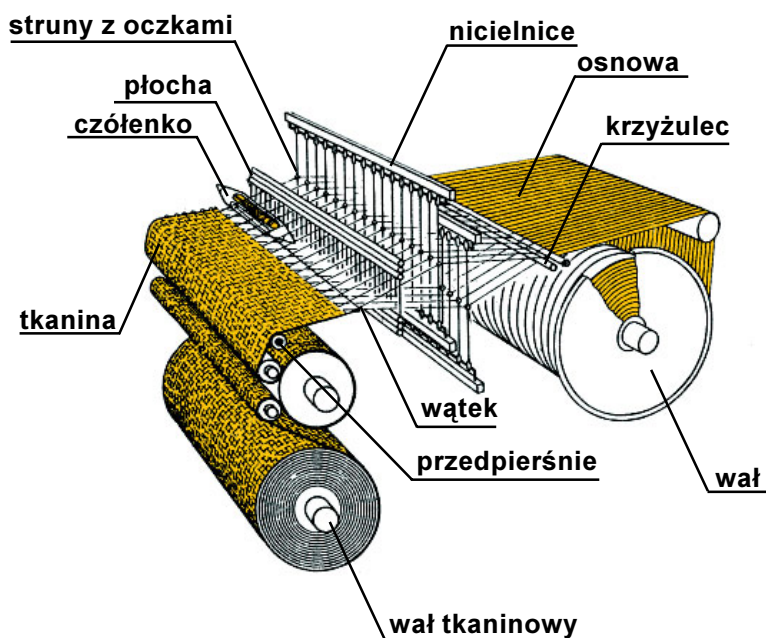
Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym są krosna okrągłe, służące do wykonywania tkanin o obwodzie zamkniętym (cylindrycznych), rys. 2.177. Są to wyroby przeznaczone przede wszystkim do celów przemysłowych.



Rys. 2.169 – zasada wykonywania tkanin metodą: a). przeplatania a). przesmykową Opracowano na podstawie [118]



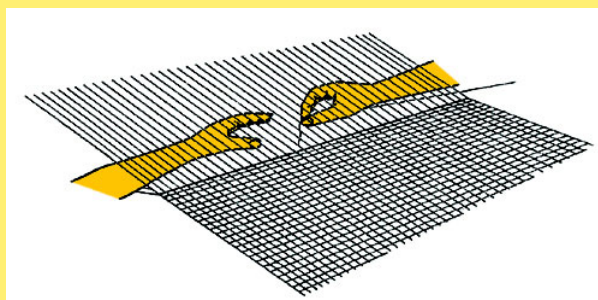
Rys. 2.170 – fazy wykonywania tkaniny metodą przesmykową: a). otwieranie przesmyku b). wprowadzanie włókna c). zamknięcie przesmyku, tworzenie następnego i dobijanie włókna do krawędzi tkaniny d). odbiór nowo utworzonego elementu tkaniny i zasilanie osnową Opracowano na podstawie [118]



Rys. 2.171 – budowa krosna i przebieg procesu tkania Opracowano na podstawie [118].

Produkcja tkanin trójosiowych | Produkcję tkanin trójosiowych rozpoczęto w latach osiemdziesiątych XX w. Są one wykonywane na krosnach o budowie podobnej do budowy krosna okrągłego. Jedynym producentem takich urządzeń jest firma Barber-Colman (USA) [204], rys. 2.178. Umożliwiają one produkcję tkanin o szerokości 1600 mm i 200 mm.

Tkactwo jest jednym z najstarszych rzemiosł, uprawianych przez człowieka. Umiejętność ręcznego tkania była znana od okresu neolitu, 12 000 lat temu. Jednak już wcześniej stosowano analogiczną metodę przeplatania gałęzi i łodyg roślin, przy wykonywaniu koszyków, osłon, ogrodzeń itp. Wynalazek krosna jest uważany za jedno z tych osiągnięć pierwotnego człowieka, które przesądziło o dalszym rozwoju cywilizacyjnym ludzkości. Pierwsze warsztaty tkackie pojawiły się około 5000 lat p.n.e. Pierwsze krosno było prawdopodobnie zwykłą, równoległą do ziemi gałęzią, na której zawieszano obciążone u dołu nitki osnowy, między którymi przeplatano wątek. Później gałęzie zastąpiono drewnianą ramą, którą następnie została ustawiona poziomo. Początkowo tkanie odbywało się niezwykle pracochłonną metodą przeplatania, rys. 2.169.a). Później została ona zastąpiona bardziej wydajną metodą przesmykową, rys. 2.169.b). W metodzie tej zamiast mozolnego przeplatania unosi się te nitki osnowy, które mają się znaleźć nad wątkiem (pokrycia osnowowe). Wskutek tego, pomiędzy dwiema płaszczyznami nitek powstaje wolna przestrzeń (przesmyk), która umożliwia wprowadzenie jednym ruchem wątku. Następnie wątek jest „dobijany” do poprzedniego na żadaną odległość i wtedy zamyka się przesmyk i tworzy następny, rys. 2.170. Najstarsza technika przewlekania wątku, czyli wątkowania, polegała na wciągnięciu wątku do przesmyku jedną ręką, a drugą z przeciwnej strony przejmowano go, aby następnie przeciągnąć poza osnowę, rys. 2.172. Później udoskonalono tę technikę poprzez zastosowanie czółenka, czyli niewielkiego, sztywnego wałka z nawiniętym wątkiem, które przetrzucano w przesmyku z jednej strony krosna na drugą. Wynalazek metody przesmykowej i czółenka jest przypisywany starożytnym Egipcjanom, rys. 2.173. Zasada metody przesmykowej jest do dzisiaj podstawą konstrukcji krosien [118].



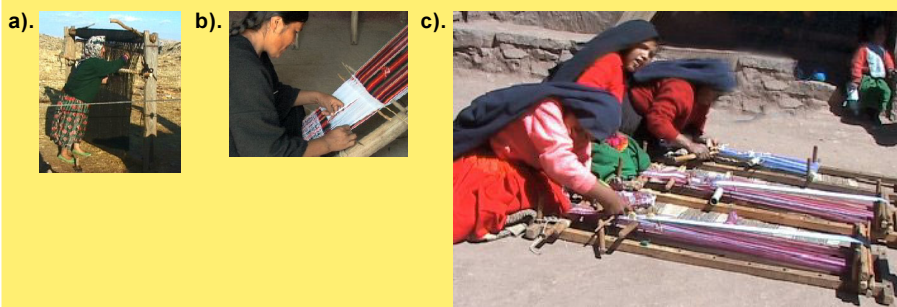
Rys. 2.172 – metoda wątkowania (przewlekania wątku) przez podawanie go „z ręki do ręki”
Opracowano na podstawie [118]

Rodzaje krosien używanych przez starożytnych Egipcjan mogą być zrekonstruowane na podstawie malowideł naściennych w grobach pochodzących z okresu Średniego Państwa oraz znajdujących w grobach miniaturowych modeli warsztatów tkackich. Najstarsze było prawdopodobnie krosno ustawione poziomo, przymocowane do ziemi kołkami, aby umożliwić naciąganie tkaniny. Około roku 1650 – 1500 p.n.e., wprowadzono krosno stojące, o pionowo ustawionych nitkach osnowy, obciążonych dla uzyskania naciągu, rys. 2.173. W okresie rzymskim pojawiło się krosno o napędzie nożnym, które umożliwiło wydajną produkcję tkanin o złożonych wzorach.



Rys. 2.173¹⁾ – warsztat tkacki w starożytnym Egipcie. Rysunek na podstawie malowidła naściennego w grobowcu z okresu Średniego Państwa.

Krosna o konstrukcji niemal identycznej jak konstrukcja krosien przed kilkoma tysiącami lat, są do dzisiaj używane wśród wielu ludów koczowniczych. Dotyczy to zarówno krosien ustawionych poziomo, jak i pionowo, rys. 2.174.



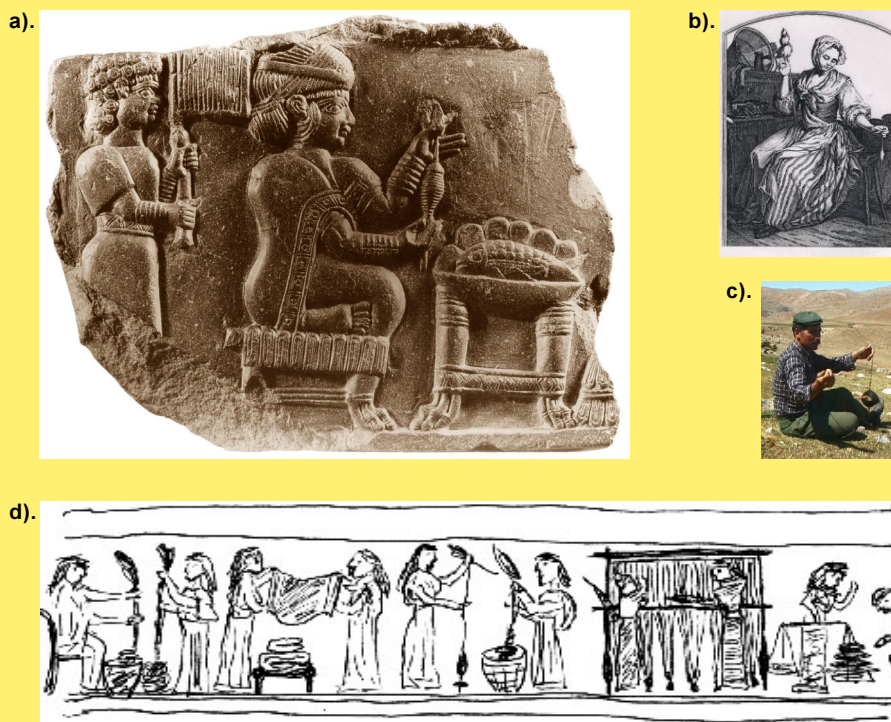
Rys. 2.174 – proste konstrukcje krosien używane współcześnie przez koczownicze ludy Bliskiego Wschodu:
a). ustawione pionowo, z obciążonymi nitkami osnowy
b). pochylone
c). ułożone poziomo
Ilustracje za [233]

¹⁾ Ilustracja: Department of Anthropology, California Academy of Sciences, San Francisco, za [233].

Aby możliwe było przekształcenie pęku włókien w tkaninę, konieczne są dwie zasadnicze operacje: przędzenie, pozwalające zamienić luźne włókna w ciągłą i odpowiednio wytrzymałą przędzę oraz tkanie, przekształcające przędzę w tkaninę. Przez stulecia zarówno przędzenie jak i tkanie było tradycyjnie rzemiosłem wykonywanym w domu lub w wiejskich warsztatach – tkanie przez mężczyzn a przędzenie przez kobiety (ang. określenie kobiety niezamężnej, starej panny – „spinstre” pochodzi od słowa „spinning” – przędzenie). Impulsem do zasadniczej reorganizacji przemysłu tekstylnego w Europie było pojawienie się na początku XVIII w. stosunkowo tanich, wysokiej jakości tekstyliów pochodzących z Indii oraz Dalekiego Wschodu, które zaczęły wypierać wyroby europejskie z międzynarodowych rynków. Powstała duża presja na wzrost krajowej produkcji oraz obniżenie jej kosztów poprzez zastępowanie pracy ręcznej czynnościami zmechanizowanymi. Zaowocowało to dużą ilością wynalazków, które powstały w tym okresie. Większość z nich miała istotny wpływ nie tylko na przemysł tekstylny, ale również na inne dziedziny przemysłu.

Przędzenie

Wytwarzanie przędzy z włókien odcinkowych, a większość włókien naturalnych (poza jedwabiem) to włókna odcinkowe, jest najbardziej pracochłonnym procesem w technologii włókienniczej [118]. Najstarszym sposobem wytwarzania przędzy jest skręcanie włókien, równie stare jak samo tkactwo¹⁾. Najwcześniej prawdopodobnie przędzono wełnę. Początkowo była to czynność wykonywana wyłącznie ręcznie. Skręcano po kilka włókien z runa, tworząc nić zwisaną w kłębek. Pierwszym prostym przyrządem ułatwiającym przędzenie było wrzeciono ręczne, czyli kądziel. Znało je już w krajach starożytnego Wschodu, rys. 2.175.a). i stosowane później przez wiele wieków, rys. 2.175.b), a wśród wielu koczowniczych ludów – również w czasach obecnych, rys. 2.175.c). W starożytnym Rzymie przygotowaniem wełny do przędzenia zajmowali się wyspecjalizowani rzemieślnicy, nazywani „lanarii pectinari”. Wyczesywali oni zebraną wełnę, w końcowej fazie wykonując to palcami [115]. Przygotowanie włókien lnianych do barwienia i przędzenia jest opisane przez Pliniusza²⁾. Opisuje on również proces przygotowania jedwabiu³⁾ i bawełny⁴⁾ oraz produkcję filcu⁵⁾, rys. 2.175.d).



Rys. 2.175 – przędzenie z zastosowaniem wrzeciona:

- a). kobieta elamicka podczas przędzenia – płaskorzeźba z Suzy, obecnie w Luwrze; ilustracja za [91]
- b). „Prząśniczka”⁴⁾, drzeworyt z XVIII w.
- c). przędzenie wełny za pomocą wrzeciona, wśród współczesnych ludów koczowniczych; [233]
- d). rekonstrukcja ilustracji z wazy ateńskiej (ok. 560 p.n.e.), przedstawia kobiety przygotowujące przędzę, składające tkaninę, przędące i tkające na krośnie pionowym z obciążonymi nitkami osnowy; ilustracja za [115]

Następnym udoskonaleniem procesu przędzenia był wynalazek kołowrotka. Nie wyeliminował on jednak całkowicie wrzeciona, które – ze względu na jego poręczność – było używane równolegle, choć w dużo mniejszym zakresie. Kołowrotek ręczny był stosowany prawdopodobnie już przez Egipcjan, ok. 1500 – 1400 p.n.e. Jednakże nie był znany Rzymianom, którzy używali kądzieli i wrzeciona ręcznego [29]. Najwcześniejsza europejska bezpośrednia wzmianka o kołowrotku jest zamieszczona w ustawach o cechach w Spirze, w Niemczech i pochodzi z około 1280 roku [220]. Był to kołowrotek o napędzie ręcznym. Niektórzy badacze uważają, że kołowrotek powstał w Chinach i wywodzi się od maszyny do obróbki włókien jedwabnych. Maszyny takie z pewnością istniały od samego początku istnienia przemysłu jedwabniczego. Po raz pierwszy są wymienione w księdze pochodzącej z roku 121 n.e., a ich wygląd przedstawiono po raz pierwszy w księgach chińskich wydanych w 1237 r. Należące do tej grupy nawijarki były również znane w Europie. Są one np. przedstawione na witrażach katedry w Chartres, datowanych na lata 1240 – 1245 oraz w „Księdze rzemiosł” z Ypres, pochodzącej z 1310 r. Nawijarki przekształciły się w Chinach w kołowrotki prawdopodobnie pod koniec XI w. Być może informacje o tych urządzeniach przywieźli do Europy włoscy podróżnicy i kupcy, którzy odwiedzali Chiny w czasach panowania dynastii mongolskiej [220]. Kołowrotek o napędzie nożnym skonstruował w 1530 r. Jürgens z Norymbergi.

¹⁾ Plinius Caius Secundus, *Historia Naturalis*, XI 11

²⁾ „...łączą oni [nitki wysnute przez jedwabniki] w runo, czeszą je i przędą...”, op.cit. XI 77, przekład Ireny i Tadeusza Zielińskich, Ossolineum, Wrocław 1980

³⁾ „...drzewa, które noszą wełnę...” oraz „...kulki puchu, z których wykonuje się drogocenny materiał na szaty...”, ibidem, XII 38

⁴⁾ ibidem, XXIV 3

⁵⁾ Drzeworyt ze zbiorów Le Musée du Textile et du Peigne en Corne, Lavelanet, Francja. Ilustracja za [233].

Pierwsze urządzenie do mechanicznego przędzenia opracowali w 1737 r. (patent uzyskali w roku 1738) Anglicy John Wyatt i Lewis Paul. Była to przędzarka jednowrzecionowa połączona z rozciągarką, o napędzie ręcznym. Urządzenie to nie znalazło jednak żadnego zastosowania praktycznego.

W 1763 r. tkacz bawełny z Lancashire, James Hargreaves (1720 – 1778), skonstruował pierwszą przydatną w praktyce przędzarkę do bawełny – słynną „Spinning Jenny”, rys. 2.176. Wg tradycji, potrafił on pewnego dnia kołowrotek, a obracające się przez pewien czas po uderzeniu koło zainspirowało go. Pierwsze wykonane przez niego urządzenie było napędzane ręcznie i działało w sposób nieciągły, wykonując przędzenie i obrót w dwóch odrębnych fazach. „Spinning Jenny” była maszyną wykorzystywaną w domu, do produkcji przędzy o małym skręcie, nadającej się do zastosowania jedynie jako wątek w tkaninie. Jej najważniejszą zaletą była możliwość przędzenia jednocześnie wielu nitok (była to przędzarka wielowrzecionowa) – początkowo ośmiu. W roku 1767, Hargreaves wykonał przędzarkę o 16 wrzecionach. Mogła ona wyprodukować w tym samym czasie trzykrotnie więcej przędzy niż robotnik pracujący ręcznie. Później budowano tego typu przędzarki wyposażone w od 12 do 120 wrzecion. W czasie zamieszek w 1779 r., bojący się o miejsca pracy robotnicy sforsowali drzwi do domu Hargreavesa i zniszczyli jego maszyny. Nie zatrzymało to jednak ich produkcji, a dzięki prostej konstrukcji i niskiej cenie szybko się rozpowszechniły. Pod koniec XVIII w. w Anglii pracowało już około dwudziestu tysięcy maszyn typu „Spinning Jenny” [29].



Rys. 2.176 – „Spinning Jenny” – jeden z pierwszych egzemplarzy przędzarki skonstruowanej przez Jamesa Hargreavesa w 1763 r. Maszyna, pochodząca z 1770 r., znajduje się w Quarrybank Mill, w Styal, w Wielkiej Brytanii. Ilustracja za [29]

Pomimo sukcesu, jaki odniosła przędzarka Hargreavesa, minęło jeszcze kilka lat, zanim pojawiła się maszyna nadająca się do zastosowania przemysłowego. Jej wynalazcą jest Richard Arkwright (1732 – 1792), z Preston w Anglii. Pochodził z biednej rodziny, był trzynastym dzieckiem. Wyuczył się zawodu fryzjera i perukarza. Pracując wraz z przyjaciółmi – kowalem i zegarmistrzem, opracował swoją wersję przędzarki do bawełny. Była to pierwsza przędzarka pracująca w sposób ciągły. Arkwright uzyskał na nią w roku 1769 angielski patent nr 931. W roku 1775, zastosował do jej napędu koło wodne (stąd ang. nazwa urządzenia – „water frame”). Była to przędzarka skrzydełkowa. W urządzeniu tym włókna były przeciągane przez pary wałków, a następnie skręcane w przędzę „skrzydełkiem” zainstalowanym na każdym wrzecionie i nawijane na szpulę zaopatrzoną w dwustronny kołnierz. Początkowo maszyna była wykonywana z drewna, a następnie ze stali. W tej wersji została nazwana „Spinning Throstle” – Przędzący Drozd, ponieważ w czasie pracy wydawała dźwięki podobne do śpiewu tego ptaka.

Nowe maszyny, które bardzo przyspieszyły proces przędzenia, wymagały również wprowadzenia usprawnień we wcześniejszych fazach produkcji. Najważniejsze było usprawnienie procesu wstępnego oczyszczenia, rozluźnienia, wymieszania, wyprostowania i paralelizacji włókien, czyli procesów zgrzeblenia (gręplowania) i czesania włókien. W ich wyniku włókna są formowane w runo, a następnie w taśmę lub w niedoprzęd, będące surowcem w procesie przędzenia. Czynności te wykonywane były początkowo ręcznie za pomocą zgrzebła. Pierwsza mechaniczna zgrzeblarka została opatentowana już w 1748 r. przez Lewis Paula i D. Bourne’a. Nie działało ono jednak zbyt dobrze. Richard Arkwright, pracując wspólnie ze swoim kolegą Coniah Wood’em, udoskonalił je i wyposażył w napęd korbowy, uzyskując 16 grudnia 1775 r. patent na „urządzenie do mechanicznego przygotowywania materiału do przędzenia”, nazwane „Doffer Comb”. Czesarka do wełny została skonstruowana w 1789 r. przez wynalazcę krosna mechanicznego – Edwarda Cartwrighta, a czesarka bawełny – przez Joshuę (Josué) Heilmanna, urodzonego w 1706 r. w Alzacji. Po krótkiej praktyce w przedziałni bawełny w Paryżu, założył on własny zakład w Alt-tham, w którym w 1818 r. działało 10 000 wrzecion. Skonstruowana przez niego w 1845 r. czesarka bawełny, w niezmienionej co do zasady formie przetrwała do dzisiaj [29].

Przędzaczowi angielskiemu Samuelowi Cromptonowi (1753 – 1827), udało się połączyć najlepsze cechy „Spinning Jenny” i przędzarki Arkwrighta. Wynalazł on w 1779 r. wielowrzecionową przędzarkę wózkową (mulejową), nazwaną od nazwiska twórcy „Crompton Mule”. Przędzarka ta mechanicznie formowała i naciągała włókna, dzięki czemu umożliwiała produkcję przędzy mocnej i jednorodnej oraz znacznie cieńszej niż produkowane na wcześniejszych urządzeniach. Była ona udoskonalana później przez wielu ludzi tak, że ok. roku 1790, wózek był wyposażony w 150 wrzecion. Do obsługi tego urządzenia potrzebny był bardzo silny i zręczny pracownik, zdolny operować wózkiem z odpowiednią prędkością, kompensując różnice naciągu i długości przędzy. W roku 1790, Williamowi Kelly udało się zastosować do przędzarki wózkowej napęd mechaniczny, chociaż nawijanie nadal odbywało się ręcznie. Jeden robotnik mógł teraz obsługiwać dwie przędzarki wyposażone w 400 wrzecion. Richard Roberts, w 1830 r., zmechanizował również czynność nawijania przędzy, stosując mechanizm kwadrantowy, który umożliwiał regulację prędkości wrzeciona podczas nawijania. Zastosował on ponadto mimośrodowy wałek, który uruchamiał sprzęgła oraz drut napinający. Powstała samoczynna przędzarka wózkowa. Mogła ona produkować przędzę o różnej grubości i różnym skręcie, z włókien o różnej długości. Maszyna była wyposażona w 1200 wrzecion i miała 37 metrów długości. Maszyny tego typu, mimo że zbyt wolne dla współczesnych potrzeb, były stosowane w przemyśle włókienniczym aż do 1950 r. [29]. W 1829 r. J. Thorp skonstruował wysokowydajną przędzarkę obręczkową, na której przez długi czas zatrzymał się rozwój tych urządzeń. Francuz Philippe de Girard (1775 – 1845), w 1810 r., opracował metodę przędzenia lnu na mokro. Kolejny przełom nastąpił w drugiej połowie XX w., kiedy opracowano metody przędzenia bezwrzecionowego. Największe znaczenie praktyczne spośród nich mają metody: otwartego końca (ang. open end spinning), przędzenie samoskrętne, metoda bezskrętowa (klejenie), metoda owijania (oplatania), metoda wytwa-

rzania przędzy rdzeniowych. Najbardziej rozpowszechniona jest metoda otwartego końca, w której stosowane są różne sposoby przędzenia: pneumomechaniczny (rotorowy), pneumatyczny (wir stacjonarny - metoda opracowana w Instytucie Włókiennictwa w Łodzi), frykcyjny [118].

Tkanie

W roku 1733, angielski sukiennik z Bury, John Key (1704 – 1764), wynalazł metodę szybkiego przerzucania czółenka w krośnie, tzw. czółenko szybkobieżne. Trzy lata wcześniej, w 1730 r., uzyskał patent na skręcarkę do wytwarzania niedoprzędu z wełny czasankowej. Czółenko szybkobieżne Keya pozwoliło podwoić produkcję z jednego krosna. Wynalazek ten zaczęto stosować powszechnie w Anglii dopiero po roku 1763. Wynikało to z faktu, iż dostawy ręcznie wykonywanej przędzy były zbyt małe dla tych wysokowydajnych maszyn. Po zmechanizowaniu procesu produkcji przędzy, istniały już wszystkie elementy potrzebne do przekształcenia rzemiosła w przemysł. Zbiegło się to w czasie z pojawieniem się nowego rodzaju napędu, niezależniającego człowieka w dużym stopniu od sił przyrody wykorzystywanych w napędach wiatrakowych czy wodnych – napęd parowy.

Pierwsze urządzenie napędzane silnikiem parowym skonstruował w 1705 r. angielski wynalazca, z zawodu kowal Thomas Newcomen (1663 – 1729), wraz z J. Cowley'em. Była to pompa do usuwania wody z kopalni Huel Vor w Kornwalii, którą nazwano „pompą na ogień”. Jej napęd stanowił atmosferyczny silnik parowy (tłokowy). Urządzenie to, udoskonalone w 1720 r., było wykorzystywane przez ponad pół wieku, zaopatrując w wodę liczne miejscowości. W 1769 r. James Watt (1736 – 1819) wprowadził do silnika Newcomena kilka usprawnień, a w 1775 r. rozpoczął jego seryjną produkcję w pierwszej na świecie fabryce tych urządzeń, którą otworzył w Soho k. Birmingham, wraz z M. Boultonem. W 1782 r. powstała pierwsza maszyna parowa – silnik parowy dwustronnego działania. W 1788 r. Watt wyposażył go w odśrodkowy regulator prędkości obrotowej. Do 1800 r. wytwórnia Watta wyprodukowała 250 silników parowych. Maszyną parową Watta wykorzystano w przemyśle tekstylnym już w 1785 r., dzięki anglikańskiemu duchownemu z Bolton, Edwardowi Cartwrightowi (1743 – 1823), który zastosował ją w skonstruowanym przez siebie pierwszym krośnie mechanicznym. Wkrótce maszyny parowe zaczęto stosować powszechnie do napędu urządzeń włókienniczych.

Mechanizacja procesu przędzenia i tkania spowodowała radykalne zmiany w przemyśle tekstylnym. Nowe urządzenia były zbyt duże i zbyt kosztowne, aby można je było stosować w małych warsztatach rodzinnych. Ponadto, zastosowanie napędu parowego wymagało lokalizacji w pobliżu kopalni węgla, tj. w hrabstwach Północnej Anglii – Yorkshire i Lancashire. Taka koncentracja przemysłu dała początek angielskiej rewolucji przemysłowej, a przemysł tekstylny stał się narodowym przemysłem Anglii. Jednym z ważnych jej animatorów był Richard Arkwright. Już w 1771 założył on – przy finansowym udziale miejscowych inwestorów – w Chromford, w Derbyshire, pierwszą przemysłową przędzalnię. W roku 1789 zatrudniał łącznie w swoich przędzalniach ponad 800 pracowników.

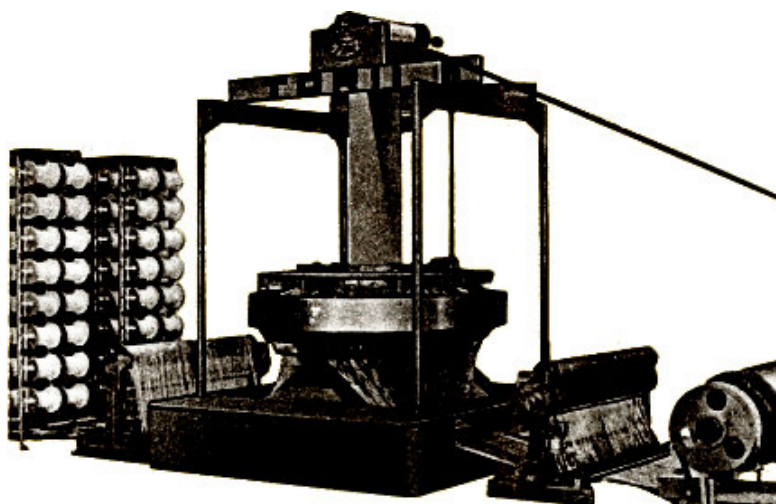
Rewolucja przemysłowa przyniosła ogromne zmiany społeczne i ekonomiczne, stwarzając dla wielu ludzi zajmujących się tradycyjnym rzemiosłem poczucie zagrożenia podstaw bytu. Już ok. 1760 r. w Sheffield powstał ruch tzw. luddystów (od nazwiska przywódcy, zapewne legendarnego – Neda Luda). Niszczyli oni wyposażenie fabryk, głównie warsztatów tkackich. Ruch ten nasilił się zwłaszcza w okresie depresji po wojnach napoleońskich, w latach 1811 – 1813, a później także w latach 1816 – 1820. W rzeczywistości więcej przędzarze i tkacze, tak w Anglii jak i na kontynencie, uprawiali swój zawód jeszcze przez niemal sto lat po pojawieniu się „Spinning Jenny”.

Anglicy zazdrośnie strzegli sekretów swojego narodowego przemysłu. Eksport nowych technologii przemysłowych był formalnie zakazany przepisami prawa aż do 1825 r. Szpiegostwo było karane wieloletnim więzieniem. Sekrety były jednak trudne do utrzymania i podróżnicy z kontynentu, odwiedzający pod koniec XVII w. Anglię (np. Francuz Faujas de Saint Fond, czy Szwed Svedenstjerna) zwiedzali nowe zakłady i wspominali o nich w swoich relacjach. Mimo tego, zrozumienie wszystkich szczegółów technicznych było niezmiernie trudne (w przemyśle tekstylnym wyróżnili się w tym względzie Milne i Holken). Dodatkowo, opóźnienie rozwoju Europy kontynentalnej, wynikające z rewolucji i wojen początku XIX w., pozwoliło Anglii utrzymać przewagę technologiczną w przemyśle tekstylnym i pozycję czołowego światowego producenta tkanin przez długi okres.

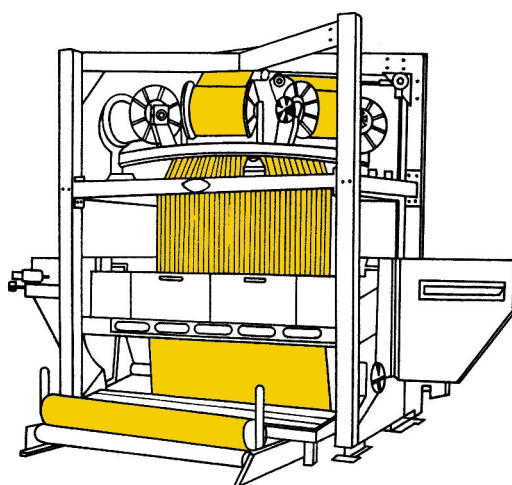
Kolejnym przełomowym etapem w rozwoju technologii produkowania tkanin było skonstruowanie w 1890 r. przez Amerykanina J. Nortropa krosna automatycznego, w którym uzupełnianie wyrobionego wątku w czółenku następuje automatycznie, co umożliwia jednemu tkaczowi obsługę kilkudziesięciu krosien jednocześnie. Następnie wprowadzono krosna wieloczółenkowe, które umożliwiają produkcję tkanin, w których wątki są różnej barwy, grubości lub z różnych surowców. Po II wojnie światowej pojawiły się krosna bezzczółenkowe, w których prędkość tkania może być nawet pięciokrotnie większa niż w krosnach klasycznych, a ponadto maleje ilość czynności wstępnych. W krosnach tych stosuje się różne rozwiązania pozwalające wyeliminować czółenka: rapiery, chwytaki, dysze pneumatyczne bądź hydrauliczne. Obecnie zwiększenie prędkości wątkowania próbuje się uzyskać dzięki krosnom wieloprzesmykowym. W urządzeniach tych powstaje kilka przesmyków przesuniętych w fazie i przewlekanych jest jednocześnie kilka wątków. Są to jednak jeszcze urządzenia niedośkonale, w początkowej fazie rozwoju i dlatego stosowane sporadycznie [118].

Równoległe z rozwojem podstawowych urządzeń włókienniczych – przędzarek i krosien, powstawały urządzenia towarzyszące. Francuz Joseph Marie Jacquard (1752 – 1834), skonstruował maszynę do wiązania sieci, a w 1805 r. – urządzenie pomocnicze do sterowania krosnem, tzw. mechanizm Jacquarda. Umożliwia ono produkcję wielobarwnych i wielowzorzystych tkanin lub dzianin, wg założonego programu. Program ten jest zapisywany na dziurkowanej karcie, tzw. wzornicy. Jest to pierwsze w historii techniki urządzenie programowo sterowane. Istota mechanizmu wzornicowego Żakarda polegała na możliwości indywidualnego sterowania według programu nawet jedną nitką osnowy, a nie tylko ich bardzo dużą grupą, ujętą nicielną. Obecnie budowane mechanizmy Żakarda mają do 2000 punktów sterujących. W obrębie jednego krosna można stosować jednocześnie dwa i więcej takich mechanizmów. Instaluje się je nad krosnem na wysokości 1.5 ÷ 1.8 m [118].

Pierwsza maszyna do wyszywania została skonstruowana przez Josué Heilmanna w 1818 r. Miała ona dwanaście igieł. W nagrodę za ten wynalazek został kawalerem Legii Honorowej. Od 1844 r. produkcją czesarek Heilmanna zajmuje się znana fabryka Nicholas Shlumberger et Cie, z Guebwiller w Alzacji (założona w roku 1824) [29].



Rys. 2.177 – widok krosna okrągłego, do produkcji tkanin o kształcie cylindrycznym (rękawów). Opracowano na podstawie [204]

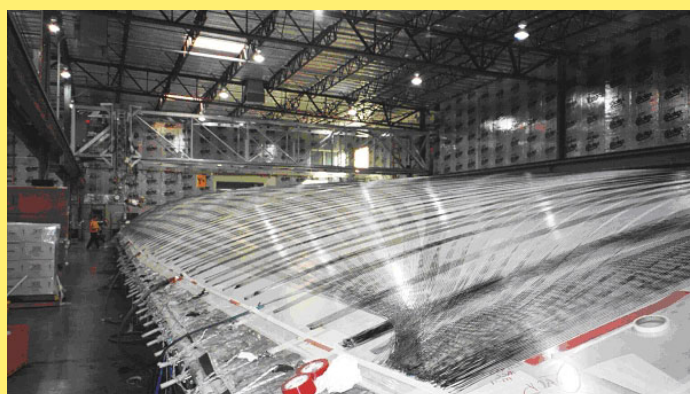


Rys. 2.178 – krosno do tkania tkanin trójosiowych, prod. firmy Barber-Colman (USA). Opracowano na podstawie [204]

Produkcja tkanin laminowanych | Obecnie istnieje pięć rozwiązań technologicznych w tym zakresie [96]:

- system 3DL firmy North Sails
- system Rotary Mould firmy North Sails
- system Genesis firmy Elvstrom Sobstad
- system Tape-Drive firmy UK Sailmakers
- system Cuben Fibre firmy Cuben Fibre Corp.

We wszystkich wymienionych systemach występuje, chociaż w różnych etapach, faza w której stosowane są płaskie elementy, łączone w przestrzennie zakrzywioną powierzchnię.



Rys. 2.179 – stanowisko do produkcji żagli systemu 3DL, firmy North Sails – regulowana forma wielkowymiarowa. Ilustracja za [233]

W systemie 3DL, stosowane są wielkowymiarowe formy, którym można nadawać za pomocą hydraulicznych urządzeń dwukierunkową krzywiznę. Na tak przygotowanej formie następuje jednocześnie laminowanie całej powierzchni, a włókna zbrojące zachowują swoją ciągłość, rys. 2.179 [107].

System Rotary Mould, będący obecnie w końcowej fazie wdrażania, jest oparty na tych samych zasadach, co system 3DL lecz zamiast wielkowymiarowej formy powierzchniowej, stosowany jest obracający się cylinder o zmiennej geometrii, na którego powierzchni następuje laminowanie tkaniny. Pozwala to zwiększyć wielkość produkcji i obniżyć jej koszty, zwłaszcza dla mniejszych wyrobów [27].

System Genesis firmy Sobstad (obecnie Elvstrom Sobstad), jest podobny do systemu 3DL. Różnica polega na tym, że nie stosuje się w tym rozwiązaniu wielkich, ruchomych form. Firma ta obecnie wytoczyła firmie North Sails proces o naruszenie jej rozwiązań chronionych patentami.

W systemie Tape-Drive, najpierw wykonywana jest membrana z folii, o zadanym kształcie (metodą tradycyjnych wykrojów i zgrzewania), na której laminowane są pasy siatek z nitek o wysokiej wytrzymałości.

System Cuben Fibre, będący głównym konkurentem dla systemu 3DL w zakresie wyrobów dla najbardziej prestiżowych imprez¹⁾, przyjął założenie odmienne niż pozostałe systemy. Stwierdzono, że dokładne dopasowanie przebiegu nitek zbrojących do rozkładu sił jest niemożliwe, ze względu na zmienność warunków obciążenia oraz jego „podążanie” za odkształconą tkaniną. Powoduje to, że zawsze pozostaje pewna część obciążeń, których te nitki nie przenoszą, a które muszą być wobec tego przeniesione przez folię poliestrową. Wobec tego zastosowano „zbrojenie rozproszone”, w postaci pojedynczych filamentów, rozmieszczonych bardzo gęsto, w kilku warstwach (ich ilość może dochodzić nawet do siedmiu), zorientowanych względem siebie pod różnymi kątami. Sposób operowania pojedynczymi filamentami, które są znacznie cieńsze niż nitki, zapożyczono z technologii stosowanych w lotnictwie. Filamenty są nakładane na nośnik papierowy, który jest usuwany po wstępnym ustabilizowaniu włókien żywicą. Po nałożeniu wszystkich warstw, matryca jest zanurzana w żywicy i obrabiana cieplnie i ciśnieniowo w autoklawie. Z tak przygotowanej tkaniny wycinane są wykroje, łączone poprzez spajanie termiczne. Zastosowana technika pozwala uzyskać tkaninę cieńszą (a więc i lżejszą) niż w innych technologiach, dzięki niewielkiej średnicy filamentów oraz małej grubości warstwy poliestrowej nakładanej na mokro.

Tkanina Cuben Fibre pojawiła się w 1992 r., kiedy jacht America3, wyposażony w żagle wykonane z tego materiału zwyciężył w regatach America's Cup. W tym czasie panowało przekonanie, że jest to nowy rodzaj włókien, wykonanych z jakiegoś „egzotycznego” materiału. W rzeczywistości, do ich produkcji stosowane są włókna węglowe i Spectra oraz folia poliestrowa, a „tajemnica” tkwi w sposobie wykonania [96].

Produkcja przędzy | Przędziny są wyrobem włókienniczym, który jest coraz częściej używany w zastosowaniach technicznych. Wynika to z ich korzystnych właściwości mechanicznych, a zwłaszcza stabilności wymiarowej, równomiernego odkształcania się i dużej wytrzymałości na rozrywanie.

Produkcja przędzy jest oparta o technologię dziewiarską (wykonywanie dzianin). Układ nitek w wyrobie zależy od rodzaju zastosowanego urządzenia. Stosowane są m.in.:

- a). osnowarki raszłowe
- b). osnowarki przeszywające, wśród których wyróżnia się takie systemy jak:

Malimo, Maliwatt (Arachne), Malivliess, Malifol (Florofol), Metap

Szczególnie ważne, z budowlanego punktu widzenia, są przędziny z „wątkiem wrzucanym” wykonywane na osnowarkach raszłowych. Wiele wyrobów przeznaczonych do wykonywania konstrukcji membranowych jest produkowanych w ten sposób, ze względu na wspomniane powyżej korzystne właściwości mechaniczne.

ang. Raschel knit

ang. weft inserted

Produkcja tkanin z włókien nieorganicznych | Produkcja tkanin technicznych z włókien nieorganicznych: szklanych, węglowych i metalowych odbywa się w sposób analogiczny i na urządzeniach o budowie podobnej do budowy urządzeń stosowanych do wyrobu tkanin z włókien organicznych.

¹⁾ Chodzi to o regaty o najwyższym stopniu trudności, w których starują najbardziej zaawansowane technologicznie jednostki, takie jak „America's Cup” czy „The Race”.

2.6.8. Tkaniny techniczne stosowane w konstrukcjach membranowych

2.6.8.1. Charakterystyka ogólna

Historycznie, do wyrobu tkanin na konstrukcje membranowe, stosowano włókna naturalne, przede wszystkim bawełnę¹⁾. Również pierwsze współczesne konstrukcje membranowe były wykonywane właśnie z tkanin bawełnianych. Ich niezbyt duża wytrzymałość oraz inne wady, stwarzały poważne ograniczenia dla wielkości i trwałości konstrukcji membranowych (maksymalny okres eksploatacji – ok. 4 lata).

Obecnie, do wykonywania konstrukcji membranowych stosowane są tkaniny produkowane z następujących rodzajów włókien chemicznych²⁾:

- włókna poliamidowe
- włókna poliestrowe
- włókna szklane
- włókna aramidowe
- włókna z PTFE

Nie są stosowane, w budownictwie, pomimo wysokich właściwości wytrzymałościowych, niektóre rodzaje włókien, wykorzystywane w innych, szczególnych zastosowaniach, jak np. żeglarstwo regatowe, czy też w zastosowaniach wojskowych lub aeronautyce.

Dotyczy to włókien węglowych oraz całej grupy włókien organicznych, określanych jako włókna specjalne (*ang. high performance fibers*). W grupie tej znajdują się takie wyroby jak: polietyleny o wysokiej masie cząsteczkowej (nazwy handlowe – Dyneema, Spectra), wysokowytrzymałe poliestry (Pentex), ciekłokrystaliczne polimery poliestrowe (Vectran), PBO (Zylon).

Powodem, dla którego włókien tych nie stosuje się w konstrukcjach membranowych jest przede wszystkim bardzo wysoka cena, możliwa do zaakceptowania w jednostkowych wyrobach o małej powierzchni, ale nie do przyjęcia w budownictwie. Wymienione powyżej włókna organiczne, wykazują też w większości istotne ograniczenia użytkowe. Są najczęściej bardzo wrażliwe na działanie promieniowania UV (poza włóknami węglowymi), a czasami również niektórych środków chemicznych, jak np. utleniacze. Z tego względu nie nadają się do zastosowań, w których przewidywany jest długi okres eksploatacji.

Oprócz wymienionych powyżej pięciu rodzajów włókien, spotyka się też jednostkowe zastosowania tkanin wykonanych z cienkiego drutu metalowego. Najczęściej są to jednak elementy drugorzędne i o niewielkich wymiarach³⁾.

Poniżej podano krótką charakterystykę wymienionych, podstawowych rodzajów tkanin stosowanych na konstrukcje membranowe.

Tkaniny z włókien poliamidowych (nylonowych) | Włókna nylonowe mają wytrzymałość na rozciąganie nieco wyższą niż włókna poliestrowe, ale niższy moduł sprężystości podłużnej. Charakterystyczne dla nich jest znaczne wydłużenie. Ponadto, pod wpływem wilgoci ulegają one znacznym odkształceniom. Powyższe cechy powodują duże trudności we właściwym opracowaniu wykrojów tkaniny. Mogą też być przyczyną powstawania zmarszczek na powierzchni membrany. Włókna nylonowe, pod wpływem działania promieniowania ultrafioletowego, tracą w pewnym stopniu wytrzymałość. Z tego powodu wymagają stosowania powłok ochronnych zabezpieczających przed działaniem tego promieniowania. Obecnie tkaniny nylonowe mają niewielkie znaczenie w budownictwie⁴⁾.

Tkaniny z włókien poliestrowych | Włókna poliestrowe są, wraz z włóknami szklanymi, podstawowym surowcem do wyrobu tkanin stosowanych na konstrukcje membranowe. Pod względem wielkości przekrytej powierzchni, jest to na pewno materiał dominujący. Włókna te

¹⁾ Dotyczy to konstrukcji wykonywanych od XIX w., w kręgu cywilizacji europejskiej.

²⁾ Szczegółowo włókna techniczne omówiono w rozdziale 2.2.4. Suplementu.

³⁾ Patrz rys. 2.168

⁴⁾ Tkaniny nylonowe są nadal chętnie stosowane w żeglarstwie, ze względu na małą masę i dużą wytrzymałość.

mają wysoką wartość wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości podłużnej. Ich rozciągliwość jest znacznie mniejsza niż nylonu ale wyraźnie większa niż włókien szklanych. Jest to zaleta wyraźnie widoczna podczas montażu membran. Tkaninę poliestrową znacznie łatwiej jest naciągnąć. Pozwala też ona w pewnym stopniu kompensować ewentualne błędy wykroju i połączenia. Poliester jest bardziej wrażliwy na promieniowanie UV niż nylon, ale znacznie łatwiej jest go chronić poprzez zastosowanie odpowiednich powłok. Z tego względu, jego praktyczna trwałość na ten rodzaj promieniowania jest większa. W porównaniu z włóknami szklanymi, włókna poliestrowe znacznie lepiej znoszą wielokrotne zaginanie. Umożliwia to ich stosowanie w konstrukcjach o dachach rozkładanych, oraz w konstrukcjach tymczasowych, podlegających wielokrotnemu montażowi i demontażowi. Niektóre, ostatnio produkowane tkaniny poliestrowe mają wytrzymałość na rozciąganie nawet większą niż tkaniny z włókien szklanych.

Tkaniny z włókien szklanych | Włókna szklane mają bardzo wysoką wytrzymałość oraz moduł sprężystości podłużnej. Są niewrażliwe na działanie promieniowania UV i niepalne. Są odporne na czynniki atmosferyczne mogące wywoływać degradację, w niewielkim stopniu ulegają starzeniu. Wprowadzenie tkanin z włókna szklanego miało wielki wpływ na rozwój konstrukcji membranowych i umożliwiło rozpoczęcie wykonywania obiektów kwalifikowanych jako stałe ¹⁾. Ich główną wadą jest kruchość, która uniemożliwia zastosowanie w konstrukcjach rozkładanych. Wysoki moduł sprężystości podłużnej z jednej strony nadaje membranie dużą sztywność i zabezpiecza przed nadmiernymi odkształceniami, a z drugiej – znacznie utrudnia montaż membrany. Tkanina z włókna szklanego musi być niezwykle dokładnie skrojona i scalona, gdyż podczas montażu nie ma możliwości „wyrównania” błędów. Ponadto, przemieszczenia powstające podczas wprowadzania naciągu wstępnego są znacznie mniejsze niż dla tkanin wykonanych z innych rodzajów włókien, co komplikuje technologię montażu.

Tkaniny z włókien aramidowych | Tkaniny z włókien aramidowych mogą uzyskiwać niezwykle wysokie wartości wytrzymałości na rozciąganie. Są odporne na działanie wielu czynników chemicznych. Włókna aramidowe mają większą odporność na wielokrotne zginanie niż włókna szklane, ale nie tak dużą, jak nylon czy poliester. Ich wadą jest wrażliwość na promieniowanie UV (wymagają ochrony). Najczęściej stosowane są włókna o nazwach handlowych Kevlar i Twaron. Tkaniny z włókien aramidowych nie są obecnie wyrobami standardowo stosowanymi w budownictwie ²⁾.

Tkaniny z włókien z PTFE | Poli-tetra-fluoroetylen (PTFE) należy do grupy polimerów fluorowych. Najbardziej znana marka handlowa to teflon. Jest to tworzywo niepalne, obojętne chemicznie. Starzeje się w bardzo niewielkim stopniu. Ma znaczną wytrzymałość mechaniczną. Charakterystyczne są jego właściwości antyadhezyjne, dzięki którym powierzchnie pokryte PTFE są bardzo łatwe do utrzymania w czystości. Tkaniny z włókien z PTFE są produkowane od kilkunastu lat. Dostępna jest tylko jedna marka handlowa – Teflon, firmy W.L. Gore. Dotychczas były to tkaniny, które nie zapewniały całkowitej wodoszczelności. Stosowano je do konstrukcji membran przeznaczonych do ochrony przed słońcem ³⁾. Od 2003 r. produkowane są odmiany, które gwarantują całkowitą szczelność tych tkanin. Tkaniny z PTFE są niezwykle odporne na wielokrotne zginanie. Pod tym względem są bliskie wyrobom z bawełny. Ich wadą jest stosunkowo wysoka cena.

¹⁾ Patrz rozdział 2.2.1. w tekście podstawowym pracy.

²⁾ Jedynym dotychczas dużym obiektem, w którym zastosowano tkaninę aramidową jest rozkładany dach stadionu olimpijskiego w Montrealu. Obiekt ten nastroczał wiele trudności konstrukcyjnych – dwukrotnie nastąpiła awaria membrany. Do dziś otwarta pozostaje kwestia jego niezawodności [195].

³⁾ Jednym z najbardziej znanych obiektów, w których zastosowano tkaniny z PTFE, jest otwierane zadaszenie dziedzińca meczetu w Mekce, projektu Bodo Rascha.

Tkaniny na membrany architektoniczne są najczęściej pokrywane powłokami ochronnymi, zwykle wielowarstwowymi. Zadaniem tych powłok jest:

- zapewnienie szczelności tkaniny jako pokrycia
- stabilizacja nitek w tkaninie
- ochrona włókien przed promieniowaniem UV i innymi czynnikami
- ułatwienie czyszczenia powłoki
- nadanie membranie walorów estetycznych (np. poprzez nadanie odpowiedniego koloru).

W tkaninach najwyższej jakości stosuje się powłoki nawet czterowarstwowe (po każdej stronie tkaniny). Obecnie wprowadzane są również warstwy zapewniające np. odpowiednie ekranowanie promieniowania podczerwonego itp. [183] [190]. Do wykonywania powłok na tkaninach najczęściej stosuje się:

Powłoki z PVC | Polichlorek winylu (PVC) jest powszechnie stosowany jako pokrycie tkanin poliestrowych i nylonowych. Jest to tworzywo miękkie, dobrze się odkształcające wraz z tkaniną, odporne na promieniowanie UV. Jest dostępne niemal we wszystkich kolorach. PVC jest наносzony jako powłoka (tkanina jest nim „oblewana”) lub laminowany na tkaninie. Drugi sposób daje znacznie gorsze efekty, jeżeli idzie o przyczepność, dlatego jest stosowany jedynie w najtańszych tkaninach, przeznaczonych do wykonywania niezbyt odpowiedzialnych, tymczasowych obiektów.

W ostatnim okresie zaczęto stosować PVC jako powłokę na tkaninach z włókien aramidowych. Wyroby takie stosowane są do wykonywania konstrukcji pneumatycznych zamkniętych, w formie łuku, o dużym ciśnieniu wewnętrznym (nawet do 0.2 MPa).

Powłoki z PTFE | Teflon jest najtrwalszym spośród wszystkich pokryć. Jest on stosowany przede wszystkim do pokrywania tkanin z włókien szklanych. Po raz pierwszy taką tkaninę zastosowano w 1973 r., w obiekcie który jest eksploatowany do dzisiaj¹⁾. Powłoki z PTFE są znacznie droższe niż powłoki z PVC.

Powłoki silikonowe | Powłoki silikonowe są stosowane do pokrywania tkanin z włókien szklanych. Mają znakomitą odporność na ultrafiolet, są bardziej odporne na zginanie niż teflon. Mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie. Jednak ich największą zaletą jest wysoka przepuszczalność światła. Dochodzi ona do 25 % w membranach architektonicznych, a w cienkich materiałach – nawet do 90 %). Zastosowanie wielowarstwowej powłoki silikonowej umożliwia uzyskanie podwyższonych wartości izolacyjności cieplnej membrany, przy zachowanym dobrym oświetleniu naturalnym wnętrza. Właściwości samoczyszczące powłok silikonowych obecnie niewiele ustępują właściwościom teflonu (wymagane jest coroczne czyszczenie powierzchni). Pierwsze zastosowanie tkaniny szklanej pokrytej silikonem miało miejsce 1981 r.²⁾ Pod względem ceny, powłoki silikonowe sytuują się pomiędzy powłokami z PTFE i powłokami z PVC.

Warstwy wykończeniowe z PVDF | Polifluorek winylidenu (PVDF) charakteryzuje znakomita odporność chemiczna oraz odporność na promieniowanie UV i wysoka przepuszczalność światła. Ma bardzo dobrą stabilność wymiarową i właściwą fluorowcom niską palność oraz właściwości samoczyszczące. Stosowany jest jako zewnętrzna warstwa na powłokach z PVC, zapewniając im estetykę zbliżoną do uzyskiwanej przy pokryciu PTFE.

¹⁾ Patrz rys. 3.24 w tekście podstawowym pracy.

²⁾ W Callaway Gardens, w Georgii (USA). Następnymi obiektami z tym rodzajem pokrycia były kopuły cięgnowe zaprojektowane przez D. Geigera na igrzyska olimpijskie w Seulu, w 1988 r.

Warstwy wykończeniowe z lakierów akrylowych | Lakier akrylowy stosowane są jako zewnętrzne pokrycie powłoki z PVC, w tkaninach o niższym standardzie wykończenia. Nie zapewniają one tak dobrego samooczyszczania powierzchni jak PTFE, PVDF czy silikon, ale przy właściwej eksploatacji, membrana może zachować odpowiednią estetykę. Pokrycia z lakierów akrylowych mogą być wykonywane w zasadzie we wszystkich kolorach.

W tabelicy 2.90 podano ogólne właściwości dla poszczególnych rodzajów tkanin i pokryć, najczęściej stosowanych w konstrukcjach membranowych.

Tabela 2.90 – Ogólne właściwości najczęściej stosowanych na konstrukcje membranowe rodzajów tkanin

Tkanina	PES		GF		PTFE	AR	
Pokrycie	PVC		PTFE	Si	–	PVC ¹⁾	PTFE ¹⁾
Wykończenie zewnętrzne	lakier akrylowy	PVDF	–	–	–	–	–
Zakładany okres eksploatacji	~ 10 lat	~ 15 lat ²⁾	> 30 lat		> 30 lat		
Odporność na starzenie	przeciętna	dobra	bardzo dobra		bardzo dobra	dobra	dobra
Właściwości samoczyszczące	przeciętne	dobre	bardzo dobre	przeciętne	bardzo dobre	dobre	bardzo dobre
Przepuszczalność światła [%]	5 – 22		7 – 24	> 25	20 – 40	brak	brak
Odporność ogniowa (wg DIN 4102)	B1		A2		A2	B1	A2
Odporność na zginanie	bardzo dobra	dobra	bardzo dobra	przeciętna	bardzo dobra	dobra	dobra
Dostępne kolory	wszystkie		biały	biały / bezbarw.	biały	wszystkie	biały

¹⁾ Produkt niestandardowy, dostępny na indywidualne zamówienie

²⁾ Obecnie są eksploatowane obiekty wybudowane ponad 20 temu, które wykazują zaledwie kilkuprocentowe zużycie tkaniny

W tabeli zastosowano powszechnie przyjęte oznaczenia:

- PES – tkanina z włókien poliestrowych
- GF – tkanina z włókien szklanych
- PTFE – tkanina lub pokrycie z włókien z poli-tetra-fluoroetyleny
- AR – tkanina z włókien aramidowych
- PVC – pokrycie z polichlorku winylu
- Si – pokrycie silikonowe
- PVDF – pokrycie z polifluorku winylidenu

2.6.8.2. Właściwości mechaniczne

Uwagi wstępne | Tkaniny stosowane do wykonywania na konstrukcji membranowych charakteryzują się:

- nieliniowością; zależność naprężenie-odkształcenie nie może być opisana linią prostą
- anizotropią; wszystkie podstawowe właściwości mechaniczne zależą są zależne od kierunku ułożenia włókien. Głównie kierunki to: kierunek osnowy i kierunek wątku
- niesprężystym przebiegiem; oznacza to, że zachowanie materiału zależy od historii obciążenia

Wielkości poszczególnych charakterystyk mechanicznych tkanin są wyznaczane laboratoryjnie, poprzez badanie próbek. Ze względu na zmienność właściwości tkanin, konieczne jest wykonywanie badań dla każdej ich partii. Dane podawane przez producenta mogą być przyjmowane jedynie informacyjnie.

Do określania właściwości mechanicznych tkanin technicznych stosowane są dwa rodzaje badań:

- próba jednoosiowego rozciągania
- próba dwuosiowego rozciągania

Jako podstawowy przyjmuje się test jednoosiowy, co wynika z następujących przesłanek. Wielkość wytrzymałości na rozciąganie określona w próbie dwuosiowej jest zawsze niższa niż określona w próbie jednoosiowej. Ponadto, występują problemy techniczne pomiaru wytrzymałości na rozciąganie w próbie dwuosiowej, gdyż metoda pomiaru, a zwłaszcza kształt próbek, rys. 2.183, powodują że zniszczenie zawsze rozpoczyna się przy narożach. Z tego względu stosowane są czasami próbki cylindryczne, obciążane ciśnieniem od wewnątrz ¹⁾. Jednakże przy wykonywaniu próbek cylindrycznych konieczne jest wykonanie szwu zamykającego obwód tkaniny i również jest on miejscem, od którego rozpoczyna się zniszczenie próbki [63].

Podstawowe wielkości | Według norm [N-41] i [N-42], do podstawowych wielkości opisujących właściwości mechaniczne tkanin powlekanych, należą:

wytrzymałość na rozciąganie) – maksymalna siła zarejestrowana podczas rozciągania próbki roboczej pobranej z tkaniny, do momentu zerwania; W normie [N-41] określana jako *siła maksymalna*

ang. tensile strength

wydłużenie przy sile maksymalnej – przyrost długości próbki roboczej, przy sile maksymalnej

ang. tensile elongation

siła zerwania – siła rozciągania zarejestrowana w momencie zerwania

wydłużenie przy zerwaniu – przyrost długości próbki roboczej, przy sile zerwania

wytrzymałość na rozdzielanie – siła powodująca rozdarcie próbki tkaniny w sposób przewidziany w normowej metodzie pomiaru

ang. tear strength

Wytrzymałość na rozciąganie jest określana w jednoosiowym stanie naprężenia, jedna z dwóch metod:

- *metodą paska*, polegającą na wyznaczaniu wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia przy zerwaniu
- *metodą grab*, polegającą na wyznaczaniu tylko wytrzymałości na rozciąganie

ang. strip tensile

ang. grab tensile

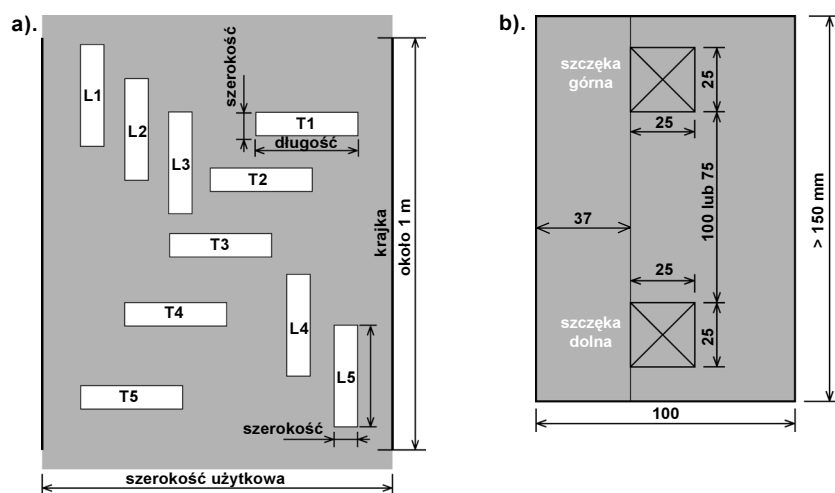
Obydwie metody różnią się też kształtem próbek i sposobem ich zamocowania w szczękach maszyny wytrzymałościowej. W metodzie paska próbka jest zaciśnięta w szczękach na całej szerokości, podczas gdy w metodzie grab – tylko w środkowej części.

Norma [N-41] przewiduje stosowanie w metodzie paska próbek o szerokości 50 mm i długości 200 mm. Dla badania metodą grab, przewidziane są próbki o szerokości 100 mm i długości min. 150 mm. Na rys. 2.180.a). przedstawiono sposób pobierania próbek z tkaniny, a na rys. 2.180.b). – kształt próbek w metodzie grab i sposób ich zamocowania w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Wyniki pomiarów są podawane najczęściej w [daN / 5 cm] lub w [N / 5 cm].

W opracowywanej ostatnio propozycji europejskich wytycznych projektowania konstrukcji membranowych, proponuje się stosowanie jako podstawowej metody badania – metody paska, przy zwiększeniu szerokości próbek do 100 mm [63]. Metoda grab jest częściej stosowana w USA.

Na rys. 2.182 przedstawiono graficznie zależności pomiędzy podstawowymi wielkościami opisującymi właściwości tkaniny, mierzonymi podczas badania próbki metodą paska.

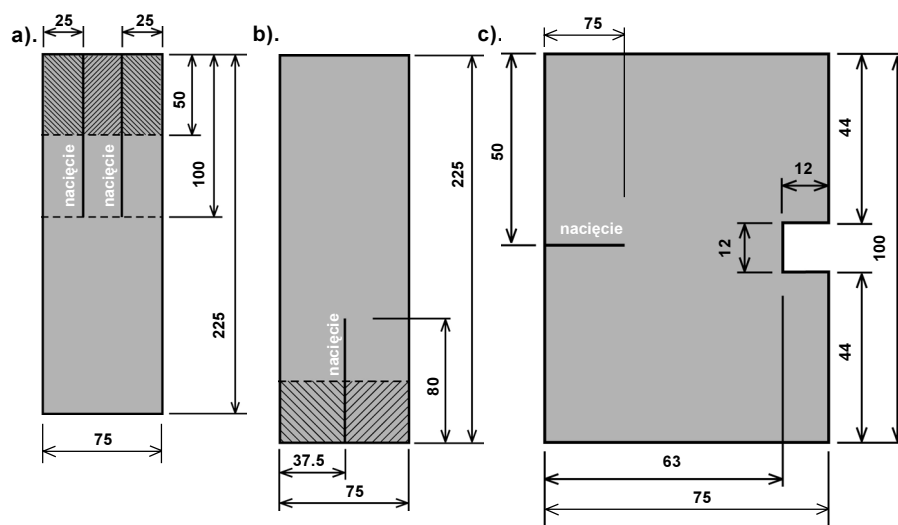
¹⁾ Opis zastosowania takich próbek podczas wykonywania przekrycia dworca lotniczego w Dżiddah, podany jest w [55].



Rys. 2.180 – badanie wytrzymałości tkaniny na rozciąganie i wydłużenia przy rozciąganiu:

- a). przykładowy sposób wycinania z tkaniny próbek roboczych do badania
- b). kształt próbek i miejsca umieszczenia szczęk w metodzie grab

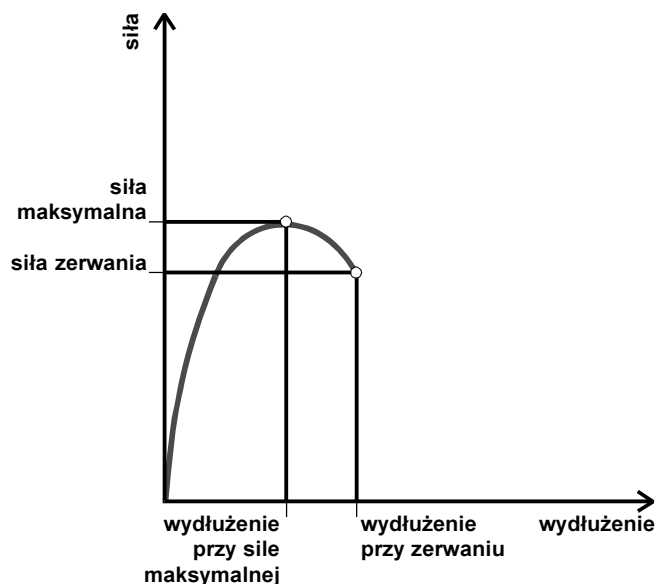
Opracowano na podstawie [N-41]



Rys. 2.181 – próbki do badania wytrzymałości tkaniny na rozdzielanie:

- a). próbka z trzema językami
- b). próbka w kształcie spodni
- c). próbka z karbem

Opracowano na podstawie [N-42]



Rys. 2.182 – zależność pomiędzy podstawowymi wielkościami mierzonymi podczas badania próbki metodą paska

Opracowano na podstawie [N-41]

Badanie wytrzymałości tkaniny na rozdzielanie, cechy bardzo istotnej z użytkowego punktu widzenia, norma [N-42] przewiduje zastosowanie jednej z trzech metod:

- metodę A1, ze stałą prędkością rozdzielania, próbka o trzech językach
- metodę A2, ze stałą prędkością rozdzielania, próbka w kształcie spodni
- metodę B, rozdzielające spadające wahadło

Na rys. 2.181 przedstawiono kształt próbek do badania wytrzymałości tkaniny na rozdzielanie.

Próba dwuosiowego rozciągania | Oprócz określenia wytrzymałości tkaniny na rozciąganie, ważne jest określenie jej zachowania w dwuosiowym stanie naprężenia. Próba dwuosiowego rozciągania, nie jest przeznaczona do określania wytrzymałości tkaniny, ale służy do pomiaru modułu sprężystości i określania niezbędnej kompensacji¹⁾. Dlatego badanie to przeprowadzane jest w rzeczywistym zakresie obciążeń, który należy wcześniej określić.

Dla konstrukcji membranowych współczynnik bezpieczeństwa (deterministyczny) jest zwykle przyjmowany jako równy 5, chociaż w indywidualnych przypadkach może być inaczej. Naprężenie robocze wynosi zatem 1/5 wartości zmierzonej w próbie jednoosiowego rozciągania. Naciąg wstępny wynosi zazwyczaj od 1/10 do 1/5 naprężenia roboczego, tj. ok. 1/25 wytrzymałości na rozciąganie. Ponieważ naciąg wstępny nie zawsze jest jednakowy dla kierunku osnowy i wątku²⁾, konieczne jest przeprowadzenie badania dla różnych stosunków naciągu w obu kierunkach. W wytycznych [63] proponowana jest procedura badań, w której przykładane jest kolejno obciążenie o wartościach podanych w tabelicy 2.91. Ponadto, w wytycznych tych zwraca się uwagę, że obciążenie dla którego określono naprężenie robocze, jest ze względów bezpieczeństwa obciążeniem o największej możliwej wartości, które w warunkach rzeczywistych może występować bardzo rzadko lub nawet wcale. Z tego względu bardziej realistyczne wydaje się przeprowadzanie próby dwuosiowego rozciągania dla naprężenia wstępnego zmniejszonego do 80 % wyznaczonej wartości.

Tablica 2.91 – Kolejność ociążania próbki w próbie dwuosiowego rozciągania, wg [63]

naciąg wstępny osnowy / naciąg wstępny wątku	stosunek naciągu wstępnego do naprężeń roboczych	
	osnowa	wątek
1 : 2	0.10	0.20
1 : 1	0.20	0.20
2 : 1	0.20	0.10

Dodatkowym rodzajem badań jest symulacja zachowania tkaniny w warunkach rzeczywistych, kiedy w projektowanej konstrukcji główne kierunki działania obciążeń zewnętrznych są równoległe kierunku wątku i osnowy. Wówczas przypadek działania tylko jednego z tych obciążeń oznacza obciążanie próbki tylko w jednym kierunku. W badaniu, próbka jest poddawana dwukierunkowemu naciągowi wstępnemu, a następnie przykładane jest obciążenie wzdłuż jednej z osi, a następnym kroku – wzdłuż drugiej osi.

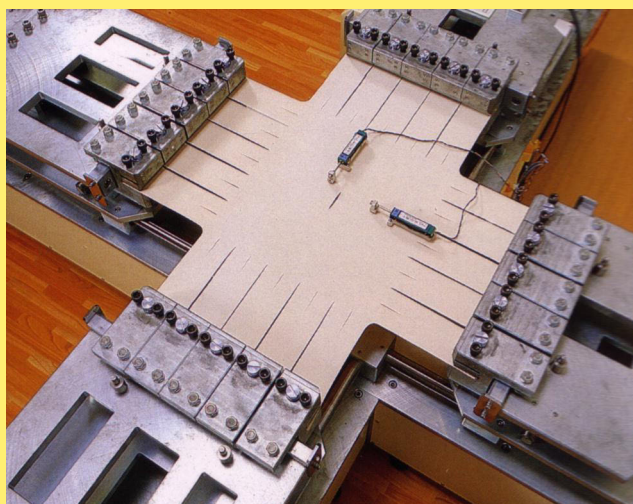
Próbka do badań w aparacie dwuosiowego rozciągania jest zwykle umieszczana równoległe do kierunku osnowy i wątku, jednakże przeprowadza się również badania z próbkami odwróconymi o zadany kąt, dla zbadania wpływu naprężeń ścinających.

W chwili obecnej sposób przeprowadzania próby dwuosiowego rozciągania nie jest uregulowany normami międzynarodowymi. Zarówno budowa stosowanych aparatów, jak i kształt oraz wielkość próbek, stosowanych w różnych laboratoriach różnią się – nieraz znacznie – między sobą. Na rys. 2.183 przedstawiono aparat do wykonywania próby dwuosiowego rozciągania tkaniny, używany przez firmę Taiyo Kogyo.

Przeciętne właściwości mechaniczne tkanin | W tabelicy 2.92 zestawiono przeciętne wartości podstawowych charakterystyk materiałowych tkanin, w oparciu o [198] [199] [200]. W przypadku tkanin poliestrowych, pokrytych

¹⁾ Patrz rys. 3.6 w tekście podstawowym pracy.

²⁾ Patrz pkt 3.3 w tekście podstawowym pracy.



Rys. 2.183– zależność pomiędzy podstawowymi wielkościami mierzonymi podczas badania próbki metodą paska

Ilustracja za [23]

PVC, podano podział tych tkanin na typy, w zależności od wytrzymałości tkaniny na rozciąganie. Podział ten został zaproponowany przez jednego z producentów niemieckich i jest powszechnie stosowany w tym kraju, a często również przez producentów z innych krajów europejskich.

Tkaniny na konstrukcje membranowe dostępne na rynku | W tablicy 2.93 zestawiono najważniejsze produkowane tkaniny na konstrukcje membranowe, podając ich najważniejsze charakterystyki ¹⁾. W tablicach 2.94 ÷ 2.98, podano rozszerzone informacje o wyrobach kilku wiodących producentów, za [7] [16] [17] [24] [35].

Tablica 2.92 – Przeciętne właściwości mechaniczne najczęściej stosowanych na konstrukcje membranowe rodzajów tkanin

Tkanina / Pokrycie		Masa powierzchniowa tkaniny	Wytrzymałość na rozciąganie ¹⁾		Wydłużenie przy zerwaniu ¹⁾		Wytrzymałość na rozdzieranie ²⁾	Wytrzymałość połączeń spawanych	Odporność na wielokrotne zginanie
			kierunek osnowy	kierunek wątku	kierunek osnowy	kierunek wątku			
Poliester / PVC	typ 1 ³⁾	800	3 000	3 000	15	20	350	2 400 ⁶⁾	bardzo dobra
	typ 2	900	4 400	4 400	15	20	580	2 850 ⁷⁾	
	typ 3	1 050	5 750	5 100	15	25	950	3 350 ⁷⁾	
	typ 4	1 300	7 450	6 400	15	30	1 400	4 600 ⁷⁾	
	typ 5	1 450	9 800	8 300	20	30	1 800	4 600 ⁷⁾	
Włókno szklane / PTFE		800	3500	3 000	7	10	300	6 000 ⁷⁾	niska
		1 270	6 600	6 000	7	10	570		
Włókno szklane / Silikon		800	3 500	3 000	7	10	300		dostateczna
		1 270	6 600	6 000	7	10	570		
PTFE		630	3 000	2 900	7	12	818	2 100 ⁸⁾	b. dobra
		830	4 200	4 000	7	12	925	2 950 ⁸⁾	
Włókna aramidowe / PVC ⁴⁾		900	9 000	7 000	5	6	700	4 800 ⁶⁾	dobra
		2 020	24 500	24 500	5	6	4 450		
Włókna aramidowe / PTFE ⁴⁾		⁵⁾	⁵⁾	⁵⁾	2 – 7	2 – 7	⁵⁾	⁵⁾	dobra

¹⁾ wg [N-41]

²⁾ wg [N-42]

³⁾ Patrz uwaga w tekście

⁴⁾ Produkt niestandardowy, dostępny na indywidualne zamówienie

⁵⁾ Ustalane indywidualnie

⁶⁾ Połączenie na zakład 30 mm, w temp. 70°C.

⁷⁾ Połączenie na zakład 60 mm, w temp. 70°C. Spawanie prądem wysokiej częstotliwości dla tkaniny PES/PVC i termiczne – dla tkaniny GF/PTFE

⁸⁾ Połączenie na zakład 62 mm, w temp. 70°C

¹⁾ Dane na podstawie: „Fabric Architecture. 2004 Product Profiles and Directory”. Wyd. Industrial Fabric Association International.

Tablica 2.93 – Charakterystyka produkowanych tkanin na konstrukcje membranowe

Włókna	Pokrycie	Producent	Nazwa wyrobu	Masa	Wytrzymałość na		Powłoka	Zalecane	Przewi-	Uwagi
				powierz-	rozciąganie					
				chniowa	kierunek	kierunek			trwałość	
tkaniny	osnowy	wątku								
g / m ²	N / 5 cm							lat		
GF	pokryte PTFE	Saint Gobain Performance Plastics Corp.	Sheerfill I	1 543	8 877	8 194	–	M, P	25+	
			Sheerfill II	1 305	7 147	5 099	–	M, P	25+	
			Sheerfill II A	1 288	5 827	5 827	–	M, P	25+	
			Sheerfill IV A	813	4 734	3 460	–	M, P	25+	
			Sheerfill V	983	4 734	5 371	–	M, P	25+	
			Ultralux I	1 186	6 145	5 463	–	M, P	25+	
			Fabrasorb I	475	273	182	–	Ak	25+	
			Fabrasorb II	288	154	164	–	Ak	25+	
		Taconic Int.	Solus 450 Acoustical	450	2 150	1 400	–	Ak, C	30+ / 10 ²⁾	
			Solus 500 L	500	2 913	2 595	–	M, P, N	30+ / 10 ²⁾	
			Solus 1100 HT	1 100	5 000	5 000	–	M, P	30+ / 10 ²⁾	
			Solus 1100	1 100	5 235	3 933	–	M, P, N	30+ / 10 ²⁾	
			Solus 1120	1 100	6 464	5 099	–	M, P, N	30+ / 10 ²⁾	
			Solus1200 SB	1 200	6 200	5 000	–	M, P, N	30+ / 10 ²⁾	
			Solus1300	1 335	7 056	5 408	–	M, P	30+ / 10 ²⁾	
			Solus1400	1 400	8 695	8 955	–	M, P	30+ / 10 ²⁾	
			Solus 1410	1 700	8 148	7 056	–	M, P	30+ / 10 ²⁾	
			Solus 1500	1 550	8 923	8 240	–	M, P	30+ / 10 ²⁾	
		Verseidag Indutex	Duraskin B18039	1 550	7 500	6 500	–	M, P	–	
			Duraskin B18059	890	5 800	5 800	–	M, P	–	
		Fabrimax	Archifab	1 101	5 554	5 463	Silikon	M, P, N	25+ / 10 ²⁾	
PES	pokryte PVC	John Boyle & Co.	56FW20 40	847	2 185 ¹⁾	1 912 ¹⁾	–	M, P, N	25+ / 10 ²⁾	
			Big Top 300	576	1 912 ¹⁾	1 730 ¹⁾	–	M, P, N	25+ / 10 ²⁾	
			Big Top 350	542	1 912 ¹⁾	1 730 ¹⁾	–	M, P, N	25+ / 10 ²⁾	
		Ferrari Textiles	Précontraint 502 8103S	725	2 800	2 800	PVDF spawalne	M, N	5 ²⁾	
			Précontraint 502 8104S	640	2 800	2 800	PVDF spawalne	M, N	5 ²⁾	
			Précontraint 702 8103S	905	2 800	2 800	PVDF spawalne	M, N	7 ²⁾	
			Précontraint 702 8104S	817	2 800	2 800	PVDF spawalne	M, N	7 ²⁾	
			Précontraint 702 Formula S	745	2 940	2 820	PVDF spawalne	M	5 ²⁾	
			Précontraint 1002 Formula S	1 050	4 000	3 960	PVDF spawalne	M	10 ²⁾	
			Précontraint 1202 Formula S	1 050	5 280	5 280	PVDF spawalne	M	10 ²⁾	
			Précontraint 1302 Formula S	1 305	8 010	6 737	PVDF spawalne	M	10 ²⁾	
			Précontraint 1502 Formula S	1 490	9 287	7 375	PVDF spawalne	M	10 ²⁾	
			Précontraint 702 Fluotop T2	750	3 000	2 800	PVDF spawalne	M	10 – 15 ²⁾	
			Précontraint 1002 Fluotop T2	1 050	4 200	4 000	PVDF spawalne	M	10 – 15 ²⁾	
			Précontraint 1202 Fluotop T2	1 050	5 600	5 600	PVDF spawalne	M	10 – 15 ²⁾	
			Précontraint 1302 Fluotop T2	1 350	8 000	7 000	PVDF spawalne	M	10 – 15 ²⁾	
		Julius Heywinkel GmbH	Heytex 5572	700	3 000	3 000	lak. akryl./PVDF	M, N	–	
			Heytex 5573	900	4 200	4 000	lak. akryl./PVDF	M, N	–	
			Heytex 5574	1200	5 800	5 400	lak. akryl./PVDF	M, N	–	
			Heytex 5577	1 400	7 000	6 000	lak. akryl./PVDF	M, N	–	
			Heytex 5578	1 800	8 000	7 000	lak. akryl./PVDF	M, N	–	

1) wytrzymałość określana metodą grab

2) okres gwarancji producenta

Oznaczenia tkanin i rodzajów pokrycia – jak dla tab. 2.90. Dodatkowo:

HDPE – polietylen o wysokiej gęstości

LDPE – polietylen o niskiej gęstości

Tablica 2.93 – c.d.

Włókna	Pokrycie	Producent	Nazwa wyrobu	Masa powier- chniowa tkaniny	Wytrzymałość na rozciąganie		Powłoka ochronna	Zalecane zastoso- wanie	Przewi- dywana trwałość	Uwagi
				g / m ²	kierunek osnowy	kierunek wątku				
				N / 5 cm					lat	
PES	pokryte PVC	Hiraoka & Co. Ltd.	Hiraoka 212T	970	4 500	4 500	PVDF	M, P, Nm	10 ²⁾	
			Hiraoka 312T	1 020	5 700	5 700	PVDF	M, P, Nm	10 ²⁾	
			Hiraoka 150SC	910	3 100	3 100	PVDF specjalne	M, P, Nm	12 ²⁾	
			Hiraoka 250 SC	1 090	4 500	4 500	PVDF specjalne	M, P, Nm	12 ²⁾	
			Hiraoka 350Sc	1 140	5 700	5 700	PVDF specjalne	M, P, Nm	12 ²⁾	
		Meridian Mfg. Corp.	Showtime II	475	1 912 ¹⁾	1 775 ¹⁾	–	M, P	–	przędzina
			Showtime II FS	475	1 912 ¹⁾	1 775 ¹⁾	PVDF	M, P	–	przędzina
			Showtime S-83	575	2 048 ¹⁾	1 886 ¹⁾	–	M, P, Nm	–	przędzina
			Showtime S-83 FS	575	2 048 ¹⁾	1 886 ¹⁾	PVDF	M, P, Nm	–	przędzina
		Naizil Inc.	Lite ADR	650	2 500	2 500	lak. akryl.	M, P, Nm	–	
			Green Cover	520	2 400	2 400	lak. akryl.	M, P, Nm	–	
			PS Cover	670	2 500	2 500	lak. akryl.	M, P, Nm	–	
			Sport Cover	720	3 000	3 000	PVDF	M, P, Nm	–	
			Best Cover	720	2 900	2 900	PVDF	M, P, Nm	6 ²⁾	przędzina
			Big Cover	900	4 000	4 000	PVDF	M, P, Nm	10 ²⁾	
			Plus Cover	1 085	5 900	5 900	PVDF	M, P, Nm	–	
			Strong Cover	1 300	7 500	7 500	PVDF	M, P, Nm	–	
		Seaman Corp.	Shelter-Rite 8028	950	4 510	4 510	PVF	M, N	15 ²⁾	
			Shelter-Rite 8424	814	2 630	2 410	PVF	M, N	10 ²⁾	
			Shelter-Rite 8616	543	1 750	1 750	–	M, N	2 ²⁾	
			Shelter-Rite 8620	678	1 750	1 750	–	M, N	2 ²⁾	
			Shelter-Rite 9032	1 085	5 690	5 690	PVF	M, N	15 ²⁾	
			Shelter-Rite 9319	644	1 750	1 750	PVF	M, N	10 ²⁾	
		Verseidag Indutex	Duraskin Type I B 495135	800	3 000	3 000	PVDF spawalne	M, P	–	
			Duraskin Type II B 461735	900	–	–	PVDF spawalne	M, P	–	
			Duraskin Type III B 495135	1 050	5 750	5 100	–	M, P	–	
			Duraskin Type IV B 40173	470	2 800	2 500	–	M, P	–	
			Duraskin B 1673	800	2 800	2 500	–	M, P	–	
	pokryte PVDF	Ferrari Textiles	Précontraint 1502 Fluotop T2	1 500	10 000	8 000	PVDF	M	10 - 15 ²⁾	
	lamino- wane PVC	Herculite Products	Architent	475			–	M, N, Nm	–	
			Architent Blackout	542	2 276 ¹⁾	2 003 ¹⁾	–	M, N, Nm	–	
			ArchitentHeavy Duty Blackout	610	2 822 ¹⁾	2 595 ¹⁾	–	M, N, Nm, NS	–	
			ArchitentOpaque 98	542	2 276 ¹⁾	1 866 ¹⁾	–	M, N, Nm, Ns	–	
			Architent Wideside	339	1 047 ¹⁾	1 047 ¹⁾	–	Ns	–	
			Architent Wideside 98"	424	2 003 ¹⁾	1 821 ¹⁾	–	Ns	–	
			Architent 777-2000D	950	3 550 ¹⁾	2 737 ¹⁾	–	M, N, Nm	–	
Mehler Haku		Polymar Tent-Poly Color	650			lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾		
		Polymar Tent 8506 Poly Opaque	750	3 500	3 500	lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾		
		Polymar Tent-Poly Prima	650	2 800	2 700	lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾		
		Polymar 8964-FR	500	950	900	lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾	przędzina	
		Polymar 8506-FR Color 700	680	3 000	3 000	lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾		
		Valmex FR 650- Lowick	650	2 800	2 600	lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾		

Symbole zastosowań zalecanych przez producenta:

M – konstrukcje membranowe

N – konstrukcje namiotowe

Ns – ściany namiotów

Ak – przegrody akustyczne

P – konstrukcje pneumatyczne

Nm – namioty z masztami

S – osłony przeciwsłoneczne

Tablica 2.93 – c.d.

Włókna	Pokrycie	Producent	Nazwa wyrobu	Masa powierzchniowa tkaniny	Wytrzymałość na rozciąganie		Powłoka ochronna	Zalecane zastosowanie	Przewidywana trwałość	Uwagi	
				g / m ²	kierunek osnowy	kierunek wątku			lat		
					N / 5 cm						
PES	lamino- wane PVC	Mehler Haku	Valmex FR 700 Mehatop F(typeI)	850	3 000	3 000	PVDF spawalne	M, P, N	5 ²⁾		
			Valmex FR 700 opaque Mehatop F	850	3 000	3 000	PVDF spawalne	M, P, N	5 ²⁾		
			Valmex FR 900 Mehatop F(typeII)	900	4 200	4 200	PVDF spawalne	M, P, N	5 ²⁾		
			Valmex FR 1000 Mehatop F(typeIII)	1 050	6 000	6 000	PVDF spawalne	M, P, N	5 ²⁾		
			Valmex FR 1400 Mehatop F(typeIV)	1 350	7 500	6 500	PVDF spawalne	M, P, N	5 ²⁾		
		Snyder Mfg. Inc.	Wheaterspan 1310Q Tent Fabric	440	1 274	1 138	–	M, P, N, Nm, Ak	–		
			Wheaterspan 1610Q Tent Fabric	–	1 502	1 274	–	M, P, N, Nm	–		
			Wheaterspan 1613W Tent Fabric	542	1 684	1 639	–	Ns	–		
			Tent Fabric 2213W	746	2 140	1 821	–	M, N, Nm	–		
		pokryte akrylem	Ferrari Textiles	Précontraint 392 Mesh	814	3 000	3 000	lakier akrylowy	M	10 ²⁾	
	Précontraint 492 Mesh			1 000	4 000	2 500	–	M, P	25 / 10 ²⁾		
	Précontraint 502 Colors			590	2 500	2 500	lakier akrylowy	M, N, S	5 ²⁾		
	Soltis 86			397	2 300	1 600	lakier akrylowy	S	5 ²⁾		
	Soltis 92			420	3 100	2 100	lakier akrylowy	S	5 ²⁾		
	Précontraint 402 8104			522	2 500	2 200	lakier akrylowy	Ns	5 ²⁾		
	Précontraint 702 Aluminium			905	2 800	2 800	lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾		
	Stamoid Drop Stop			729	2 800	3 100	lakier akrylowy	M, N	5 ²⁾		
	Marchem Coated Fabrics		Odyssey IV	245	2 731 ¹⁾	2 276 ¹⁾	–	P, Nm	3 – 5		
	PTFE expand		–	W.L. Gore Assoc. Inc.	Gore Tenara Arch. Fabric VGO180	520	3 240	3 240	–	M, N, Nm	25+ / 15 ²⁾
		Gore Tenara Arch. Fabric VGO181			330	2 250	2 150	–	M, N, Nm	25+ / 15 ²⁾	
Gore Tenara Arch. Fabric 3T20		630			3 000	2 900	–	M, N, Nm	25+ / 15 ²⁾		
Gore Tenara Arch. Fabric 3T40		630			3 000	2 900	–	M, N, Nm	25+ / 15 ²⁾		
Gore Tenara Arch. Fabric 4T20		830			4 200	4 000	–	M, N, Nm	25+ / 15 ²⁾		
Gore Tenara Arch. Fabric 4T40		830			4 200	4 000	–	M, N, Nm	25+ / 15 ²⁾		
Akryl	pokryte żywicą fluorową	Glen Raven Custom Fabrics LLC	Dickson Marine	301	2 230 ¹⁾	1 456 ¹⁾	–	-	5+ / 5 ²⁾		
			Sunbrella	305	2 094 ¹⁾	1 274 ¹⁾	–	N	5+ / 5 ²⁾		
			Sunbrella Plus	353	2 503 ¹⁾	1 593 ¹⁾	–	N	5+ / 5 ²⁾		
Mod-akryl	j.w.	Glen Raven Custom Fabrics	Sunbrella Firesist	314	2 276x	1 276x	–	N	5+ / 5 ²⁾		
HDPE	-	Shadetex Inc.	Polytex 230	230	–	–	–	M, P	20+ / 10 ²⁾	przędzina	
			Comtex 320	320	–	–	–	M, P	20+ / 10 ²⁾	przędzina	
			Polyfx 290	290	–	–	–	M, P	20+ / 10 ²⁾	przędzina	
	pokryte LDPE	Intertape Polymer Group	Nova-Shield FRU 8-6	250	1 365	1 456	–	M, Nm, S, Ak	7–12 / 5 ²⁾		
			Nova-Shield FRU 88X-6 (4mil)	410	2 280	2 105	–	M	7–12 / 5 ²⁾		
			Nova-Shield RB 88X-6	407	2 310	2 095	–	M	7–12 / 5 ²⁾		
			Nova-Shield RU 88X-6	407	2 280	2 105	–	M	7–12 / 5 ²⁾		

Tablica 2.94 – Charakterystyka tkanin na konstrukcje membranowe produkowanych przez firmę Ferrari S.A. (Francja) [35]

Nazwa tkaniny	rodzaj włókien pokrycie	Masa liniowa włókien dtex	Masa powierz- chniowa tkaniny g / m ²	Wytrzymałość na rozciąganie		Wydłużenie		Wytrzymałość na rozdzieranie		Przyczep- ność	Wytrzyma- łość na zginanie	Zakres temperatur eksploatacji min / max	Przepusz- czalność światła	Warstwa wykończe- niowa
				kierunek osnowy	kierunek wątku	kierunek osnowy	kierunek wątku	kierunek osnowy	kierunek wątku					
				N / 5 cm		%		N		N / cm	ilość cykli	°C	%	
Précontraint 702 Fluotop T	PES HT 240µm PVC	1100	750	3 000	2 800	< 1 %		300	280	20	- ¹⁾	-30 / +70	22	PVDF
Précontraint 1002 Fluotop T	PES HT 350µm PVC	1100	1 050	4 200	4 000	< 1 %		550	500	24	- ¹⁾	-30 / +70	15	PVDF
Précontraint 1202 Fluotop T	PES HT 270µm PVC	1100/1670	1 050	5 600	5 600	< 1 %		800	650	24	- ¹⁾	-30 / +70	15	PVDF
Précontraint 1302 Fluotop T	PES HT 300µm PVC	1100/2270	1 350	8 000	7 000	< 1 %		1 200	1 100	26	- ¹⁾	-30 / +70	12	PVDF
Précontraint 1502 Fluotop T	PES HT 300µm PVC	1670/2270	1 500	10 000	8 000	< 1 %		1 600	1 400	30	- ¹⁾	-30 / +70	11	PVDF

¹⁾ brak danych;

Tablica 2.95 – Charakterystyka tkanin na konstrukcje membranowe produkowanych przez firmę Julius Heywinkel GmbH (Niemcy) [17]

Nazwa tkaniny	rodzaj włókien splot liczność nitów pokrycie	Masa liniowa włókien dtex	Masa powierz- chniowa tkaniny g / m ²	Wytrzymałość na rozciąganie		Wydłużenie		Wytrzymałość na rozdzielanie		Przyczep- ność	Wytrzyma- łość na zginanie	Zakres temperatur eksploatacji min / max	Przepuszc- zalność światła	Warstwy wykończe- niowe wewn./ zewn.
				kierunek osnowy	kierunek włókna	kierunek osnowy	%	kierunek osnowy	kierunek włókna					
				N / 5 cm		%		N		N / cm	ilość cykli	°C	%	
Heytex 5572 ¹⁾	PES panama 9x9 PVC	1100	700	3 000	3 000	— ⁶⁾	— ⁶⁾	300	300	— ⁶⁾	> 100 000	-30 / — ⁶⁾	— ⁶⁾	lakier akrylowy lub PVDF
Heytex 5573 ²⁾	PES panama 12x12 PVC	1100	900	4 200	4 000	— ⁶⁾	— ⁶⁾	550	500	— ⁶⁾	> 100 000	-30 / — ⁶⁾	— ⁶⁾	lakier akrylowy lub PVDF
Heytex 5574 ³⁾	PES panama 10.5x10.5 PVC	1670	1200	5 800	5 400	— ⁶⁾	— ⁶⁾	1 000	9 000	— ⁶⁾	> 100 000	-30 / — ⁶⁾	— ⁶⁾	lakier akrylowy lub PVDF
Heytex 5577 ⁴⁾	PES panama 9.2x9.7 PVC	1220	1 400	7 000	6 000	— ⁶⁾	— ⁶⁾	1 100	1 100	— ⁶⁾	> 100 000	-30 / — ⁶⁾	— ⁶⁾	lakier akrylowy lub PVDF
Heytex 5578 ⁵⁾	PES panama 14x14 PVC	2200	1 800	8 000	7 000	— ⁶⁾	— ⁶⁾	2 000	1 500	— ⁶⁾	> 100 000	-30 / — ⁶⁾	— ⁶⁾	lakier akrylowy lub PVDF

¹⁾ typ I; ²⁾ typ II; ³⁾ typ III; ⁴⁾ typ IV; ⁵⁾ typ V; ⁶⁾ brak danych;

Tablica 2.96 – Charakterystyka tkanin na konstrukcje membranowe produkowanych przez firmę Naizil – La Plastiveneta S.p.a. (Włochy) [24]

Nazwa tkaniny	rodzaj włókien splot liczność nitów pokrycie	Masa liniowa włókien dtex	Masa powierz- chniowa tkaniny g / m ²	Wytrzymałość na rozciąganie		Wydłużenie		Wytrzymałość na rozdzieranie		Przyczep- ność	Wytrzyma- łość na zginanie	Zakres temperatur eksploatacji min / max	Przepusz- czalność światła	Warstwy wykończe- niowe wewn./ zewn.
				kierunek osnowy	kierunek wędku	kierunek osnowy	%	kierunek osnowy	kierunek wędku					
				N / 5 cm		N		N		N / cm	ilość cykli	°C	%	
Green Cover	PES płócienny 7x7 PVC	1100	520	2 400	2 400	18	22	180	180	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾
PS Cover	PES płócienny 8x8 PVC	1100	670	2 500	2 500	20	24	200	200	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾
Sport Cover ¹⁾	PES płócienny 9x9 PVC	1100	720	3 000	3 000	22	26	250	250	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾
Best Cover	PES przędzina — ⁵⁾ PVC	1100	720	2 900	2 900	22	24	400	400	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾
Big Cover ²⁾	PES panama 12x12 PVC	1100	900	4 000	4 000	22	29	400	400	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾
Plus Cover ³⁾	PES płócienny 10x10.5 PVC	1670	1 085	5 900	5 900	26	32	1 000	1 000	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾
Strong Cover ⁴⁾	PES płócienny 14x14 PVC	1670	1 300	7 500	7 500	24	32	1 100	1 400	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾
Lite ADR	PES płócienny PVC	1100	650	2 500	2 500	— ⁵⁾	— ⁵⁾	200	200	— ⁵⁾	> 100 000	-30 / +70	— ⁵⁾	— ⁷⁾

¹⁾ typ I; ²⁾ typ II; ³⁾ typ III; ⁴⁾ typ IV; ⁵⁾ brak danych;

⁷⁾ warianty warstw wykończeniowych: Rotopal –lakier akrylowy 2xzewn. + 1xwewn.; Rotofluo W. - 1xlakier akrylowy i 1xlakier PVDF zewn. + 1xlakier PVDF wewn.;

Tabela 2.97 – Charakterystyka tkanin na konstrukcje membranowe produkowanych przez firmę Mehler Haku GmbH (Niemcy) [7]

Nazwa tkaniny	rodzaj włókien splot pokrycie	Masa liniowa włókien dtex	Masa powierz- chniowa tkaniny g / m ²	Wytrzymałość na rozciąganie		Wydłużenie		Wytrzymałość na rozdzielanie		Przyczep- ność	Wytrzyma- łość na zginanie	Zakres temperatur eksploata- cyjnych min / max	Przepusz- czalność światła	Warstwy wykończe- niowe wewn./ zewn.
				kierunek osnowy	kierunek włoku	kierunek osnowy	kierunek włoku	kierunek osnowy	kierunek włoku					
Valmex FR 700 ¹⁾ Mehatop F	PES płócienny PVC	1100	850	3 000	3 000	— ⁵⁾	— ⁵⁾	300	300	20	> 100 000	-30 / +70	~ 5	PVDF / 2×akryl
Valmex FR 700 ¹⁾ opaque Mehatop F	PES płócienny PVC	1100	850	3 000	3 000	— ⁵⁾	— ⁵⁾	300	300	20	> 100 000	-30 / +70	~ 5	PVDF / 2×akryl
Valmex FR 900 ²⁾ Mehatop F	PES panama 2×2 PVC	1100	900	4 200	4 200	— ⁵⁾	— ⁵⁾	500	450	25	> 100 000	-30 / +70	~ 5	PVDF dwustronnie
Valmex FR 1000 ³⁾ Mehatop F	PES panama 2×2 PVC	1670	1 050	6 000	5 500	— ⁵⁾	— ⁵⁾	1 000	1 000	25	> 100 000	-30 / +70	~ 5	PVDF dwustronnie
Valmex FR 1400 ⁴⁾ Mehatop F	PES panama 3×3 PVC	1670	1 350	7 500	6 500	— ⁵⁾	— ⁵⁾	1 200	1 200	25	> 100 000	-30 / +70	~ 5	PVDF dwustronnie
Polymar tent – Poly Prima	PES płócienny PVC	1100	650	2 800	2 700	— ⁵⁾	— ⁵⁾	300	300	20	> 100 000	-30 / +70	~ 5	lakier akryl. dwustronnie
Polymar 8506-FRColor 700	PES płócienny PVC	1100	680	3 000	3 000	— ⁵⁾	— ⁵⁾	300	300	20	> 100 000	-30 / +70	~ 5	lakier akryl. dwustronnie
Polymar tent 8506 PolyOpak	PES płócienny PVC	1100	7580	3 500	3 500	— ⁵⁾	— ⁵⁾	350	350	20	> 100 000	-30 / +70	~ 5	lakier akryl. dwustronnie
Polymar 8964-FR	PES przędzina PVC	1100	500	950	900	20	20	200	150	16	> 100 000	-25 / +70	~ 5	lakier akryl. dwustronnie

¹⁾ typ I; ²⁾ typ II; ³⁾ typ III; ⁴⁾ typ IV; ⁵⁾ brak danych;

Tablica 2.98 – Charakterystyka tkanin na konstrukcje membranowe produkowanych przez firmę W.L. Gore Assoc. Int. (USA) [16]

Nazwa tkaniny	rodzaj włókien splot pokrycie	Masa liniowa włókien	Masa powierz- chniowa tkaniny	Wytrzymałość na rozciąganie		Wydłużenie		Wytrzymałość na rozdzielanie		Przyczep- ność	Wytrzyma- łość na zginanie	Zakres temperatur eksploatacji min / max	Przepusz- czalność światła	Warstwy wykończe- niowe wewn./ zewn.
				kierunek osnowy	kierunek wętku	kierunek osnowy	kierunek wętku	kierunek osnowy	kierunek wętku					
				N / 5 cm		%		N					N / cm	
Gore Tenara Architectural Fabric type 1 3T20	PTFE płócienny PTFE	— ¹⁾	630	3 000	2 900	— ¹⁾	— ¹⁾	818	854	—	> 50 000	— ¹⁾	19	—
Gore Tenara Architectural Fabric type 1 3T40	PTFE płócienny PTFE	— ¹⁾	630	3 000	2 900	— ¹⁾	— ¹⁾	818	854	—	> 50 000	— ¹⁾	38	—
Gore Tenara Architectural Fabric type 2 4T20	PTFE płócienny PTFE	— ¹⁾	830	4 200	4 000	— ¹⁾	— ¹⁾	925	925	—	> 50 000	— ¹⁾	19	—
Gore Tenara Architectural Fabric type 2 4T40	PTFE płócienny PTFE	— ¹⁾	830	4 200	4 000	— ¹⁾	— ¹⁾	925	925	—	> 50 000	— ¹⁾	38	—
Gore Tenara Architectural Fabric VGO180	PTFE panama —	— ¹⁾	520	3 240	3 240	— ¹⁾	— ¹⁾	934	934	—	— ¹⁾	— ¹⁾	32	—
Gore Tenara Architectural Fabric VGO181	PTFE panama —	— ¹⁾	330	2 250	2 150	— ¹⁾	— ¹⁾	347	347	—	— ¹⁾	— ¹⁾	32	—

¹⁾ brak danych;

2.6.8.3. Charakterystyka pożarowa

Stosowane obecnie tkaniny na konstrukcje membranowe, posiadają odporność ogniową, która umożliwia ich bezpieczne stosowanie w obiektach o różnym przeznaczeniu. Najczęściej określa się odporność ogniową wg normy DIN 4102 lub – wg wymagań amerykańskich – California State Fire Marshal.

Najwyższą odporność ogniową mają tkaniny z włókien teflonowych. Są to materiały niepalne, zaliczane do klasy A2 wg DIN. Niemal równie wysoką odporność mają tkaniny z włókien szklanych pokrytych PTFE lub silikonem oraz tkaniny aramidowe pokryte PTFE w trakcie prób). Są one także zaliczane do klasy A2.

Tkaniny poliestrowe z powłoką PVC nie podtrzymują palenia i w warunkach pożaru ulegają stopieniu i zamianie w produkty gazowe. Nie powstają krople PVC, które kapiąc, mogłyby wywoływać oparzenia. Charakterystycznym zjawiskiem jest powstawanie w bardzo krótkim czasie dużych otworów w membranie, dzięki czemu możliwe jest naturalne oddymianie obiektu. Wg wielu opinii, poprawia to znacznie ich bezpieczeństwo. Na rys. 2.183 przedstawiono konstrukcję membranową, z dziurą powstałą w wyniku pożaru. Tkaniny poliestrowe z powłoką PVC są zaliczane do klasy B1 (DIN) oraz T19 (California). Do tej samej klasy zaliczane są również tkaniny aramidowe z powłoką PVC.



Rys. 2.183 – konstrukcja membranova z tkaniny PES/PVC, uszkodzona w trakcie pożaru

Ilustracja za [92]

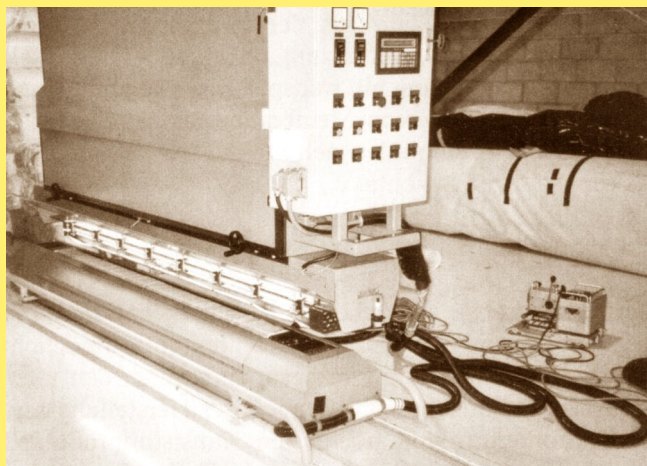
2.6.8.4. Połączenia tkanin w konstrukcjach membranowych

Tkaniny membranowe łączy się przez spawanie lub szycie. Ten drugi sposób ma obecnie mniejsze znaczenie i nie do wszystkich rodzajów tkanin może być stosowany. Podstawowym sposobem wykonywania połączeń jest spawanie. Stosowane są trzy sposoby spawania tkanin [204]:

- **spawanie za pomocą gorącego powietrza**; technika ta polega na wprowadzeniu pomiędzy dwie tkaniny dyszy dostarczającej powietrze ogrzane do odpowiedniej temperatury, a następnie natychmiastowym ich dociśnięciu. Najczęściej jest to wykonywane w sposób ciągły, poprzez dociskanie tkanin teflonowymi rolkami. Jakość połączenia w dużym stopniu zależy od umiejętności operatora. Połączenie takie może być stosowane jedynie do drugorzędnych konstrukcji oraz do drobnych uzupełnień i napraw, wykonywanych na placu budowy.
- **spawanie za pomocą podgrzewanych rolek**, między którymi przesuwają się łączone tkaniny. Jest to jeden z najstarszych sposobów spawania materiałów termoplastycznych. Jego wadą jest to, że umożliwia wykonywanie jedynie połączeń zakładkowych i tylko w sposób ciągły.

– **spawanie prądem o wysokiej częstotliwości**; ten sposób spawania zapewnia najwyższą jakość połączeń. Polega on na docięnięciu łączonych tkanin z określoną siłą oraz nagraniu do odpowiedniej temperatury za pomocą przepływającego prądu o wysokiej częstotliwości (27.12 MHz). Spawanie odbywa się sekwencyjnie, a nie w sposób ciągły. Kształt i wielkość elektrody decydują o kształcie połączenia. Na rys. 2.184 przedstawiono przykład urządzenia do spawania prądem o wysokiej częstotliwości.

Poszczególne części montażowe tkanin są, po scaleniu, konfekcjonowane w taki sposób, aby zajmowały jak najmniej miejsca w transporcie oraz aby można je było jak najdogodniej rozłożyć na placu budowy, rys. 2.185



Rys. 2.184 – spawanie tkaniny prądem o wysokiej częstotliwości

Ilustracja za [28]



Rys. 2.185 – konfekcjonowanie tkanin

Ilustracja za [28]

Podstawowe rodzaje połączeń | W zależności od sposobu, w jaki jest ukształtowane połączenie montażowe tkanin, wyróżnia się wiele ich rodzajów. Oprócz samych szwów i spoin, w połączeniach umieszczane są często dodatkowe elementy, które zwiększają nośność połączenia, poprawiają szczelność i ułatwiają wykonanie. Spośród tych elementów należy wymienić przede wszystkim:

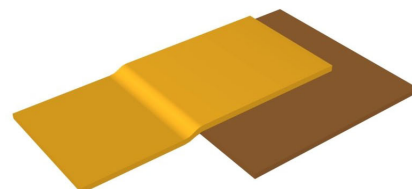
- listwy zaciskowe i brzegowe, wykonywane z płaskowników aluminiowych lub stalowych; są one często wyposażone w otwory, w których umieszcza się śruby
- rurki osłonowe i linki brzegowe
- nity oczkowe do przeplatania linek włókiennych
- specjalna linka poliestrowa, wtopiona w brzegowy pas tkaniny, tzw. keder; umożliwia on zaciśnięcie tkaniny pomiędzy płytkami lub w profilu aluminiowym
- specjalne profile aluminiowe, jedno- lub wieloczęściowe, posiadające szczelinę, w której jest umieszczany keder; profile te są najczęściej specjalnie projektowane przez firmy zajmujące się wykonywaniem membran, a czasami nawet – dla dużych obiektów – indywidualnie,

Przy wyborze rodzaju połączenia istotny jest poziom naprężeń wstępnych, które mają być wprowadzone do tkaniny. Ponieważ naciąg wstępny odbywa się w zasadzie poprzez połączenia tkaniny, konieczne jest dopasowanie rozwiązania do wielkości sił i sposobu naciągania.

Poniżej podano, za [182] [198] [199], niektóre sposoby łącznia tkaniny membranowej. Nie wyczerpują one wszystkich rodzajów rozwiązań występujących w praktyce.

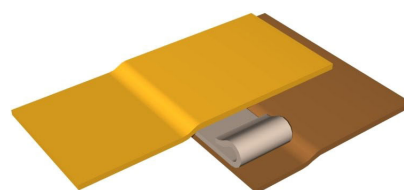
Połączenie spawane

Połączenia spawane są wykonywane przede wszystkim jako nakładkowe. Tkaniny układane są bez zagięć.



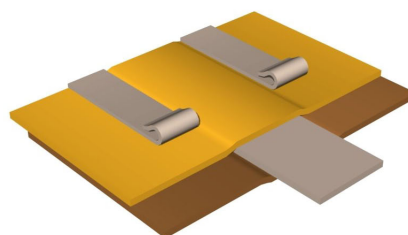
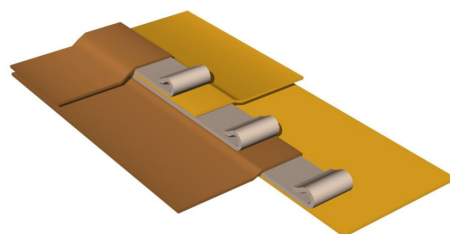
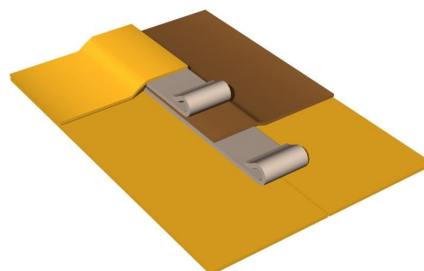
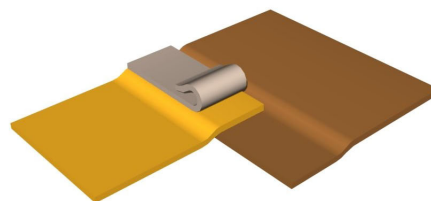
Połączenie spawane z dodatkową taśmą

Niektóre materiały (np. PTFE) wymagają zastosowania przy spawaniu dodatkowych taśm przekładowych.



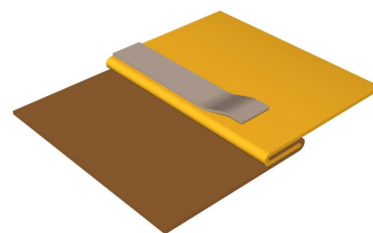
Połączenie szyte, z taśmą zabezpieczającą

Szwy szyte stosuje się rzadko, gdyż stają się one nieszczelne, ponieważ igły uszkodzają (perforują) membranę. Z tego powodu, szwy muszą być dodatkowo uszczelniane taśmami zabezpieczającymi – tj. paskami z folii, naspawanymi na wierzch. Jednakże w obszarach wielowarstwowych i szczególnie narażonych na obciążenia ciągłe stosuje się je jako wypróbowany i niezawodny sposób połączenia. Sama nić wymaga w przypadku zastosowania w budowlach stałych ochrony przed światłem i warunkami atmosferycznymi. Możliwe jest wykonanie połączenia tego rodzaju dla układu wielu warstw tkaniny i taśm zabezpieczających.



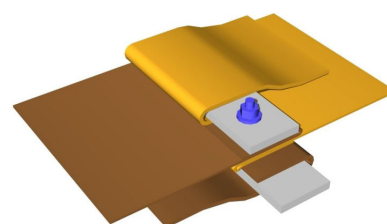
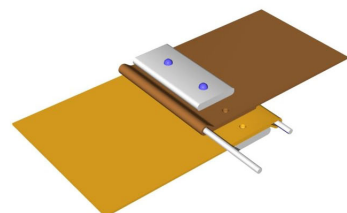
Połączenie szyte zakładkowe, dwustronnie zagięte, z taśmą zabezpieczającą

Dwustronne zagięcie tkaniny wzmacnia połączenie szyte. Pozostałe właściwości tego połączenia – jak dla połączenia szytego bez zagięć.



Połączenie z płytkami zaciskowymi

Za pomocą płytek zaciskowych udaje się uzyskać porównywalne wytrzymałości szycia jak przy szwach spawanych. Ponieważ ani szwów szytych jak i szwów spawanych nie można wykonywać na placu budowy, płytki zaciskowe mogą być uznane za standardowe rozwiązanie na wykonywanie złącz na placu budowy.



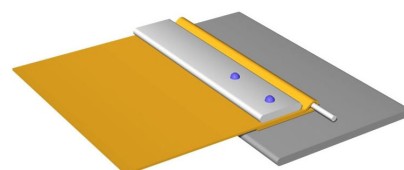
Połączenie z listwą brzegową

W tym rozwiązaniu listwa brzegowa zastępuje cięgno, wzmacniając jednocześnie krawędź tkaniny. Stosowane raczej w mniejszych obiektach.



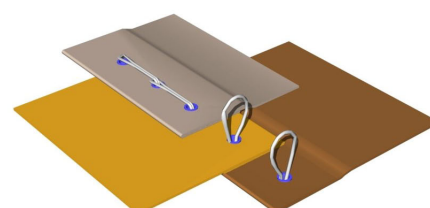
Połączenie zaciskowe z konstrukcją wsporczą

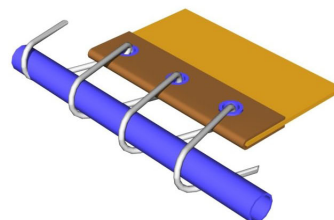
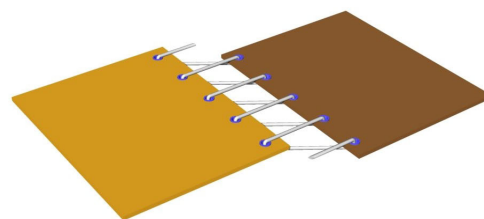
W tego typu połączeniu bardzo często stosowane są gwintowane trzpienie, na które nakłada się tkaninę. Otwory muszą być wzmocnione nitami oczkowymi. Płytki zaciskowe dociskają tkaninę.



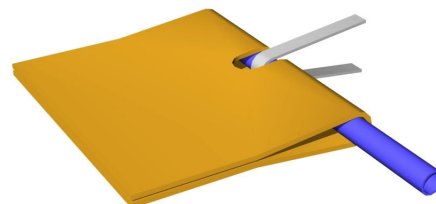
Połączenie sznurowane, pętelkowe

Złącza pętelkowe i zygzakowe nadają się głównie na połączenia o małym obciążeniu, przede wszystkim w budowlach tymczasowych i przy małym wyężeniu konstrukcji; można je szybko wykonać na placu budowy.

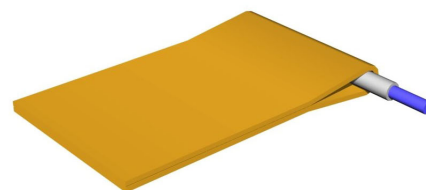
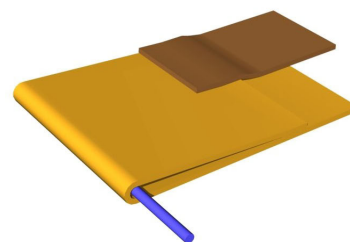


Połączenie sznurowane, „zygzak”**Rurka w kieszeni**

Rurka, przebiegająca w „kieszeni” jest łatwa w montażu i stosunkowo niedroga. Jednakże to rozwiązanie nadaje się tylko dla małych obciążeń. Było stosowane standardowo przez długi czas w małych halach pneumatycznych.

**Kieszeń na linę brzegową**

Służy do połączenia membrany z cięgnem brzegowym. Obecnie dla zabezpieczenia tkaniny przed przecieraniem, wewnątrz kieszeni umieszcza się rurkę osłonową, jak w rozwiązaniu powyżej, a dopiero w niej cięgno.

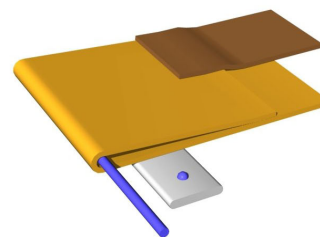
**Kieszeń na linę brzegową, dwuwarstwowa****Kieszeń na linę brzegową, dwuwarstwowa, z taśmą napinającą**

Taśmy napinające stosowane są dla zapewnienia możliwości lokalnego naciągnięcia tkaniny w strefie brzegowej.



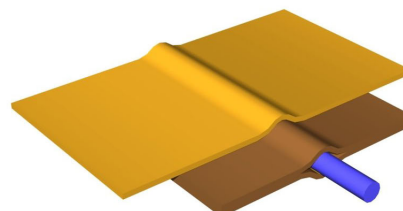
Kieszonka na linę brzegową, dwuwarstwowa, z listwą brzegową

Listwa brzegowa zabezpiecza tkaninę przed siłami stycznymi powstającymi podczas przesuwania się ciężna i dodatkowo wzmacnia jej krawędź.



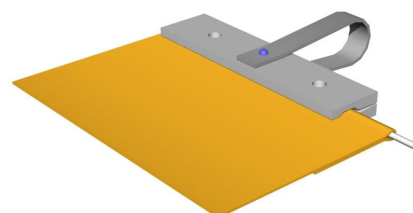
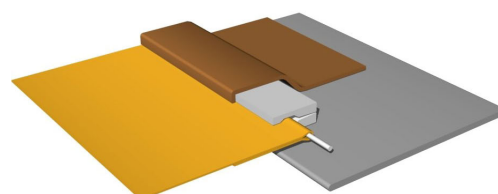
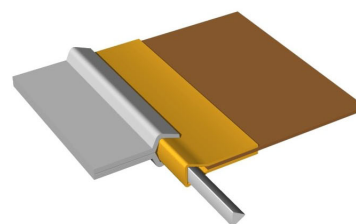
Kieszonka na linę pośrednią, dwuwarstwowa

Służy do połączenia membrany z cięgnem pośrednim. Często właściwa kieszonka, w której przesuwa się cięgno, jest przyspawana do membrany.



Połączenie zaciskowe dla silnie obciążonych membran

Profil aluminiowy, w którym jest umieszczany keder może mieć złożony przekrój poprzeczny (zmniejszający przenikanie ciepła, podobnie jak w ścianach kurtynowych) i składać się z kilku części. W małych obiektach profile są jednoczęściowe, a krawędź tkaniny, zakończoną kederem, jest wsuwana w szczelinę profilu. W większych i bardziej odpowiedzialnych obiektach, górna część profilu stanowi rodzaj płytki zaciskowej. Tkanina (z kederem) jest układana na dolnej części profilu, zamocowanej do konstrukcji wsporczej, a następnie dociskana górną częścią profilu.



* * *