

Politechnika Wroclawska Wydział Górniczy

Praca doktorska pt.:

***Wpływ konstrukcji taśmy oraz geometrii
odcinka przejściowego na rozkład obciążeń
w taśmie z linkami stalowymi***

Autor: **mgr inż. Dariusz Woźniak**

Promotor: **dr hab. inż. Lech Gładysiewicz
prof. Politechniki Wroclawskiej**

Wroclaw - 1998

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	8
2. DOTYCHCZASOWE WYNIKI BADAŃ ODCINKÓW PRZEJŚCIOWYCH TAŚMY PRZENOŚNIKOWEJ	10
3. TEZY PRACY.....	16
4. Badania eksperymentalne na odcinku przejściowym przenośnika rurowego	17
4.1 Przedmiot badań.....	17
4.2 <i>Badania pola przemieszczeń taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego</i>	<i>21</i>
4.2.1 <i>Metoda pomiarowa.....</i>	<i>21</i>
4.2.2 <i>Przebieg badań i wyniki pomiarów</i>	<i>22</i>
4.2.3 <i>Analiza wyników badań</i>	<i>26</i>
4.3 Badania stanu odkształceń w taśmie	27
4.3.1 <i>Metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej.....</i>	<i>27</i>
4.3.2 <i>Przebieg i wyniki badań.....</i>	<i>30</i>
4.3.3 <i>Analiza wyników badań</i>	<i>32</i>
4.3.4 <i>Metoda fotografii plamkowej.....</i>	<i>40</i>
4.3.5 <i>Wyniki badań uzyskane metodą fotografii plamkowej</i>	<i>41</i>
4.3.6 <i>Analiza wyników badań z metody fotografii plamkowej.....</i>	<i>42</i>
4.4 Podsumowanie badań eksperymentalnych.....	44
5. MODEL TEORETYCZNY TAŚMY Z LINKAMI STALOWYMI NA ODCINKU PRZEJŚCIOWYM	46
5.1 Założenia do modelu taśmy z linkami stalowymi na odcinku przejściowym.....	46
5.2 Wymuszenia geometryczne na odcinku przejściowym przenośnika rurowego	47
5.3 Podstawy teoretyczne modelu taśmy z linkami stalowymi na odcinku przejściowym.....	53
5.4 Określenie właściwości taśmy z linkami stalowymi dla potrzeb modelowania odcinków przejściowych	58
5.4.1 <i>Określenie modułu sprężystości podłużnej linek stalowych.....</i>	<i>58</i>
5.4.2 <i>Określenie zastępczego modułu odkształcenia postaciowego gumy.....</i>	<i>62</i>
5.4.3 <i>Podsumowanie.....</i>	<i>67</i>
5.5 Analiza obciążeń linek w rejonie odcinka przejściowego przenośnika rurowego ..	69
6. WNIOSKI.....	80
Literatura	82-83

Załącznik A: Wyniki pomiarów odwzorowania geometrii taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego 84-110

Załącznik B: Wyniki badań stanu odkształceń w taśmie na odcinku przejściowym przenośnika rurowego metodą elastooptycznej warstwy powierzchniowej 111-146

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1	Odcinek przejściowy przenośnika rurowego.....	9
Rys. 2.1	Rozkład obciążeń linek po szerokości taśmy dla odcinka przejściowego przenośnika nieckowego wg [12]	10
Rys. 2.2	Rozkład obciążeń drugiej linki (liczonej od brzegu taśmy) dla różnych długości odcinka przejściowego przenośnika nieckowego wg [12]	11
Rys. 2.3	Metoda pomiarowa przy badaniach współpracy sąsiednich linek w taśmie wg [12] ..	11
Rys. 2.4	Taśma na odcinku przejściowym przenośnika rurowego (ustawienie nr 5) wg [6] a) widok z boku b) przekroje poprzeczne taśmy - widok z kierunku A	13
Rys. 2.5	Porównanie wyników badań odkształceń taśmy (ustawienie nr 1 i nr 5) wg [6].....	13
Rys. 2.6	Przekrój poprzeczny taśmy z linkami stalowymi [15]: a) układ rzeczywisty, b) i c) układ zastępczy	14
Rys. 4.1	Stanowisko pomiarowe odcinka przejściowego przenośnika rurowego	18
Rys. 4.2	Modele konstrukcji prototypowych taśm z linkami stalowymi do przenośnika rurowego	20
Rys. 4.3	Przekrój przez stanowisko badawcze. Metoda pomiarowa.	21
Rys. 4.4	Przekroje poprzeczne taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego.....	22
Rys. 4.5	Kształt przekroju poprzecznego B-B taśmy w zależności od długości odcinka przejściowego (taśma D, $F_N = 60 \text{ kN}$, $e = + 75 \text{ mm}$).....	23
Rys. 4.6	Kształt przekroju poprzecznego B-B taśmy w zależności od położenia bębna (taśma D, $L_e = 5.5 \text{ m}$, $F_N = 60 \text{ kN}$)	23
Rys. 4.7	Porównanie przekrojów poprzecznych taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego dla dwóch konstrukcji taśmy	24
Rys. 4.8	Porównanie przekrojów poprzecznych taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego dla dwóch konstrukcji taśmy	24
Rys. 4.9	Porównanie wyników badań czterech przebadanych konstrukcji taśm. Parametry odcinka przejściowego: $L_e = 7.5 \text{ m}$, $e = + 75 \text{ mm}$, $F_N = 60 \text{ kN}$	25
Rys. 4.10	Schemat polaryskopu do metody elastooptycznej warstwy powierzchniowej (światła odbitego)	28
Rys. 4.11	Schemat stanowiska pomiarowego z umiejscowieniem warstwy elastooptycznej ..	31
Rys. 4.12	Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń dla taśmy typu C ($L_e = 7.5 \text{ m}$, $e = 0$, $F_N = 60 \text{ kN}$)	33
Rys. 4.13	Przebieg różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy dla taśmy typu C.....	34
Rys. 4.14	Rozkład odkształceń po szerokości taśmy na odcinku przejściowym w okolicach bębna w zależności od położenia bębna w stosunku do osi poziomej rury (e).....	36

Rys. 4.15	Rozkład odkształceń po szerokości taśmy na odcinku przejściowym w okolicach bębna w zależności od długości odcinka przejściowego L_e	37
Rys. 4.16	Rozkład odkształceń po szerokości taśmy na odcinku przejściowym w okolicach bębna w zależności od siły napinania taśmy F_N	38
Rys. 4.17	Porównanie wyników badań dla różnych konstrukcji taśm.....	39
Rys. 4.18	Zjawisko plamkowania i rejestracja plamkogramu	40
Rys. 4.19	Schemat układu do analizy plamkogramu	41
Rys. 4.20	Lokalizacja strefy pomiarów metodą fotografii plamkowej oraz lokalizacja analizowanych przekrojów	42
Rys. 4.21	Wykres przemieszczeń dla taśmy A w okolicach bębna wyznaczony metodą fotografii plamkowej: a) $L_e=5.5$ m, $e=+75$ mm, $F=60$ kN b) $L_e=7.5$ m, $e=+75$ mm, $F=60$ kN.....	43
Rys. 5.1	Przyjęty układ współrzędnych do analizy wymuszeń geometrycznych.....	48
Rys. 5.2	Przekrój taśmy na początku układu $x=0$	48
Rys. 5.3	Przekrój taśmy na końcu układu ($x=L_e$).....	49
Rys. 5.4	Przekrój poprzeczny połowy taśmy dla $x=0$	50
Rys. 5.5	Pole przemieszczeń taśmy na odcinku przejściowym wg modelu geometrycznego.	51
Rys. 5.6	Przekroje poprzeczne taśmy na odcinku przejściowym: a) wyznaczone modelem teoretycznym, b) z pomiarów na stanowisku badawczym	52
Rys. 5.7	Schemat obciążenia linek na odcinku przejściowym.....	54
Rys. 5.8	Charakterystyka wytrzymałościowa linek stalowych.....	58
Rys. 5.9	Charakterystyka rozciągania trzech próbek linki $\varnothing 6$ mm	60
Rys. 5.10	Schemat obciążania linki $\varnothing 6$ mm w badaniach dynamicznych.....	61
Rys. 5.11	Charakterystyka rozciągania linki $\varnothing 6$ mm zatopionej w gumie w badaniach dynamicznych	61
Rys. 5.12	Próbka do badań modułu odkształcenia postaciowego gumy	62
Rys. 5.13	Schemat układu trzech linek do modelu teoretycznego	63
Rys. 5.14	Schemat układu przenoszenia sił	64
Rys. 5.15	Wyniki obliczeń modelu teoretycznego dla układu z linkami o średnicy $\varnothing 6$ mm: a) siły F w linkach b) wydłużenia u	66
Rys. 5.16	Porównanie wyników z modelu teoretycznego z wynikami badań laboratoryjnych dla taśmy z linkami o średnicy 6 mm. W modelu zadano moduł odkształcenia postaciowego gumy $G=2.9$ N/mm ²	67
Rys. 5.17	Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu A ($L_e=7.5$ m, $e=75$ mm).	70
Rys. 5.18	Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu B ($L_e=7.5$ m, $e=75$ mm).....	71

Rys. 5.19	Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu C ($L_e=7.5$ m, $e=75$ mm).....	72
Rys. 5.20	Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu D ($L_e=7.5$ m, $e=75$ mm).	73
Rys. 5.21	Wskaźniki do analizy obciążeń linek.....	74
Rys. 5.22	Wskaźniki nierównomierności obciążeń linek dla czterech typów taśm	76
Rys. 5.23	Przyrosty sił w linkach po połowie szerokości taśmy w przekroju nabiegania na bęben wg modelu teoretycznego dla różnych wysokości położenia bębna	77
Rys. 5.24	Przyrosty sił w linkach po połowie szerokości taśmy w przekroju nabiegania na bęben wg modelu teoretycznego dla różnych długości odcinka przejściowego	78
Rys. 5.25	Nierównomierność obciążeń linek w zależności od długości odcinka przejściowego	79

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- F_N - siła napinania taśmy, [N]
 L_e - długość odcinka przejściowego, [m]
 K - długość strefy wpływu odcinka przejściowego, [m]
 e - położenie taśmy na bębnie w stosunku do poziomej osi symetrii przekroju kołowego taśmy zwiniętej w rurę, [mm]
 n - liczba linek stalowych w taśmie,
 d - średnica linki, [mm]
 E - moduł sprężystości podłużnej linki stalowej, [N/m²]
 $(EA)_i$ - sztywność linki stalowej, [N]
 t - podziałka linek, [mm]
 G - moduł odkształcenia postaciowego pasma gumy pomiędzy linkami, [N/m²]
 h_t - grubość taśmy, [mm]
 F_i - siła w i-tej linie, [N]
 F_{oi} - siła początkowa w i-tej linie, [N]
 u_i - wydłużenie i-tej linki, [mm]
 E_l - energia sprężysta w linie, [Nm]
 E_G - energia sprężysta w warstwie gumy, [Nm]
 τ - naprężenia styczne w warstwie gumy, [N/m²]
 R_i - wektor wodzący i-tej linki z modelu geometrycznego,
 φ_i - kąt obrotu wektora wodzącego i tej linki,
 P_{max} - maksymalny przyrost, [N]
 S_{max} - maksymalny spadek, [N]
 $P_{max}-S_{max}$ - bezwzględna różnica przyrostów w linie skrajnej i środkowej, [N]
 P_{max}/F_{oi} - względny maksymalny przyrost, [%]
 S_{max}/F_{oi} - względny maksymalny spadek, [%]
 $2*b_0/B$ - procentowy udział strefy utraty stateczności na szerokości taśmy, [%]

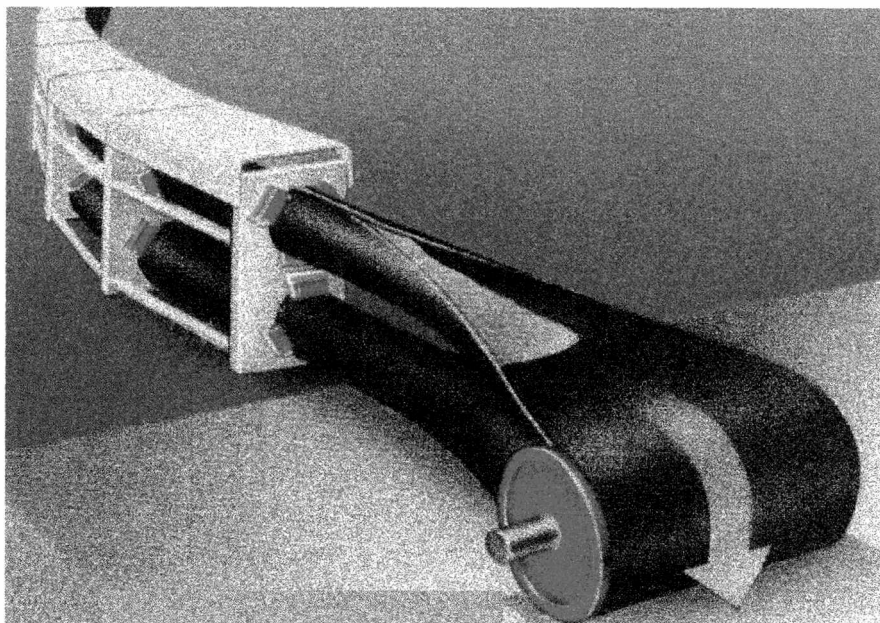
1. Wstęp

Przenośniki taśmowe są obecnie podstawowym urządzeniem transportowym stosowanym w górnictwie odkrywkowym i podziemnym. Znalazły one zastosowanie również w innych gałęziach przemysłu m.in. w energetyce, ciepłownictwie, budownictwie, cukrownictwie. W transporcie materiałów sypkich, gdzie wymagane jest zabezpieczenie przed pyleniem urobku lub zabezpieczenie przed oddziaływaniem warunków atmosferycznych na transportowane nosiwo, coraz szersze zastosowanie znajdują specjalne przenośniki z taśmą rurową. Cechą charakterystyczną tego przenośnika jest to, że w zasadzie nie różni się on od przenośnika konwencjonalnego, jedynie na trasie taśma zwinięta jest w rurę wewnątrz której leży nosiwo. Daje to możliwość prowadzenia trasy po złożonych krzywiznach przestrzennych bez konieczności dzielenia taśmociągu i stosowania przesypów. Ponadto przenośniki rurowe mogą transportować urobek na trasach o kątach nachylenia znacznie większych niż trasy przenośników nieckowych. Dzięki swoim zaletom przenośniki z taśmą rurową rozszerzyły zakres zastosowań transportu ciągłego stając się w wielu przypadkach jedynym ekonomicznie i ekologicznie uzasadnionym rozwiązaniem.

Jednym z kierunków rozwoju systemów transportu ciągłego jest poprawa ich niezawodności. Niezawodność taśmociągu zależy w dużej mierze od liczby przenośników wchodzących w jego skład [22]. W związku z tym dąży się do projektowania systemów transportowych składających się z długich przenośników z możliwością pokonywania łuków pionowych i poziomych (np. przenośniki nieckowe krzywoliniowe, lub przenośniki rurowe). Długie trasy przenośników wymagają jednak stosowania taśm z linkami stalowymi. Innym ważnym czynnikiem decydującym o niezawodności przenośnikowych systemów transportowych jest trwałość taśmy - najdroższego elementu przenośnika. Podstawowym kryterium doboru taśmy, oprócz wymaganej wytrzymałości na rozciąganie, jest zachowanie się taśmy na odcinku przejściowym przenośnika, na którym dochodzi do znacznego zróżnicowania odkształceń elementów rdzenia taśmy (linek stalowych lub włókien tkaniny). Kryterium to nabiera szczególnego znaczenia przy przenośnikach rurowych, gdzie taśma na odcinku przejściowym tworząc złożoną powierzchnię przestrzenną określoną z jednej strony płaskim przekrojem poprzecznym na bębnie, a z drugiej przekrojem kołowym (Rys. 1.1), charakteryzuje się znacznie większym polem odkształceń niż w przypadku odcinków przejściowych przenośników nieckowych. Linki na brzegach taśmy poddane są znacznie

większym odkształceniom niż linki w pobliżu osi podłużnej taśmy. W wyniku tego występuje znaczne zróżnicowanie naprężeń po szerokości taśmy. W skrajnych przypadkach przy nieodpowiedniej konstrukcji rdzenia lub niewłaściwych parametrach geometrycznych odcinka przejściowego (tj. długość odcinka i położenie bębna) dochodzić może do utraty stateczności taśmy w pobliżu bębna (tzw. wybrzuszeń). Cykliczne pokonywanie odcinków przejściowych przy nadmiernych różnicach naprężeń może doprowadzić [3] do:

- utraty stabilnego biegu taśmy,
- nierównomiernego rozkładu trwałych odkształceń taśmy,
- szybkiego zniszczenia zmęczeniowego taśmy i jej połączeń.



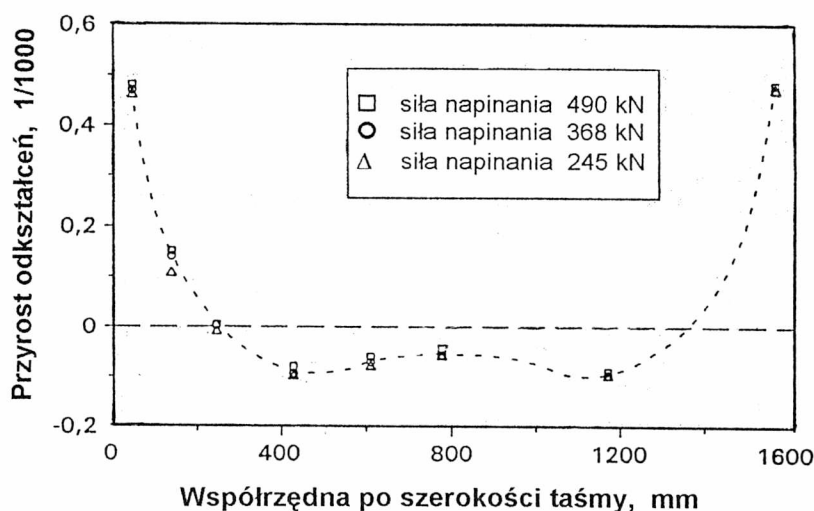
Rys. 1.1 Odcinek przejściowy przenośnika rurowego

Pomimo licznych już zastosowań przenośników rurowych (na świecie około 300, kilka prototypowych egzemplarzy w Polsce) brak jest dotychczas odpowiednich modeli teoretycznych stanowiących podstawę obliczeń projektowych tych przenośników, jak również brak jest optymalnych rozwiązań konstrukcji taśm z linkami stalowymi do przenośników rurowych.

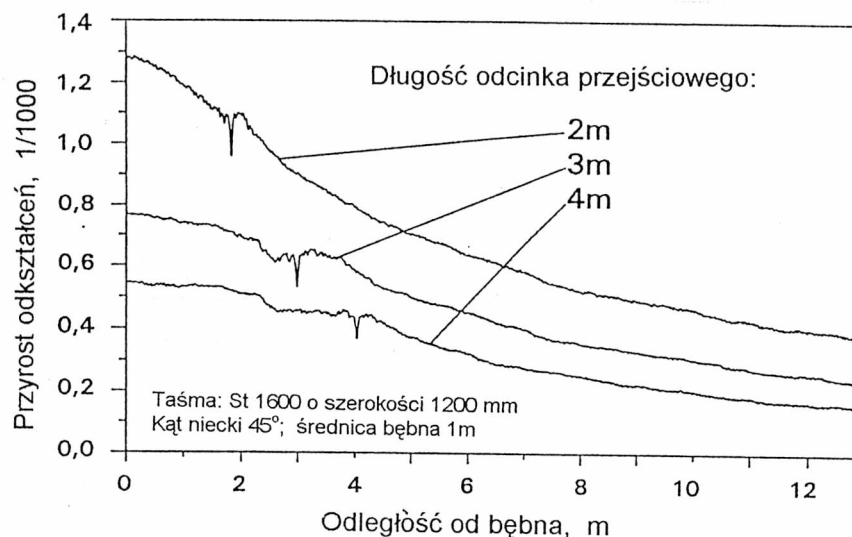
2. Dotychczasowe wyniki badań odcinków przejściowych taśmy przenośnikowej

W zakresie badań odcinków przejściowych taśm jest stosunkowo niewiele publikacji. Wśród prac eksperymentalnych, prowadzonych w celu rozpoznania zagadnienia można wyróżnić badania taśmy z linkami stalowymi na odcinku przejściowym przenośnika nieckowego prowadzone w Hanowerze przez M. Hagera i S. Tappeinera [12], oraz badania odcinka przejściowego na modelu przenośnika rurowego przedstawione w pracy W. Engsta [6]. Wśród prac teoretycznych, uwzględniających oddziaływanie sąsiednich linek w taśmie na skutek odkształceń spowodowanych np. odcinkiem przejściowym, na uwagę zasługują przede wszystkim prace K.H.Oehmena [14], [15] oraz praca A.Schmandry [19].

Badania odcinka przejściowego przenośnika nieckowego M. Hagera i S. Tappeinera [12] wykonano na doświadczalnym przenośniku nieckowym o długości 36 m umożliwiającym zmiany geometrii odcinka przejściowego. Do pomiaru wydłużeń linek zastosowano tensometry, przy czym naklejano je nie bezpośrednio na linki, a na tulejki z żywicy w których były zatopione linki. Metoda ta wymaga niestety ingerencji w strukturę taśmy, ponadto pomiar wydłużeń jest możliwy jedynie w kilku linkach. W wyniku przeprowadzonych badań autorzy uzyskali przyrosty wydłużeń linek taśmy, przykładowy rozkład wydłużeń po szerokości taśmy przedstawia rys. 2.1 oraz przykładowe rozkłady wydłużeń po długości taśmy dla drugiej linki z brzegu taśmy przedstawia rys 2.2.

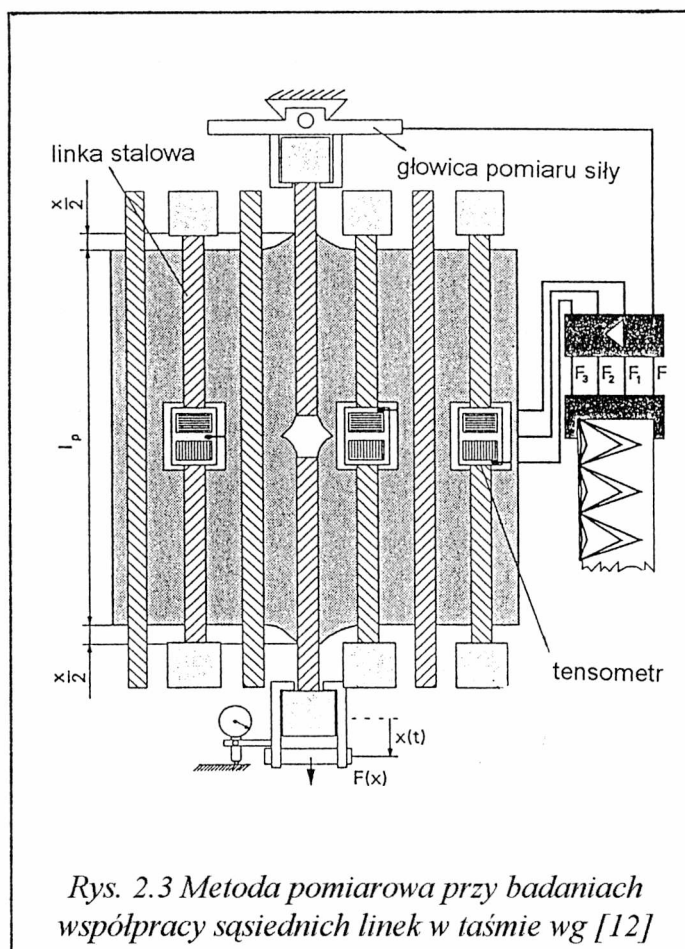


Rys. 2.1 Rozkład obciążeń linek po szerokości taśmy dla odcinka przejściowego przenośnika nieckowego wg [12]



Rys. 2.2 Rozkład obciążeń drugiej linki (liczonej od brzegu taśmy) dla różnych długości odcinka przejściowego przenośnika nieckowego wg [12]

Stwierdzono, że siła w ciągnie (Rys. 2.1) oraz prędkość taśmy nie mają wpływu na nierównomierność obciążeń linek. Duży wpływ ma natomiast długość odcinka przejściowego



Rys. 2.3 Metoda pomiarowa przy badaniach współpracy sąsiednich linek w taśmie wg [12]

(Rys. 2.2), przy czym wzrost obciążeń linek nie jest proporcjonalny do zmian długości tego odcinka (zmniejszania długości). Z wykresu wynika, że do wyrównanie obciążeń linek dochodzi nie na odcinku przejściowym, ale daleko poza nim. Na nierównomierność obciążeń linek ma również wpływ kąt niecki oraz szerokość taśmy. Aby rozpoznać mechanizmy jakie rządzą współpracą sąsiednich linek w taśmie i przenoszeniem sił pomiędzy nimi, autorzy przeprowadzili eksperyment którego istotę wyjaśnia rys 2.3. Stwierdzono, że na proces przenoszenia sił pomiędzy linkami mają wpływ następujące czynniki: rodzaj

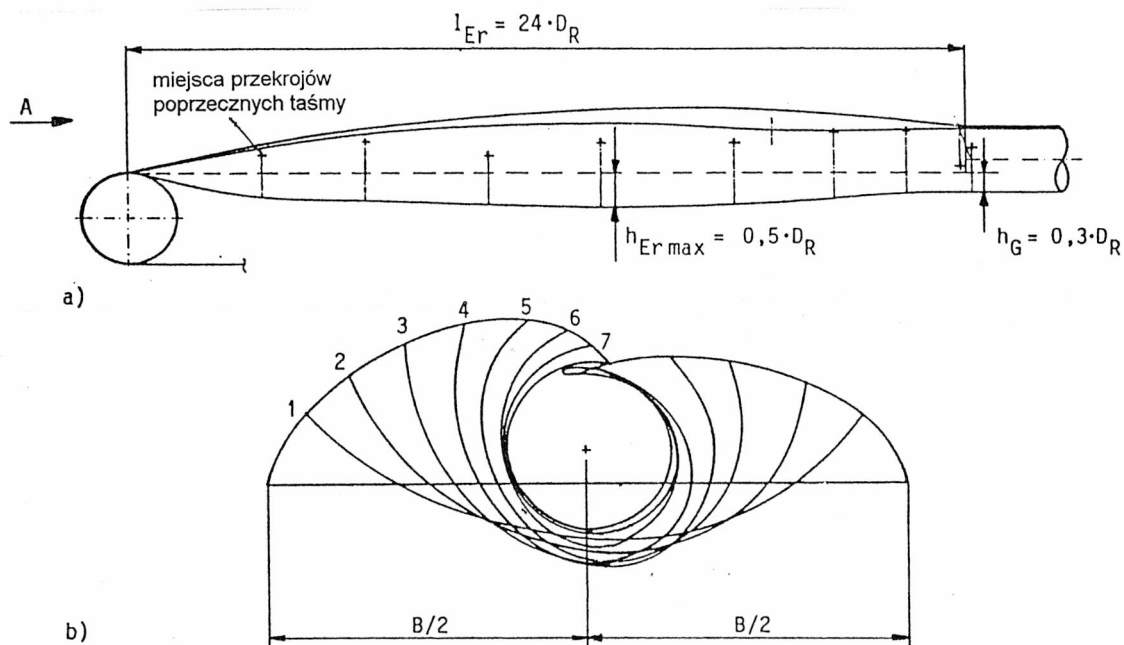
zastosowanych mieszanek gumowych, grubość okładek taśmy, podziałka i średnica linek. Ponadto dla schematu obciążenia próbki jak na rys. 2.3 stwierdzono, że 95% siły rozciągającej przejmują linki sąsiednie, a tylko 5% linki pozostałe.

Jedyne badania odcinka przejściowego przenośnika rurowego przeprowadził W.Engst [6], są to jednak badania na modelu przenośnika w którym taśma o szerokości 22 cm tworzyła przekrój kołowy o średnicy 6 cm. Była to taśma tkaninowa jednoprzekładowa wzmocniona na brzegach stalowym kordem. Autor prowadził badania zmieniając parametry geometryczne odcinka przejściowego. Tabela 2.1 zawiera przyjęte przez autora ustawienia układu. Engst wykonał pomiary pola przemieszczeń taśmy na odcinku przejściowym oraz pola odkształceń. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys.2.4 i rys. 2.5.

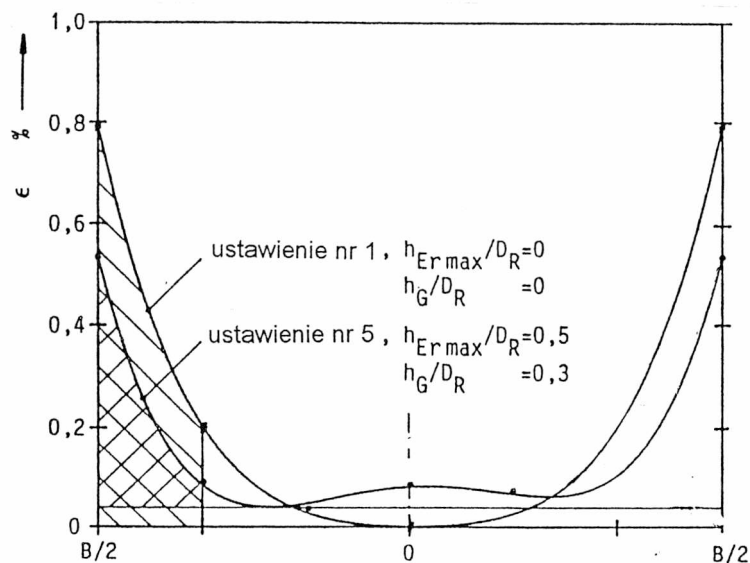
Tabela 2.1 Ustawienia odcinka przejściowego w badaniach W.Engsta

Ustawienie nr	Odcinek przejściowy nabiegający			Odcinek przejściowy zbiegający	
	l_{Er}/D_R	h_{Ermax}/D_R	h_G/D_R	l_{Ar}/D_R	h_{Armax}/D_R
1	23,3	0	0	23,3	0
2	23,3	0,2	0	23,3	0,2
3	23,3	0,3	0	23,3	0,13
4	23,3	0,4	0	23,3	0,4
5	23,3	0,5	0,5	23,3	0,5
6	23,3	0,8 bei $l_{Er}/2$	0,9	23,3	0,8 bei $l_{Ar}/2$
7	26,6	0,5	0,5	26,6	0,5
8	30,0	0,5	0,5	20,0	0,5

Analizując prace teoretyczne na uwagę zasługują prace K.H.Oehmena [14], [15]. Autor opracował model matematyczny umożliwiający określenie przyrostu odkształceń linek stalowych na skutek przechodzenia taśmy przez krzywizny poziome i pionowe, pokonywania odcinka przejściowego lub odwracania taśmy. Taśma z linkami stalowymi rozpatrywana jest jako wielopasmowe płaskie cięgno, globalnie przenoszące jedynie obciążenia wzdłużne.

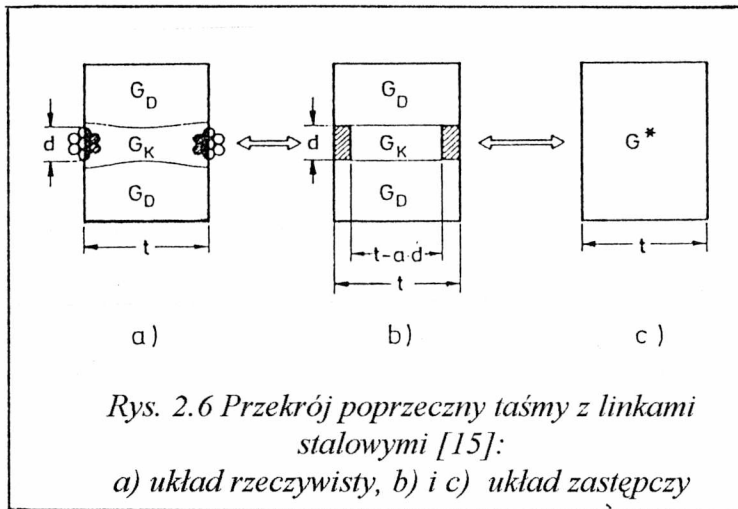


Rys. 2.4 Taśma na odcinku przejściowym przenośnika rurowego (ustawienie nr 5) wg [6]
a) widok z boku b) przekroje poprzeczne taśmy - widok z kierunku A



Rys. 2.5 Porównanie wyników badań odkształceń taśmy (ustawienie nr 1 i nr 5) wg [6]

Zastępczy wielopasmowy model taśmy tworzony jest zgodnie ze schematem przedstawionym na rys 2.6. Pasma odwzorowujące gumowe części rdzenia mają przekrój prostokątny o grubości równej grubości taśmy i rozmieszczone są po szerokości taśmy z taką samą podziałką co linki stalowe.



Pasma odwzorowujące linki stalowe mają zerową szerokość, a grubość równą grubości taśmy. Wówczas zastępczy moduł odkształcenia postaciowego G^* gumy opisuje zależność:

$$G^* = G_D \cdot \frac{h_t}{t} + G_K \cdot \frac{d}{t - 0.7 \cdot d} \quad (2.1)$$

gdzie:

- G_D - moduł odkształcenia postaciowego gumy okładkowej,
- G_K - moduł odkształcenia postaciowego gumy rdzeniowej,
- h_t - grubość taśmy,
- t - podziałka linek,
- d - średnica linek.

Wychodząc z równowagi sił w kierunku osiowym Oehmen dla każdej linki zapisuje równanie różniczkowe:

$$S \cdot \ddot{u}_i(x) + q_i(x) = 0 \quad (2.2)$$

- S - sztywność wzdłużna linki (moduł sprężystości podłużnej x przekrój poprzeczny linki),
- $\ddot{u}_i(x)$ - przyrost odkształcenia,
- $q_i(x)$ - siła wynikająca z naprężeń stycznych w ścinanej warstwie gumy pomiędzy linkami.

Rozwiązanie równania (2.2) określa zmiany siły rozciągającej linkę w wyniku przekazywania naprężeń stycznych z linek sąsiednich poprzez gumę. Oddziaływanie sąsiednich linek zależy od przemieszczeń, od średnicy i podziałki linek, grubości taśmy oraz właściwości mieszanek gumowych. Oehmen proponuje poszukiwanie rozwiązań układu równań różniczkowych w postaci szeregów.

Innym autorem, który teoretycznie badał zagadnienia obciążeń linek przy uwzględnieniu współpracy pomiędzy linkami był A.Schmandra [19]. Korzystając z założeń modelowych wyprowadzonych przez Oehmena opracował model matematyczny połączeń taśm z linkami stalowymi. Z rozważań Schmandry wynika, że przebieg sił stycznych w wyniku współpracy linek opisują funkcje hiperboliczne o następującej postaci:

$$q(x) = C_1 \cdot \cosh(ax) + C_2 \cdot \sinh(ax) \quad (2.3)$$

gdzie parametr a zależy od średnicy linki d , sztywności linki S , modułu odkształcenia postaciowego gumy G_K oraz szerokości warstwy gumy pomiędzy linkami z :

$$a^2 = \frac{G_K}{S} \cdot \frac{\pi \cdot d}{z} \quad (2.4)$$

W taśmach do przenośników rurowych w celu uzyskania zmiennej sztywności po szerokości taśmy często stosuje się różne podziałki i różne średnice linek. Tak więc zastosowanie obu modeli znacznie się komplikuje, a przy dużej liczbie linek jest wręcz niemożliwe.

Przeprowadzona tu analiza literatury z zakresu badań odcinków przejściowych wykazała, że brak jest badań taśm z linkami stalowymi na odcinkach przejściowych przenośników rurowych jak również brak jest modeli teoretycznych umożliwiających poszukiwania optymalnych konstrukcji taśm do tych przenośników.

3. Tezy pracy

Nierównomierność odkształceń taśmy na odcinku przejściowym wymusza stan naprężeń charakteryzujący się przyrostem naprężeń w linkach skrajnych kosztem spadku naprężeń w linkach środkowych. W przypadku nieprawidłowo dobranej taśmy lub źle dobranych parametrów odcinka przejściowego istnieje niebezpieczeństwo utraty stateczności, czyli zaniku naprężeń w strefie środkowej taśmy. Miarą zdolności taśmy do układania się na odcinku przejściowym jest nierównomierność obciążeń poszczególnych linek.

Istnieje możliwość zmniejszenia nierównomierności obciążeń linek poprzez odpowiedni dobór konstrukcji rdzenia oraz parametrów geometrycznych odcinka przejściowego. Dobór konstrukcji rdzenia polega na zróżnicowaniu podziałki oraz średnicy linek. Uzyskuje się wówczas zmienną po szerokości sztywność rozciągania taśmy. Dla każdej z konstrukcji rdzenia istnieje optymalny zestaw parametrów geometrycznych odcinka przejściowego. Poszukiwanie optymalnych rozwiązań możliwe jest w oparciu o uproszczony model uwzględniający współpracę sąsiednich linek polegającą na wzajemnym przekazywaniu naprężeń ścinających poprzez warstwę gumy między linkami.

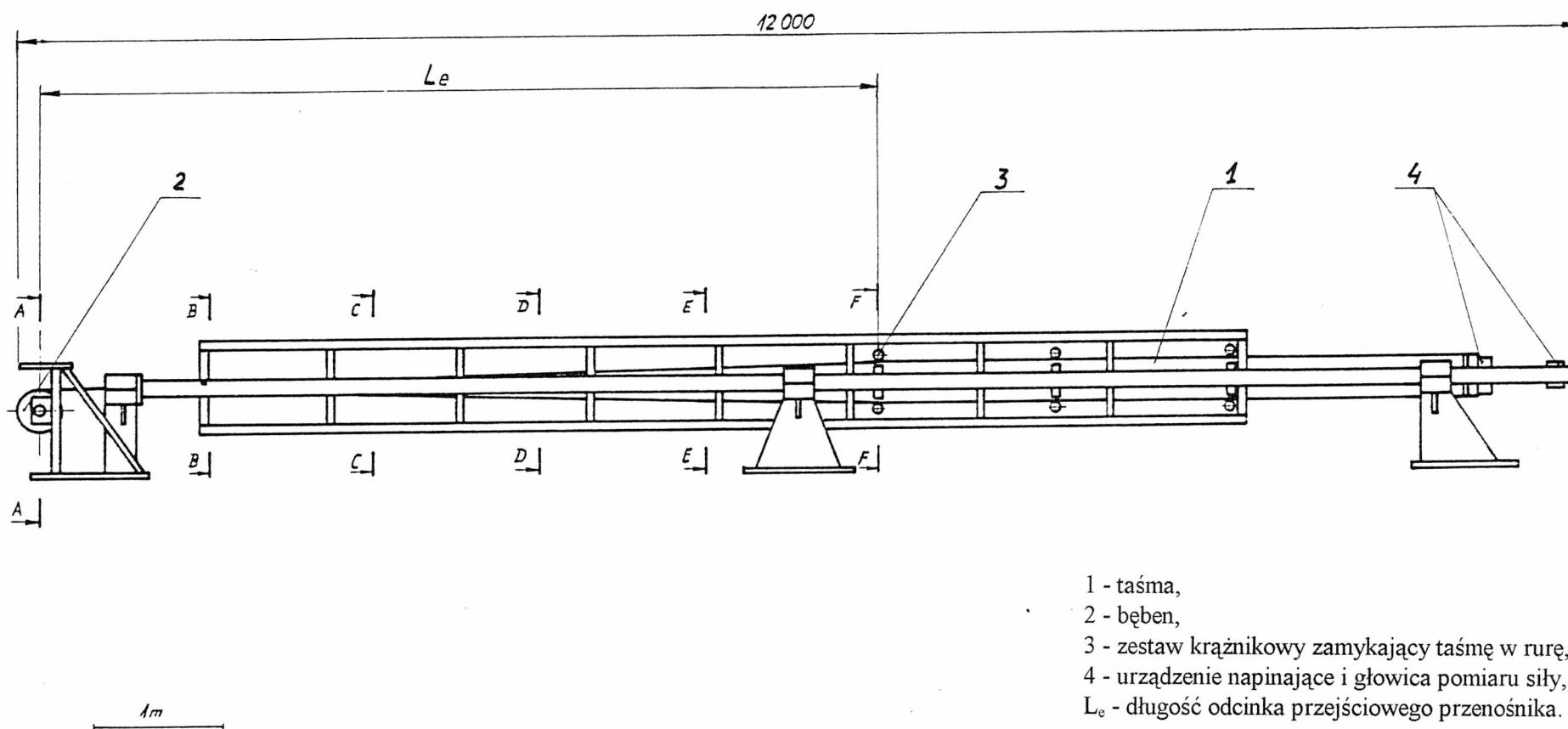
W celu udowodnienia tez pracy przeprowadzono badania kilku typów taśm na stanowisku pomiarowym oraz analizę teoretyczną pola przemieszczeń oraz pola naprężeń poszczególnych linek.

4. Badania eksperymentalne na odcinku przejściowym przenośnika rurowego

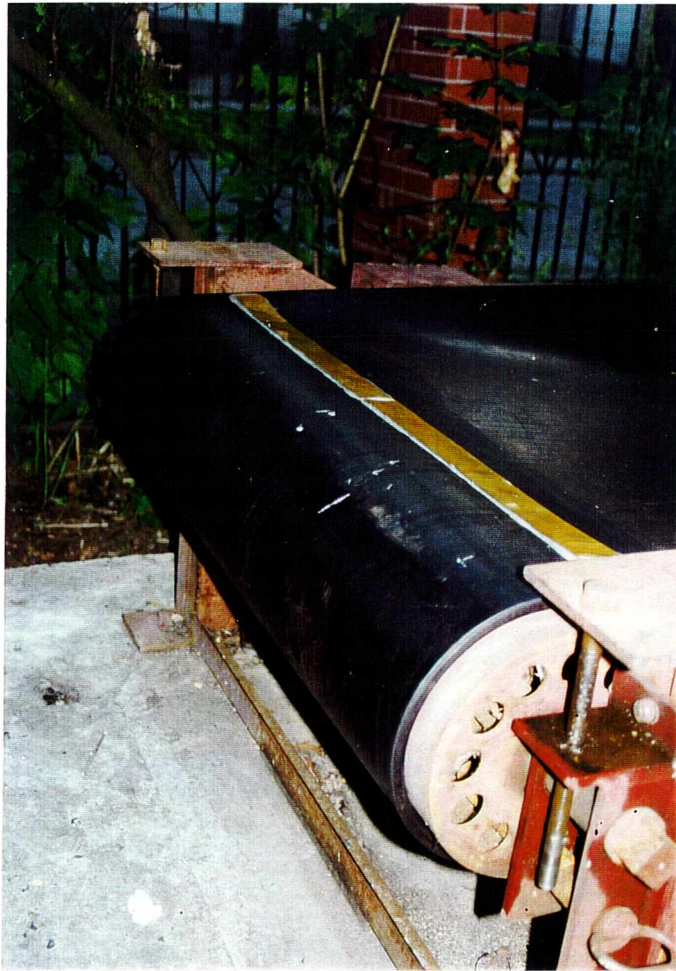
W celu rozpoznania zjawiska układania się taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego przeprowadzono badania eksperymentalne na stanowisku pomiarowym. Badania obejmowały odwzorowanie geometrii taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego oraz badania stanu odkształceń w taśmie. Pomiary wykonano na stanowisku badawczym modelującym w skali 1:1 odcinek przejściowy o długości L_e ($L_e=5.5\div 8.25$ m) (Rys. 4.1 oraz fot.1-3), tzn. odcinek przenośnika od bębna, na którym taśma ma przekrój płaski, do pierwszego zestawu krążnikowego formującego taśmę w rurę, na którym taśma ma przekrój w kształcie okręgu. Na całej długości odcinka przejściowego usunięto wszystkie zestawy krążnikowe, które w jakikolwiek sposób wymuszałyby kształt taśmy.

4.1 Przedmiot badań

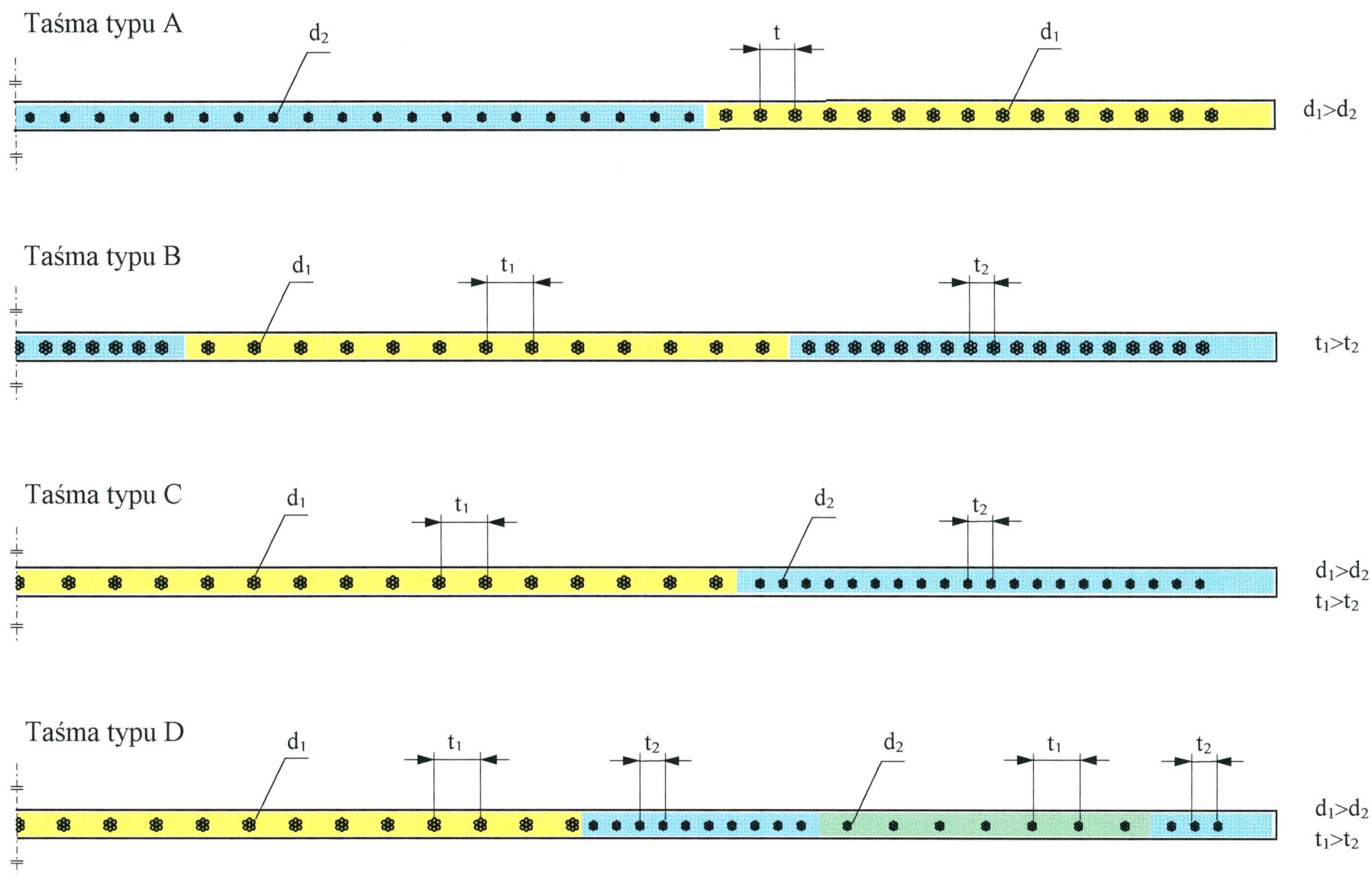
Badaniom poddano cztery prototypowe taśmy z linkami stalowymi (A,B,C,D). Wszystkie taśmy o szerokości ok. 1100 mm tworzyły przekrój kołowy na trasie przenośnika rurowego o średnicy $\varnothing 300$ mm. Konstrukcje badanych taśm przedstawiono na rys. 4.2. Taśmę typu A wykonano w IGO Poltegor-Instytut, powstała ona w wyniku wulkanizacji ze sobą trzech pasów taśmy ułożonych jeden obok drugiego. Pasy zostały wycięte z dwóch tradycyjnych taśm z linkami stalowymi do przenośników nieckowych różniących się między sobą średnicą i konstrukcją zastosowanych w taśmie linek. Pas środkowy wycięto z jednej taśmy a pasy skrajne z drugiej. Konstrukcję pozostałych taśm (taśma typu B, typu C, typu D) opracowano wspólnie z BZPG „Stomil” Bełchatów S.A w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Prototypowe odcinki tych taśm wykonano w BZPG „Stomil” Bełchatów S.A. Konstrukcje kolejnych taśm powstawały na bazie doświadczeń z badań eksperymentalnych poprzednich taśm. Zmieniając podziałkę i średnicę linek uzyskiwano różne przebiegi zmian sztywności poprzecznej taśmy. Stosowano dwa rodzaje linek: linki o średnicy $d_1=6$ mm i konstrukcji 7x19 (7 splotek po 19 drutów w splotce) oraz linki o średnicy $d_2=4.2$ mm i konstrukcji 7x7 (7 splotek po 7 drutów w splotce), ponadto stosowano trzy wielkości podziałki: $t=15$ mm, $t_1=20$ mm i $t_2=10$ mm. Wyniki prac nad konstrukcjami tych taśm zgłoszono do ochrony patentowej w Urzędzie Patentowym RP- zgłoszenie pt. „Taśma do przenośników” autorzy: M. Hardygóra, D. Woźniak, S. Peć, A. Gajderowicz.



Rys. 4.1 Stanowisko pomiarowe odcinka przejściowego przenośnika rurowego



Fotografia 1-3. Stanowisko pomiarowe odcinka przejściowego przenośnika rurowego



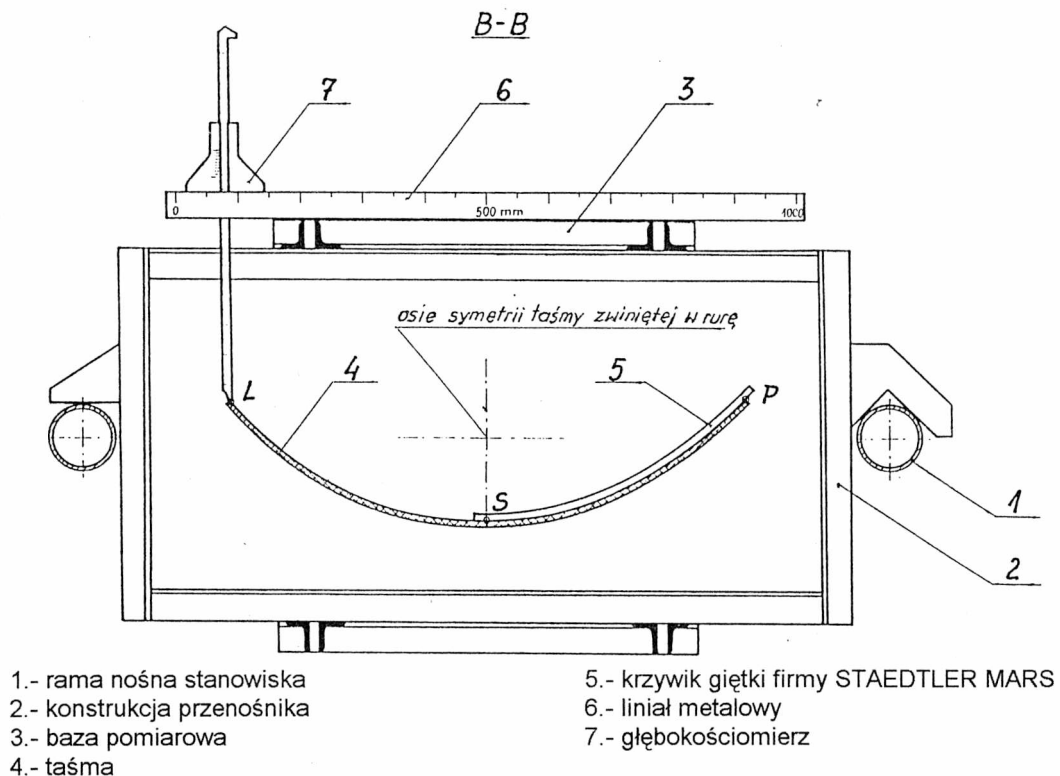
Rys. 4.2 Modele konstrukcji prototypowych taśm z linkami stalowymi do przenośnika rurowego

4.2 Badania pola przemieszczeń taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego

Pole przemieszczeń taśmy jest miarą zdolności taśmy do przejmowania zróżnicowanych obciążeń na odcinku przejściowym przenośnika. Badanie polegało na odwzorowaniu w wybranych punktach pomiarowych kształtu przekrojów poprzecznych taśmy. Niezależnie od długości odcinka przejściowego, wyznaczano jednakową ilość równo oddalonych od siebie przekrojów poprzecznych taśmy.

4.2.1 Metoda pomiarowa

Zasadę pomiaru kształtu taśmy w poszczególnych przekrojach przedstawia rys. 4.3. Wykorzystując proste przyrządy pomiarowe tj. metalowy liniał, głębokościomierz i giętki krzywik firmy STAEDTLER MARS, który po wyprofilowaniu na taśmie zachowywał jej kształt, odwzorowywano na papierze w podziale naturalnej 1:1 zarys przekroju poprzecznego taśmy. Poszczególne krzywe wykreślano w układzie współrzędnych, którego początek był zarazem środkiem przekroju kołowego taśmy na pierwszym zestawie kółnikowym. Tak wykreślone krzywe poddano digitalizacji i utworzono analogiczne rysunki, odwzorowujące przekroje poprzeczne taśmy, w formacie AutoCAD.

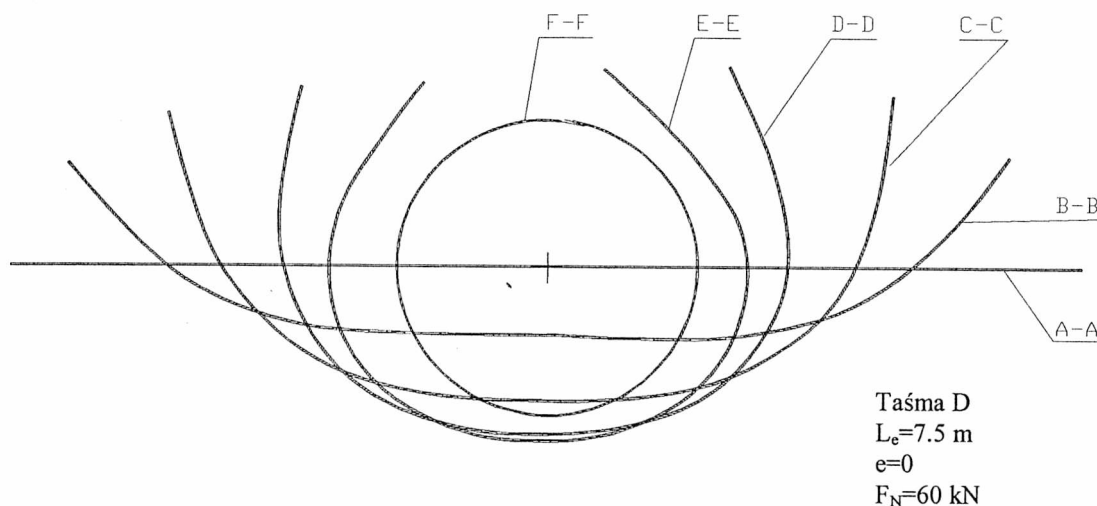


Rys. 4.3 Przekrój przez stanowisko badawcze. Metoda pomiarowa.

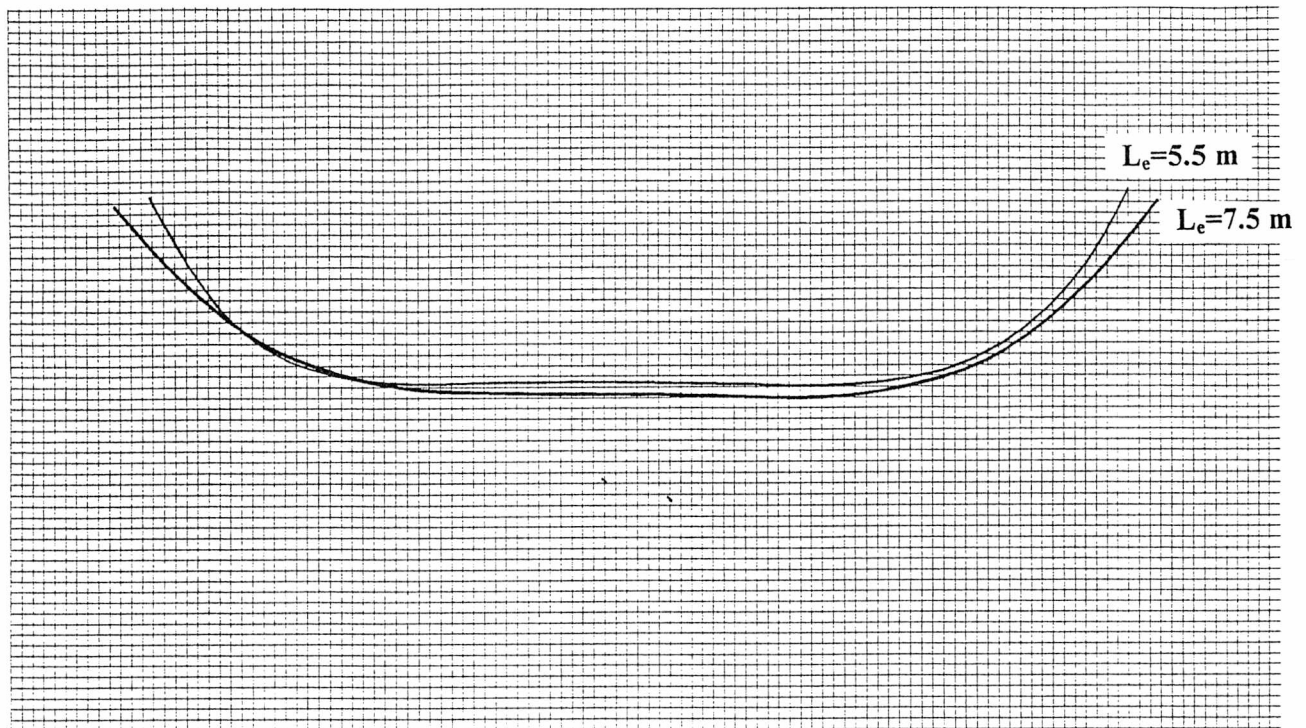
4.2.2 Przebieg badań i wyniki pomiarów

Badania taśm prowadzono zmieniając parametry geometryczne odcinka przejściowego, tzn. zmieniając długość odcinka przejściowego L_e ($L_e = 5.5 \div 8.25$ m) oraz położenie bębna względem osi poziomej rury e (różnica wysokości pomiędzy położeniem taśmy na bębnie, a osią poziomą rury $e = -75 \div 75$ mm) oraz zmieniając siłę napinania taśmy F_N . Siła napinania mieściła się w granicach od 1 do 7% siły zrywającej taśmę. Odcinek przejściowy L_e podzielono na pięć równych części i odwzorowywano zarysy następujących przekrojów poprzecznych taśmy (Rys. 4.1) A-A (na bębnie, przekrój taśmy płaski), B-B, C-C, D-D, E-E. Przykładowe wyniki badań pozwalające na ocenę zdolności układania się taśmy w rurę przedstawia rys. 4.4. Dla każdej z taśm wykonano po kilkanaście rysunków odwzorowujących kształt taśmy przy różnych wariantach parametrów geometrycznych odcinka przejściowego i różnym obciążeniu taśmy. Dla czterech badanych taśm wykonano 53 rysunki, które zaprezentowano w załączniku A. Na rysunkach przedstawiono tylko zmieniające się kształty przekrojów poprzecznych taśmy tzn. bez przekroju A-A (taśma płaska na bębnie) i F-F (przekrój taśmy w kształcie okręgu na pierwszym zestawie krażnikowym).

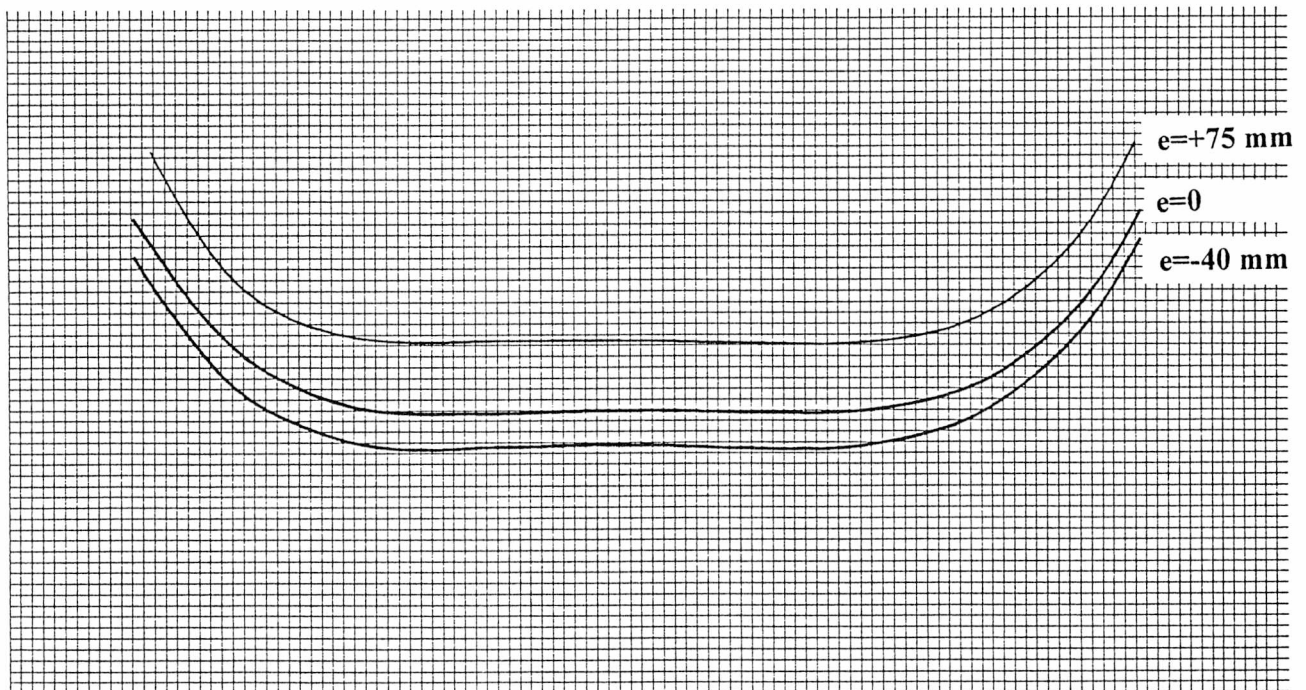
Komputerowe opracowanie wyników badań pozwala nakładać na siebie dowolne krzywe z dowolnych prób, umożliwia to np. obserwację pola przemieszczeń przekrojów w zależności od zmiany parametrów geometrycznych odcinka przejściowego (Rys. 4.5 i Rys. 4.6) lub zmiany konstrukcji taśmy (Rys. 4.7 i Rys. 4.8). Na Rys. 4.9 przedstawiono porównanie wyników badań czterech konstrukcji taśm z linkami stalowymi do przenośników rurowych przy jednakowych parametrach geometrycznych odcinka przejściowego oraz jednakowej sile napinania.



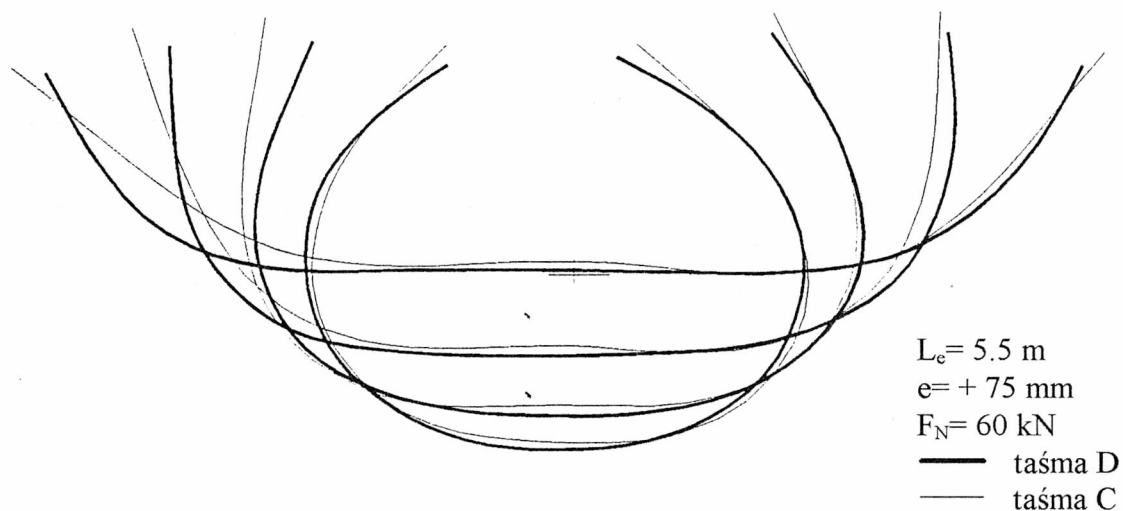
Rys. 4.4 Przekroje poprzeczne taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego



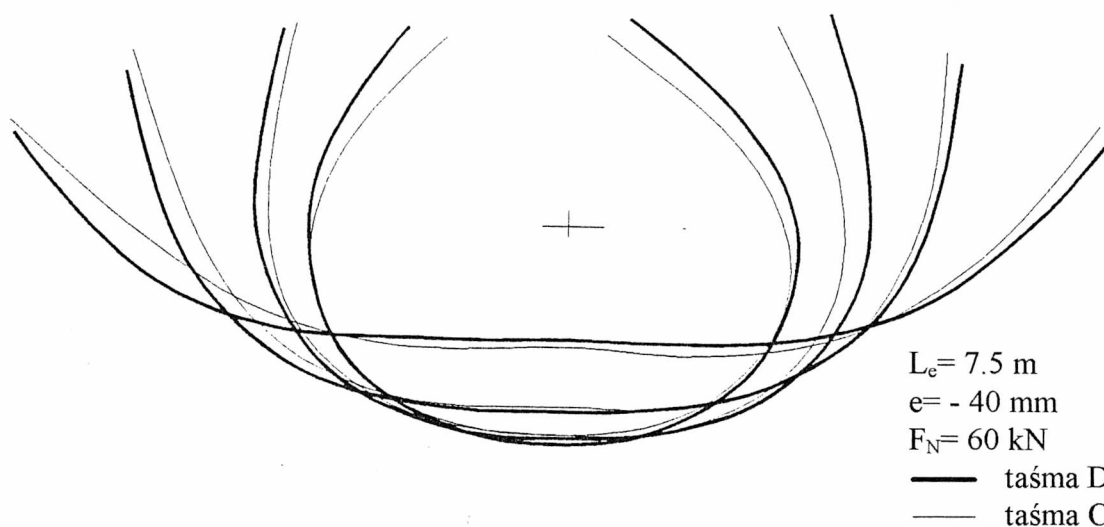
Rys. 4.5 Kształt przekroju poprzecznego B-B taśmy w zależności od długości odcinka przejściowego (taśma D, $F_N = 60 \text{ kN}$, $e = +75 \text{ mm}$)



Rys. 4.6 Kształt przekroju poprzecznego B-B taśmy w zależności od położenia bębna (taśma D, $L_e = 5.5 \text{ m}$, $F_N = 60 \text{ kN}$)

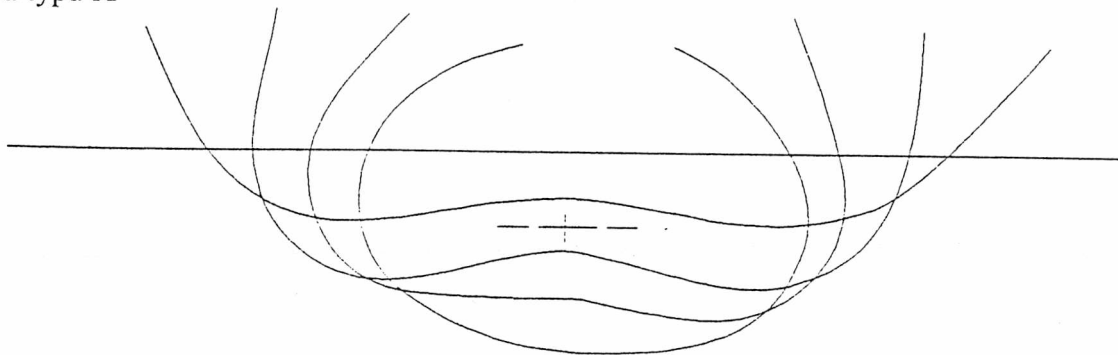


Rys. 4.7 Porównanie przekrojów poprzecznych taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego dla dwóch konstrukcji taśmy

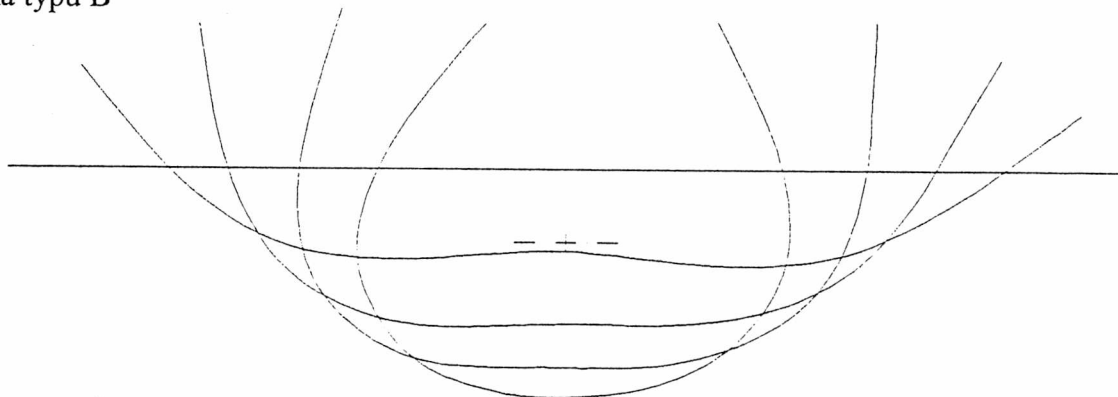


Rys. 4.8 Porównanie przekrojów poprzecznych taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego dla dwóch konstrukcji taśmy

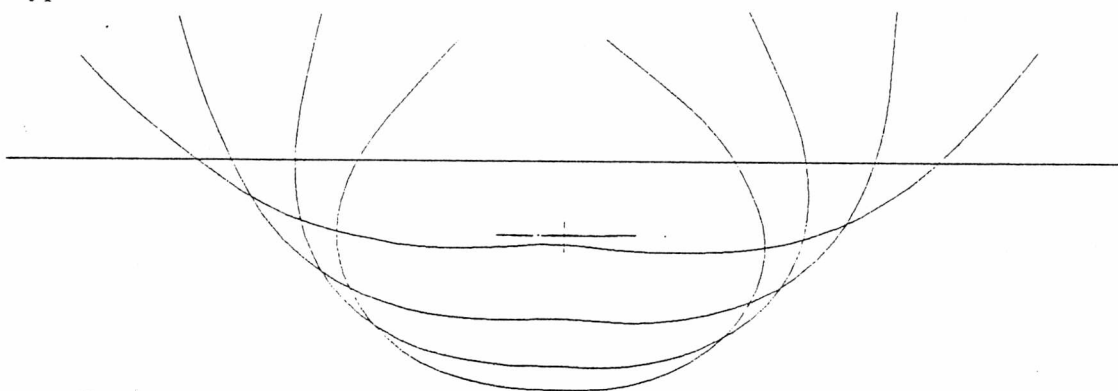
Taśma typu A



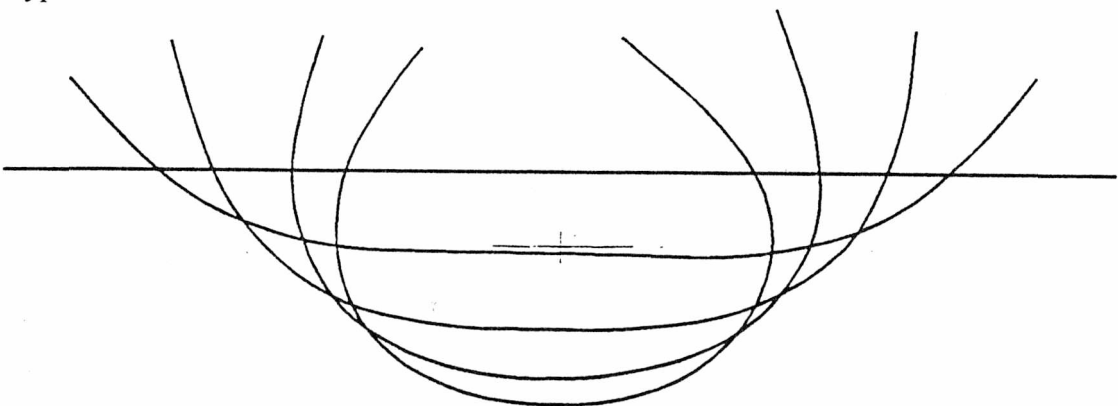
Taśma typu B



Taśma typu C



Taśma typu D



Rys. 4.9 Porównanie wyników badań czterech przebadanych konstrukcji taśm. Parametry odcinka przejściowego: $L_e = 7.5 \text{ m}$, $e = +75 \text{ mm}$, $F_N = 60 \text{ kN}$

4.2.3 Analiza wyników badań

Po przeanalizowaniu wszystkich wyników badań stwierdzono, że:

- ◆ krzywe odzwierciedlające kształt powierzchni taśmy w przekrojach poprzecznych są niesymetryczne, prawa połowa taśmy układa się inaczej niż lewa. Przyczyną tego stanu rzeczy jest przede wszystkim stosowany zamek (na zakładkę) przy zwijaniu taśmy w rurę, a ponadto nie zawsze symetryczne w stosunku do osi pionowej rury ustawienie zamka taśmy na pierwszym zestawie krażnikowym (formującym taśmę w rurę).
- ◆ na odcinku przejściowym w okolicach bębna pojawiają się niekorzystne deformacje taśmy tzw. wybrzuszenia. Wielkość tego wybrzuszenia jest zależna od konstrukcji taśmy, siły napinania i parametrów geometrycznych odcinka przejściowego przenośnika. Przyczyną takiego odkształcenia taśmy jest prawdopodobnie znaczny spadek naprężeń w strefie środkowej taśmy w stosunku do obrzeży taśmy. Zauważono, że:
 - ze wzrostem siły napinania taśmy F_N oraz przy zmniejszaniu długości odcinka przejściowego L_e (Rys. 4.5) zwiększa się wybrzuszenie taśmy w okolicach bębna,
 - przy zmianie położenia bębna w stosunku do osi poziomej rury (Rys. 4.6), przechodząc z położenia dolnego (płaszcz bębna poniżej osi poziomej rury) do położenia górnego (płaszcz bębna ponad osią poziomą rury) wybrzuszenie zmniejsza się.
- ◆ w zakresie małych napięć ($F_N < 3\%$ siły zrywającej taśmę) siły ciężkości taśmy mają wpływ na układanie się taśmy na odcinku przejściowym, jednak po przekroczeniu tej granicy dalszy wzrost siły napinania nie wpływa znacząco na kształty przekrojów poprzecznych taśmy.
- ◆ porównując cztery przebadane taśmy z linkami stalowymi (Rys. 4.7, Rys. 4.8 i Rys. 4.9) taśma typu D (Rys. 4.2) wykazała najlepszą zdolność do tworzenia przekroju kołowego na odcinku przejściowym przenośnika rurowego. Obserwując poszczególne przekroje taśmy zauważymy, że przekroje taśmy typu D odzwierciedlają krzywiznę kołową na większej szerokości taśmy niż w przypadku pozostałych taśm. Będzie to miało pozytywny wpływ na opory ruchu przenośnika. Taśma typu D układa się na odcinku przejściowym poprawnie, tzn. wybrzuszenie w okolicach bębna jest minimalne (najmniejsze z przebadanych taśm) i możliwe do zniwelowania poprzez zastosowanie na odcinku przejściowym odpowiednio ustawionych zestawów krażnikowych formujących taśmę.
- ◆ badania prowadzono dla czterech długości odcinka przejściowego: 5.5m , 6.5m , 7.5m, 8.25m. Na podstawie uzyskanych wyników badań oraz na podstawie obserwacji układania

się taśmy na pierwszym zestawie krążnikowym (zamykającym taśmę w rurę), gdzie przy małych długościach odcinka przejściowego dochodziło do wrzynania się taśmy pomiędzy krążniki, stwierdza się, że długość odcinka przejściowego dla taśm z linkami stalowymi tworzącymi przekrój kołowy o średnicy 300mm powinna wynosić co najmniej 7.5m. Natomiast analizując wpływ położenia bębna na układanie się taśmy (Rys. 4.6) najkorzystniejszym położeniem bębna jest położenie, gdy płaszcz bębna znajduje się powyżej osi poziomej rury ($e > 0$).

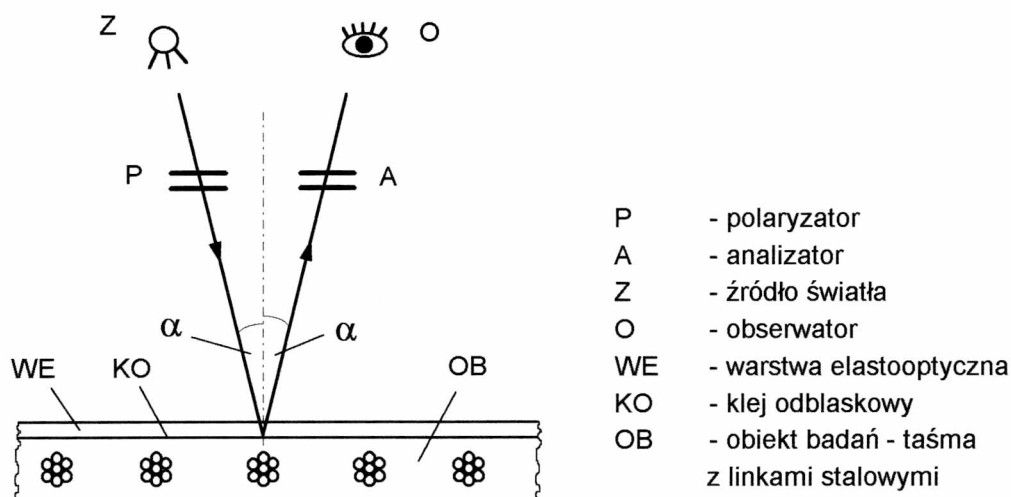
4.3 *Badania stanu odkształceń w taśmie*

Taśma na odcinku przejściowym przenośnika tworzy złożoną powierzchnię przestrzenną. Elementy rdzenia taśmy - linki stalowe mają do pokonania różne drogi, w związku z tym dochodzi do znacznego zróżnicowania naprężeń po szerokości taśmy. W takim wypadku szczególnego znaczenia nabiera identyfikacja stanu odkształceń rdzenia taśmy na odcinku przejściowym przenośnika. Mając na uwadze charakter badanego obiektu, anizotropię taśmy zbrojonej linkami stalowymi, do wyznaczania odkształceń zdecydowano się zastosować bezkontaktowe metody optyczne. Zastosowano metodę elastooptycznej warstwy powierzchniowej oraz podjęto próbę określenia stanu odkształceń również metodą fotografii plamkowej. Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rys. 4.1.

4.3.1 *Metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej*

Metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej jest metodą określenia stanu odkształcenia elementów badanych konstrukcji. Pośrednio umożliwia też określenie występującego w nich stanu naprężenia. Badany element pokrywany jest warstwą materiału o własnościach dwójłomności optycznej (w przypadku badanej taśmy zastosowano tworzywo PSM-4). Na skutek obciążeń badanego elementu dochodzi do jego odkształceń wraz ze znajdującą się na nim warstwą elastooptyczną. Mierzony efekt elastooptyczny (złożony z obserwowanych w warstwie linii o stałym zabarwieniu) zależy od różnicy głównych odkształceń w płaszczyźnie warstwy. Ujawnia więc tym samym miejsca największego wyężenia materiału oraz kierunki głównych naprężeń. Wymaga to przyjęcia założenia, że występuje jedność odkształceń powierzchni obiektu oraz przyklejanej do niego warstwy materiału elastooptycznego.

Obserwacja efektu elastooptycznego wymaga zastosowania aparatury pomiarowej umożliwiającej oświetlenie badanego elementu wiązką światła o określonej polaryzacji. Najczęściej stosowane są w tym celu polaryskopy w układzie „V” (Rys. 4.10) [2].



Rys. 4.10 Schemat polaryskopu do metody elastooptycznej warstwy powierzchniowej (światła odbitego)

Po obciążeniu obiektu, na jego powierzchni i w nałożonej warstwie pojawiają się jednakowe odkształcenia. Światło padające na powierzchnię badanego obiektu przez warstwę elastooptyczną ulega odbiciu i może być obserwowane pod postacią zmian dwójłomności wymuszonej w analizatorze polaryskopu. Wielkość opóźnienia światła, obserwowana jako przesunięcie wektora świetlnego, jest związana ze stanem odkształcenia i naprężenia warstwy.

Opóźnienie względne promieni świetlnych związane z dwukrotnym przejściem wiązki światła przez warstwę optycznie czułą, powiązane jest z różnicą naprężeń głównych w warstwie i przybiera postać:

$$\delta = 2gC(\sigma_1 - \sigma_2)_w \quad (4.1)$$

gdzie: δ - opóźnienie promieni świetlnych,

C - stała optyczna, wielkość charakterystyczna dla rodzaju tworzywa warstwy,

g - grubość warstwy,

$(\sigma_1 - \sigma_2)$ - różnica naprężeń głównych w warstwie.

Opóźnienie powiązane z efektem optycznym obserwowanym w warstwie określa się zależnością :

$$\delta = m \cdot \lambda \quad (4.2)$$

gdzie: m - rząd izochromy,
 λ - długość fali światła.

Wstawiając zależność (4.2) do (4.1) oraz po uporządkowaniu otrzymujemy

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_w = m \frac{K^{1,0}}{2g} \quad (4.3)$$

gdzie: $K^{1,0}$ -elastoptyczna stała materiałowa, wyznaczana na podstawie pomiarów wzorujących [2] dla jednostkowej grubości próbek z materiałów, z którego została wykonana warstwa optycznie czuła.

Na podstawie pomiarów elastoptycznych można również wyznaczyć różnice odkształceń głównych w warstwie. Odkształcenia w zakresie sprężystym można wyrazić na podstawie prawa Hooke'a dla płaskiego stanu naprężenia, przez różnicę naprężeń głównych

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_w = \frac{1 + \nu_w}{E_w} (\sigma_1 - \sigma_2)_w \quad (4.4)$$

gdzie: ν_w - współczynnik Poissona dla materiału warstwy,
 E_w - moduł sprężystości materiału warstwy.

Na podstawie zależności 4.3 otrzymamy

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_w = \frac{1 + \nu_w}{E_w} m \frac{K^{1,0}}{2g_w} \quad (4.5)$$

Odkształcenia warstwy (ε_w) są równe odkształceniom powierzchni badanego elementu, czyli

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_w = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_o \quad (4.6)$$

uwzględniając, że:

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_w = m \cdot f_\varepsilon \quad (4.7)$$

gdzie: f_ε - stała warstwy elastoptycznej $f_\varepsilon = \frac{\lambda}{2g_w K^{1,0}}$

możemy przedstawić różnicę odkształceń głównych w obiekcie jako

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_o = m \cdot f_\varepsilon \quad (4.8)$$

Wykorzystując zależność (4.5) można napisać równanie na różnice odkształceń głównych w obiekcie

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_o = \frac{1 + \nu_w}{E_w} m \frac{K^{1,0}}{2g_w} \quad (4.9)$$

oraz wykorzystując prawo Hooke'a dla płaskiego stanu naprężenia zapisać równanie na różnice naprężeń w obiekcie

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_o = \frac{1 + \nu_w}{1 + \nu_o} \frac{E_o}{E_w} \frac{K^{1,0}}{2g_w} m \quad (4.10)$$

Po wprowadzeniu pojęcia „wartości izochromy” f_s

$$f_\sigma = \frac{1 + \nu_w E_o K^{1,0}}{1 + \nu_o E_w 2g} \quad [\text{MPa/rząd izochromy}] \quad (4.11)$$

podstawowe równanie metody warstwy powierzchniowej przyjmuje postać

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = m \cdot f_\sigma \quad (4.12)$$

W omawianym przypadku taśmy przenośnikowej występuje duża anizotropia własności wywołana linkami zbrojenia. W związku z tym obserwowany w badaniach efekt elastooptyczny może być odniesiony tylko i wyłącznie do stanu odkształceń występującego na powierzchni taśmy.

4.3.2 Przebieg i wyniki badań

Badania prowadzono na stanowisku pomiarowym umożliwiającym zmianę siły napinania taśmy, zmianę długości odcinka przejściowego oraz położenia bębna. Schemat stanowiska przygotowanego do badań przy zastosowaniu metody elastooptycznej warstwy powierzchniowej wraz z umiejscowieniem rejonu pomiarowego przedstawiono na rys. 4.11.

Do analizy stanu odkształceń powierzchni taśmy wytypowano rejon nabiegania taśmy na bęben. Przy badaniach taśmy typu A warstwę elastooptyczną naklejono na połowie taśmy, jednak w celu kontroli symetrii obciążeń, w badaniach pozostałych taśm warstwę elastooptyczną naklejono na całej szerokości taśmy. Dla lepszej identyfikacji punktów

A detailed technical drawing of a mechanical assembly. On the left, a cylindrical component is shown in perspective, with a rectangular plate of thickness e mounted on its top surface. The plate has a central pivot point. A lever arm, labeled Le , is attached to this pivot. The lever arm extends to the right and is connected to a complex linkage mechanism. This mechanism includes several cylindrical components and a horizontal bar. Various points are labeled with letters: A , B , C , D , E , F , G , H , I , J , K , L , M , N , O , P , Q , R , S , T , U , V , W , X , Y , Z . A coordinate system is shown with a vertical Z -axis and a horizontal X -axis. The diagram illustrates the geometry and kinematics of the assembly, with various dimensions and angles indicated.

Do badań zastosowano polaryskop w układzie V firmy Vishay umieszczony na statywie. Pole oświetlające badany obiekt umożliwiło rejestrację fragmentów warstwy na odcinku ok. 40 cm. W trakcie prac stwierdzono, iż dla wszystkich przypadków obciążenia efekty elastooptyczne obserwowane są w rejonach krawędzi taśmy i występują na szerokości ok. 1/3 szerokości taśmy. Rejestrację prowadzono przy pomocy aparatu fotograficznego Minolta 2xi z obiektywem do zdjęć makroskopowych AF 3,5/50 makro. Ze względu na rodzaj światła oświetlającego warstwę elastooptyczną do rejestracji wybrano film kolorowy o czułości 400 ASA. Aparat umieszczono na statywie wraz z polaryskopem.

Badania prowadzono dla różnych parametrów geometrii odcinka przejściowego oraz różnego obciążenia. Tabela 4.1 prezentuje przykładowy zestaw rejestrowanych przypadków uwzględniających zmiany geometrii układu oraz zmiany obciążenia.

Tabela 4.1 Przyjęte w badaniach warianty geometrii odcinka przejściowego i obciążenia układu

Długość odcinka przejściowego (L_e) Położenie bębna (e)	5.5 m	6.5 m	7.5 m	8.25 m
+75 mm	15, 60 kN	15, 60 kN	15, 45, 60, 80 kN	15, 60 kN
0	15, 60 kN	-	15, 60 kN	-
-40 mm	15, 60 kN	15, 60 kN	15, 60 kN	15, 60 kN

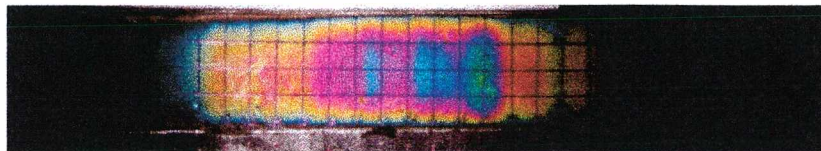
Badania przeprowadzono dla wszystkich czterech taśm, jednak w przypadku taśmy typu B pomiary nie powiodły się ponieważ zastosowano warstwę elastooptyczną własnej produkcji, która okazała się zbyt mało czuła, aby uzyskać efekt optyczny przy zmianie obciążenia taśmy. Przykładowe rejestrowane wyniki badań w postaci izochrom całkowitych i połówkowych przedstawiono na rys.4.12, zaś przykładowy przebieg różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy przedstawiono na rys. 4.13. Wszystkie wyniki badań zamieszczono w załączniku B.

4.3.3 Analiza wyników badań

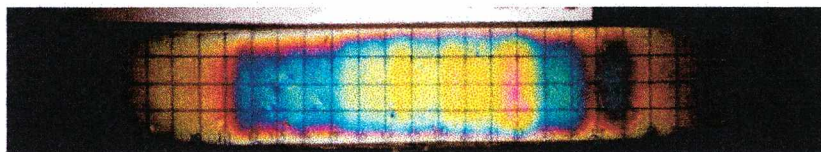
W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano rozkład różnic odkształceń głównych po szerokości taśmy. Ze względu na kłopoty w wyznaczeniu własności naprężeniowo-odkształceniowych dla tak anizotropowego obiektu jakim jest taśma z linkami stalowymi wyniki pomiarów przedstawiono w rzędach izochrom. Po przeanalizowaniu wszystkich wyników pomiarów stwierdzono, że:

- ♦ największe odkształcenia na odcinku przejściowym przenośnika rurowego znajdują się w okolicach bębna w rejonie obrzeży taśmy, ale nie w skrajnych linkach,
- ♦ odkształcenia po szerokości taśmy zmieniają się od największych w rejonie obrzeży taśmy do najmniejszych w rejonie środka taśmy, gdzie praktycznie są nierozpoznawalne dla stosowanej metody elastooptycznej,
- ♦ przebiegi odkształceń po szerokości taśmy, podobnie jak przekroje poprzeczne taśmy z badań opisanych w rozdz.4.2, są niesymetryczne względem osi taśmy. Przyczyną tego stanu rzeczy prawdopodobnie jest po pierwsze: stosowany zamek (na zakładkę) przy zwijaniu taśmy w rurę, a po drugie: nie zawsze symetryczne w stosunku do osi pionowej rury ustawienie zamka taśmy na pierwszym zestawie krążnikowym formującym taśmę w rurę,

Lewy skraj taśmy: - izochromy całkowite



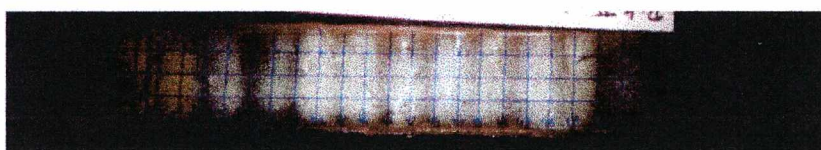
- izochromy połówkowe



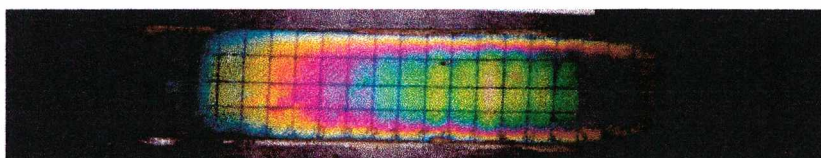
Środek taśmy: - izochromy całkowite



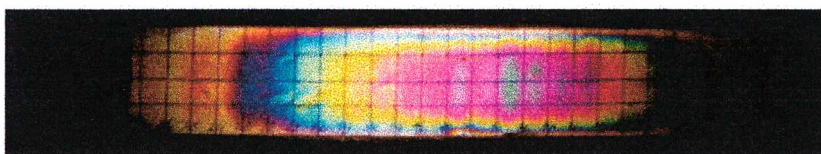
- izochromy połówkowe



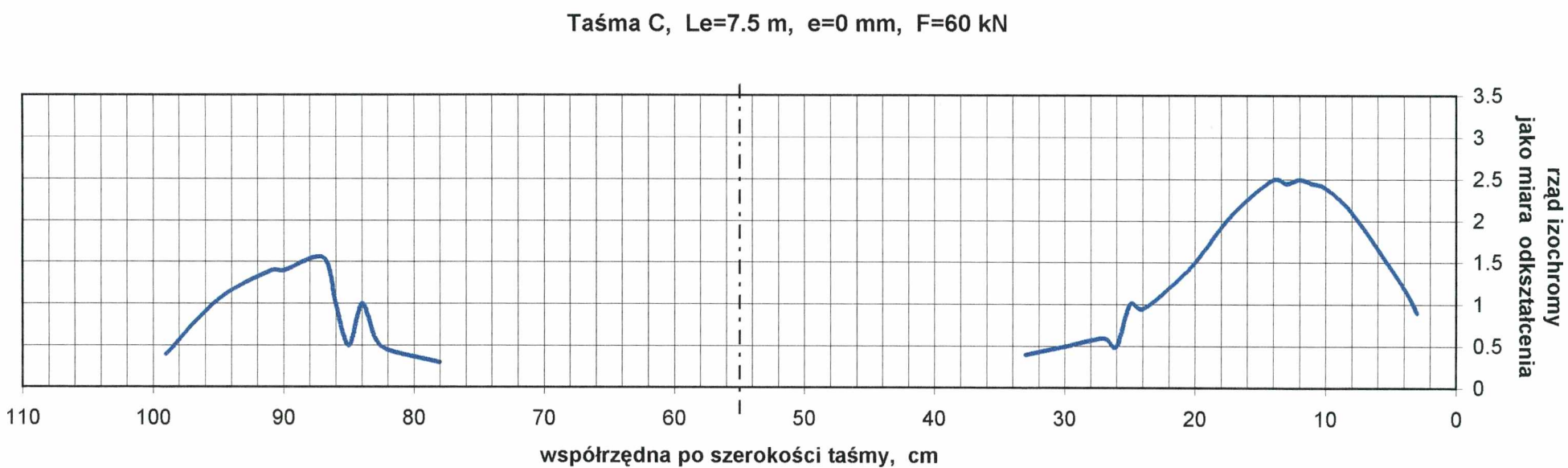
Prawy skraj taśmy: - izochromy całkowite



- izochromy połówkowe

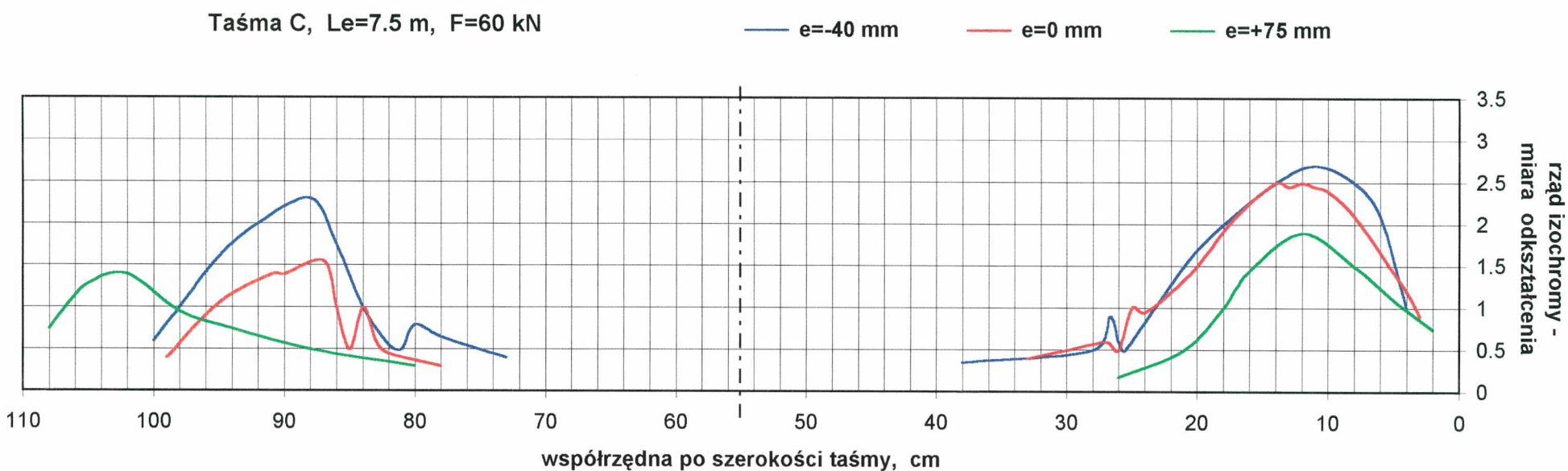


Rys. 4.12 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń dla taśmy typu C
($L_e=7.5\text{ m}$, $e=0$, $F_N=60\text{ kN}$)

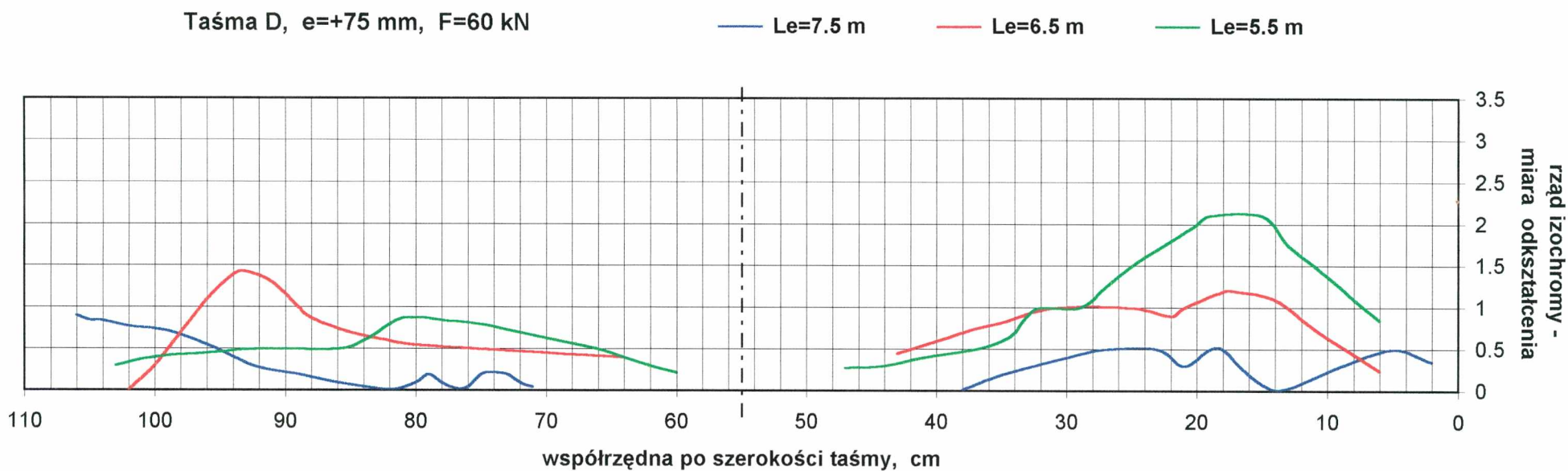


Rys. 4.13 Przebieg różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy dla taśmy typu C

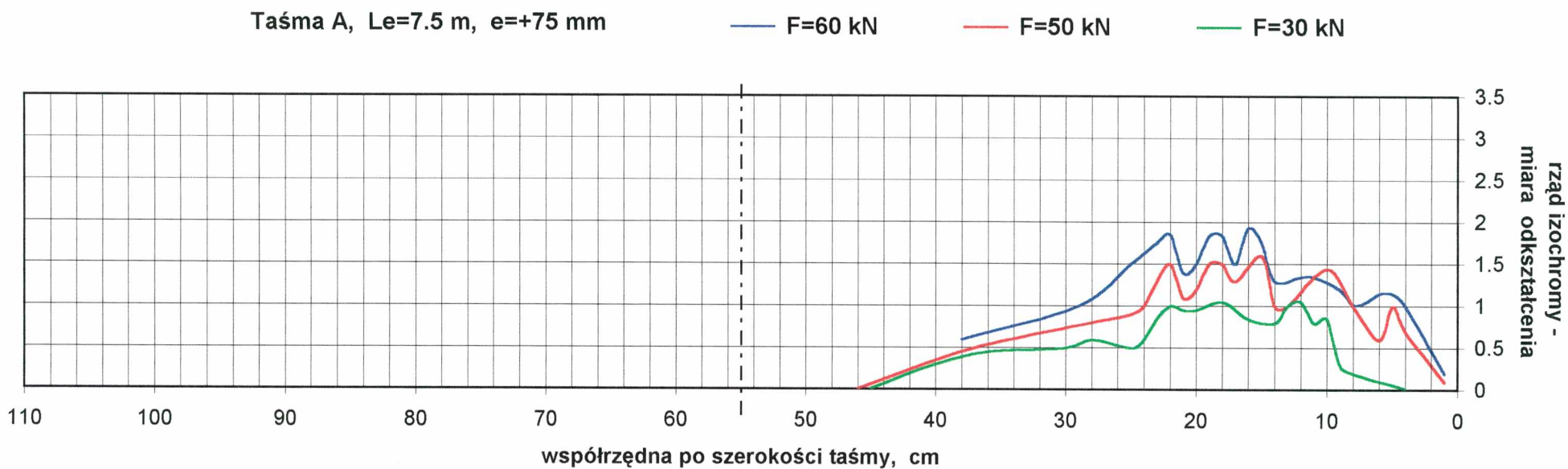
- ♦ zmiana położenia bębna w stosunku do osi poziomej rury (Rys. 4.14), przechodząc z położenia dolnego (płaszcz bębna poniżej osi poziomej rury) do położenia górnego (płaszcz bębna ponad osią poziomą rury), powoduje zmniejszenie wartości maksymalnych odkształceń,
- ♦ zwiększenie długości odcinka przejściowego (Rys. 4.15) powoduje bardziej równomierny rozkład odkształceń, zmniejszenie maksymalnych wartości oraz niewielkie przesunięcie strefy maksymalnych odkształceń w kierunku środka taśmy,
- ♦ zmiana siły napinania taśmy nie powoduje zmiany charakteru przebiegu odkształceń jedynie zmienia ich wartości (Rys. 4.16),
- ♦ z porównania wykresów odkształceń dla różnych konstrukcji taśmy (Rys. 4.17) wynika, że konstrukcja taśmy ma wpływ na stan odkształceń w taśmie na odcinku przejściowym przenośnika. Najkorzystniej wypadła w badaniach taśma typu D, uzyskała ona najmniejsze z badanych taśm wartości odkształceń oraz najmniejszą nierównomierność rozkładu odkształceń po szerokości taśmy.



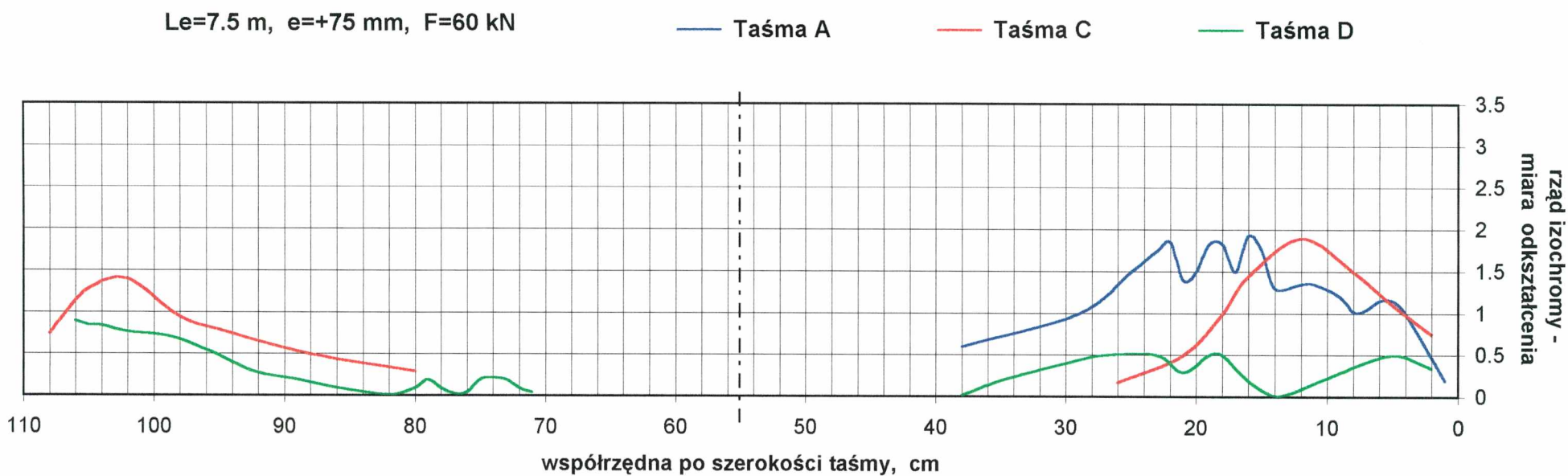
Rys. 4.14 Rozkład odkształceń po szerokości taśmy na odcinku przejściowym w okolicach bębna w zależności od położenia bębna w stosunku do osi poziomej rury (e)



Rys. 4.15 Rozkład odkształceń po szerokości taśmy na odcinku przejściowym w okolicach bębna w zależności od długości odcinka przejściowego Le



Rys. 4.16 Rozkład odkształceń po szerokości taśmy na odcinku przejściowym w okolicach bębna w zależności od siły napinania taśmy F_N

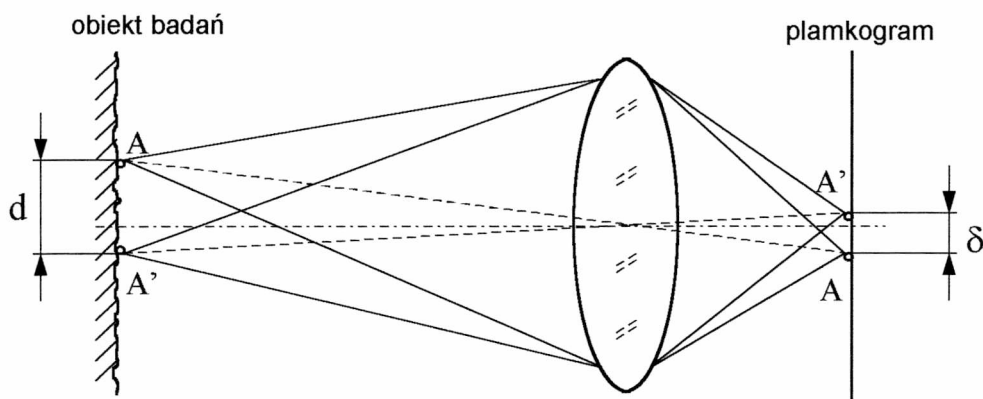


Rys. 4.17 Porównanie wyników badań dla różnych konstrukcji taśm

4.3.4 Metoda fotografii plamkowej

Podjęto również próbę identyfikacji stanu odkształceń taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego metodą fotografii plamkowej. Metoda ta należy do grupy bezkontaktowych metod optycznych. Pozwala na określenie wartości jak i kierunku wektora przemieszczeń powierzchni badanego obiektu. Istota metody [16] opiera się o zjawisko obserwowane podczas oświetlania światłem spójnym powierzchni optycznie niegładkich. Widoczna jest wtedy ziarnista struktura złożona z jasnych i ciemnych plamek rozmieszczonych na tle obiektu w sposób losowy. Zjawisko to w literaturze nosi nazwę „plamkowania”, a mechanizm powstawania zjawiska związany jest z rozpraszaniem oświetlającej wiązki światła spójnego na mikronierównościach badanej powierzchni.

Podczas pomiaru przemieszczenia obiektu w płaszczyźnie prostopadłej do osi obserwacji rejestruje się na materiale światłoczułym obraz struktury plamkowej obiektu w stanie zerowym (Rys. 4.18 pkt. A). Jeżeli w wyniku przyłożonego obciążenia obiekt ulegnie przemieszczeniu, to ulegnie również przemieszczeniu związany z nim układ plamek. Rejestrując na tym samym materiale światłoczułym stan końcowy obiektu (Rys. 4.18 pkt. A') otrzymujemy w efekcie dwa układy plamek. Każdej plamce w układzie przed obciążeniem odpowiada plamka drugiego układu po obciążeniu.



Rys. 4.18 Zjawisko plamkowania i rejestracja plamkogramu

Analiza rejestrowanego materiału polega na prześwietlaniu plamkogramu wiązką światła spójnego w układzie optycznym jak na rys. 4.19. W efekcie uzyskuje się na strukturze plamkowej, analogicznie jak w doświadczeniu Younga, ugięcie promienia analizującego. Na

ekranie umieszczonym w odległości L od plamkogramu obserwowane są wówczas prążki interferencyjne. Wielkość przemieszczenia określa wzór:

$$|d| = \frac{\lambda \cdot \sqrt{4L^2 + a^2}}{2pa} \quad (4.13)$$

gdzie: λ - długość fali światła użytego do analizy,

L - odległość ekranu od plamkogramu,

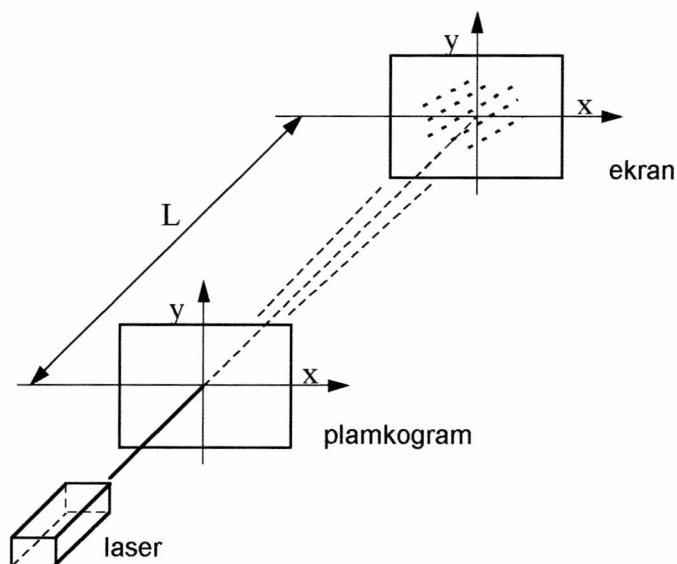
a - odległość między prążkami interferencyjnymi,

p - powiększenie fotograficzne.

Ponieważ najczęściej $L \gg a$ wówczas wzór 4.13 upraszcza się do:

$$|d| = \frac{\lambda \cdot L}{p \cdot a} \quad (4.14)$$

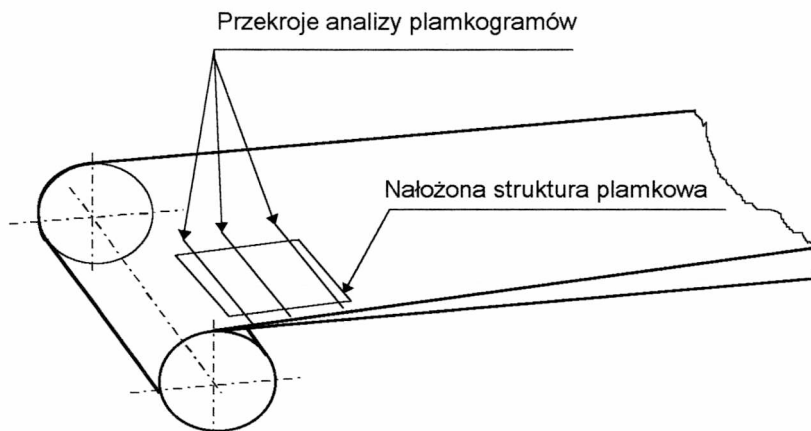
Kierunek przemieszczenia jest prostopadły do kierunku prążków obserwowanych na ekranie.



Rys. 4.19 Schemat układu do analizy plamkogramu

4.3.5 Wyniki badań uzyskane metodą fotografii plamkowej

W badaniach na stanowisku pomiarowym wybrano technikę fotografii plamkowej w świetle niekoherentnym. W tym celu na obszarze przeznaczonym do badań nałożono strukturę refleksyjnych plamek, których przemieszczenie jest nośnikiem informacji o przemieszczeniu taśmy. Do badań wytypowano obszar taśmy w okolicach bębna o powierzchni ok. 0.5m x 0.5m (Rys. 4.20).



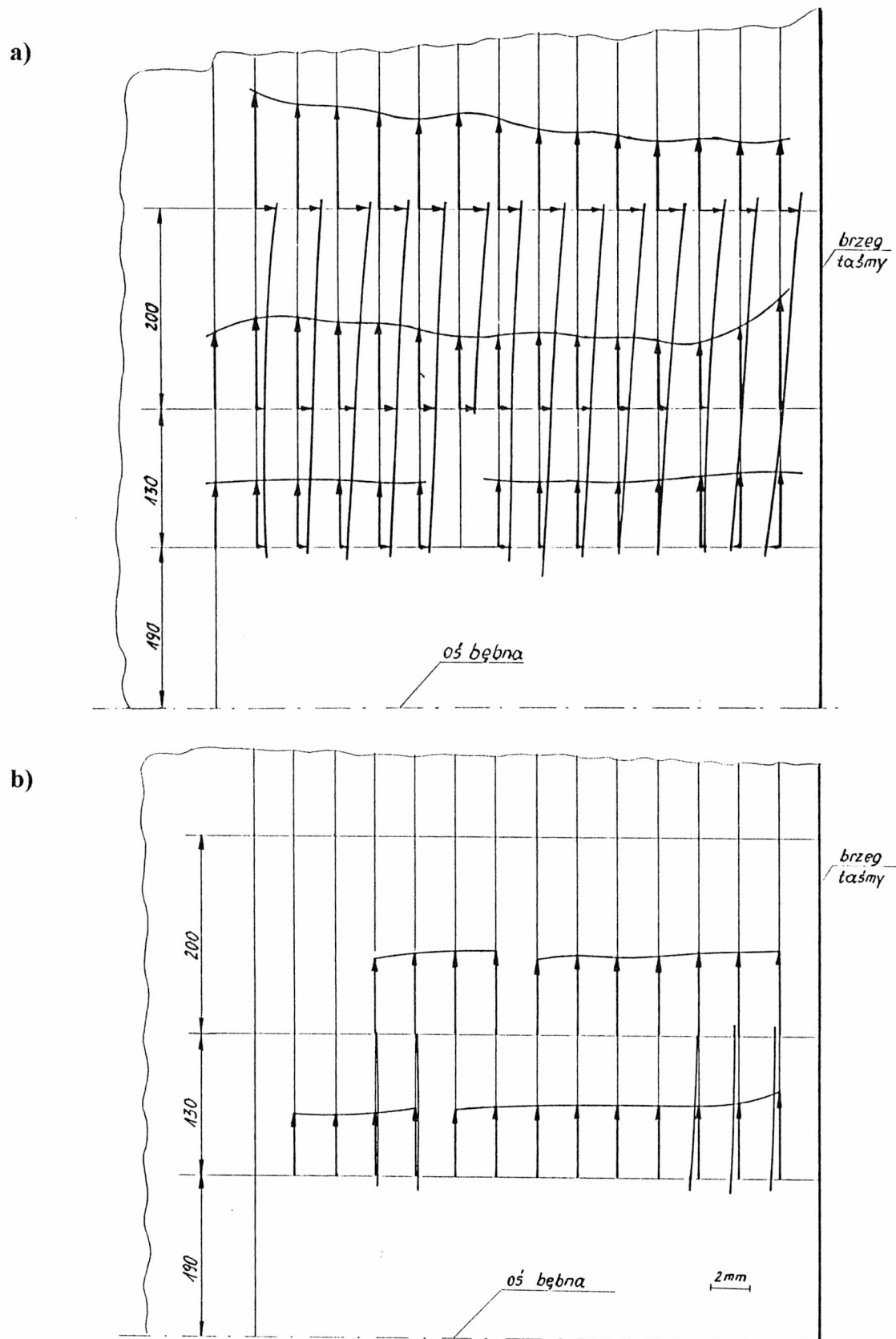
Rys. 4.20 Lokalizacja strefy pomiarów metodą fotografii plamkowej oraz lokalizacja analizowanych przekrojów

Stanowisko pomiarowe zbudowano na bazie aparatu fotograficznego oraz lampy wyładowczej. Aparat i lampę umieszczono na statywie tak, aby zapewnić równoległość płaszczyzny rejestracji z płaszczyzną taśmy przenośnika. Zastosowano film 24x35 mm typu Holotest firmy AGFA o rozdzielczości 2000 linii/mm. Analizę plamkogramów prowadzono przy pomocy lasera helowo-neonowego o mocy 60mW i średnicy wiązki ok. 1.5 mm.

Badania przeprowadzono dla taśmy A, dla dwóch przypadków obciążenia taśmy. Wyniki badań w postaci wykresów przemieszczeń przedstawiono na rys. 4.21.

4.3.6 Analiza wyników badań z metody fotografii plamkowej

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla badanej powierzchni właściwym powiększeniem fotograficznym było powiększenie rzędu 0.05. Ze względu na średnicę stosowanej do analizy wiązki światła lasera przy powyższym powiększeniu otrzymuje się obszar uśrednienia w kształcie koła o średnicy ok. 30 mm. Uzyskiwane z tego obszaru wyniki są więc uśredniane. Skutki uśrednienia obniżają jakość uzyskanych wyników, szczególnie względem składowej przemieszczenia równoległej do osi taśmy. Tak więc należałoby obszar poddany badaniom podzielić na małe strefy i prowadzić w nich rejestrację stosując powiększenie fotograficzne rzędu 0.3-0.5. Wystąpi wówczas, podobnie jak przy zdjęciach lotniczych, konieczność łączenia poszczególnych stref. Ze względu na trudności techniczne prowadzenia w ten sposób badań, przy wyznaczaniu odkształceń taśmy zdecydowano się pozostać jedynie przy metodzie warstwy elastooptycznej.



Rys. 4.21 Wykres przemieszczeń dla taśmy A w okolicach bębna wyznaczony metodą fotografii plamkowej:

a) $L_e = 5.5 \text{ m}$, $e = +75 \text{ mm}$, $F = 60 \text{ kN}$

b) $L_e = 7.5 \text{ m}$, $e = +75 \text{ mm}$, $F = 60 \text{ kN}$

Na zamieszczonych wykresach przemieszczeń dostrzegalny jest mechanizm powodujący „wybrzuszenie taśmy” w strefie środkowej. Przemieszczenia ukierunkowane są skośnie do osi taśmy (Rys. 4.21b), ku jej środkowi. Porównując wykresy dla dwu długości odcinka przejściowego, większe przemieszczenia występują przy długości $L_e=5.5$ m, niż przy długości $L_e=7.5$ m.

4.4 Podsumowanie badań eksperymentalnych

W oparciu o przeprowadzone badania można sformułować wnioski zarówno dotyczące zachowania się taśm na odcinkach przejściowych jak i wyboru odpowiedniej metody pomiarowej.

W pomiarach pola przemieszczeń taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego posłużono się prostą choć czasochłonną metodą pomiarową przedstawioną w rozdz.4.2.1. Znane z literatury inne bardziej efektywne metody pomiarowe stosowane w tego typu zagadnieniach (np. metody optyczne lub zastosowanie czujników zdalnego pomiaru odległości), wymagają znacznych nakładów finansowych przy realizacji zaplanowanego eksperymentu. Zastosowana metoda dała zadawalający efekt pomiarowy, a komputerowe opracowanie wyników pomiarów znacznie rozszerzyło możliwości prowadzonej analizy wyników badań.

W badaniach stanu odkształceń taśmy zastosowano metody optyczne, czyli metody bezkontaktowe, dające poglądowe wyniki badań. Zastosowanie jakiegokolwiek punktowej metody pomiarowej (jak np. w [12]) w przypadku taśmy z linkami stalowymi wymagałoby zastosowania bardzo licznych punktów pomiarowych. Nie ma literaturowego odniesienia co do zastosowania metody elastooptycznej warstwy powierzchniowej, czy metody fotografii plamkowej na taśmach przenośnikowych. Badania te były prowadzone po raz pierwszy na takim obiekcie jak taśma z linkami stalowymi. W związku z tym nie uniknięto we wstępnej fazie badań popełnienia błędów, takich jak np. wcześniej już opisane niepowodzenie w badaniach elastooptycznych na taśmie typu B lub zastosowanie zbyt małego powiększenia fotograficznego przy metodzie fotografii plamkowej. Jednocześnie jednak uzyskano wiele doświadczeń, które wykorzystano w kolejnych badaniach. Metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej wykazała nierównomierności odkształceń taśmy. Pomimo braku ilościowej oceny tych odkształceń pozwala ona ocenić wpływ parametrów geometrycznych odcinka

przejściowego oraz konstrukcji taśmy na nierównomierność rozkładu odkształceń w taśmie. Przeprowadzone badania metodą fotografii plamkowej udowodniły przydatność powyższej metody do wyznaczania przemieszczeń taśmy, jednak charakter badanego obiektu wymaga stosowania powiększeń rzędu 0.3-0.5, co spowoduje podobnie jak przy zdjęciach lotniczych konieczność łączenia poszczególnych stref rejestracji.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zarówno pole przemieszczeń jak również stan odkształceń taśmy na odcinku przejściowym przenośnika zależy od konstrukcji taśmy oraz parametrów geometrycznych, takich jak długość odcinka przejściowego i położenie bębna.

Z porównania wyników badań dla różnych konstrukcji taśmy najlepiej wypadła taśma typu D. Wykazała ona najlepszą zdolność do tworzenia przekroju kołowego na odcinku przejściowym przenośnika rurowego. Przekroje poprzeczne tej taśmy (Rys. 4.7, Rys. 4.8, Rys. 4.9) odzwierciedlają krzywiznę kołową na większej szerokości taśmy niż w przypadku pozostałych taśm. Taśma ta układa się na odcinku przejściowym poprawnie, wybrzuszenie w okolicach bębna jest minimalne (najmniejsze z dotychczas przebadanych taśm). Wielkość tego wybrzuszenia nie będzie miała wpływu na ruch transportowanego nosiwa, natomiast określenie wpływu tej deformacji na trwałość taśmy wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań. Porównując odkształcenia taśm (Rys. 4.17), taśma typu D posiada łagodne przebiegi rozkładów odkształceń, których wartości maksymalne leżą znacznie poniżej wartości maksymalnych innych taśm.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się, że spośród wszystkich przebadanych wariantów parametrów geometrycznych odcinka przejściowego dla taśmy z linkami stalowymi tworzącej przekrój kołowy o średnicy 300 mm optymalne parametry to: długość odcinka $L_e=7.5\text{m}$, położenie płaszcza bębna powyżej osi poziomej rury $e=+75\text{mm}$ (Rys. 4.5, Rys. 4.6, Rys. 4.14 i Rys. 4.15).

Przeprowadzone badania eksperymentalne miały na celu rozpoznanie zjawisk zachodzących podczas przejścia taśmy z układu płaskiego na bębnie do zwinięcia w rurę. Badania nie mogły dać oceny ilościowej badanego zjawiska, dały natomiast ocenę jakościową nierównomierności rozkładu naprężeń taśmy i w tym zakresie udowodniły tezę pracy. Jednak rozwiązywanie problemu doboru konstrukcji taśmy i parametrów geometrycznych odcinka przejściowego na drodze eksperymentalnej jest kosztowne i pracochłonne, dlatego podjęto pracę nad modelem teoretycznym taśmy z linkami stalowymi na odcinku przejściowym przenośnika rurowego.

5. Model teoretyczny taśmy z linkami stalowymi na odcinku przejściowym

Celem modelu teoretycznego taśmy z linkami stalowymi ma być rozpoznanie wpływu różnych struktur rdzenia taśmy (rozmszczenie po szerokości taśmy linek o różnej średnicy i z różną podziałką) na wymuszenia spowodowane odcinkiem przejściowym, tzn. na wymuszenia charakteryzujące się znacznym zróżnicowaniem obciążeń i odkształceń poszczególnych linek. Nierównomierności obciążeń linek spowodowane odcinkiem przejściowym mają miejsce nie tylko na tym odcinku, ale również przechodzą poza ten odcinek [12]. Mając to na uwadze model będzie uwzględniał taśmę o długości równej sumie długości odcinka przejściowego (L_e) i długości strefy wpływu (K) na której następuje wyrównanie naprężeń w linkach. Zjawiska zachodzące przy współpracy sąsiednich linek zarówno na odcinku przejściowym przenośnika rurowego, jak również przenośnika nieckowego są takie same. Pomimo, że model będzie opisywał odcinek przejściowy przenośnika rurowego, to po uwzględnieniu odpowiednich założeń geometrycznych układu, można go wykorzystywać również do opisu odcinków przejściowych przenośników nieckowych.

5.1 Założenia do modelu taśmy z linkami stalowymi na odcinku przejściowym

Założenia:

1. Taśma rozpatrywana jest jako wielopasmowe płaskie cięgno, globalnie przenoszące jedynie obciążenia wzdłużne.
2. Linki stalowe modelowane są jako elementy liniowo-sprężyste.
3. Pasma gumy łączące sąsiednie linki, z uwagi na pomijalnie mały w stosunku do linek stalowych moduł sprężystości podłużnej, nie przenoszą obciążeń wzdłużnych.
4. Wzajemne oddziaływanie linek stalowych odbywa się poprzez odkształcenia postaciowe gumy w zakresie liniowo-sprężystym [14], [15], [19].
5. Sztywność rozciągania zastosowanych linek oraz zastępczy moduł odkształcenia postaciowego gumy pomiędzy linkami wyznacza się w oparciu o badania laboratoryjne (sposób wyznaczenia modułu odkształcenia postaciowego gumy pozwala na pominięcie wpływu okładek oraz różnicy we właściwościach gumy rdzeniowej i okładkowej).
6. Rozpatrujemy odcinek taśmy o długości L_e+K gdzie L_e to długość odcinka przejściowego, a K to długość odcinka wpływu.

7. Taśma rozciągana jest stałą siłą F_N .
8. Na długości odcinka przejściowego L_e nie ma żadnych oddziaływań zewnętrznych (tzn. brak oporów ruchu, pomijalny jest wpływ pola grawitacji ziemskiej), co oznacza, że w każdym przekroju poprzecznym suma sił w linkach równa jest sile rozciągającej F_N . Pomija się również oddziaływanie bębna.
9. Guma pomiędzy linkami nie odkształca się w kierunku poprzecznym, w związku z tym odległości pomiędzy osiami linek (podziałka) nie ulegają zmianie. Założenie to pozwala na rozwiązanie zadania jako układu płaskiego.
10. Rozpatrywana jest połowa taśmy od środkowej osi symetrii do brzegu (założenie symetryczności układu).

5.2 Wymuszenia geometryczne na odcinku przejściowym przenośnika rurowego

Punktem wyjścia tak sformułowanego modelu jest wyznaczenie wydłużeń poszczególnych linek. Wynikają one z drogi jaką musi pokonać każda z linek przy przejściu taśmy z przekroju kołowego na zestawie krażnikowym do przekroju płaskiego na bębnie. Dla analitycznego opisu zagadnienia przyjęto biegunowy układ współrzędnych jak na rys. 5.1. Każda linka zatacza tor, który możemy opisać promieniem wodzącym. Dla i -tej linki wektor wodzący opisany jest modulem $R_i(\mathbf{x})$ oraz kątem nachylenia wektora $\varphi_i(\mathbf{x})$. Składowe wektora $R_i(\mathbf{x})$ wynoszą:

$$R_{iz} = R_i \cdot \cos \varphi_i \quad (5.2.1)$$

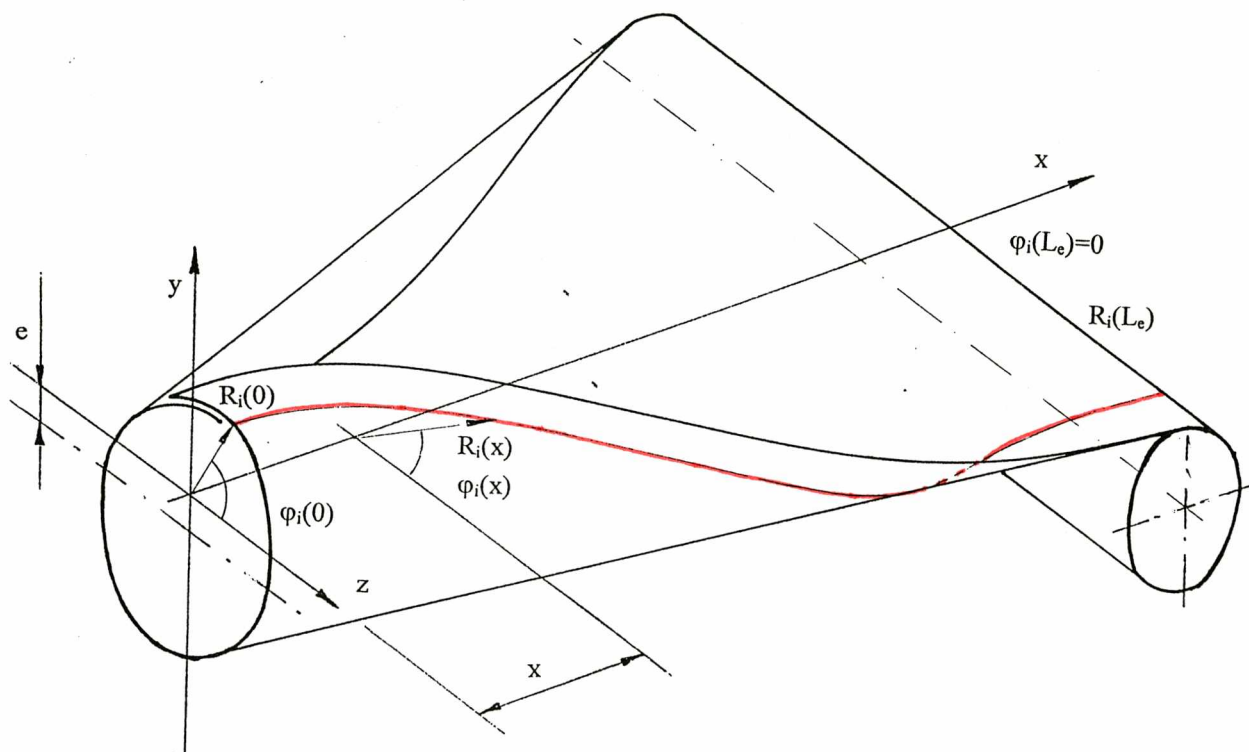
$$R_{iy} = R_i \cdot \sin \varphi_i \quad (5.2.2)$$

W przekroju odpowiadającym współrzędnej $x=0$ taśma ma przekrój kołowy rys. 5.2. Ponieważ przyjęto, że oś z pokrywa się z przekrojem taśmy na bębnie, to początek układu współrzędnych nie pokrywa się ze środkiem przekroju kołowego i jest przesunięty o wielkość wektora $\mathbf{e}$ (za wyjątkiem taśmy na bębnie na wysokości poziomej osi symetrii przekroju kołowego $\mathbf{e}=0$). Zatem zachodzą następujące zależności:

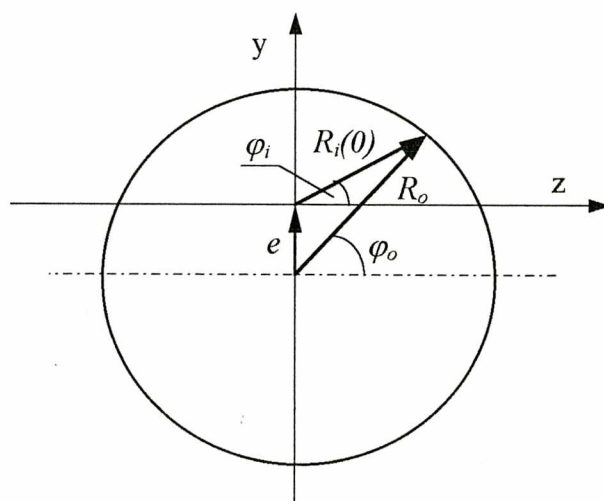
$$\bar{\mathbf{R}}_o = \bar{\mathbf{R}}_i(0) + \bar{\mathbf{e}} \quad (5.2.3)$$

$$\bar{\mathbf{R}}_i(0) = \bar{\mathbf{R}}_o - \bar{\mathbf{e}} \quad (5.2.4)$$

gdzie: R_o - promień przekroju kołowego taśmy zwiniętej w rurę,
 e - przesunięcie środka przekroju kołowego taśmy w stosunku do środka układu współrzędnych.



Rys. 5.1 Przyjęty układ współrzędnych do analizy wymuszeń geometrycznych



Rys. 5.2 Przekrój taśmy na początku układu $x=0$

Na podstawie zależności geometrycznych można wyznaczyć moduł wektora wodzącego na początku układu:

$$R_i(0) = \sqrt{R_{iz}^2(0) + R_{iy}^2(0)} \quad (5.2.5)$$

gdzie:

$$R_{iz}(0) = R_o \cdot \cos \varphi_o \quad (5.2.6)$$

$$R_{iy}(0) = R_o \cdot \sin \varphi_o - e \quad (5.2.7)$$

Prawdziwa jest również zależność:

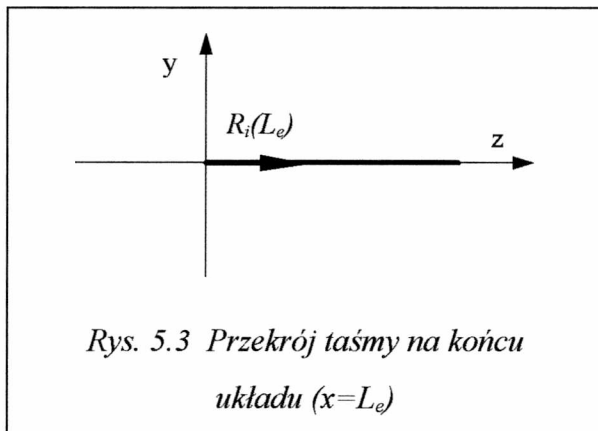
$$R_i(0) \cdot \cos \varphi_i = R_o \cdot \cos \varphi_o \quad (5.2.8)$$

z której wynika wielkość kąta obrotu wektora wodzącego na początku układu:

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{R_o}{R_i(0)} \cdot \cos \varphi_o\right) \quad (5.2.9)$$

Na końcu układu współrzędnych (dla $x=L_e$) przekrój taśmy tworzy odcinek płaski pokrywający się z osią z (Rys. 5.3) a zatem dla każdej linki kąt obrotu wektora wodzącego wynosi:

$$\varphi_i(L_e) = 0 \quad (5.2.10)$$



Rys. 5.3 Przekrój taśmy na końcu układu ($x=L_e$)

a moduł promienia wodzącego

$$R_i(L_e) = \sum_{j=i}^{n-1} t_j \quad (5.2.11)$$

gdzie: t_j - podziałka linek

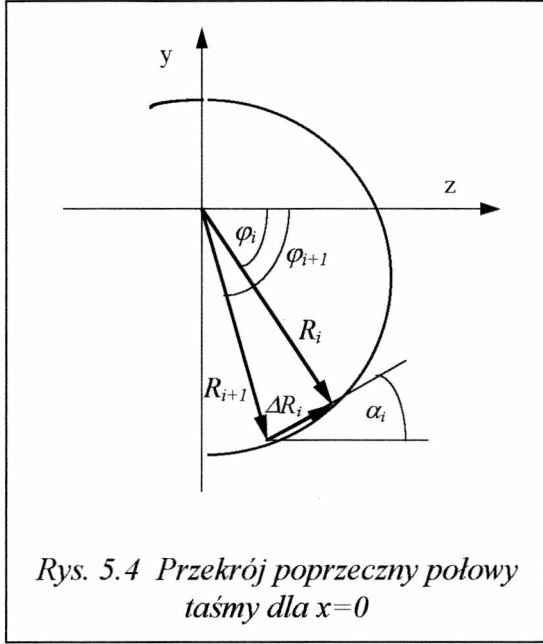
$i=1 \div n$ ($i=1$ linka skrajna,

$i=n$ linka środkowa)

$j=1 \div n-1$

Dla spełnienia założenia nie odkształcania się gumy pomiędzy linkami w kierunku poprzecznym istotnym jest, aby moduł różnicy wektorów wodzących dwóch sąsiednich linek (ΔR_i Rys. 5.4) miał stałą wielkość na całej długości odcinka przejściowego, czyli

$$|\Delta \bar{R}_i| = t_i \quad (5.2.12)$$



Kąt nachylenia wektora ΔR_i dla przekroju taśmy na początku układu $x=0$ (Rys. 5.4) wynosi:

$$\alpha_i(0) = \arctan \left(\frac{R_i(0) \cdot \sin \varphi_i - R_{i+1}(0) \cdot \sin \varphi_{i+1}}{R_i(0) \cdot \cos \varphi_i - R_{i+1}(0) \cdot \cos \varphi_{i+1}} \right) \quad (5.2.13)$$

natomiast dla przekroju taśmy na końcu układu $x=L_e$ (Rys. 5.3) $\alpha_i(L_e)=0$

Zakładamy, że na długości odcinka przejściowego nachylenie wektora ΔR_i zmienia się liniowo, czyli:

$$\alpha_i(x) = \alpha_i(0) + \frac{\alpha_i(L_e) - \alpha_i(0)}{L_e} \cdot x \quad (5.2.14)$$

Na podstawie rys. 5.4 można zapisać następujące zależności:

$$\bar{R}_{i+1} + \Delta \bar{R}_i = \bar{R}_i \quad (5.2.15)$$

oraz

$$R_{i+1} \cdot \sin \varphi_{i+1} + t_i \cdot \sin \alpha_i = R_i \cdot \sin \varphi_i \quad (5.2.16)$$

$$R_{i+1} \cdot \cos \varphi_{i+1} + t_i \cdot \cos \alpha_i = R_i \cdot \cos \varphi_i \quad (5.2.17)$$

dzieląc stronami równania (5.2.16) i (5.2.17) otrzymamy

$$\frac{R_{i+1} \cdot \sin \varphi_{i+1} + t_i \cdot \sin \alpha_i}{R_{i+1} \cdot \cos \varphi_{i+1} + t_i \cdot \cos \alpha_i} = \tan \varphi_i \quad (5.2.18)$$

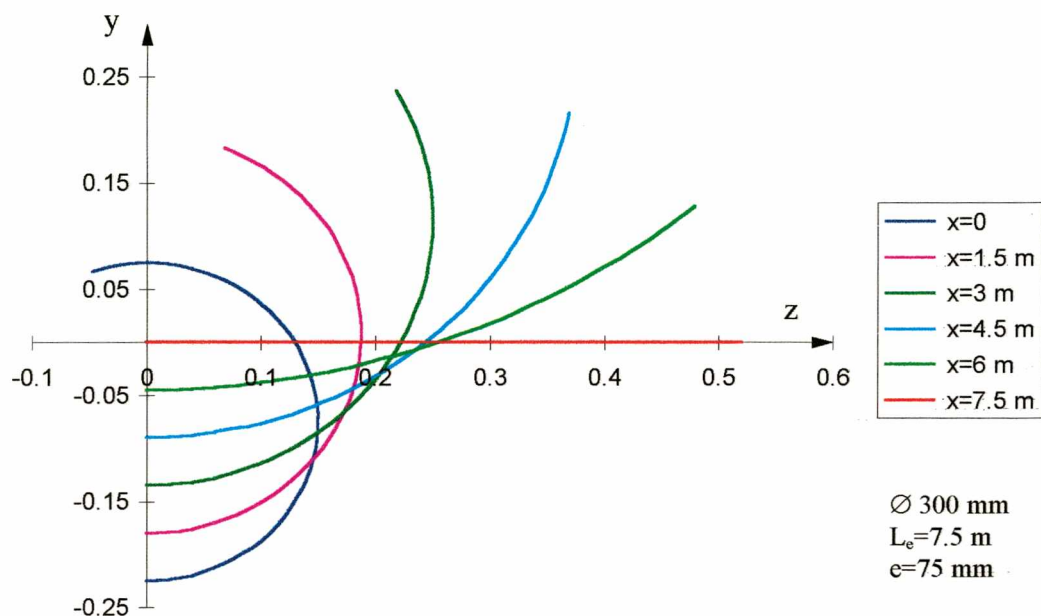
Stąd kąt obrotu wektora wodzącego na odcinku przejściowym wynosi:

$$\varphi_i(x) = \arctan \left(\frac{R_{i+1}(x) \cdot \sin \varphi_{i+1} + t_i \cdot \sin \alpha_i(x)}{R_{i+1}(x) \cdot \cos \varphi_{i+1} + t_i \cdot \cos \alpha_i(x)} \right) \quad (5.2.19)$$

a moduł wektora wodzącego z zależności (5.17) wynosi:

$$R_i(x) = \frac{R_{i+1}(x) \cdot \cos \varphi_{i+1} + t_i \cdot \cos \alpha_i}{\cos \varphi_i} \quad (5.2.20)$$

Wyznaczanie toru linek na odcinku przejściowym rozpoczynamy od linki środkowej ($i=n$) dla której zakładamy prostoliniowy bieg linki. Dla linek kolejnych ($i=n-1$ do $i=1$) korzystamy z zależności 5.2.19 i 5.2.20. Wówczas otrzymujemy pole przemieszczeń taśmy na odcinku przejściowym jak na rys. 5.5.



Rys. 5.5 Pole przemieszczeń taśmy na odcinku przejściowym wg modelu geometrycznego

Drogę Δl jaką linka pokonuje na odcinku $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ wyznaczmy z zależności geometrycznej:

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (5.2.21)$$

W związku z tym wydłużenie linki Δu na odcinku Δx wynosi:

$$\Delta u = \Delta l - \Delta x \quad (5.2.22)$$

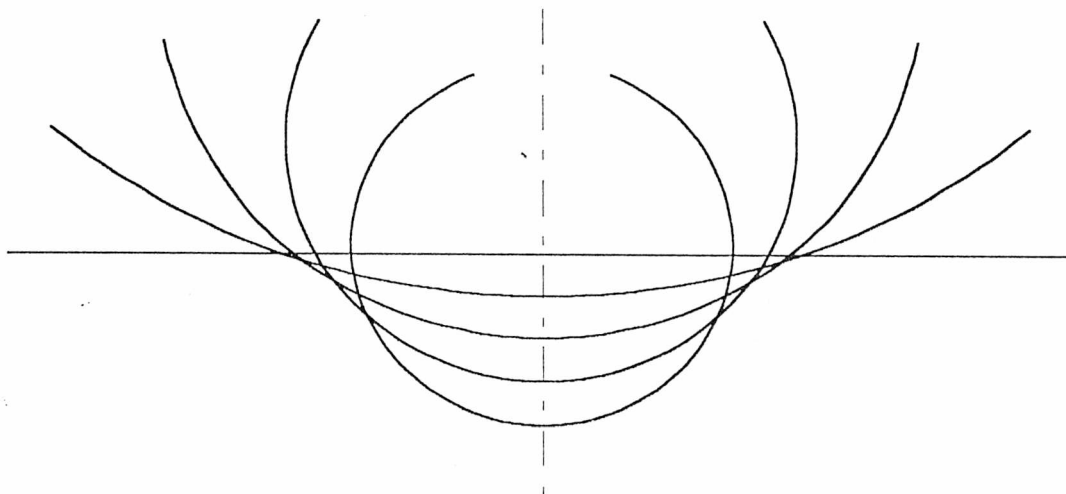
Jeśli podzielimy odcinek przejściowy na m równych odcinków to całkowite wydłużenie pojedynczej linki wynosi:

$$u = \sum_{j=1}^m \Delta u_j \quad (5.2.23)$$

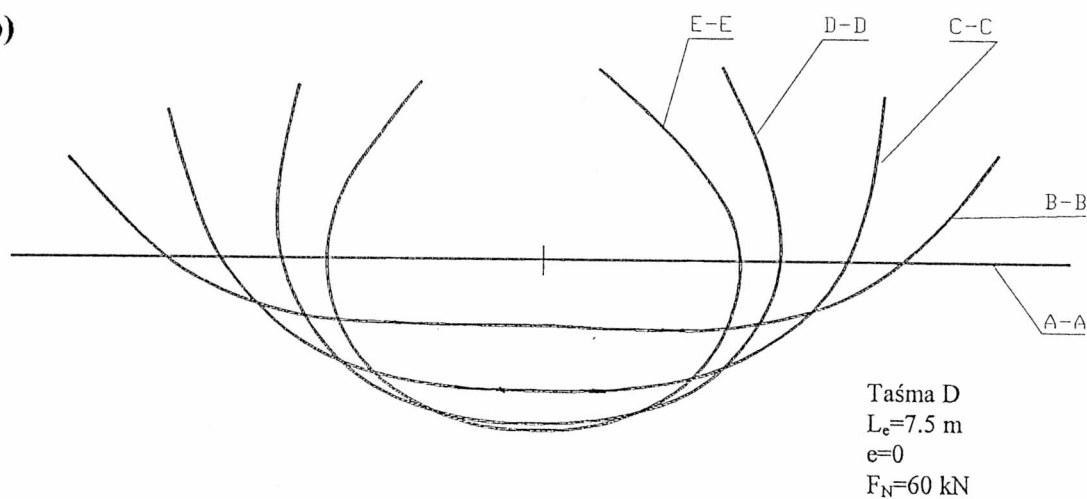
Na rys. 5.6 przedstawiono porównanie przekrojów poprzecznych taśmy na odcinku przejściowym wyznaczonych modelem teoretycznym z wynikami badań eksperymentalnych taśmy typu D. Pole przemieszczeń taśmy wyznaczone za pomocą modelu opierającego się jedynie na zależnościach geometrycznych wykazuje odstępstwa od rzeczywistości, jednak

charakter wymuszeń w postaci nierównomierności odkształceń pozostaje podobny. Tak więc, dla zbadania zachowania się analizowanej struktury rdzenia taśmy można korzystać z rozkładu odkształceń poszczególnych linek po szerokości taśmy wyznaczonego z modelu geometrycznego.

a)



b)



Rys. 5.6 Przekroje poprzeczne taśmy na odcinku przejściowym: a) wyznaczone modelem teoretycznym, b) z pomiarów na stanowisku badawczym

5.3 Podstawy teoretyczne modelu taśmy z linkami stalowymi na odcinku przejściowym

Model rozpatruje połowę taśmy o długości równej sumie długości odcinka przejściowego L_e i długości odcinka wpływu K . Symetryczna połowa rdzenia taśmy składa się z n linek, przy czym może występować m rodzajów linek. Wówczas

$$n = n_1 + \dots + n_i + \dots + n_m \quad (5.3.1)$$

gdzie n_i - liczba linek i-tego rodzaju

Początkowy stan obciążeń rdzenia taśmy wywołany siłą napinania F_N odpowiada równomiernym odkształceniom linek, a zatem linki i-tego rodzaju będą rozciągane siłą F_i , czyli z warunku równowagi sił:

$$F_N = n_1 F_1 + \dots + n_m F_m \quad (5.3.2)$$

Linki tworzą strukturę równoległą, czyli każda linka rdzenia taśmy wydłuży się o taką samą wielkość u_o . Stąd siła w linie i-tego rodzaju wynosi:

$$F_i = \frac{u_o}{l} \cdot (EA)_i \quad (5.3.3)$$

gdzie: $(EA)_i$ - sztywność rozciągania linki i-tego rodzaju,

l - długość taśmy.

Po zsumowaniu sił we wszystkich linkach otrzymuje się:

$$F_N = \frac{u_o}{l} [n_1 \cdot (EA)_1 + \dots + n_m \cdot (EA)_m] \quad (5.3.4)$$

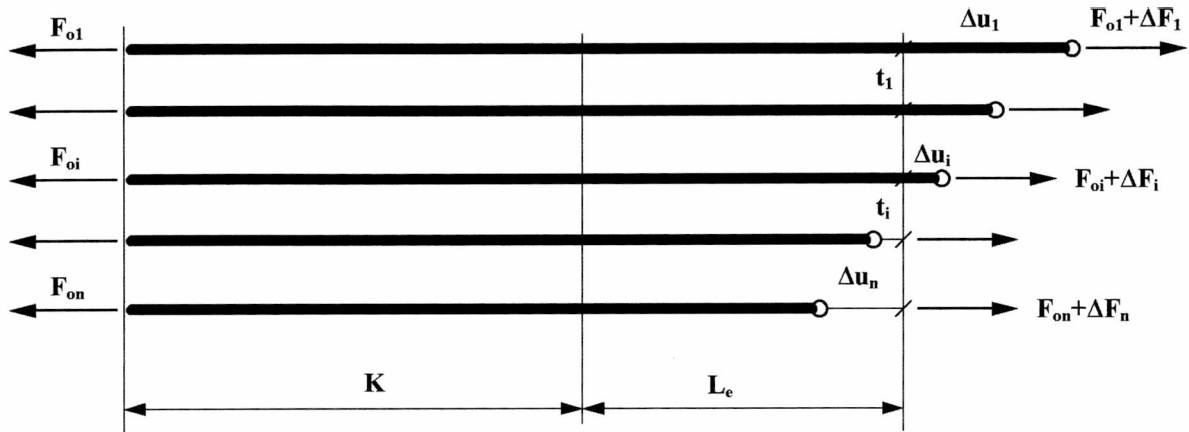
wydłużenie u_o wyniesie:

$$u_o = \frac{F_N \cdot l}{n_1 \cdot (EA)_1 + \dots + n_m \cdot (EA)_m} \quad (5.3.5)$$

Po podstawieniu do zależności 5.3.3 siła w linie i-tego rodzaju wyniesie:

$$F_i = F_N \cdot \frac{(EA)_i}{n_1 \cdot (EA)_1 + \dots + n_m \cdot (EA)_m} \quad (5.3.6)$$

Natomiast siły pochodzące od wymuszeń geometrycznych związanych z odcinkiem przejściowym przenośnika, gdzie występuje nierównomierny rozkład wydłużeń linek (Rys. 5.7), wyznaczymy wychodząc z energii sprężystej płaskiego układu równoległych linek i gumy.



Rys. 5.7 Schemat obciążenia linek na odcinku przejściowym

Na przyrost energii sprężystej ΔE składa się przyrost energii sprężystej w linie ΔE_l oraz przyrost energii sprężystej w gumie ΔE_g .

$$\Delta E = \Delta E_l + \Delta E_g \quad (5.3.7)$$

Pochodna cząstkowa energii po sile daje wydłużenie

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial \Delta F} = \Delta u \quad (5.3.8)$$

Analiza modeli taśm z linkami stalowymi [19] wykazuje, że rozwiązań równań różniczkowych opisujących przebieg sił w linkach należy szukać w postaci kombinacji funkcji hiperbolicznych, co wynika z charakteru równań różniczkowych. Rozwinięciem tych funkcji w szeregi Taylor'a są wielomiany o silnie malejących kolejnych wyrazach. Z zadawalającą dokładnością, nie przekraczającą kilku procent [7], można przyjąć tylko dwa pierwsze wyrazy, a zatem równanie opisujące przebieg siły w pojedynczej linie uprościć do funkcji kwadratowej. Potwierdzeniem tego założenia mogą być również wyniki przeprowadzone na Uniwersytecie w Hanowerze pomiarów obciążeń linek w rejonie odcinków przejściowych [12]. W wyniku oddziaływania sąsiednich linek poprzez warstwy gumy siła w dowolnej linie zmienia się zgodnie z zależnością:

$$F(x) = F_o \cdot (1 + a \cdot x^2) \quad (5.3.9)$$

$$\text{dla } x=L_e+K=L \quad F_k = F_o \cdot (1 + a \cdot L^2) \quad (5.3.10)$$

gdzie: F_o - siła początkowa

F_k - siła końcowa

Stąd

$$a = \frac{1}{L^2} \left(\frac{F_k}{F_o} - 1 \right) \quad (5.3.11)$$

wówczas

$$F(x) = F_o + F_k \cdot \frac{x^2}{L^2} - F_o \cdot \frac{x^2}{L^2} \quad (5.3.12)$$

Przyrost energii sprężystej w linie wyraża się wzorem

$$\Delta E_l = \frac{1}{2 \cdot (EA)} \cdot \int_0^L F^2(x) \cdot dx = \frac{1}{2 \cdot (EA)} \cdot F_o^2 \cdot \int_0^L (1 + ax^2)^2 dx \quad (5.3.13)$$

$$\Delta E_l = \frac{1}{2 \cdot (EA)} \cdot F_o^2 \cdot \left(L + \frac{2}{3} \cdot a \cdot L^3 + \frac{1}{5} \cdot a^2 \cdot L^5 \right) \quad (5.3.14)$$

a wówczas pochodna cząstkowa energii sprężystej w linie po sile wynosi:

$$\frac{\partial \Delta E_l}{\partial F_k} = \frac{\partial \Delta E_l}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial F_k} \quad (5.3.15)$$

$$\frac{\partial \Delta E_l}{\partial F_k} = \frac{L}{(EA)} \cdot \left(\frac{3}{15} \cdot F_k + \frac{2}{15} \cdot F_o \right) \quad (5.3.16)$$

Następny etap to wyznaczenie energii sprężystej i jej pochodnej dla pasma gumy pomiędzy linkami.

$$dE_G = \frac{1}{2} \cdot \Delta u(x) \cdot \tau \cdot h_t \cdot dx \quad (5.3.17)$$

h_t - grubość pasma gumy - grubość taśmy.

Naprężenia styczne wynoszą

$$\tau = \gamma \cdot G^* = \frac{\Delta u(x)}{t} \cdot G^* \quad (5.3.18)$$

gdzie:

G^* - zastępczy moduł odkształcenia postaciowego gumy wyznaczony w badaniach laboratoryjnych,

t - podziałka linek.

Wówczas

$$\Delta E_G = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_t \cdot G^*}{t} \cdot \int_0^x \Delta u(x)^2 \cdot dx \quad (5.3.19)$$

Pochodna cząstkowa energii w i-tym paśmie gumy po sile w i-tej linie wyniesie

$$\frac{\partial \Delta E_{Gi}}{\partial F_i} = \frac{h_t \cdot G^*}{t_i} \cdot \int_0^x \Delta u(x) \cdot \frac{\partial \Delta u(x)}{\partial F_i} \cdot dx \quad (5.3.20)$$

$$\Delta u(x) = u_{io} + \frac{1}{(EA)_i} \cdot \int_0^x F_i(x) \cdot dx - u_{i+1,o} - \frac{1}{(EA)_{i+1}} \cdot \int_0^x F_{i+1}(x) \cdot dx \quad (5.3.21)$$

Pochodna cząstkowa energii po sile dla i -tej linki wyniesie

$$\frac{\partial \Delta E_i}{\partial F_i} = \frac{\partial \Delta E_{ii}}{\partial F_i} + \frac{\partial \Delta E_{Gi}}{\partial F_i} + \frac{\partial \Delta E_{Gi-1}}{\partial F_i} \quad (5.3.22)$$

Korzystając z zależności (5.3.16), (5.3.20), (5.3.8) otrzymujemy układ n równań typu:

$$A_{i-1} \cdot F_{i-1} + A_i \cdot F_i + A_{i+1} \cdot F_{i+1} + C_i = 0 \quad (5.3.23)$$

Stosując macierzową metodę Gaussa otrzymujemy rozwiązanie układu równań w postaci wektora sił F_i w linkach. Z układu n równań typu (5.3.23) otrzymujemy równanie:

$$[A] \cdot [F] = [C] \quad (5.3.24)$$

Macierz A jest macierzą, której wyrazy grupują się tylko wokół przekątnej, natomiast F i C są wektorami. Wówczas równanie (5.3.24) ma postać:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & .. & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & 0 & .. & 0 \\ 0 & A_{32} & A_{33} & A_{34} & 0 & .. & 0 \\ .. & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & A_{i,i-1} & A_{ii} & A_{i,i+1} & 0 \\ .. & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{n,n-1} & A_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ .. \\ F_i \\ .. \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ .. \\ C_i \\ .. \\ C_n \end{bmatrix} \quad (5.3.25)$$

Dla i -tego wiersza macierzy A jej elementy mają postać:

$$A_{i,i} = \frac{L}{3 \cdot (EA)_i} + a_{i,i} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_i} + a_{i-1,i} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_i} \quad (5.3.26)$$

$$A_{i,i-1} = -a_{i-1,i} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_{i-1}} \quad A_{i,i+1} = -a_{i,i} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_{i+1}} \quad (5.3.27)$$

gdzie stosujemy podstawienie $a_{i,j} = \frac{h_i \cdot G}{t_i \cdot (EA)_j} \quad (5.3.28)$

dla pierwszego wiersza ze względu na to, że dotyczy on skrajnej linki współpracującej tylko z jedną linką sąsiednią, elementy macierzy mają postać:

$$A_{1,1} = \frac{L}{3 \cdot (EA)_1} + a_{1,1} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_1} \quad A_{1,2} = -a_{1,1} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_2} \quad (5.3.29)$$

W ostatnim wierszu macierzy A uwzględniona jest symetryczna współpraca linki środkowej taśmy (oddziaływanie linek sąsiednich jest takie same co do wielkości i kierunku), a zatem wyrazy macierzy wynoszą:

$$A_{n,n-1} = -2 \cdot a_{n-1,n} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_{n-1}} \quad A_{n,n} = \frac{L}{3 \cdot (EA)_n} + 2 \cdot a_{n-1,n} \cdot \frac{L^3}{63 \cdot (EA)_n} \quad (5.3.30)$$

Elementy wektora wyrazów wolnych wynoszą:

$$\begin{aligned} C_i = u_i - & \left[\frac{2}{15} + a_{i,i} \cdot \left(\frac{L^2}{15} - \frac{L^2}{63} \right) + a_{i-1,i} \cdot \left(\frac{L^2}{15} - \frac{L^2}{63} \right) \right] \cdot \frac{L \cdot F_{io}}{(EA)_i} + \\ & - a_{i,i} \cdot \left(\frac{L^2}{63} - \frac{L^2}{15} \right) \cdot \frac{L \cdot F_{i+1,o}}{(EA)_{i+1}} - a_{i-1,i} \cdot \left(\frac{L^2}{63} - \frac{L^2}{15} \right) \cdot \frac{L \cdot F_{i-1,o}}{(EA)_{i-1}} + \\ & - \left(a_{i,i} \cdot \frac{L^2}{12} - a_{i-1,i} \cdot \frac{L^2}{12} \right) \cdot u_{io} + a_{i,i} \cdot \frac{L^2}{12} \cdot u_{i+1,o} + a_{i-1,i} \cdot \frac{L^2}{12} \cdot u_{i-1,o} \end{aligned} \quad (5.3.31)$$

$$\begin{aligned} C_1 = u_1 - & \left[\frac{2}{15} + a_{1,1} \cdot \left(\frac{L^2}{15} - \frac{L^2}{63} \right) \right] \cdot \frac{L \cdot F_{1o}}{(EA)_1} - a_{1,1} \cdot \left(\frac{L^2}{63} - \frac{L^2}{15} \right) \cdot \frac{L \cdot F_{2,o}}{(EA)_2} + \\ & - a_{1,1} \cdot \frac{L^2}{12} \cdot u_{1o} + a_{1,1} \cdot \frac{L^2}{12} \cdot u_{2,o} \end{aligned} \quad (5.3.32)$$

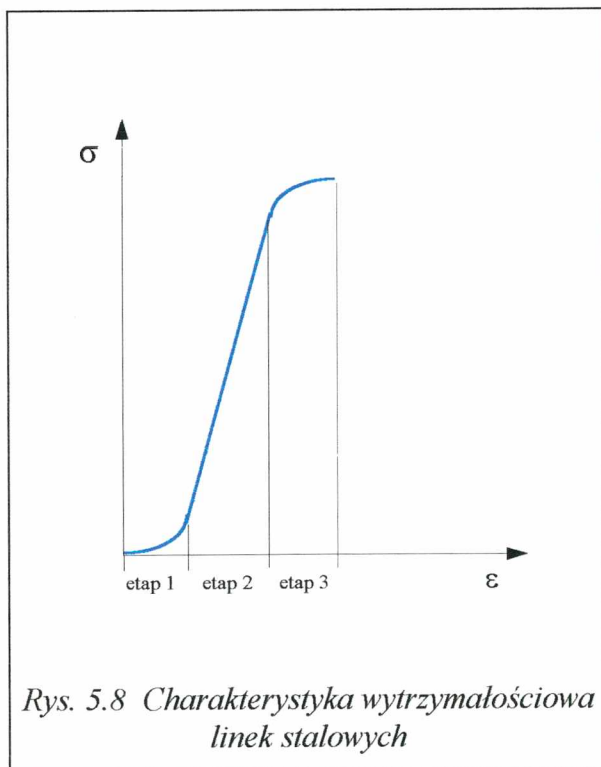
$$\begin{aligned} C_n = u_n - & \left[\frac{2}{15} + 2 \cdot a_{n-1,n} \cdot \left(\frac{L^2}{15} - \frac{L^2}{63} \right) \right] \cdot \frac{L \cdot F_{no}}{(EA)_n} + \\ & - 2 \cdot a_{n-1,n} \cdot \left(\frac{L^2}{63} - \frac{L^2}{15} \right) \cdot \frac{L \cdot F_{n-1,o}}{(EA)_{n-1}} - 2 \cdot a_{n-1,n} \cdot \frac{L^2}{12} \cdot u_{no} + 2 \cdot a_{n-1,n} \cdot \frac{L^2}{12} \cdot u_{n-1,o} \end{aligned} \quad (5.3.33)$$

5.4 Określenie właściwości taśmy z linkami stalowymi dla potrzeb modelowania odcinków przejściowych

Mając na uwadze założenia modelowe stosowane w modelach taśm z linkami stalowymi oraz charakter uzyskiwanych rozwiązań można przypuszczać, że o powodzeniu danego modelu teoretycznego w istotnym stopniu decydują poprawnie określone współczynniki opisujące właściwości fizyko-mechaniczne taśmy. W związku z tym wykonano badania modułu sprężystości podłużnej linek stalowych E oraz zastępczego modułu odkształcenia postaciowego gumy G^* dla taśmy z linkami stalowymi do przenośników rurowych. Określenie tych właściwości taśmy prowadzono dla potrzeb modelowania odcinków przejściowych przenośników taśmowych, czyli odcinków na których dochodzi do znacznego zróżnicowania naprężeń w linkach po szerokości taśmy i do oddziaływania sąsiednich linek poprzez naprężenia styczne w warstwie gumy wywołane odkształceniem postaciowym gumy.

5.4.1 Określenie modułu sprężystości podłużnej linek stalowych

Wydłużanie się linek stalowych pod wpływem przyłożonego obciążenia odbywa się w trzech wyodrębnionych etapach (Rys. 5.8):



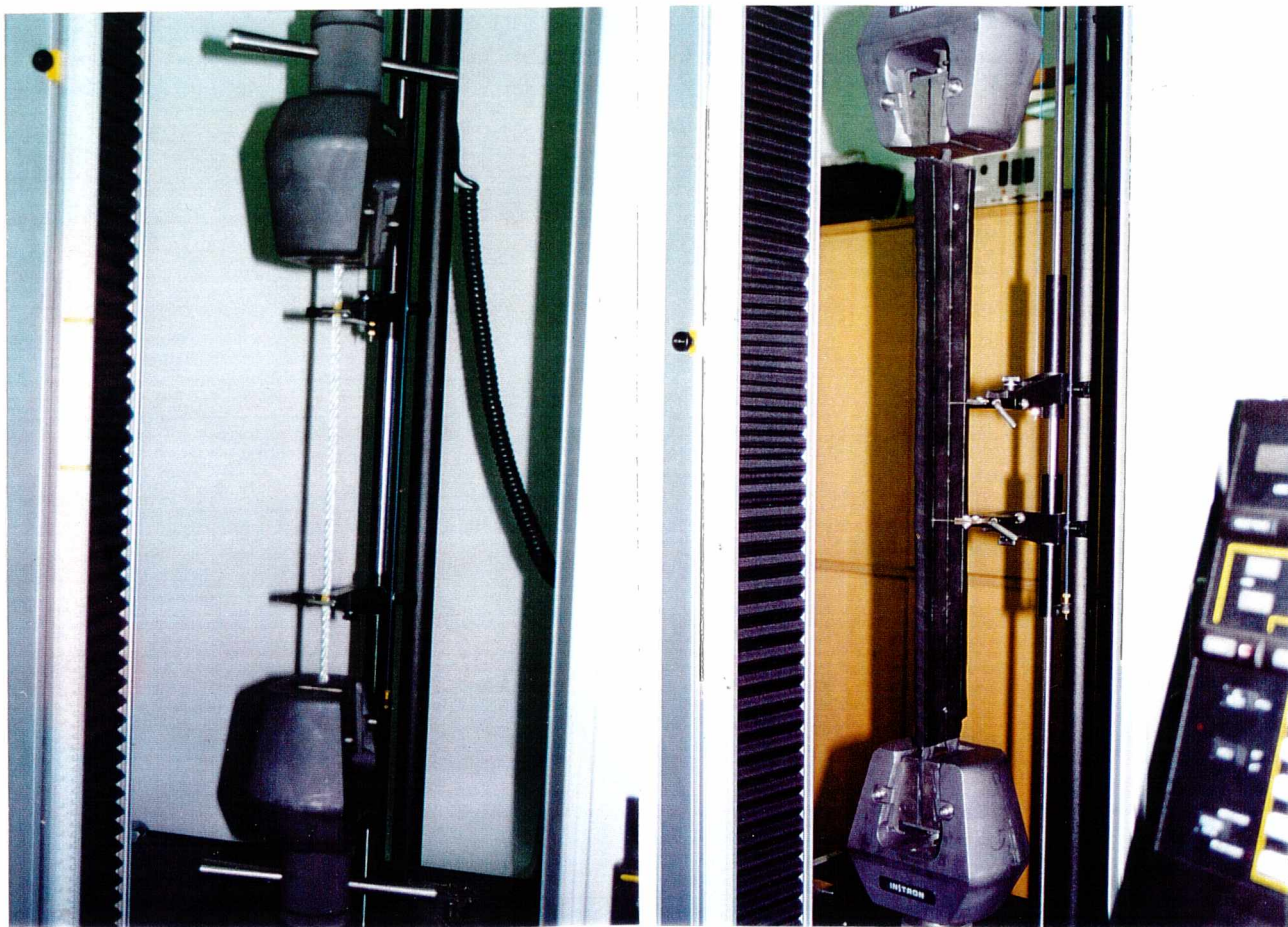
Etap 1 -wydłużenie wstępne, jest to wydłużenie spowodowane dopasowywaniem się położenia drutów w splotkach oraz położenia splotek w linie, wydłużenie to określa się zazwyczaj jako trwałe wydłużenie konstrukcyjne. Po wytworzeniu się na przyległych do siebie drutach powierzchni nośnych rozpoczyna się etap drugi.

Etap 2 -wydłużenie sprężyste, jest to wydłużenie spowodowane przyłożonym obciążeniem rozciągającym odbywające się zgodnie z zasadami prawa Hooke'a. Po przekroczeniu granicy proporcjonalności rozpoczyna się etap trzeci.

Etap 3 -wydłużenie trwałe, jest to niesprężyste wydłużenie elementów stalowych spowodowane obciążeniem rozciągającym, przekraczającym granicę plastyczności materiału. Wydłużenie to trwa aż do momentu zerwania linki.

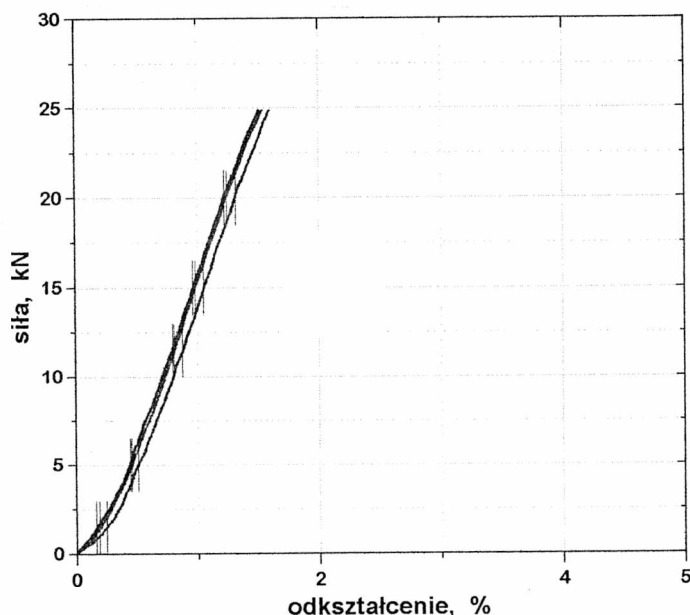
Polskie normy dotyczące lin stalowych [18] nie określają wymagań co do wartości i badań modułu sprężystości podłużnej, tak więc zastosowano własną metodę pomiarową. Próbę rozciągania linek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu INSTRON 4467 (fot.4). W badaniach stosowano próbki linek o długości 500mm z bazą pomiarową 100mm. Prędkość przyrostu naprężenia dobrano zgodnie z PN-91/H-04310 „Próba statyczna rozciągania metali” i ustalono na poziomie 10 MPa/s. Próbkę obciążano do około 70% obciążenia zrywającego linkę. Przebadano dwa rodzaje linek stosowanych w taśmach, dla których prowadzono badania pola przemieszczeń oraz pola odkształceń (rozd. 4):

- a) linka $\varnothing 6$ mm -konstrukcja 7x19,
- b) linka $\varnothing 4.2$ mm -konstrukcja 7x7.



Fotografia 4 i 5. Badania modułu sprężystości podłużnej linek oraz modułu odkształcenia postaciowego gumy

Badania prowadzono dla linek nowych (czyste, bez gumy) oraz dla linek zatopionych w gumie (wyciętych z taśmy). Na rys. 5.9 zaprezentowano przykładowy wykres przebiegu próby rozciągania linki, a wyniki badań oraz wyznaczone moduły sprężystości podłużnej przedstawiono w tabeli 5.1.



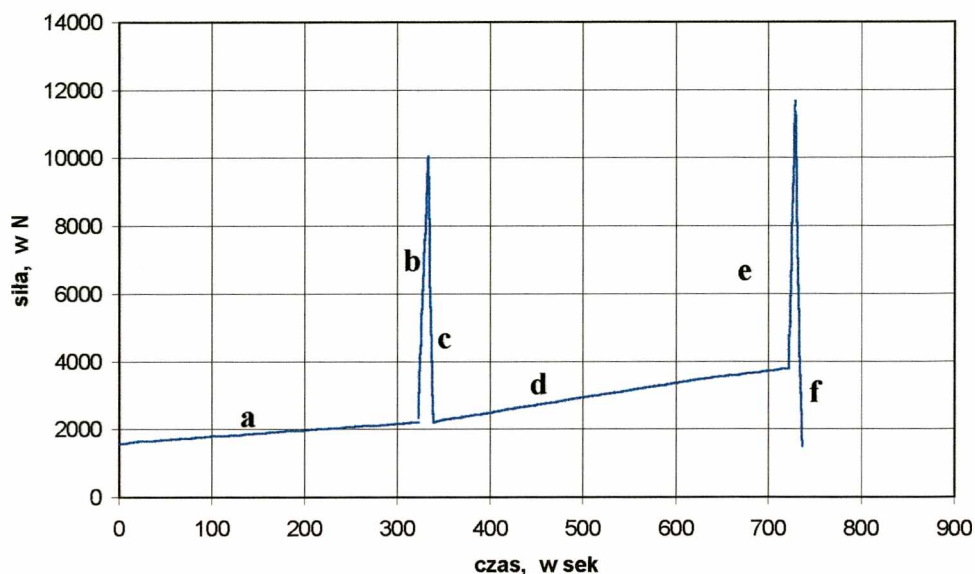
Rys. 5.9 Charakterystyka rozciągania trzech próbek linki $\varnothing 6$ mm

Tabela 5.1 Wyniki badań modułu sprężystości podłużnej linek stalowych

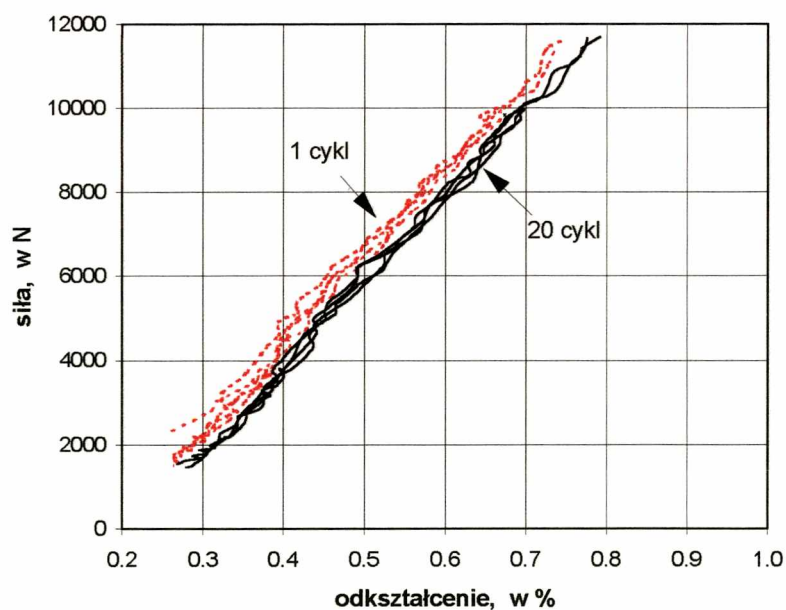
Linka	Odkształcenie ε w % dla sił					Moduł Young'a E w kN/mm ²
	1.5 kN	5 kN	11.5 kN	15 kN	20 kN	
$\varnothing 6$ mm	0.202	0.468	0.827	1.000	1.266	95
$\varnothing 6$ mm w gumie	0.159	0.372	0.688	0.843	1.070	111
	0.75 kN	5.5 kN	7.5 kN	10 kN	-	
$\varnothing 4.2$ mm	0.071	0.501	0.678	0.912	-	139
$\varnothing 4.2$ mm w gumie	0.094	0.483	0.667	0.889	-	154

Linki przebadano również pod obciążeniem dynamicznym. Przyjęty do badań schemat obciążenia przedstawia rys. 5.10. Starano się, aby badania odzwierciedlały stan obciążenia skrajnych linek w taśmie podczas pracy na przenośniku. Pierwszy etap cyklu obciążania (Rys. 5.10 odcinek a) to przejście taśmy przez ciągnio dolne, następnie wejście na odcinek przejściowy (odcinek b), bęben i zejście z odcinka przejściowego (odcinek c), następnie ciągnio górne (odcinek d), odcinek przejściowy (odcinek e), bęben i ponownie odcinek przejściowy

(odcinek f). Wielkości sił oraz prędkości ich przyrostu z rys. 5.10 oszacowano dla linki $\varnothing 6$ mm pracującej jako linka skrajna w taśmie na przenośniku rurowym o średnicy $\varnothing 300$ mm i długości przenośnika ok. 500 m. Na rys 5.11 przykładowo przedstawiono charakterystyki otrzymane dla pierwszego i dwudziestego cyklu obciążenia linki $\varnothing 6$ mm zatopionej w gumie.



Rys. 5.10 Schemat obciążania linki $\varnothing 6$ mm w badaniach dynamicznych



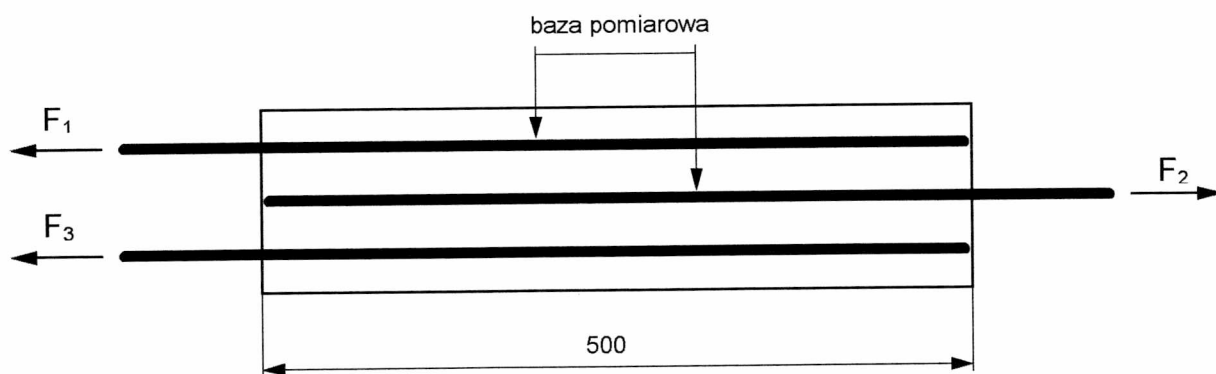
Rys. 5.11 Charakterystyka rozciągania linki $\varnothing 6$ mm zatopionej w gumie w badaniach dynamicznych

Analizując wyniki badań statycznych i dynamicznych linek można stwierdzić, że moduł sprężystości podłużnej linki stalowej zależy od konstrukcji linki, ponadto linka w gumie wykazuje większy moduł niż linka czysta. W przypadku linki $\varnothing 6$ mm jest to wzrost o 16% , a w przypadku linki $\varnothing 4.2$ mm jest to wzrost o 11%. Analizując charakterystyki otrzymane w badaniach dynamicznych stwierdzono, że w zakresie stosowanych obciążeń, czyli obciążeń jakich można się spodziewać podczas pracy na przenośniku, przebiegi charakterystyk są liniowe. Ponadto nachylenie charakterystyki po kilkudziesięciu cyklach obciążania próbki nie uległo zmianie.

5.4.2 Określenie zastępczego modułu odkształcenia postaciowego gumy

Pokonywanie przez taśmę odcinków przejściowych przenośnika rurowego bądź przenośnika nieckowego powoduje powstanie dodatkowych odkształceń w linkach spowodowanych nierównomiernym wydłużeniem lub skróceniem poszczególnych linek w taśmie. W związku z tym dochodzi do odkształcenia postaciowego gumy pomiędzy linkami, a co za tym idzie powstania naprężeń stycznych wzdłuż linek. Tak więc, przy posługiwaniu się modelem teoretycznym odcinka przejściowego konieczna jest znajomość modułu odkształcenia postaciowego gumy w danej taśmie [12].

Badania laboratoryjne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu INSTRON 4467 (fot.5). Wymiary oraz kształt stosowanych próbek zaprezentowano na rys. 5.12.

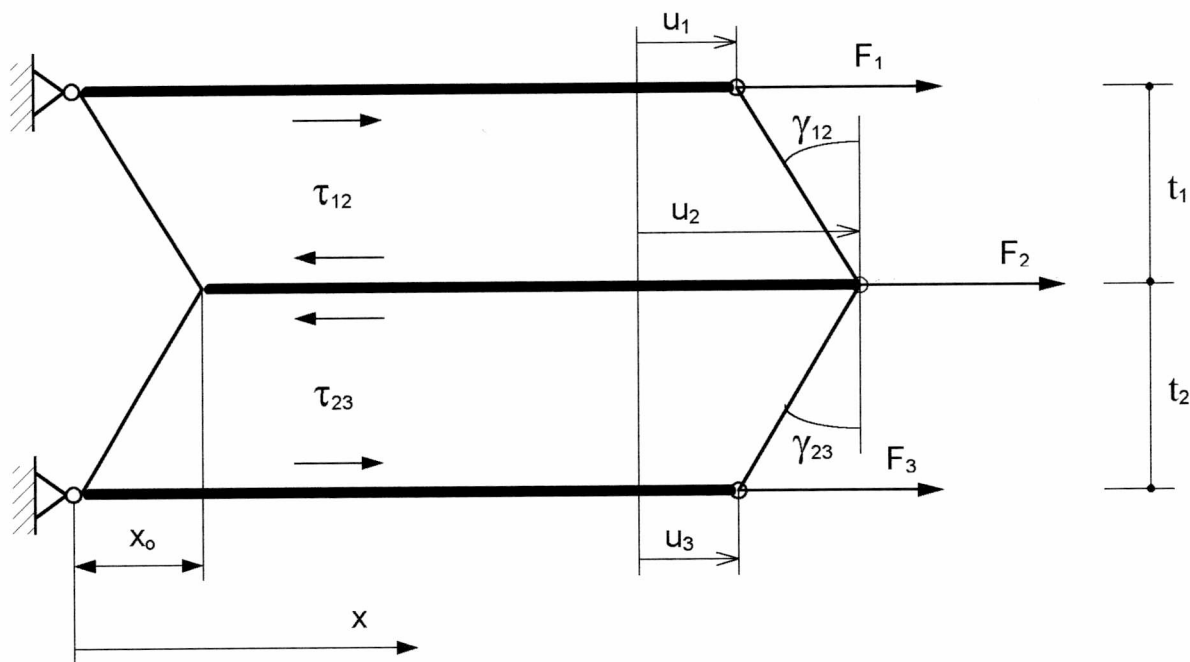


Rys. 5.12 Próbką do badań modułu odkształcenia postaciowego gumy

Na podstawie badań przeprowadzonych w Hanoverze [12] w których wykazano, że 95% sił przejmują linki sąsiednie, a tylko 5% następne, zdecydowano się zastosować w badaniach układ trzech linek. Próbki wycięto z taśm, dla których prowadzono badania pola przemieszczeń oraz pola odkształceń (rozdz. 4). Badania prowadzono dla dwóch rodzajów próbek:

- układ trzech linek $\varnothing 6$ mm z podziałką $t=20$ mm,
- układ trzech linek $\varnothing 4.2$ mm z podziałką $t=20$ mm.

W badaniach laboratoryjnych mierzono przemieszczenia linki środkowej w stosunku do linki skrajnej. Położenie bazy pomiarowej zmieniano wzdłuż całej długości próbki. Oprócz badań laboratoryjnych wykonano model teoretyczny opisywanego zadania. W tym celu zastosowano układ zastępczy jak na rys. 5.13.



Rys. 5.13 Schemat układu trzech linek do modelu teoretycznego

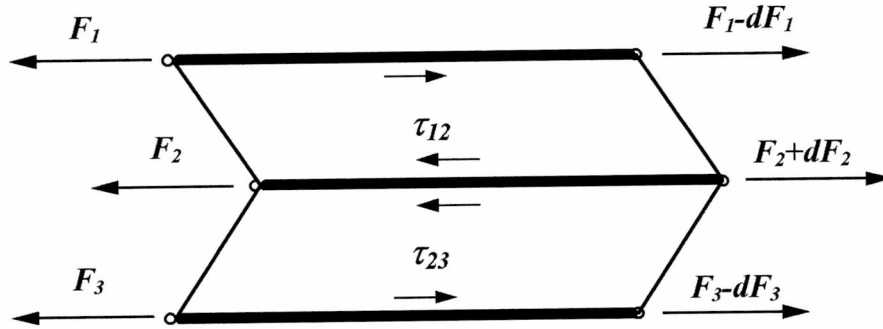
Dla takiego schematu obciążeń wydłużenia poszczególnych linek wynoszą:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{(EA)_1} \cdot \int_0^x F_1 \cdot dx \\ u_2 = \frac{1}{(EA)_2} \cdot \int_0^x F_2 \cdot dx + x_0 \\ u_3 = \frac{1}{(EA)_3} \cdot \int_0^x F_3 \cdot dx \end{cases} \quad (5.4.1)$$

Różniczkując układ równań (5.4.1) otrzymujemy:

$$\begin{cases} (EA)_1 \cdot \frac{du_1}{dx} = F_1 \\ (EA)_2 \cdot \frac{du_2}{dx} = F_2 \\ (EA)_3 \cdot \frac{du_3}{dx} = F_3 \end{cases} \quad (5.4.2)$$

$$\begin{cases} (EA)_1 \cdot \frac{d^2 u_1}{dx^2} = \frac{dF_1}{dx} \\ (EA)_2 \cdot \frac{d^2 u_2}{dx^2} = \frac{dF_2}{dx} \\ (EA)_3 \cdot \frac{d^2 u_3}{dx^2} = \frac{dF_3}{dx} \end{cases} \quad (5.4.3)$$



Rys. 5.14 Schemat układu przenoszenia sił

Z układu równowagi sił (Rys. 5.14) działających na wydzieloną linkę można zapisać równania:

$$\begin{cases} dF_1 = -\tau_{1,2} \cdot h_t \cdot dx \\ dF_2 = (\tau_{1,2} + \tau_{2,3}) \cdot h_t \cdot dx \\ dF_3 = -\tau_{2,3} \cdot h_t \cdot dx \end{cases} \quad (5.4.4)$$

h_t - grubość taśmy,

τ - naprężenia styczne, które można wyznaczyć z zależności (5.4.5) i (5.4.6)

$$\begin{cases} \tau_{1,2} = \gamma_{1,2} \cdot G \\ \tau_{2,3} = \gamma_{2,3} \cdot G \end{cases} \quad (5.4.5)$$

$$\begin{cases} \tau_{1,2} = \frac{u_2 - u_1}{t_1} \cdot G \\ \tau_{2,3} = \frac{u_2 - u_3}{t_2} \cdot G \end{cases} \quad (5.4.6)$$

G - moduł odkształcenia postaciowego gumy.

Podstawiając zależności (5.4.6) do (5.4.4) a następnie zależności (5.4.4) do układu równań (5.4.3) oraz stosując podstawienia (5.4.7) otrzymujemy układ równań różniczkowych (5.4.8).

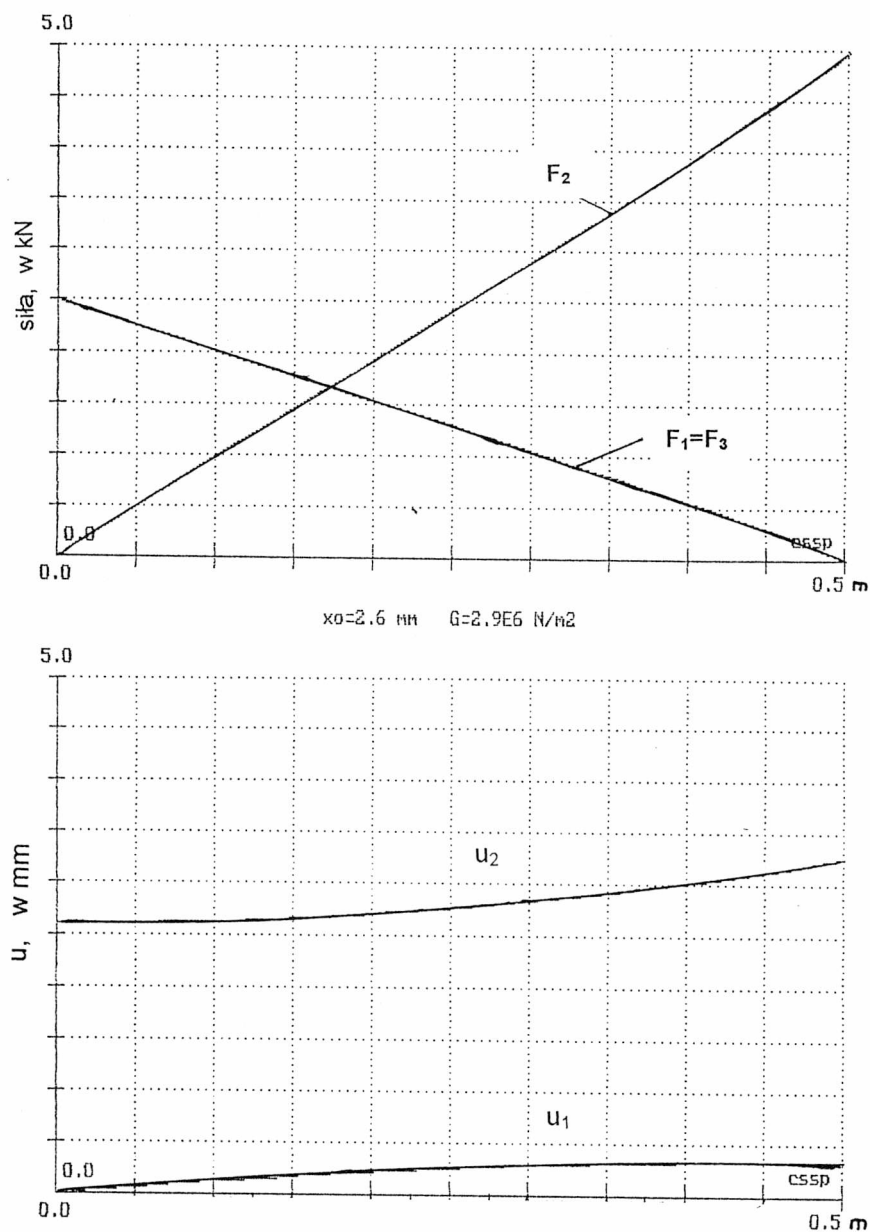
$$\begin{aligned} \frac{G \cdot h_t}{t_1 \cdot (EA)_1} &= a_{11} & \frac{G \cdot h_t}{t_1 \cdot (EA)_2} &= a_{12} \\ \frac{G \cdot h_t}{t_2 \cdot (EA)_2} &= a_{22} & \frac{G \cdot h_t}{t_2 \cdot (EA)_3} &= a_{23} \end{aligned} \quad (5.4.7)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_1}{dx^2} = u_1 \cdot a_{11} - u_2 \cdot a_{11} \\ \frac{d^2 u_2}{dx^2} = u_2 \cdot (a_{12} + a_{22}) - u_1 \cdot a_{12} - u_3 \cdot a_{22} \\ \frac{d^2 u_3}{dx^2} = u_3 \cdot a_{23} - u_2 \cdot a_{23} \end{cases} \quad (5.4.8)$$

Rozwiązując układ równań różniczkowych (5.4.8) przy warunkach początkowych zapisanych jak poniżej oraz przy zadanej hipotetycznej wielkości modułu odkształcenia postaciowego G gumy otrzymano przebiegi sił F w linkach oraz wydłużenia bezwzględne u . Przykładowe wyniki dla układu z linkami o średnicy $\varnothing 6$ mm zaprezentowano na rys. 5.15.

Warunki początkowe dla $x=0$

$$\begin{aligned} u_1 &= 0 & F_1 &= \frac{1}{2} F_o & \frac{du_i}{dx} &= \frac{F_i}{(EA)_i} & \frac{du_1}{dx} &= \frac{F_o}{2(EA)_1} \\ u_2 &= x_o & F_2 &= 0 & & & \frac{du_2}{dx} &= 0 \\ u_3 &= 0 & F_3 &= \frac{1}{2} F_o & & & \frac{du_3}{dx} &= \frac{F_o}{2(EA)_3} \end{aligned}$$



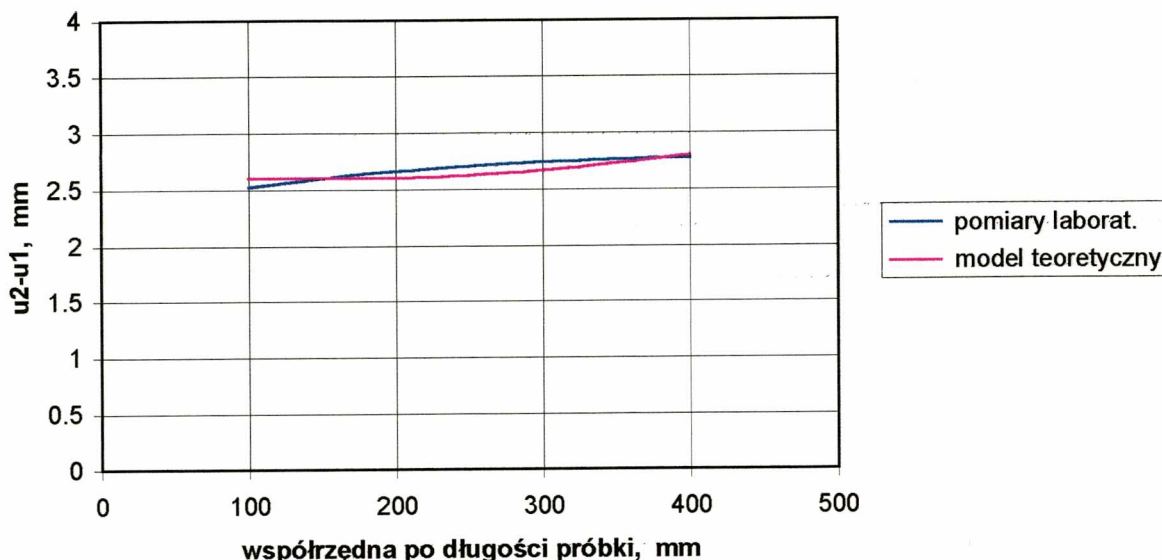
Rys. 5.15 Wyniki obliczeń modelu teoretycznego dla układu z linkami o średnicy $\varnothing 6$ mm:
a) siły F w linkach b) wydłużenia u

Zgodność wyników modelu teoretycznego z wynikami badań laboratoryjnych uważano za kryterium wyboru wielkości modułu G dla danej próbki taśmy (Rys. 5.16). W ten sposób określona wielkość zastępczego modułu odkształcenia postaciowego gumy wynosi:

$G^* = 2.9$ N/mm² dla taśmy z linkami o średnicy $\varnothing 6$ mm z podziałką $t = 20$ mm,

$G^* = 3.75$ N/mm² dla taśmy z linkami o średnicy $\varnothing 4.2$ mm z podziałką $t = 20$ mm.

**Przemieszczenie linki środkowej w stosunku do linki skrajnej
przy sile $F_0=5$ kN**



Rys. 5.16 Porównanie wyników z modelu teoretycznego z wynikami badań laboratoryjnych dla taśmy z linkami o średnicy 6 mm. W modelu zadano moduł odkształcenia postaciowego gumy $G=2.9$ N/mm²

5.4.3 Podsumowanie

Moduł sprężystości podłużnej E linki stalowej zależy od konstrukcji linki. Stwierdzono rozbieżności w wielkości modułu E dla linki czystej i dla linki zatopionej w gumie. Dla potrzeb modelowania odcinków przejściowych należy stosować wielkość modułu E dla linek zatopionych w gumie. W badaniach prowadzonych na Uniwersytecie w Delft [5] uzyskano podobnej wielkości moduły sprężystości podłużnej E linek stalowych (czystych oraz zawulkanizowanych w gumie) jak przedstawione w pracy.

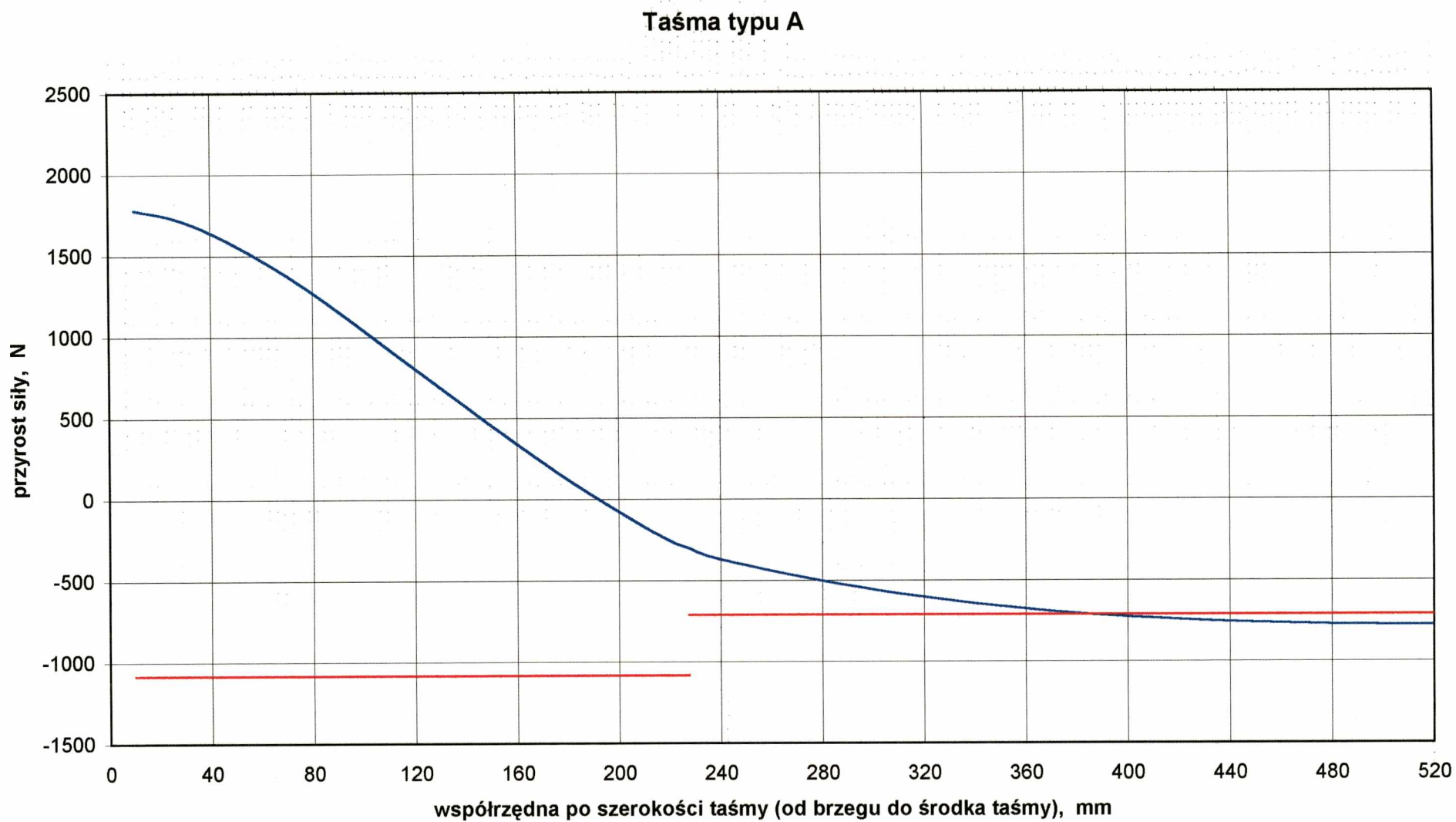
Charakterystyki wytrzymałościowe linek uzyskane w badaniach dynamicznych w zakresie obciążeń jakich można się spodziewać podczas pracy na przenośniku są liniowe. Nachylenie tych charakterystyk po kilkudziesięciu cyklach obciążania próbki nie uległo zmianie.

Uzyskane wielkości modułu odkształcenia postaciowego G gumy różnią się od wielkości stosowanych przez innych autorów w modelowaniu taśm z linkami stalowymi. Na przykład w porównaniu z wielkością modułu G proponowaną przez K.H. Oehmena [15]

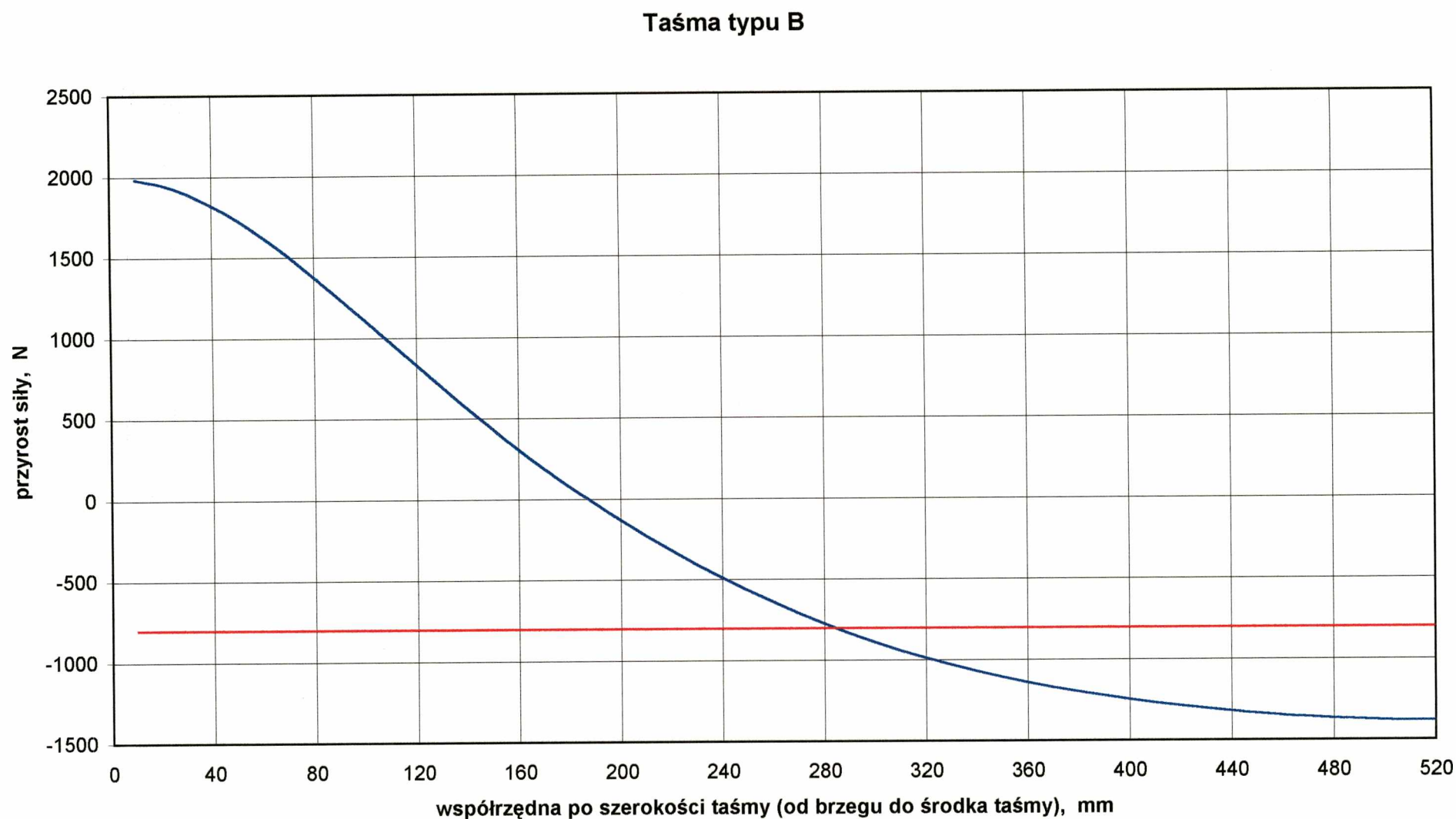
uzyskana wielkość modułu jest prawie trzykrotnie większa. K.H. Oehmen odwzorowywał taśmę układem wielopasmowym, a dla wyznaczenia zastępczego modułu sprężystości postaciowej warstwy gumy, składającej się z gumy rdzeniowej oraz gumy okładkowej, zastosował metodę elementów skończonych. Wyznaczenie eksperymentalne parametrów gumy na drodze symulacji procesów rzeczywistych zachodzących w taśmie wydaje się być bardziej adekwatne.

5.5 Analiza obciążeń linek w rejonie odcinka przejściowego przenośnika rurowego

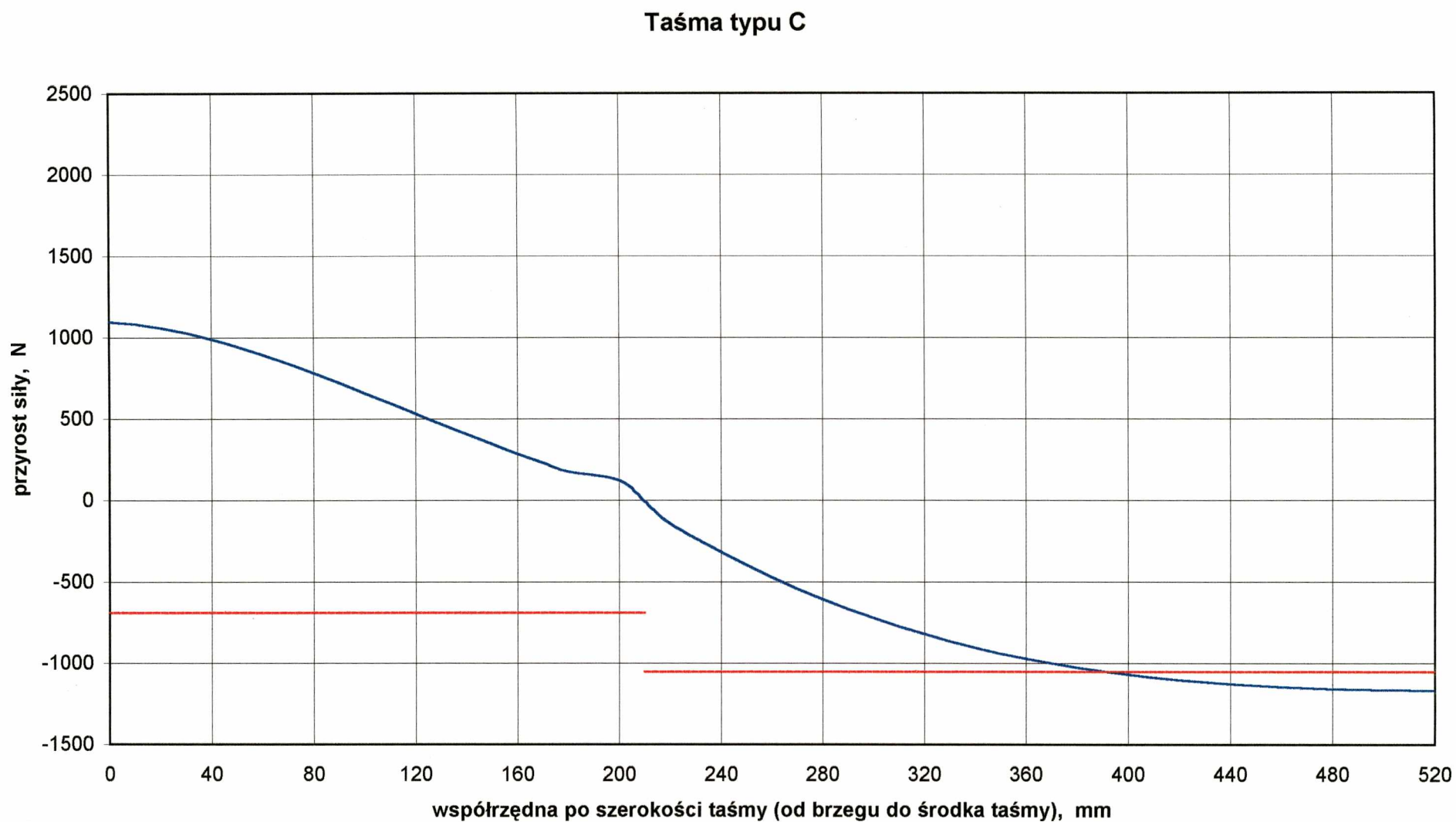
Przy wykorzystaniu opracowanego modelu teoretycznego wykonano obliczenia obciążeń linek w taśmie w rejonie odcinka przejściowego przenośnika rurowego. Obliczenia wykonano dla taśm, dla których prowadzono na stanowisku pomiarowym badania pola przemieszczeń oraz pola odkształceń (rozdz. 4). Badane taśmy o szerokości nominalnej 1100 mm tworzyły przekrój kołowy przenośnika rurowego o średnicy $\varnothing 300$ mm. Konstrukcje tych taśm przedstawiono na rys. 4.2. Przeprowadzono obliczenia dla wszystkich czterech typów taśm przy tych samych parametrach geometrycznych odcinka przejściowego tj. długość odcinka przejściowego $L_e = 7.5$ m, położenie bębna $e = 75$ mm oraz przy tej samej sile napinania $F_0 = 60$ kN. W obliczeniach wykorzystano wielkości modułu sprężystości podłużnej linek stalowych E oraz modułu odkształcenia postaciowego gumy G wyznaczone w badaniach laboratoryjnych (rozdz. 5.4). W obliczeniach konieczne było przyjęcie założeń odnośnie długości odcinka taśmy, na którym obciążenia linek wyrównują się i osiągają poziom odpowiadający sile napięcia wstępnego. W badaniach prowadzonych w Hanowerze [12] wykazano, że wyrównanie obciążeń linek nie następuje na długości odcinka przejściowego, ale daleko poza tym odcinkiem. Wykazano, że długość strefy wpływu odcinka przejściowego jest zależna od panującego na odcinku przejściowym stanu obciążeń linek. Dla taśmy o szerokości 1600 mm, przy odcinku przejściowym o długości od 2 do 4 m na przenośniku nieckowym z zestawem trójkątnym o kącie niecki 45° długość strefy wpływu wynosiła od 10 do 20 m. Mając na uwadze fakt, że na odcinku przejściowym przenośnika rurowego występują znacznie większe zróżnicowanie odkształceń, to długość strefy wpływu (K) powinna być jeszcze większa. W analizie porównawczej przyjęto arbitralnie dla wszystkich typów taśm $K = 25$ m. Założenie to nie mogło być sprawdzone, albowiem na stanowisku pomiarowym możliwe było zainstalowanie odcinków taśm o długości do 12 m. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano rozkład obciążeń linek po szerokości taśmy w rejonie bębna. Na rysunkach (Rys. 5.17÷Rys. 5.20) przedstawiono przyrosty sił w linkach po połowie szerokości taśmy w przekroju nabiegania na bęben wywołane odkształceniami na odcinku przejściowym. Na wykresach tych dodatkowo linią ciągłą zaznaczono poziom sił, poniżej którego przyrosty (spadki) przekraczają wielkości sił w linkach wynikające z siły napinającej.



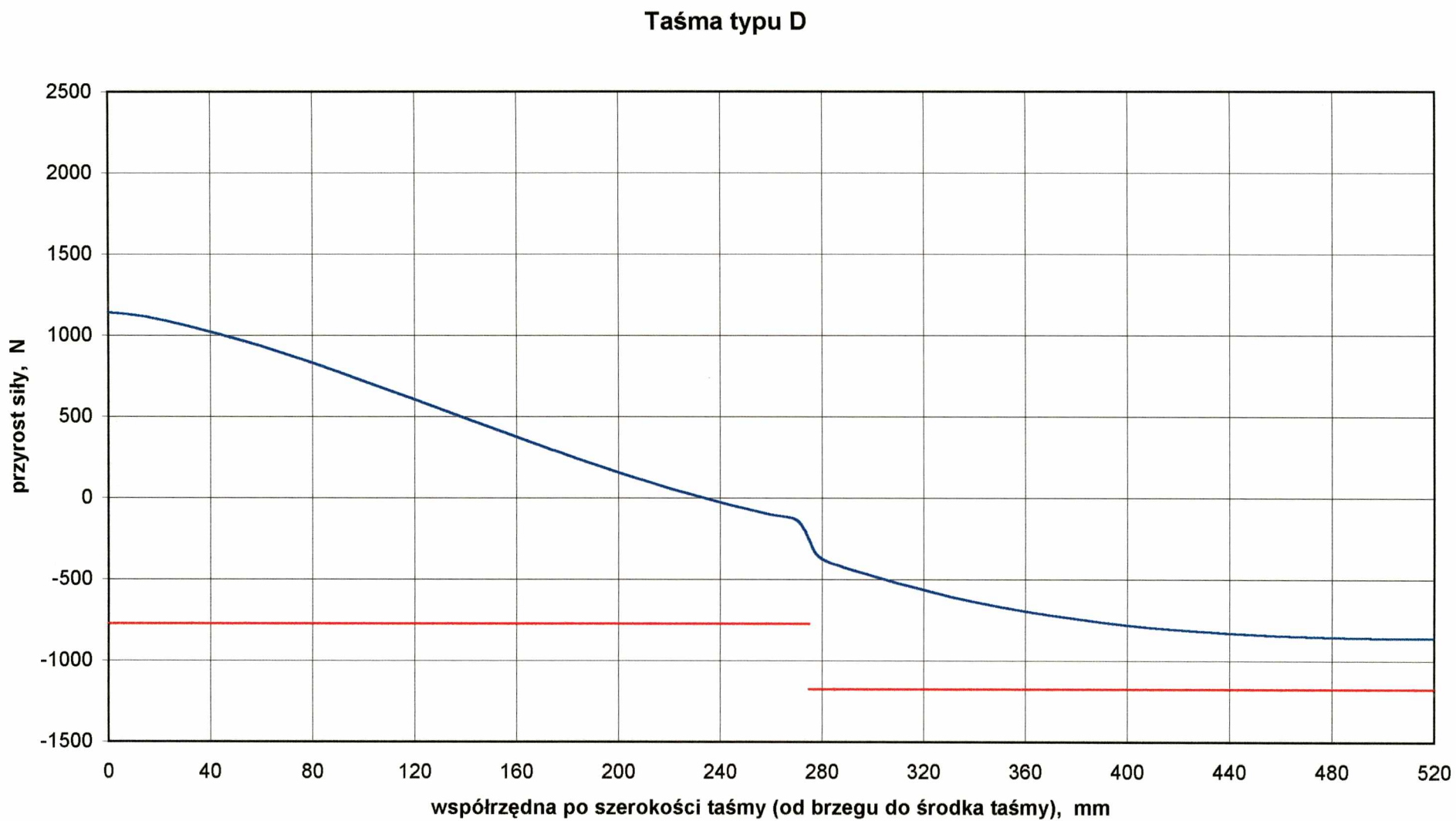
Rys. 5.17 Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu A ($L_e=7.5$ m, $e=75$ mm)



Rys. 5.18 Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu B ($Le=7.5$ m, $e=75$ mm)

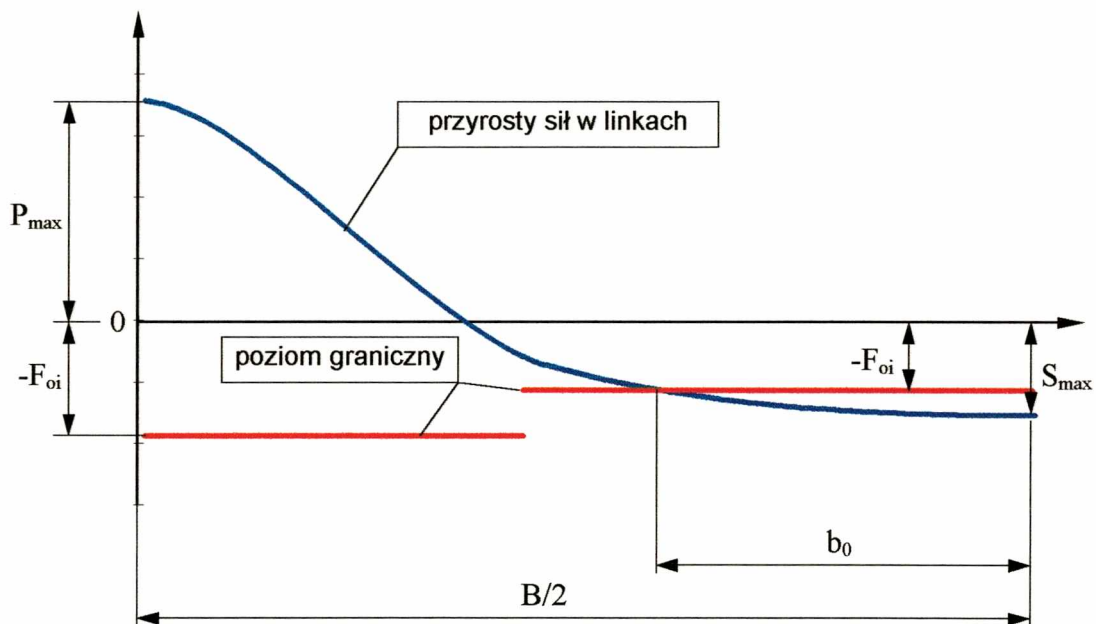


Rys. 5.19 Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu C ($L_e=7.5$ m, $e=75$ mm)



Rys. 5.20 Przyrosty sił w linkach na odcinku przejściowym przenośnika rurowego w rejonie bębna wg modelu teoretycznego - dla taśmy typu D ($L_e=7.5$ m, $e=75$ mm)

W przypadku konstrukcji rdzenia taśmy opartej na dwóch typach linek występują dwa poziomy siły graniczne, co wynika z różnych sztywności linek. Ponieważ analizowane są przyrosty sił, a w strefie środkowej taśmy dochodzi do spadku sił i istnieje niebezpieczeństwo utraty stateczności, to spadek siły w linie nie może być większy od napięcia początkowego, czyli zaznaczony na wykresach poziom graniczny jest ujemny i co do wartości bezwzględnej równy napięciu wstępnemu linki. Prawidłowy dobór taśmy i parametrów geometrycznych odcinka przejściowego (e i L_e) powinien charakteryzować się tym, że krzywa obrazująca rozkład przyrostów sił w linkach zawsze znajduje się powyżej poziomu granicznego. W przeciwnym przypadku w rejonie środkowym taśmy, gdzie nie jest spełniony ten warunek, będą występowały tak zwane wybrzuszenia stwierdzone w trakcie pomiarów (widoczne szczególnie dla taśm typu A i B - patrz rys. 4.9).



Rys. 5.21 Wskaźniki do analizy obciążeń linek

Miarodajną oceną zachowania się różnych struktur rdzenia taśmy w zależności od wymuszenia spowodowanego odcinkiem przejściowym jest nierównomierność obciążeń poszczególnych linek. Nierównomierność ta może być mierzona następującymi wskaźnikami (Rys. 5.21):

- maksymalny przyrost $P_{\max}$ [N],
- maksymalny spadek $S_{\max}$ [N],
- bezwzględna różnica przyrostów w linie skrajnej i środkowej $P_{\max}-S_{\max}$ [N],
- względny maksymalny przyrost $P_{\max}/F_{oi}$ [%]
- względny maksymalny spadek $S_{\max}/F_{oi}$ [%],
- procentowy udział strefy utraty stateczności na szerokości taśmy $2*b_0/B$ [%].

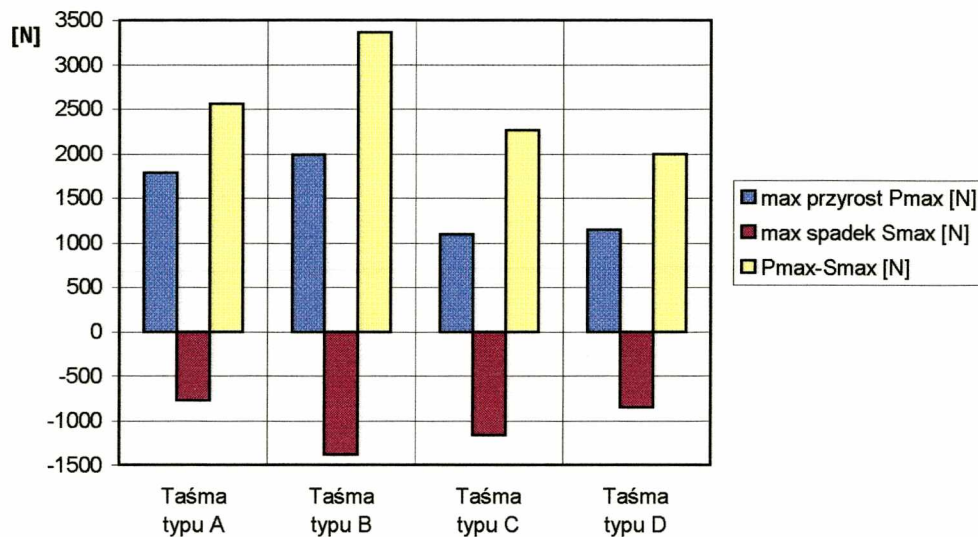
Uzyskane wielkości wskaźników (patrz - tabela 5.2 oraz rys. 5.22) pozwalają na przeprowadzenie analizy porównawczej przydatności różnych struktur rdzenia taśmy z linkami stalowymi.

Tabela 5.2. Wskaźniki nierównomierności obciążeń linek

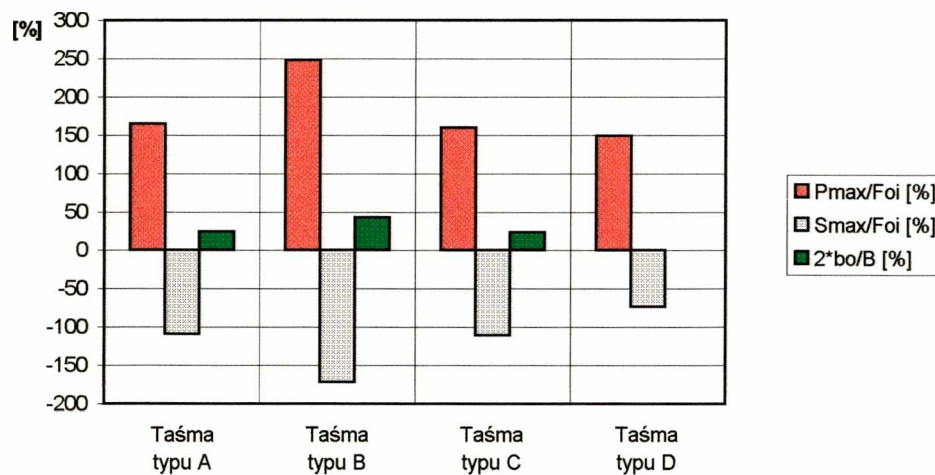
Taśma Wskaźnik	Taśma typu A	Taśma typu B	Taśma typu C	Taśma typu D
max przyrost $P_{\max}$ [N]	1784	1985	1097	1143
max spadek $S_{\max}$ [N]	-773	-1377	-1165	-857
$P_{\max}-S_{\max}$ [N]	2557	3362	2262	2000
$P_{\max}/F_{oi}$ [%]	165	248	160	149
$S_{\max}/F_{oi}$ [%]	-109	-172	-111	-73
$2*b_0/B$ [%]	24.5	42.7	23.6	0

Analiza uzyskanych wyników umożliwia ocenę przydatności taśmy w oparciu o kryterium najmniejszych nierównomierności obciążeń linek na odcinku przejściowym. Spośród czterech przebadanych taśm najlepsze właściwości w tym zakresie wykazywała taśma typu D. Przy poziomie napięcia wstępnego $F_0=60$ kN tylko ten typ taśmy nie wykazywał utraty stateczności tzn. spadek sił w linkach środkowych nie przekraczał poziomu napięcia wstępnego. Również przyrosty sił w linkach skrajnych oraz spadki sił w linkach środkowych w taśmie typu D są najmniejsze. Z analizy porównawczej wynika, że najgorsze właściwości wykazują taśmy typu A i B. Obie te konstrukcje cechuje przesztynnienie brzegów taśm w stosunku do strefy środkowej. Przesztynnienie to może być wynikiem zastosowania linek o większej średnicy na około 1/4 szerokości idąc od brzegu taśmy (taśma typu A) lub zagęszczenia podziałki linek na około 1/5 szerokości również idąc od brzegu taśmy (taśma typu B). Z analizy tej wynika również, że najlepszym rozwiązaniem może być zastosowanie różnej podziałki i różnych linek. Wnioski te są zbieżne z wynikami pomiarów (Rys. 4.9 i Rys. 4.17).

a)

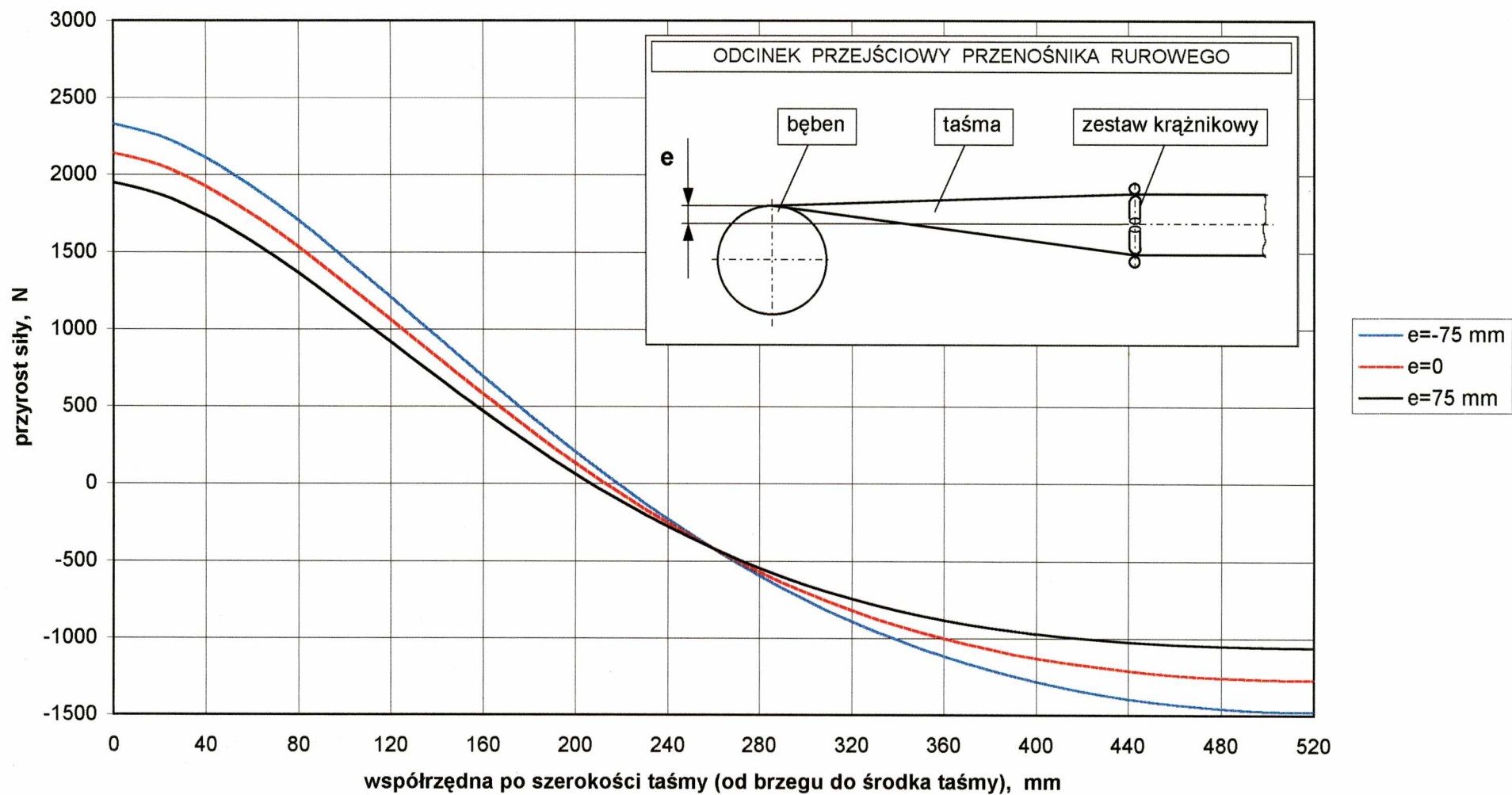


b)

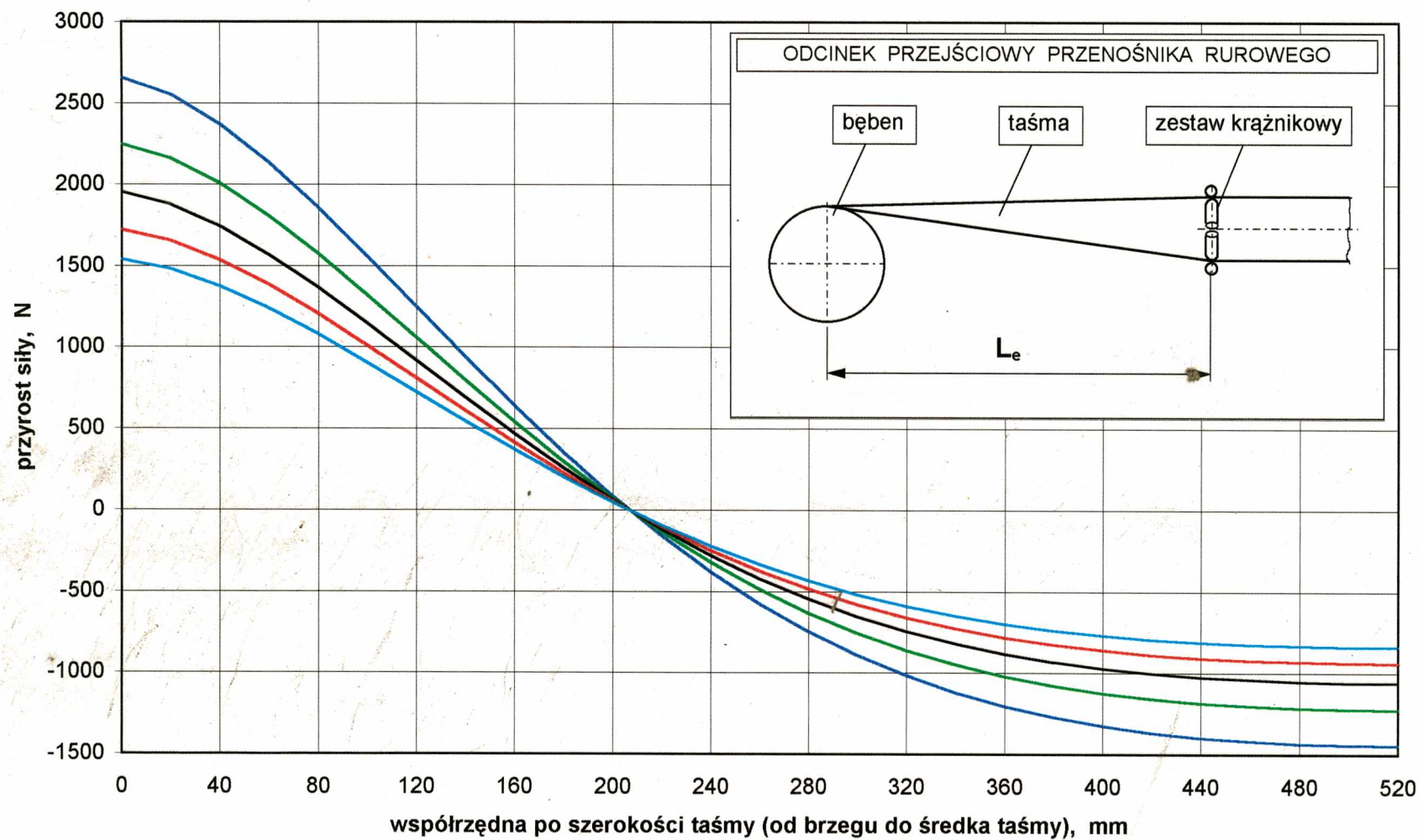


Rys. 5.22 Wskaźniki nierównomierności obciążeń linek dla czterech typów taśm

Przeprowadzono również analizę wpływu parametrów geometrycznych odcinka przejściowego (e i L_e) na rozkład obciążeń linek. W tym celu wykonano obliczenia dla taśmy, której rdzeń składał się z jednakowych linek o średnicy 6 mm ze stałą podziałką $t=20$ mm. Wyniki obliczeń dla trzech położenia bębna ($e=75$ mm, $e=0$, $e=-75$ mm) przedstawiono na rys. 5.23, a wyniki obliczeń dla pięciu długości odcinka przejściowego ($L_e=5.5$ m, $L_e=6.5$ m, $L_e=7.5$ m, $L_e=8.5$ m i $L_e=9.5$ m) przedstawiono na rys. 5.24.

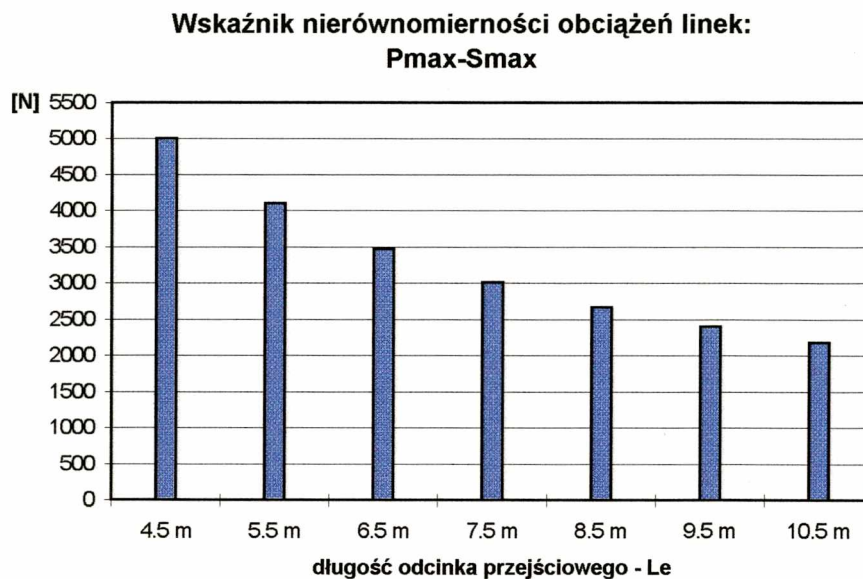


Rys. 5.23 Przyrosty sił w linkach po połowie szerokości taśmy w przekroju nabiegania taśmy na bęben wg modelu teoretycznego dla różnych wysokości położenia bębna



Rys. 5.24 Przyrosty sił w linkach po połowie szerokości taśmy w przekroju nabiegania taśmy na bęben wg modelu teoretycznego dla różnych długości odcinka przejściowego

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że położenie bębna ma wpływ na stan obciążeń taśmy na odcinku przejściowym. Najkorzystniejszym z analizowanych położen bębna było położenie, w którym tworząca bębna znajduje się 75 mm ponad osią poziomą przekroju kołowego taśmy (Rys. 5.23). Zmniejszenie nierównomierności obciążeń linek w taśmie można uzyskać również wydłużając odcinek przejściowy L_e , przy czym wzrost długości odcinka nie jest proporcjonalny do zmniejszania się nierównomierności obciążeń linek. Z wykresów przedstawionych na rys. 5.24 wynika, że w zakresie zmian długości od 5.5÷7.5 m uzyskuje się największy efekt w postaci zmniejszenia nierównomierności obciążeń. Zwiększanie odcinka przejściowego powyżej 7.5 m powoduje już znacznie mniejszy spadek nierównomierności obciążeń (patrz rys. 5.25). Uzyskane wyniki obliczeń są zbieżne z pomiarami (Rys. 4.6, Rys. 4.5, Rys. 4.14 i Rys. 4.15).



Rys. 5.25 Nierównomierność obciążeń linek w zależności od długości odcinka przejściowego

6. Wnioski

1. Badania na stanowisku pomiarowym oraz przeprowadzone obliczenia wykazały, że konstrukcja taśmy ma wpływ na nierównomierność obciążeń linek na odcinku przejściowym. W niektórych przypadkach dochodzi do utraty stateczności uwidaczniającej się tzw. wybrzuszeniem w strefie środkowej taśmy. Utrata stateczności polega na zaniku sił rozciągających kosztem przyrostu sił w linkach skrajnych. Nierównomierność obciążeń na odcinkach przejściowych można zmniejszyć dobierając odpowiednio strukturę rdzenia taśmy poprzez zastosowanie linek o różnej średnicy oraz zmian podziałki linek. Najgorzej zachowują się na odcinku przejściowym taśmy z przeszywnionymi brzegami.
2. Nierównomierność obciążeń linek oraz efekt utraty stateczności można minimalizować parametrami geometrycznymi odcinka przejściowego (długością odcinka i położeniem bębna). Długość odcinka przejściowego ma duży wpływ na obciążenia linek przy czym wzrost długości odcinka nie jest proporcjonalny do zmian nierównomierności obciążeń linek. Optymalizacja tego parametru powinna opierać się z jednej strony na dążeniu do projektowania jak najkrótszych odcinków przejściowych, a z drugiej strony na wybraniu takiej długości przy której dalszy jej wzrost daje mały efekt w postaci zmniejszenia nierównomierności obciążeń linek. Badania i obliczenia wykazały, że najkorzystniejsze położenie bębna jest wówczas, gdy taśma na płaszczu bębna znajduje się powyżej osi poziomej przekroju kołowego.
3. Opracowany w pracy uproszczony model teoretyczny uwzględnia najważniejsze parametry wpływowe i w zakresie oceny zdolności taśmy do tworzenia odcinka przejściowego jest zgodny z wynikami pomiarów. Tak więc, można posługiwać się tym modelem w poszukiwaniach optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych rdzenia taśm oraz optymalnych parametrów geometrycznych odcinka przejściowego.
4. Zarówno wyniki pomiarów jak i analiza teoretyczna wykazały zbieżność w ocenie przebadanych czterech typów taśm. Rozbieżności wyników obliczeń oraz pomiarów elastooptycznych występują w zasadzie jedynie w rejonie obrzeży taśm, co może wynikać z nieuwzględnienia sił ciężkości taśm oraz przybliżonego modelu geometrii taśmy na odcinku przejściowym.

5. Po wprowadzeniu zmian związanych z wymuszeniami geometrycznymi model teoretyczny może również posłużyć do analizy odcinków przejściowych przenośników nieckowych.
6. W obliczeniach modelowych istotna jest identyfikacja parametrów taśm takich jak: moduł sprężystości podłużnej linek zatopionych w gumie oraz zastępczy moduł odkształcenia postaciowego gumy. W obliczeniach należy uwzględniać parametry taśm wyznaczone w badaniach laboratoryjnych, gdzie na stanowiskach pomiarowych symulowane są procesy rzeczywiste. Ze względu na zakres odkształceń oraz różnicę właściwości gumy rdzeniowej i okładkowej, a także wpływ gumy na współpracę zewnętrznych spletek linek parametry te odbiegają od wielkości podawanych dotychczas w literaturze.
7. W celu uściślenia modelu teoretycznego konieczne jest uwzględnienie masy własnej taśmy. Pozwoli to na uzyskanie większej zbieżności wyników obliczeń z pomiarami, ale nie wpłynie to w sposób istotny na ocenę zdolności taśmy do tworzenia odcinka przejściowego.
8. W kompleksowej ocenie konstrukcji taśmy do przenośnika rurowego konieczne jest uwzględnienie wielu kryteriów np. szczelność zamknięcia prostoliniowych i krzywoliniowych odcinków rurowych. Można do tego wykorzystać opracowany model teoretyczny. Podstawy modelu mogą być stosowane również do taśm tkaninowych, ale konieczne jest przeprowadzenie badań w celu identyfikacji parametrów (zastępczy moduł sprężystości podłużnej oraz zastępczy moduł odkształcenia postaciowego wydzielonego pasa taśmy).

LITERATURA:

- [1] Bartelmus W., Gładysiewicz L., 1994, *Możliwości techniczne przenośników z taśmą rurową*, VII Konferencja - Rozwój Podstaw Budowy, Eksploatacji i Badań Maszyn Roboczych Ciężkich, Zakopane 1994r.
- [2] Będziński R. 1980, *Badania pojazdów*. Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980r.
- [3] Będziński R., Czarniecki T., Gładysiewicz L., Modzel P., 1995, *Badania odkształceń rurowej taśmy przenośnikowej z wykorzystaniem optycznych metod pomiarowych*, Metrologia i systemy pomiarowe, tom II, zeszyt 4, Warszawa 1995r.
- [4] Będziński R., Czarniecki T., Hardygóra M., Modzel P., Woźniak D., 1996, *Badania stanu odkształceń w taśmie przenośnika rurowego*. Przegląd mechaniczny. Nr 19/1996r.
- [5] Brouwer R.C., Kramer E., 1985, *Measurement of conveyor belt mechanical properties*, Raport z badań nr T62, praca niepublikowana, University of Delft 1985r.
- [6] Engst W., 1986, *Rollgurtfördere für Massenströme mit höherer Geschwindigkeit bei steil ansteigender und kurviger Streckenführung*. Dissertation, Universität Hannover. Hannover 1986r.
- [7] Gładysiewicz L., 1980, *Metoda wyznaczania sił wciągach przenośnika taśmowego wielonapędowego z taśmowym napędem pośrednim*, Praca doktorska, niepublikowana, Politechnika Wrocławska 1980r.
- [8] Gładysiewicz L., Bartelmus W., 1994, *Możliwości techniczne przenośników z taśmą rurową*. VII Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane 1994r.
- [9] Gładysiewicz L., Woźniak D., 1994, *Badania pola przemieszczeń i stanu naprężeń w taśmie na odcinku przejściowym przenośnika rurowego*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr nr 75, seria: Konferencje nr 17, Podstawowe Problemy Transportu Kopalnianego, Wrocław 1994r.
- [10] Gładysiewicz L., Woźniak D., 1997, *Określenie właściwości taśmy z linkami stalowymi dla potrzeb modelowania odcinków przejściowych*. V Międzynarodowe Sympozjum Fabryki Taśm Transporterowych „Stomil” Wolbrom. Ustroń 1997r.
- [11] Grimmer K.J., Kessler F., 1995, *Dehnungsverteilung in Fördergurten beim Einlauf in die Gurtmulde*. BHM, 140. 1995 Heft 4.
- [12] Hager M., Tappeiner S., 1993, *Zusatzbeanspruchungen des Zugträgers von Fördergurten im Muldenbereich und in Kurven*. Braunkohle 9/1993r.
- [13] Kopkowski J., Słowikowska I., Stupnicki J., 1987, *Badania naprężeń metodą elastooptycznej warstwy powierzchniowej*. PWN, Warszawa 1987r.

- [14] Oehmen K.H., 1977, *Zur Berechnung zusätzlicher Dehnungen in Stahlseilgurten infolge Kurvenführungen und Muldungsübergängen*. Braunkohle, Heft 6, Juni 1977.
- [15] Oehmen K.H., 1979, *Einfluß vertikaler und horizontaler Kurven auf die Dehnungsverteilung in Fördergurten - Theorie und Anwendung*. Braunkohle, Heft 10, Oktober 1979.
- [16] Pluta M., 1980, *Holografia optyczna*. PWN Warszawa 1980r.
- [17] PN-91/H-04310 *Próba statyczna rozciągania metali*. PKNMiJ Warszawa 1991r.
- [18] PN-92/M.-80201 *Liny stalowe z drutu okrągłego. Wymagania i badania*. PKNMiJ Warszawa 1992r.
- [19] Schmandra A., 1991, *Allgemeines Modell für die Berechnung von Spannungsverläufen in Stahlseilfördergurten*. Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 31, 1991.
- [20] Woźniak D., 1993, *Wyniki pomiarów wybranych parametrów układania się taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego na stanowisku badawczym*. praca nie publ., Raport IGO Poltegor -Instytut, nr arch. 3168, Wrocław 1993r.
- [21] Woźniak D., Hardygóra M., Gładysiewicz L., 1996, *Belts for pipe conveyors*. Mine Planing and Equipment Selection. Sao Paulo. Balkema 1996.
- [22] Żur T., Hardygóra M., 1996, *Przenośniki taśmowe w górnictwie*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1996r.

Załącznik A: Wyniki pomiarów odwzorowania geometrii taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego

W załączniku przedstawiono wyniki pomiarów odwzorowania geometrii taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego wg metody opisanej w rozdziale 4.2. Rysunki przedstawiają zarysy przekrojów poprzecznych taśmy na odcinku przejściowym przenośnika rurowego. Rozpatrywano następujące przekroje taśmy (Rys. 4.1 lub Rys. 4.11) A-A (na bębnie, przekrój taśmy płaski), B-B , C-C , D-D , E-E , F-F (przekrój taśmy kołowy na pierwszym zestawie krążnikowym). Dla każdej z czterech taśm wykonano po kilkanaście rysunków odwzorowujących kształt taśmy przy różnych wariantach parametrów geometrycznych odcinka przejściowego i różnym obciążeniu taśmy. Na rysunkach zastosowano następujące oznaczenia:

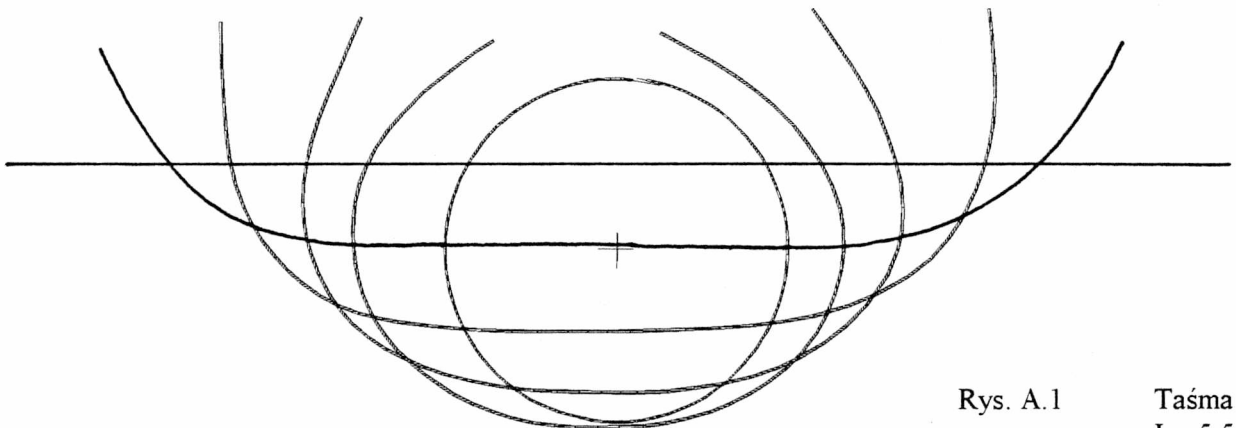
Taśma A, B, C lub D - rodzaj konstrukcji taśmy wg rys. 4.2 ,

L_e - długość odcinka przejściowego,

e - położenie taśmy na bębnie w stosunku do poziomej osi symetrii przekroju kołowego taśmy zwiniętej w rurę na pierwszym zestawie krążnikowym,

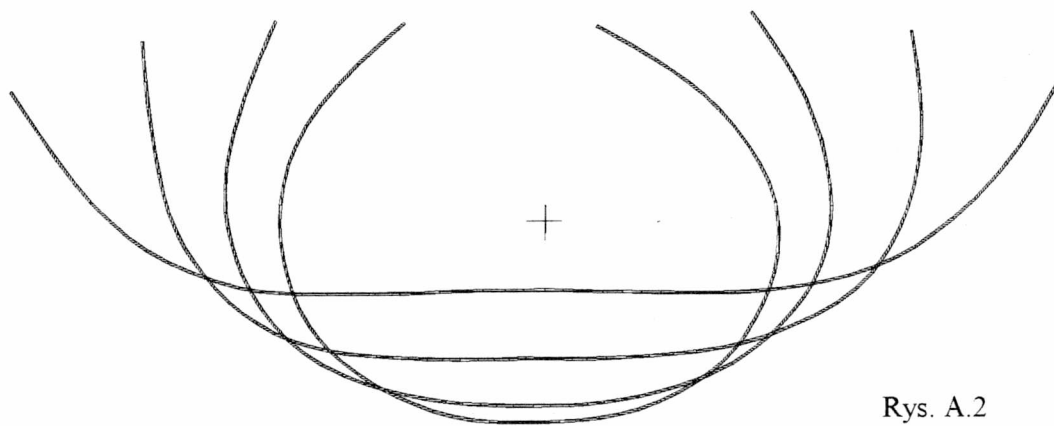
F_N - siła napinania taśmy.

Na kolejnych rysunkach (poza rys. A.1) przedstawiono tylko zmieniające się kształty przekrojów poprzecznych taśmy tzn. bez przekroju A-A (taśma płaska na bębnie) i F-F (przekrój taśmy w kształcie okręgu na pierwszym zestawie krążnikowym).



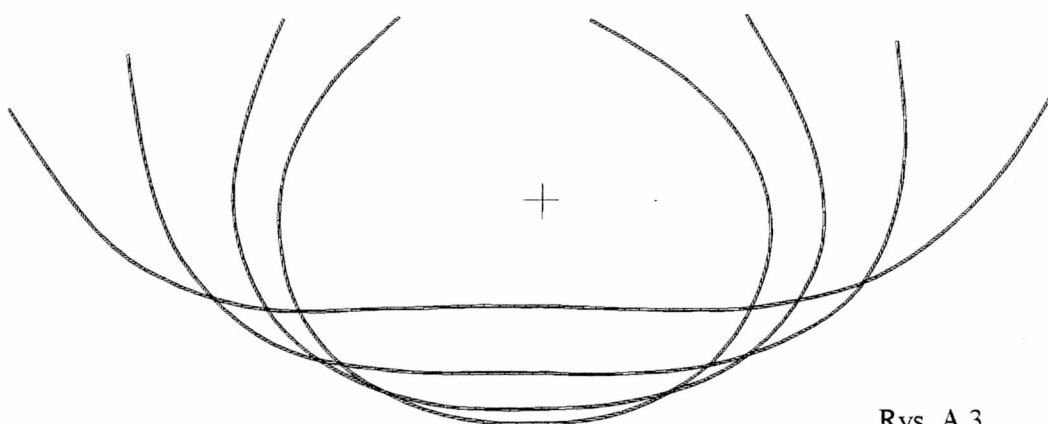
Rys. A.1

Taśma D
 $L_e=5.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=60$ kN



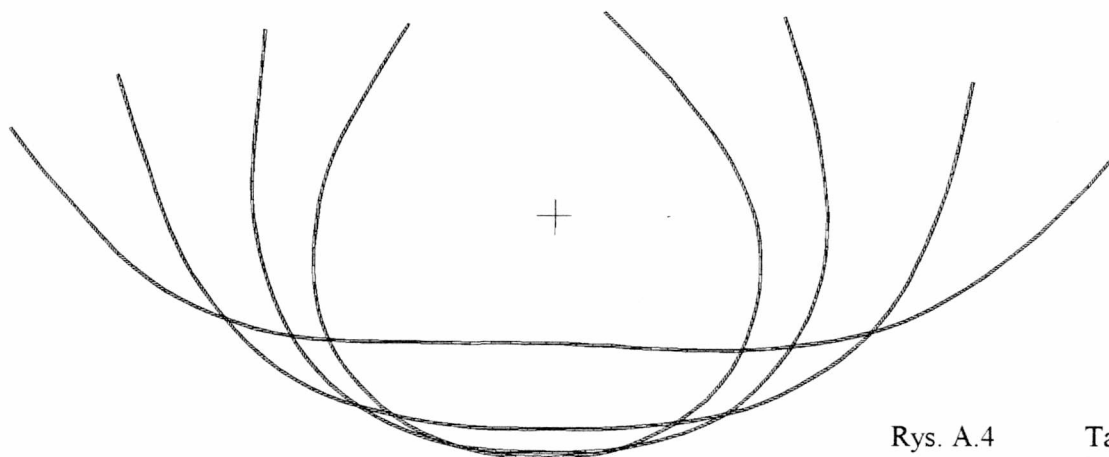
Rys. A.2

Taśma D
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = 0$
 $F_N = 60 \text{ kN}$



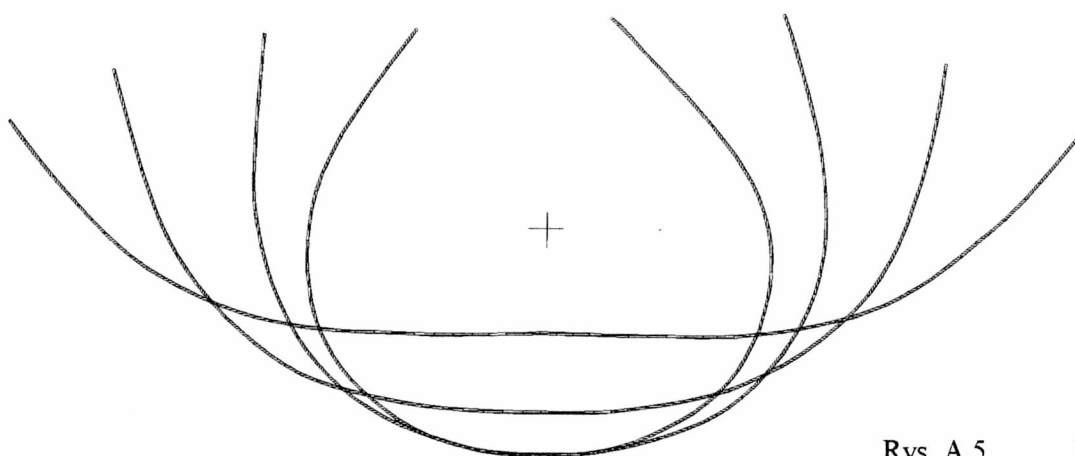
Rys. A.3

Taśma D
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = -40 \text{ mm}$
 $F_N = 60 \text{ kN}$



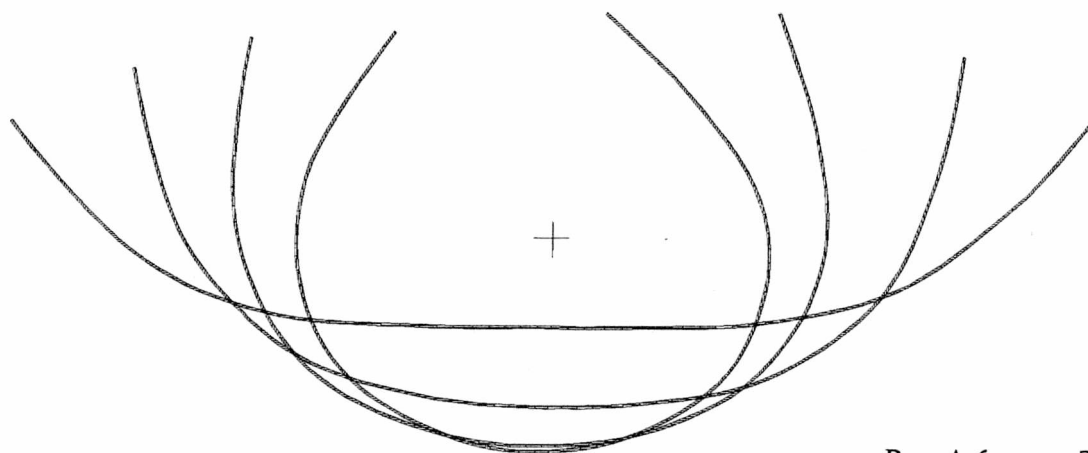
Rys. A.4

Taśma D
 $L_e = 7.5$ m
 $e = 0$
 $F_N = 15$ kN



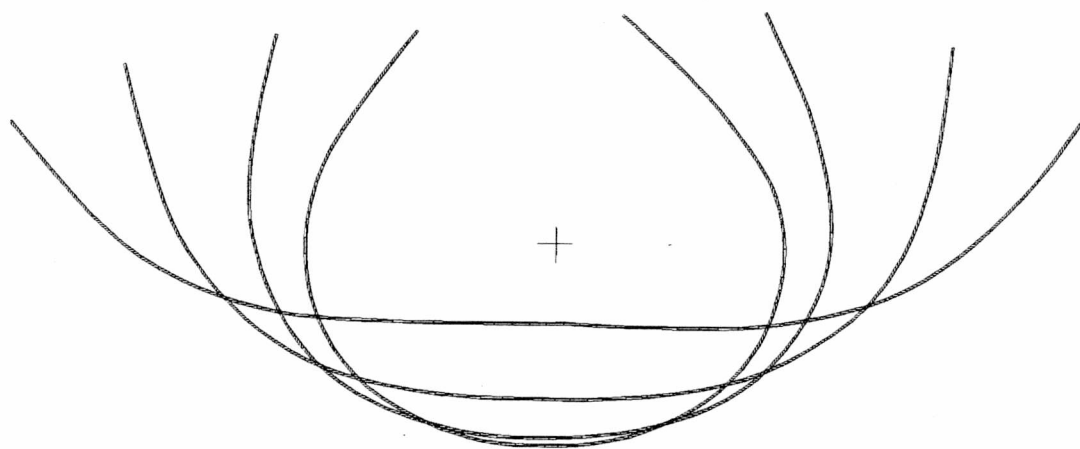
Rys. A.5

Taśma D
 $L_e = 7.5$ m
 $e = 0$
 $F_N = 30$ kN



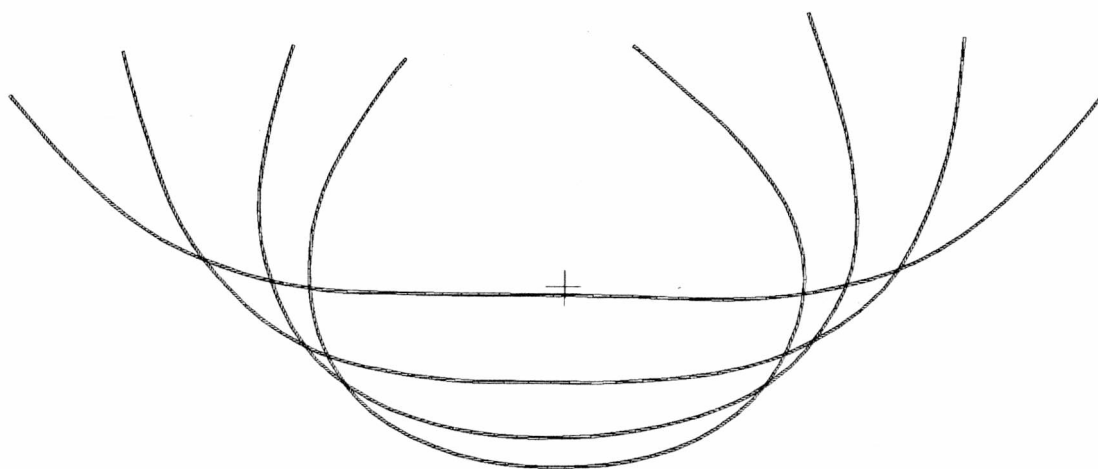
Rys. A.6

Taśma D
 $L_e=7.5$ m
 $e=0$
 $F_N=45$ kN



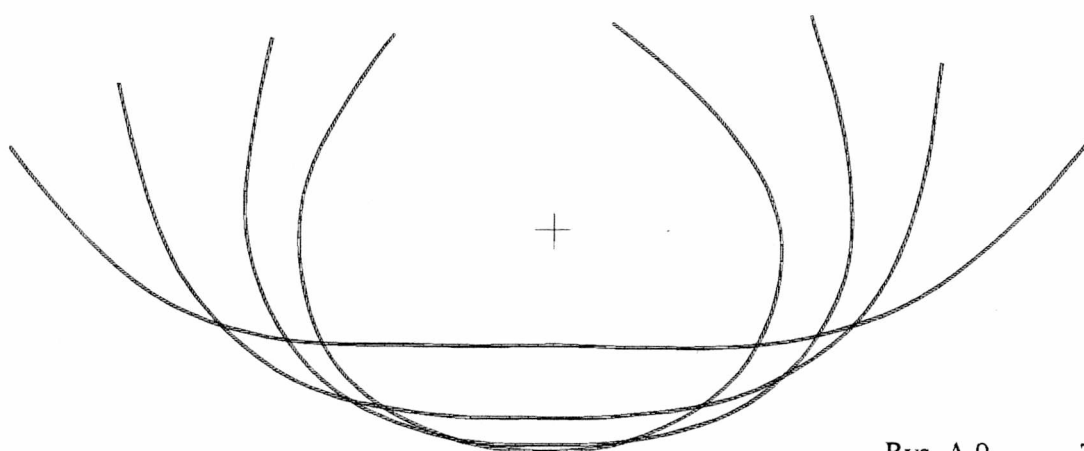
Rys. A.7

Taśma D
 $L_e=7.5$ m
 $e=0$
 $F_N=60$ kN



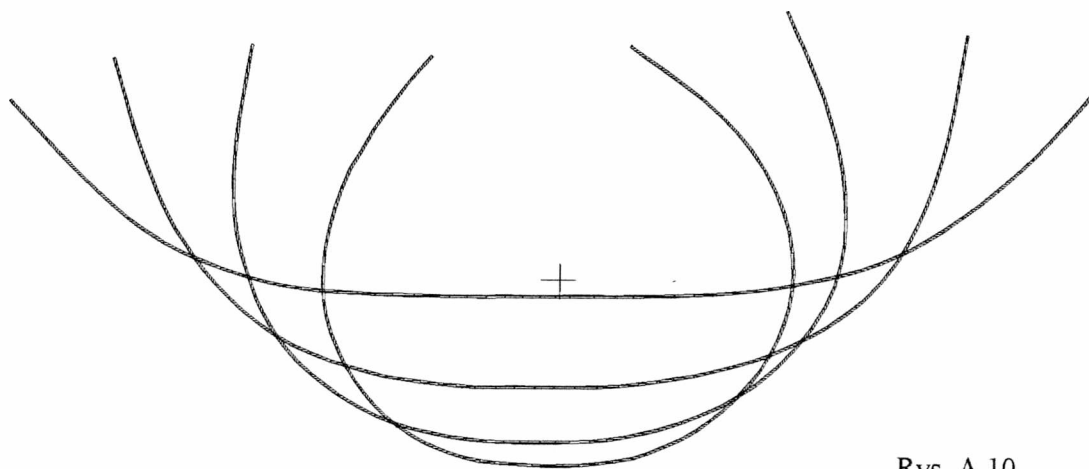
Rys. A.8

Taśma D
 $L_e = 7.5 \text{ m}$
 $e = +75 \text{ mm}$
 $F_N = 60 \text{ kN}$



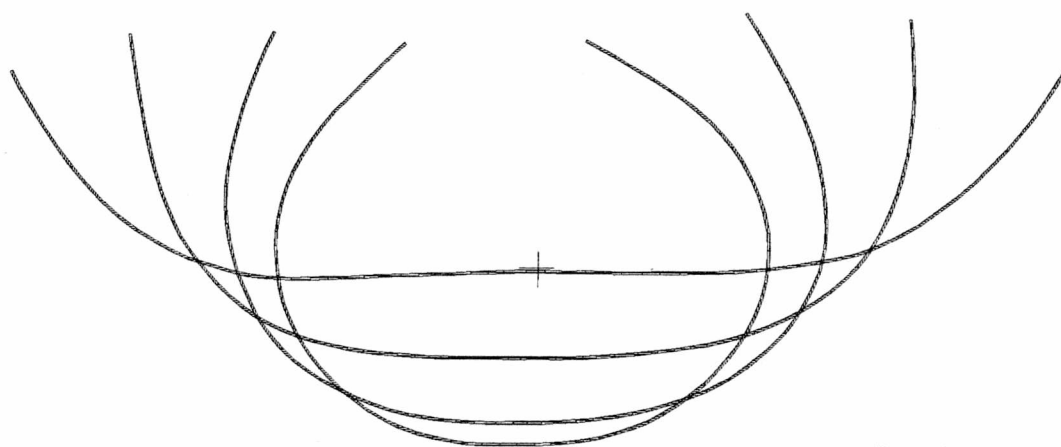
Rys. A.9

Taśma D
 $L_e = 7.5 \text{ m}$
 $e = -40 \text{ mm}$
 $F_N = 60 \text{ kN}$



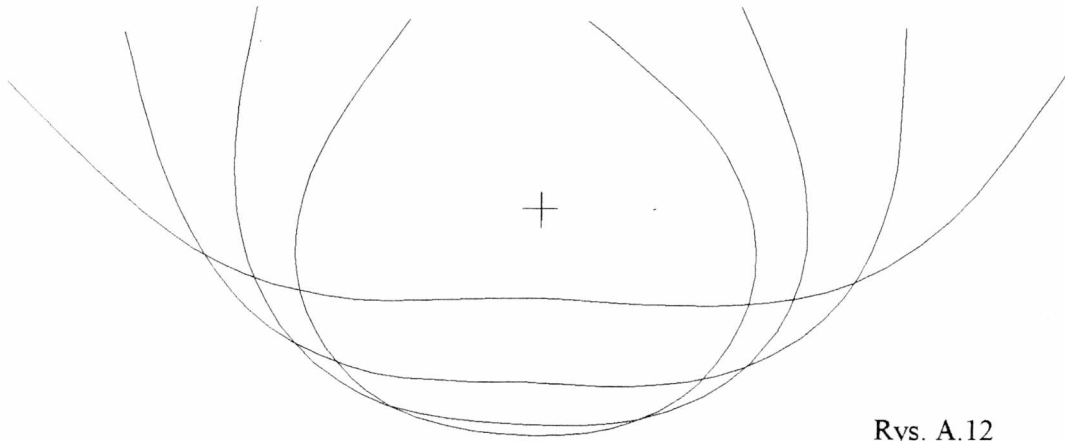
Rys. A.10

Taśma D
 $L_c=8.25$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=60$ kN



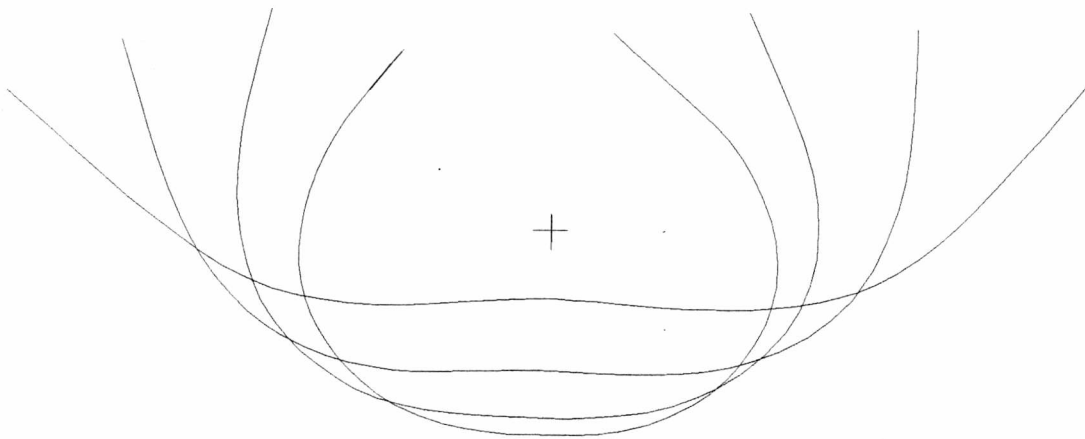
Rys. A.11

Taśma D
 $L_c=6.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=60$ kN



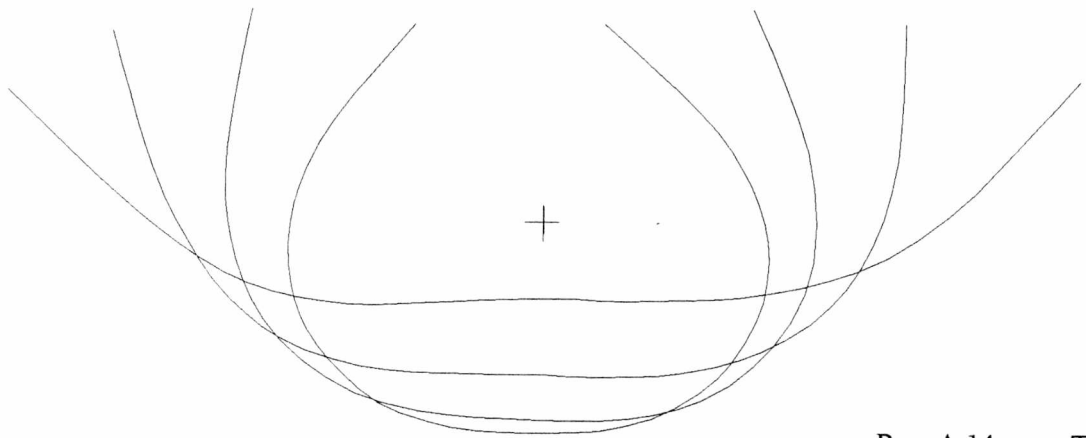
Rys. A.12

Taśma C
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = 0$
 $F_n = 15 \text{ kN}$



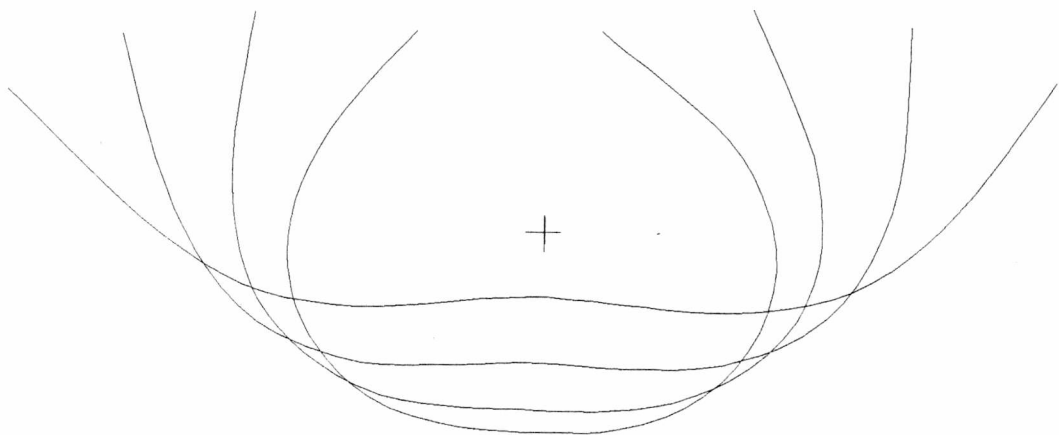
Rys. A.13

Taśma C
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = 0$
 $F_n = 45 \text{ kN}$



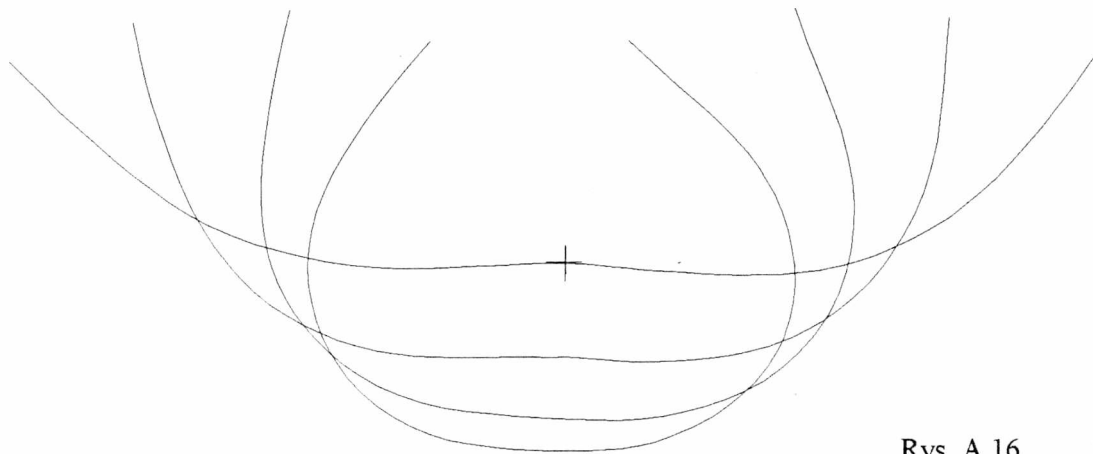
Rys. A.14

Taśma C
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_N=30$ kN



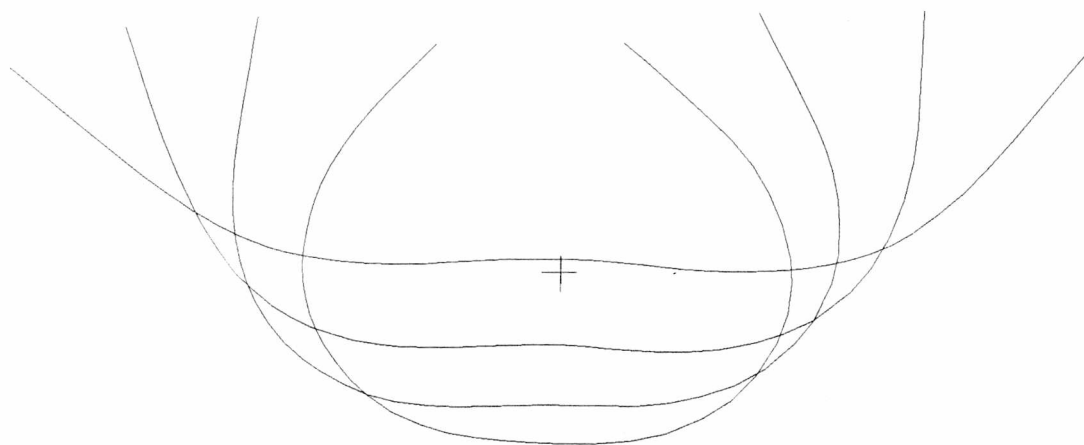
Rys. A.15

Taśma C
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_N=60$ kN



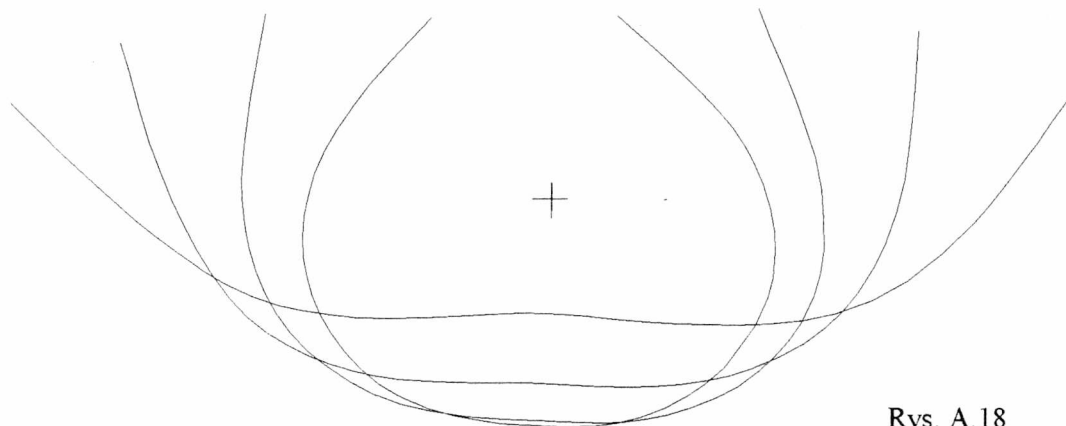
Rys. A.16

Taśma C
 $L_e=5.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=30$ kN



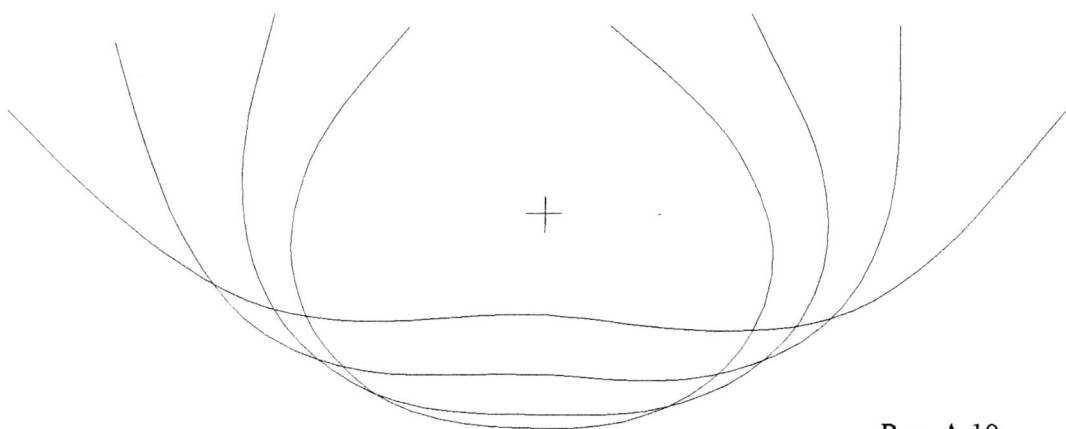
Rys. A.17

Taśma C
 $L_e=5.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=60$ kN



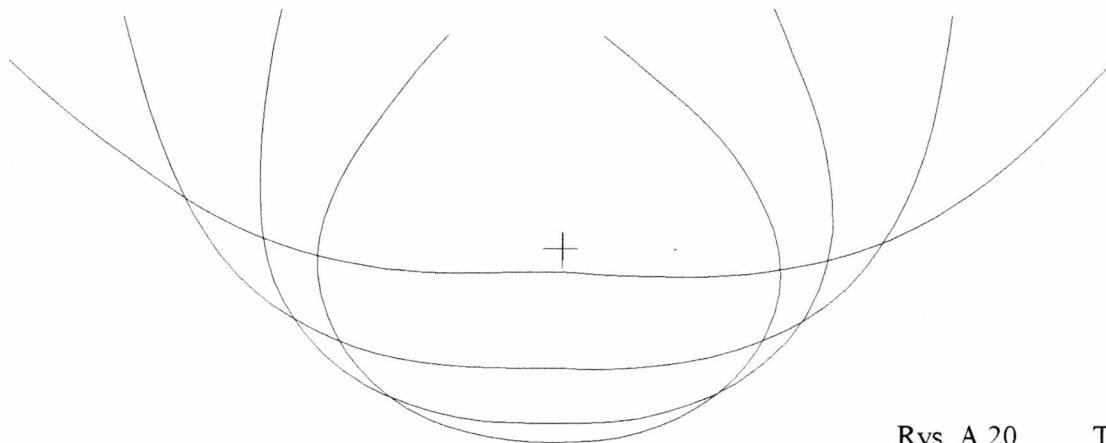
Rys. A.18

Taśma C
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = -40 \text{ mm}$
 $F_N = 30 \text{ kN}$



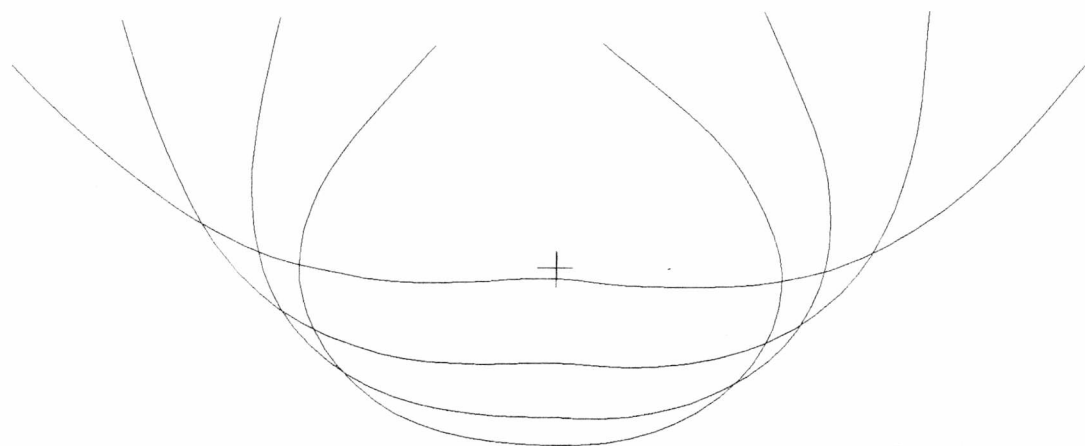
Rys. A.19

Taśma C
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = -40 \text{ mm}$
 $F_N = 60 \text{ kN}$



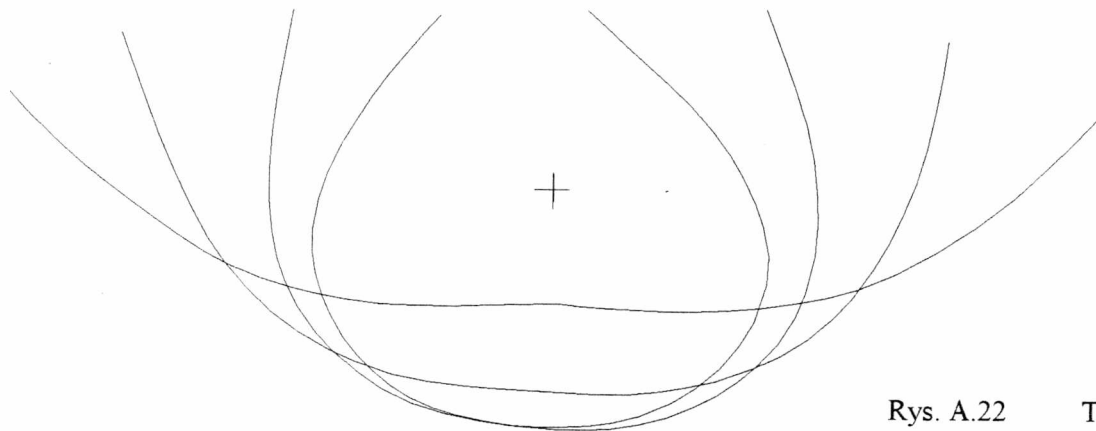
Rys. A.20

Taśma C
 $L_e=7.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=30$ kN



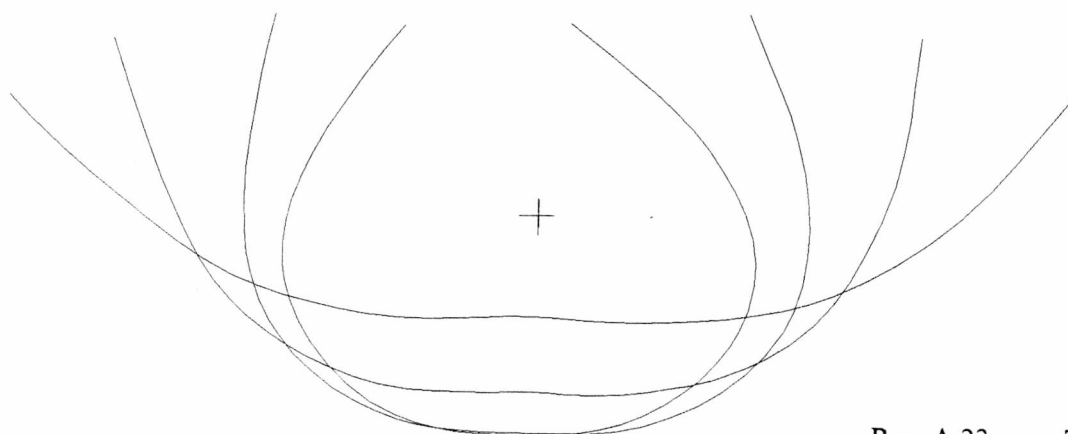
Rys. A.21

Taśma C
 $L_e=7.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=60$ kN



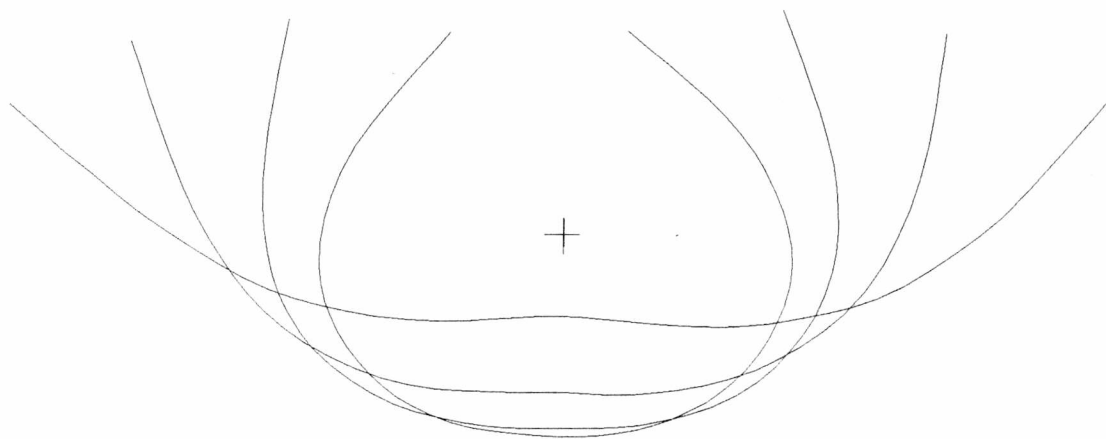
Rys. A.22

Taśma C
 $L_e = 7.5 \text{ m}$
 $e = 0$
 $F_N = 15 \text{ kN}$



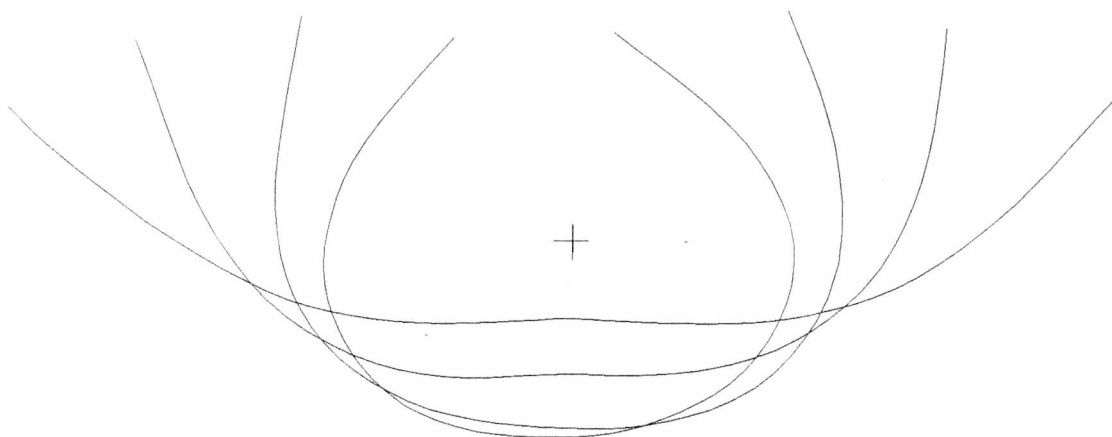
Rys. A.23

Taśma C
 $L_e = 7.5 \text{ m}$
 $e = 0$
 $F_N = 30 \text{ kN}$



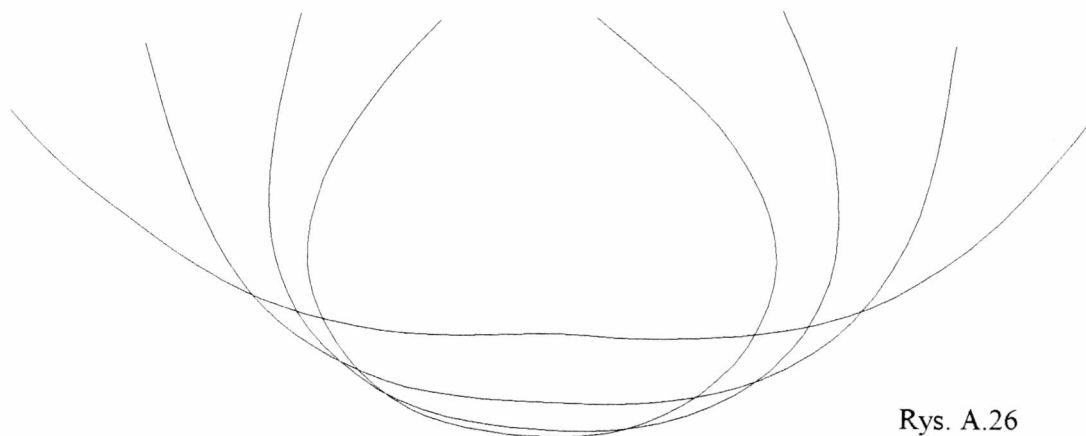
Rys. A.24

Taśma C
 $L_e=7.5$ m
 $e=0$
 $F_N=45$ kN



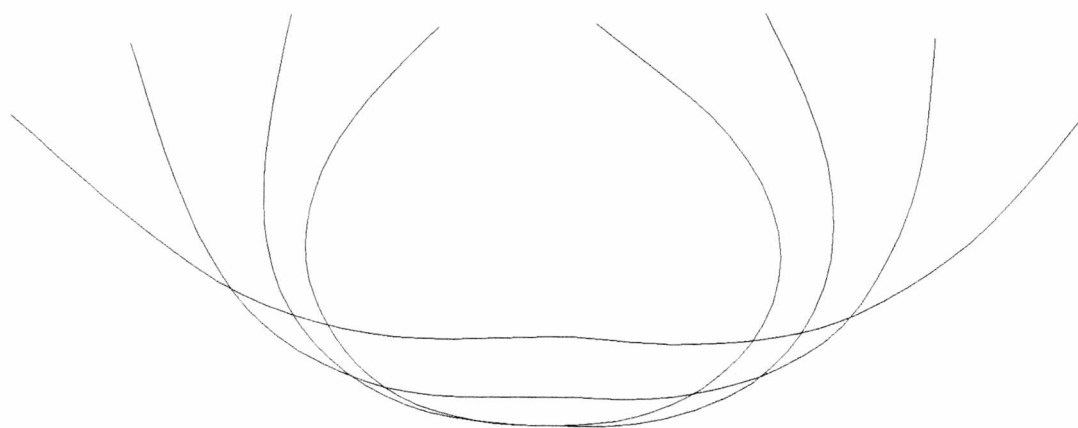
Rys. A.25

Taśma C
 $L_e=7.5$ m
 $e=0$
 $F_N=60$ kN



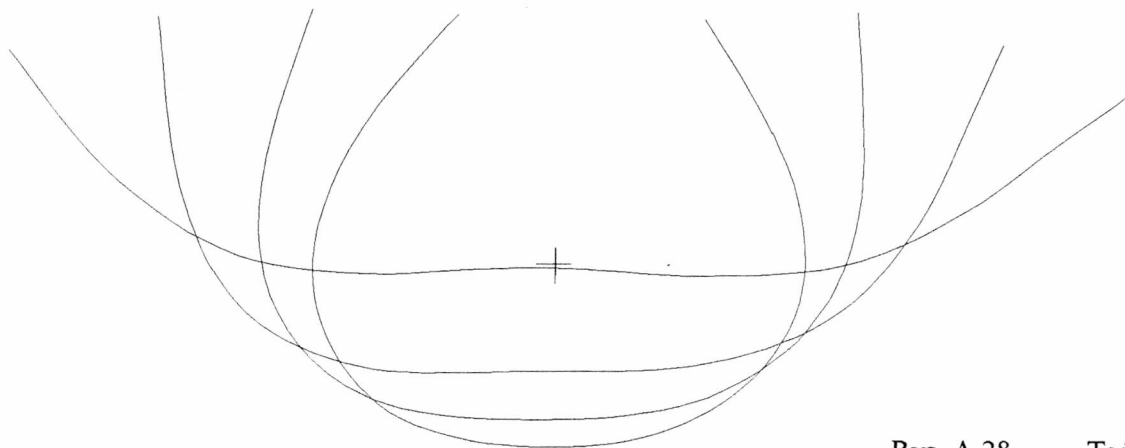
Rys. A.26

Taśma C
 $L_e = 7.5$ m
 $e = -40$ mm
 $F_N = 30$ kN

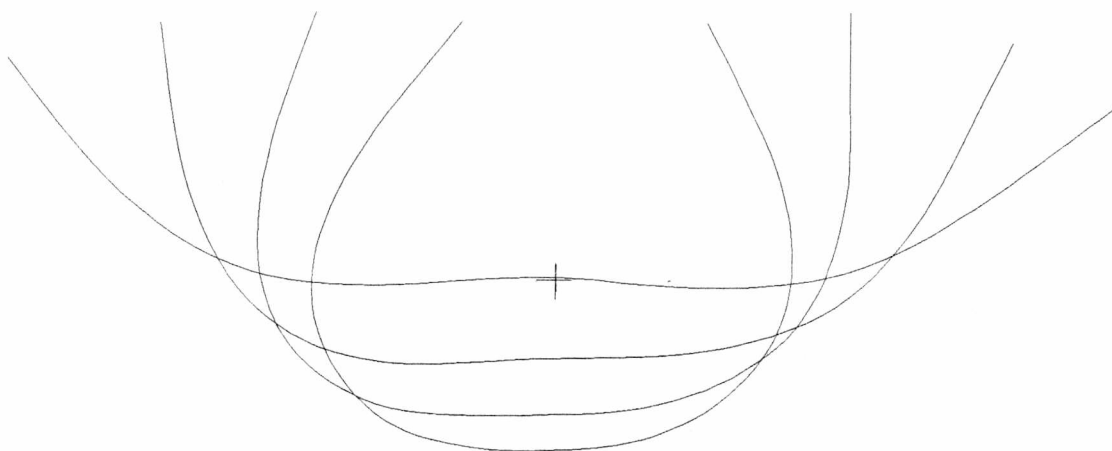


Rys. A.27

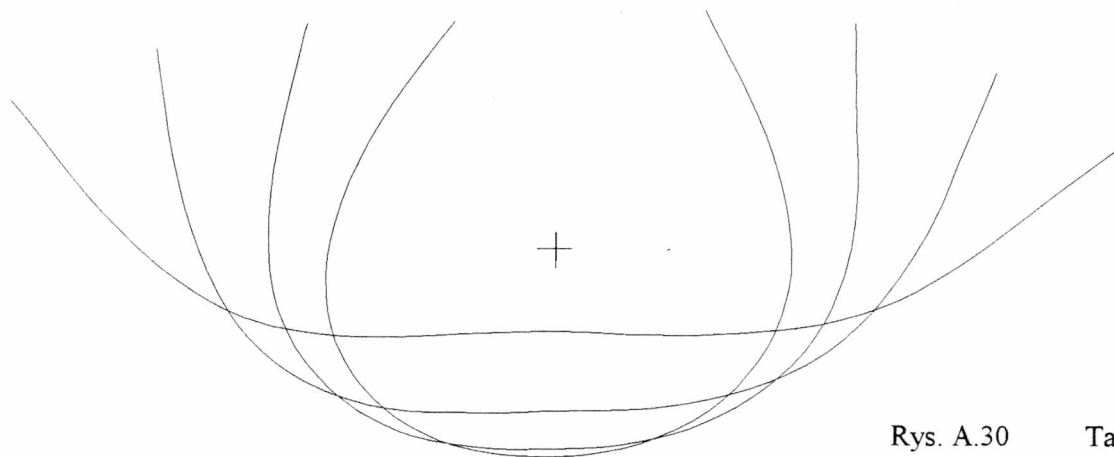
Taśma C
 $L_e = 7.5$ m
 $e = -40$ mm
 $F_N = 60$ kN



Rys. A.28 Taśma B
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = +75 \text{ mm}$
 $F_n = 30 \text{ kN}$

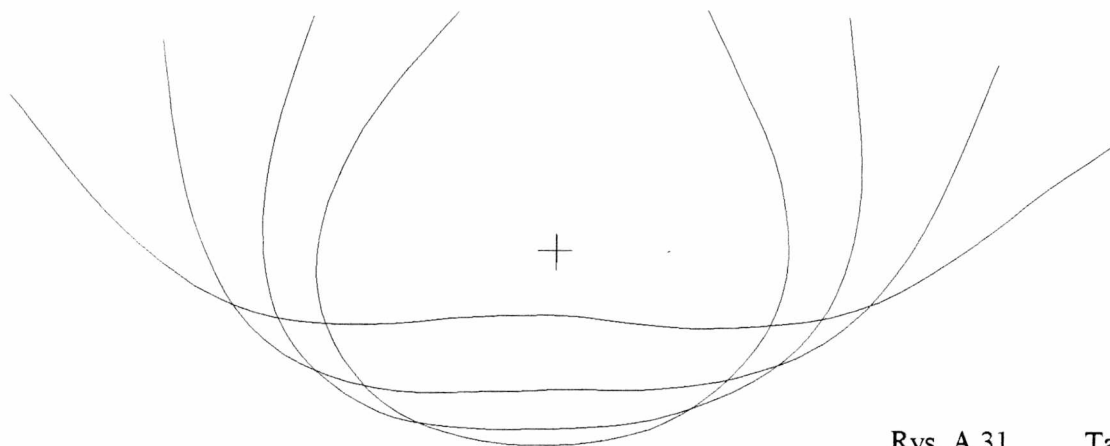


Rys. A.29 Taśma B
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = +75 \text{ mm}$
 $F_n = 60 \text{ kN}$



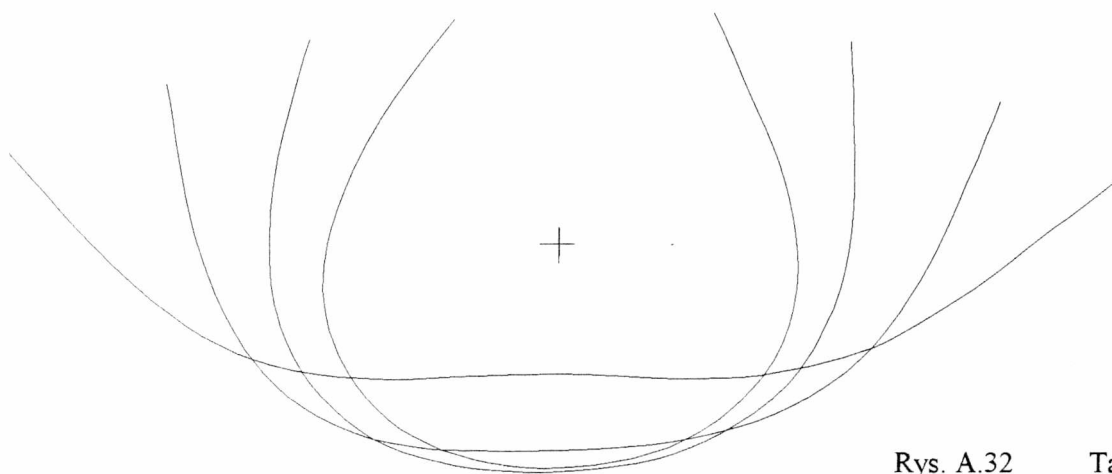
Rys. A.30

Taśma B
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_N=30$ kN



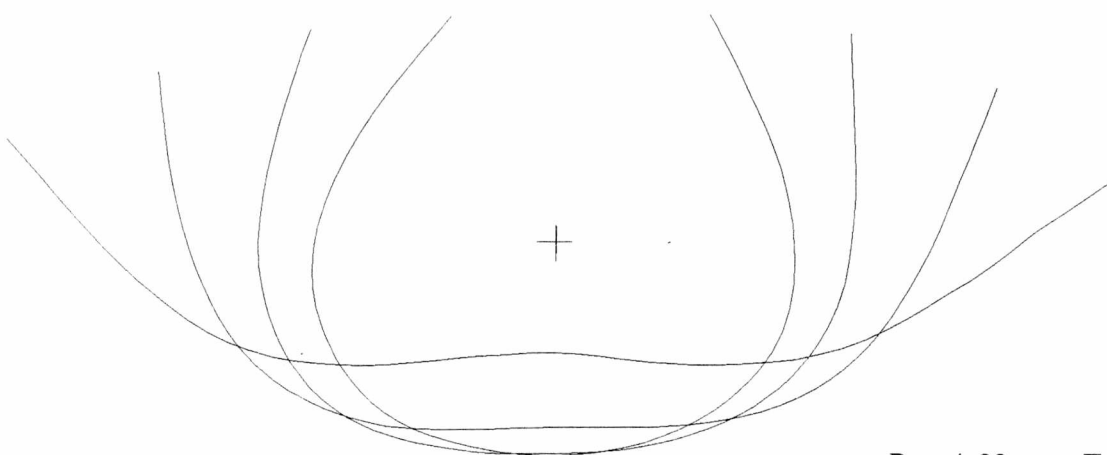
Rys. A.31

Taśma B
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_N=60$ kN



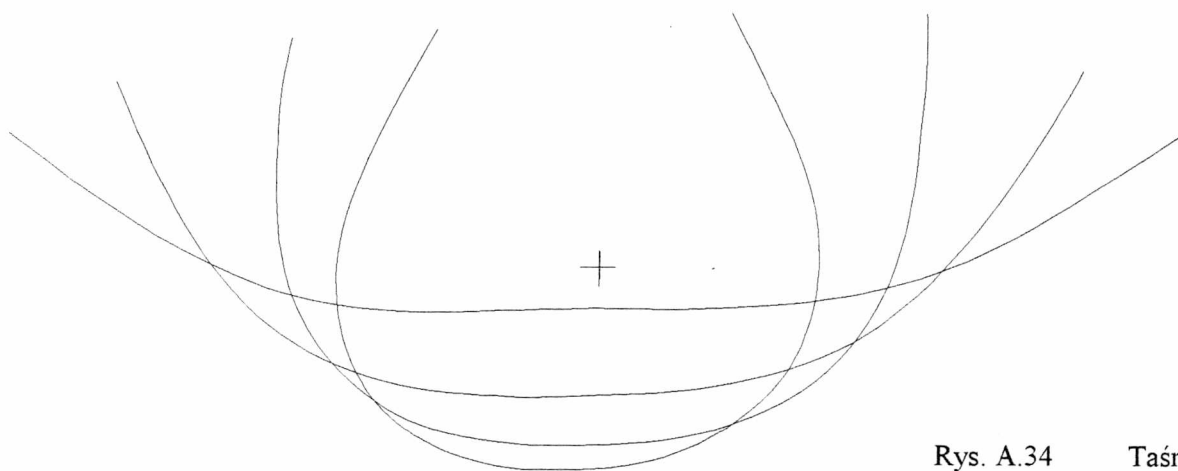
Rys. A.32

Taśma B
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = -60 \text{ mm}$
 $F_N = 30 \text{ kN}$



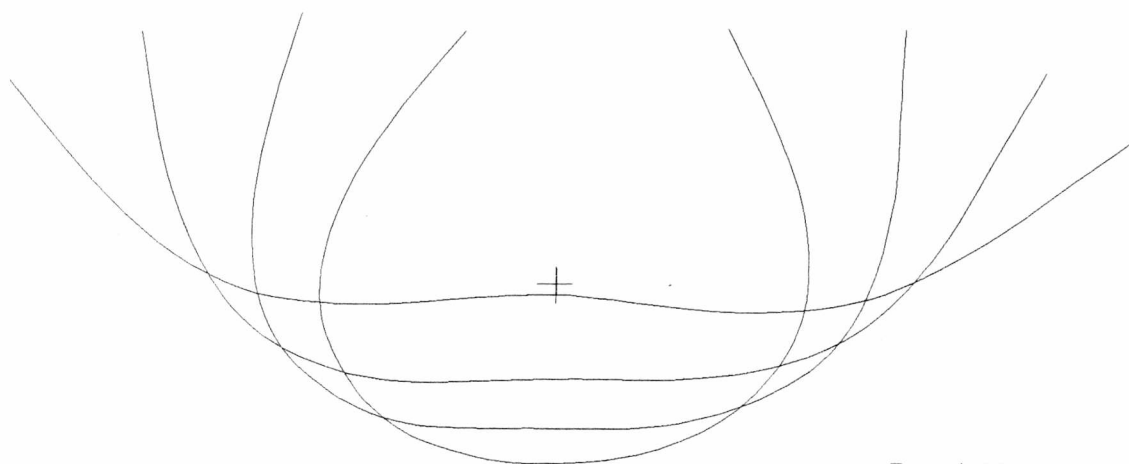
Rys. A.33

Taśma B
 $L_e = 5.5 \text{ m}$
 $e = -60 \text{ mm}$
 $F_N = 60 \text{ kN}$



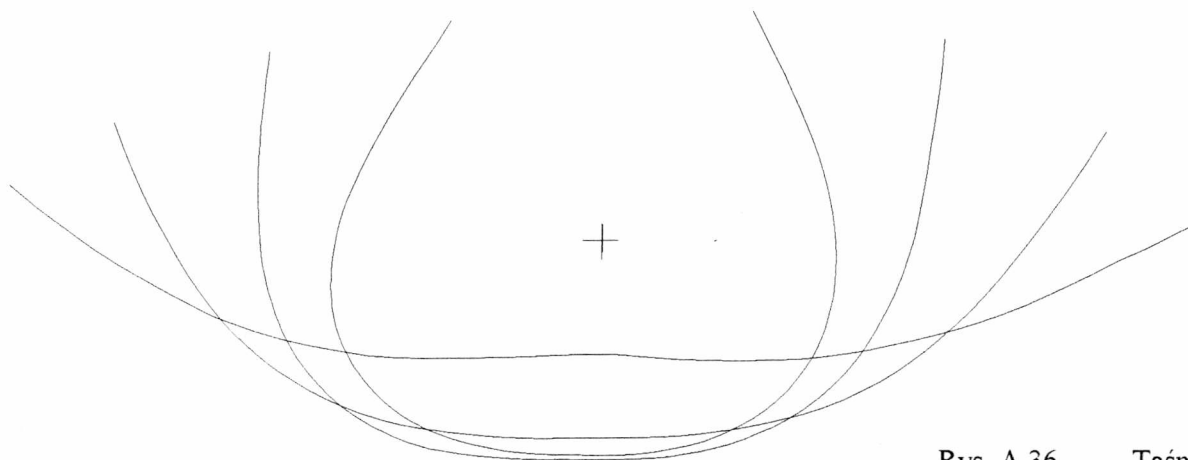
Rys. A.34

Taśma B
 $L_e = 7.5$ m
 $e = +75$ mm
 $F_N = 30$ kN



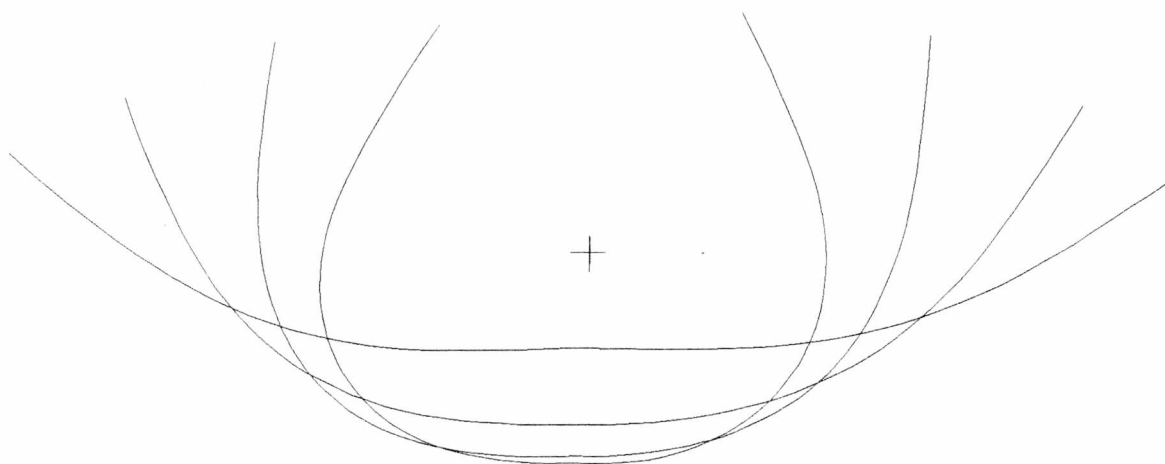
Rys. A.35

Taśma B
 $L_e = 7.5$ m
 $e = +75$ mm
 $F_N = 60$ kN



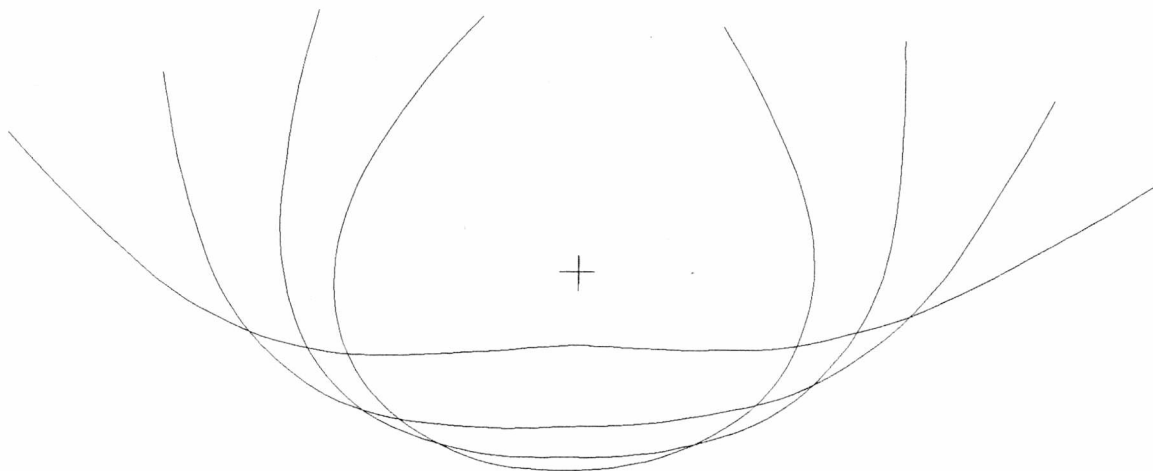
Rys. A.36

Taśma B
 $L_e = 7.5$ m
 $e = 0$
 $F_N = 15$ kN

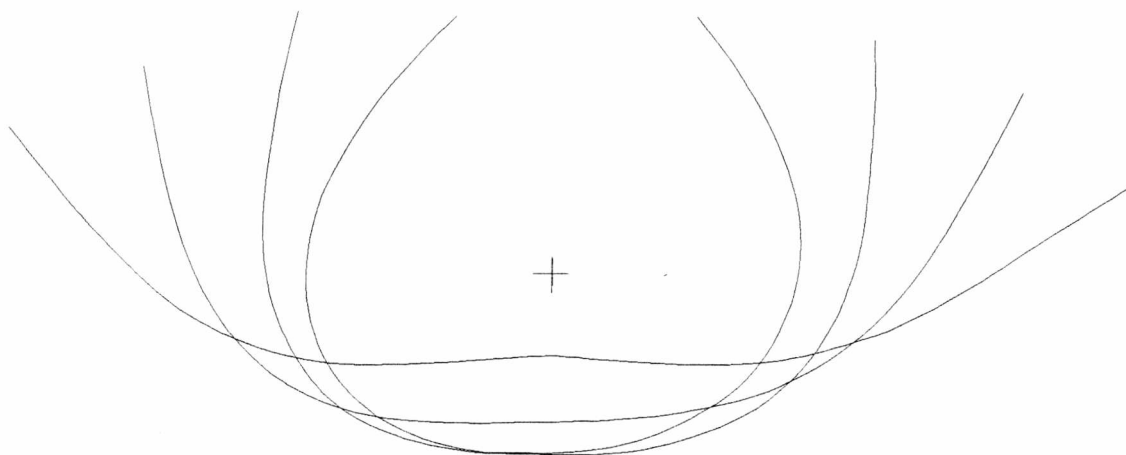


Rys. A.37

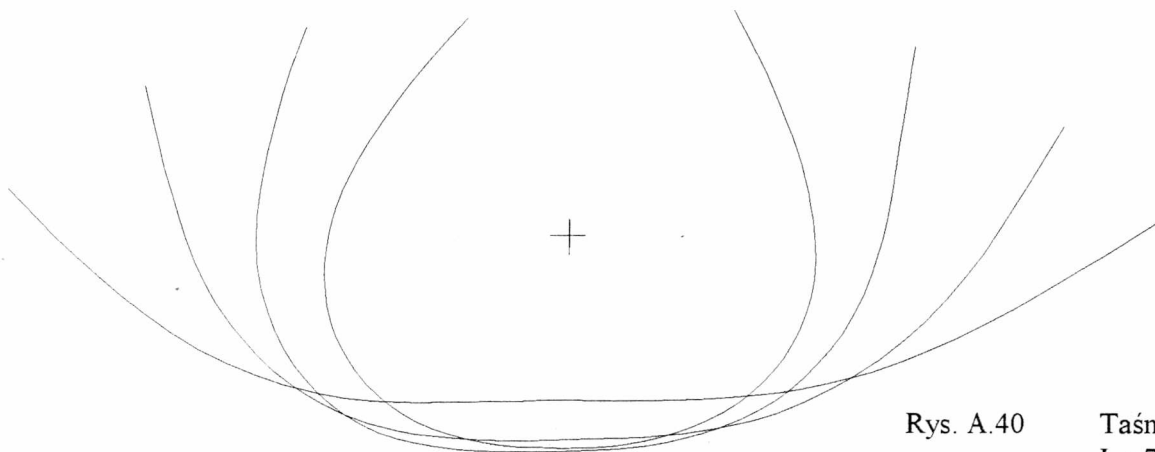
Taśma B
 $L_e = 7.5$ m
 $e = 0$
 $F_N = 30$ kN



Rys. A.38 Taśma B
 $L_e=7.5$ m
 $e=0$
 $F_N=45$ kN

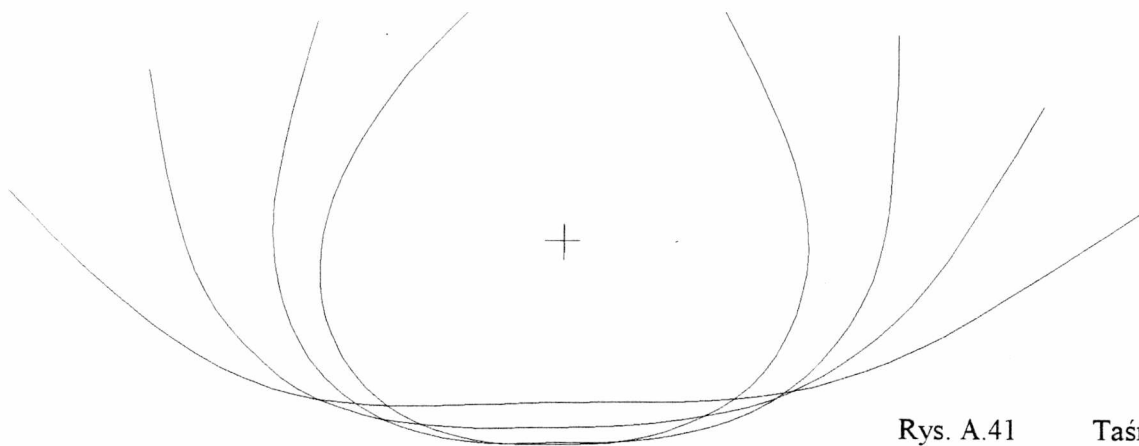


Rys. A.39 Taśma B
 $L_e=7.5$ m
 $e=0$
 $F_N=60$ kN



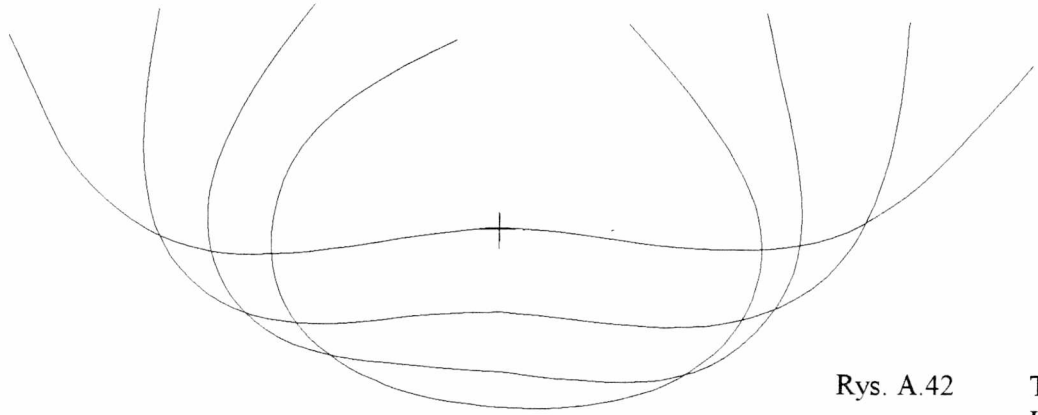
Rys. A.40

Taśma B
 $L_e=7.5$ m
 $e=-60$ mm
 $F_N=30$ kN



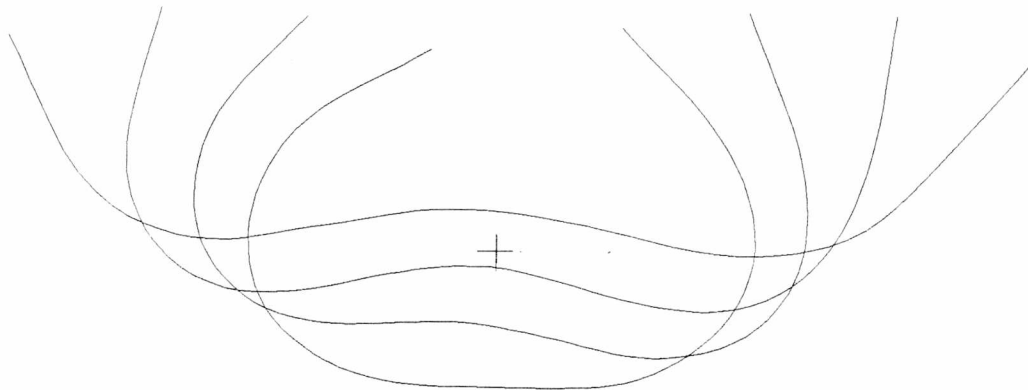
Rys. A.41

Taśma B
 $L_e=7.5$ m
 $e=-60$ mm
 $F_N=60$ kN



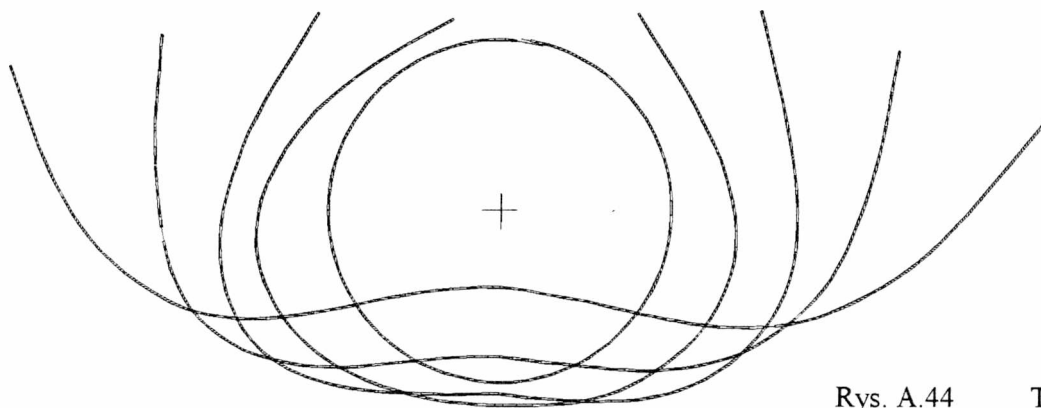
Rys. A.42

Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=15$ kN



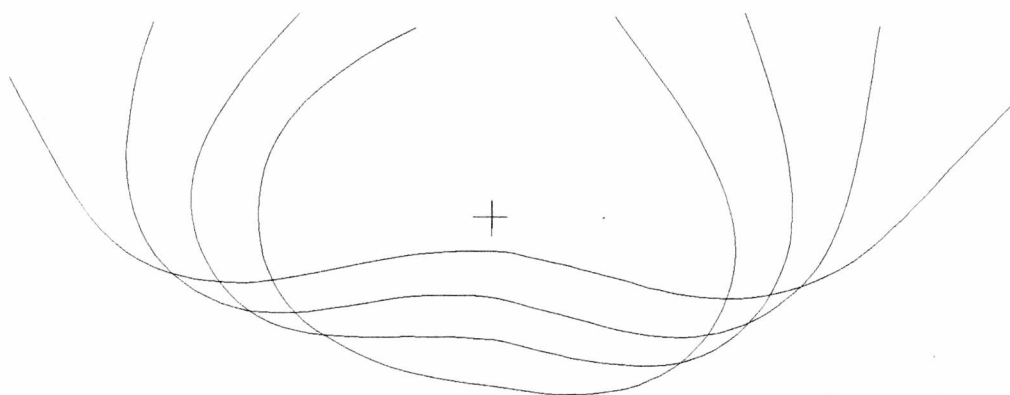
Rys. A.43

Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=+75$ mm
 $F_N=60$ kN



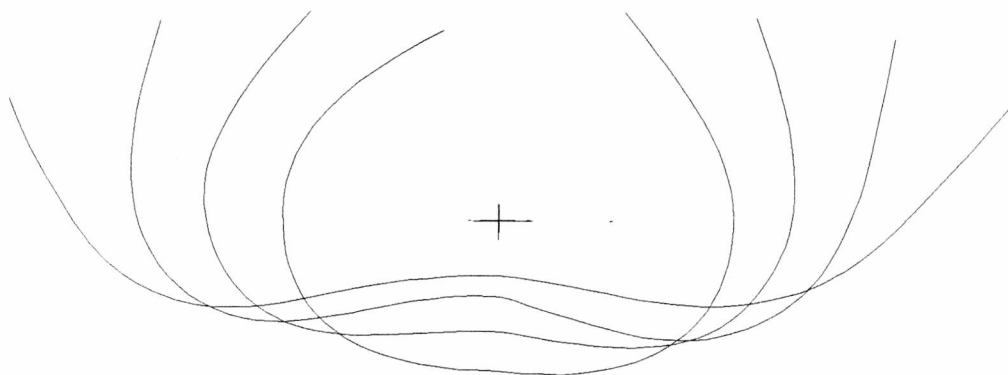
Rys. A.44

Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_N=15$ kN

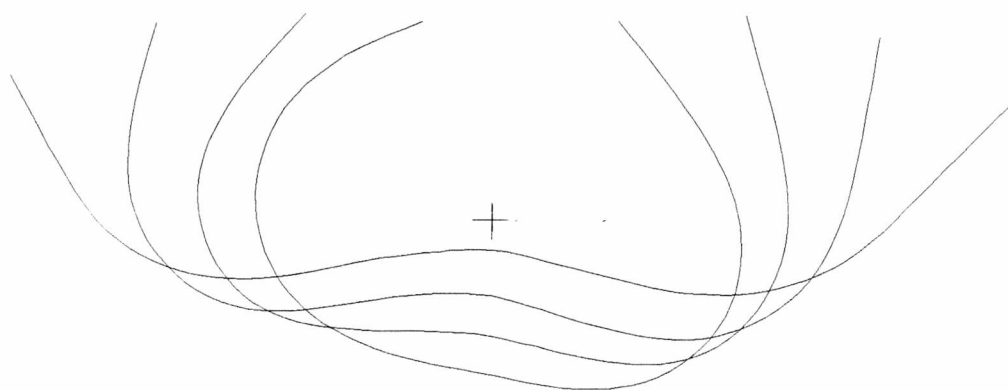


Rys. A.45

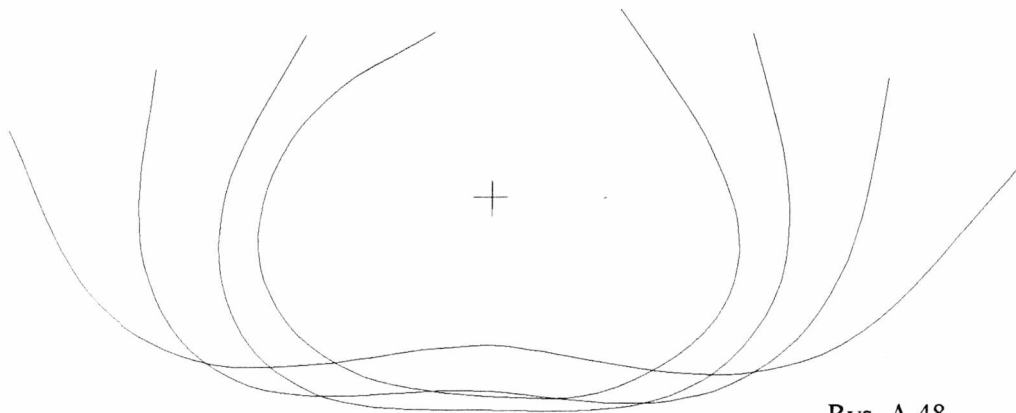
Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_N=45$ kN



Rys. A.46 Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_n=30$ kN

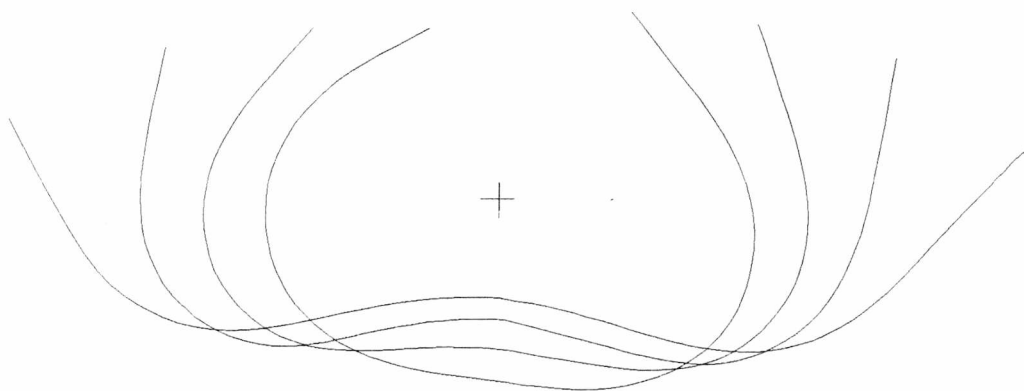


Rys. A.47 Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=0$
 $F_n=60$ kN



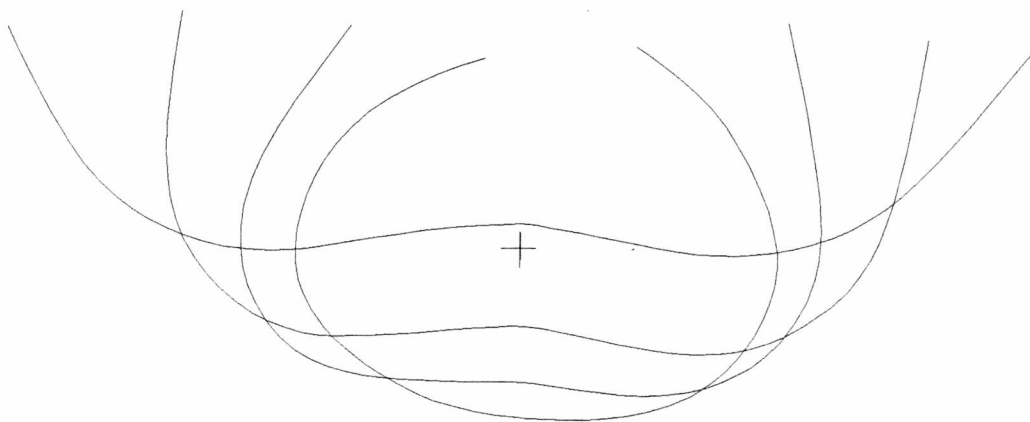
Rys. A.48

Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=-75$ mm
 $F_N=15$ kN



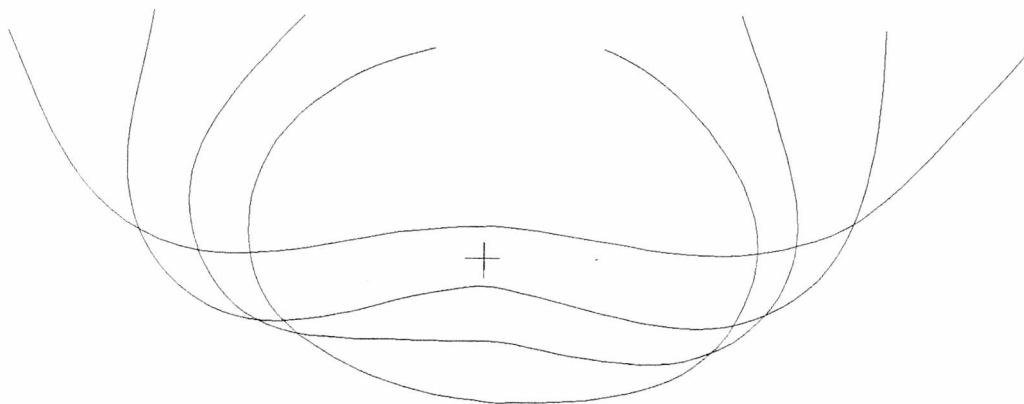
Rys. A.49

Taśma A
 $L_e=5.5$ m
 $e=-75$ mm
 $F_N=60$ kN



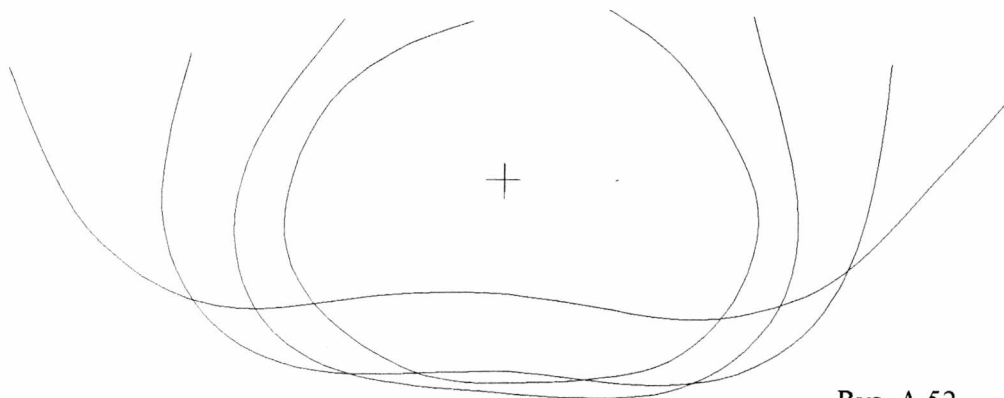
Rys. A.50

Taśma A
 $L_e = 7.5$ m
 $e = +75$ mm
 $F_N = 15$ kN

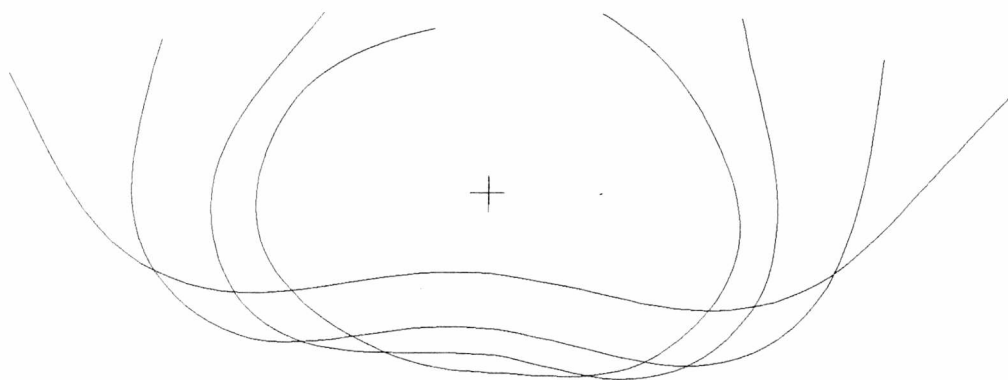


Rys. A.51

Taśma A
 $L_e = 7.5$ m
 $e = +75$ mm
 $F_N = 60$ kN



Rys. A.52 Taśma A
 $L_e=7.5$ m
 $e=-75$ mm
 $F_n=15$ kN



Rys. A.53 Taśma A
 $L_e=7.5$ m
 $e=-75$ mm
 $F_n=60$ kN

Załącznik B: Wyniki badań stanu odkształceń w taśmie na odcinku przejściowym przenośnika rurowego metodą elastooptycznej warstwy powierzchniowej

W załączniku przedstawiono wyniki badań stanu odkształceń w taśmie z linkami stalowymi na odcinku przejściowym metodą elastooptycznej warstwy powierzchniowej. W pierwszej części załącznika zaprezentowano fotografie izochrom całkowitych i połówkowych rejestrowanych w warstwie elastooptycznej podczas badań rozkładu odkształceń po szerokości taśmy w okolicach bębna. Badania prowadzono wg metody pomiarowej przedstawionej w rozdziale 4.3. W drugiej części załącznika zaprezentowano wykresy w których na osi odciętych jest współrzędna po szerokości taśmy, a na osi rzędnych rząd izochromy jako miara różnicy odkształceń głównych.

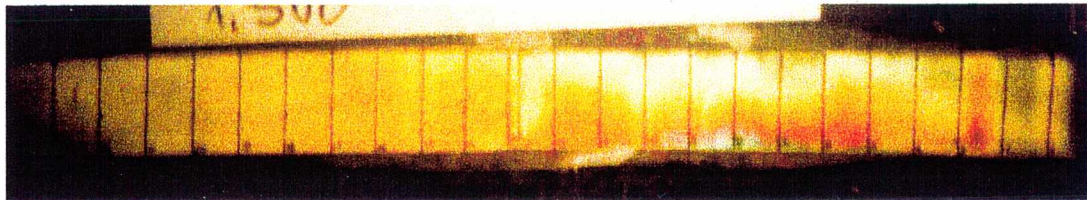
W załączniku zastosowano następujące oznaczenia:

Taśma A, B, C lub D - rodzaj konstrukcji taśmy wg rys. 4.2,

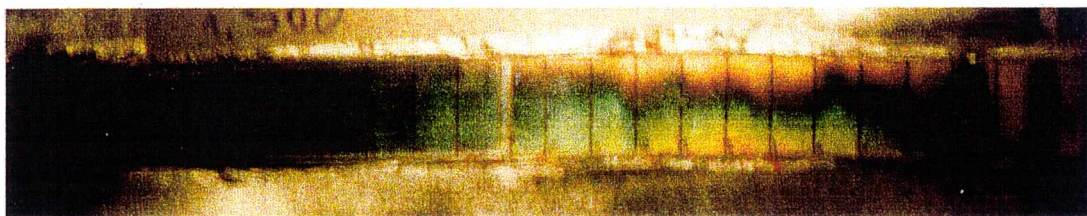
L_e - długość odcinka przejściowego,

e - położenie taśmy na bębnie w stosunku do poziomej osi symetrii przekroju kołowego taśmy zwiniętej w rurę na pierwszym zestawie krażnikowym,

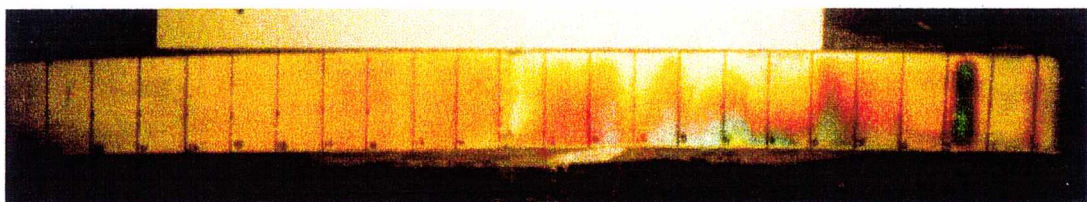
F_N - siła napinania taśmy.



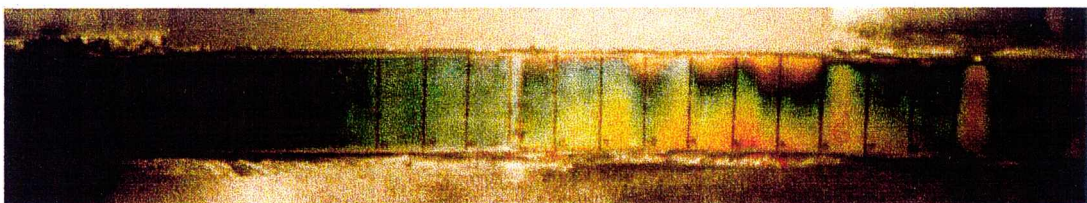
Rys. B.1 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=15\text{ kN}$)



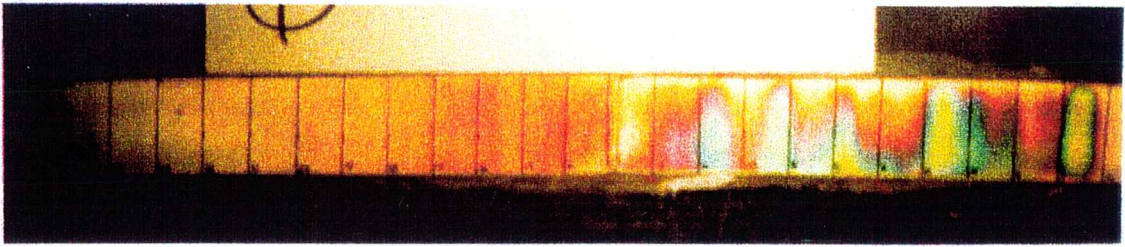
Rys. B.2 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=15\text{ kN}$)



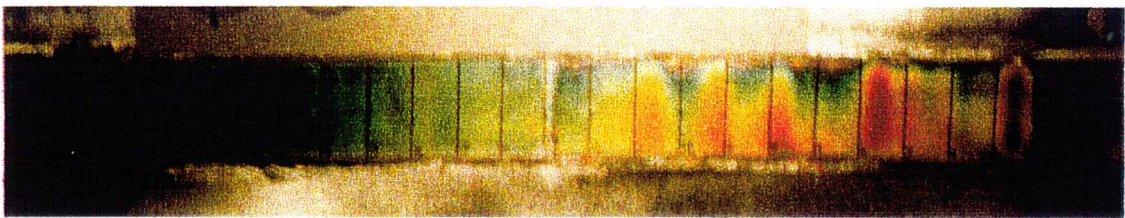
Rys. B.3 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=30\text{ kN}$)



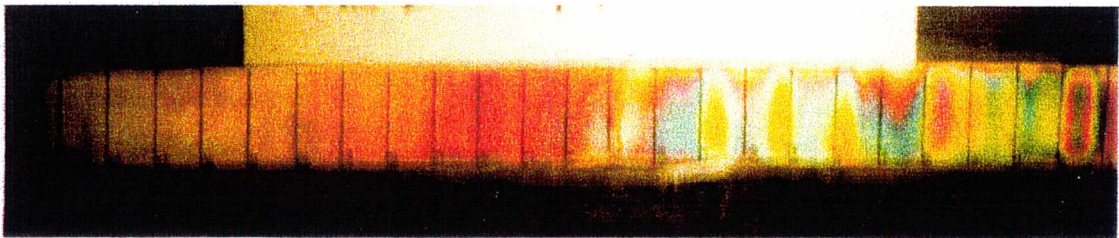
Rys. B.4 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=30\text{ kN}$)



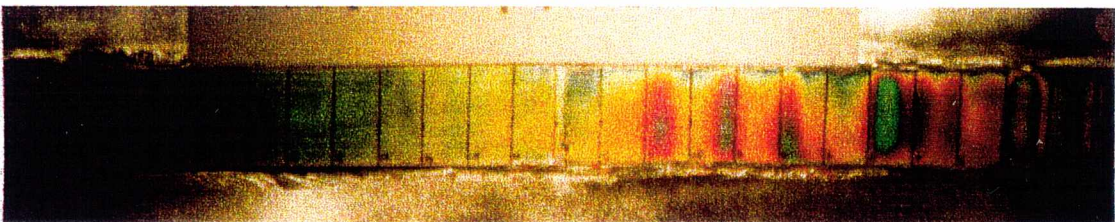
Rys. B.5 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=45\text{ kN}$)



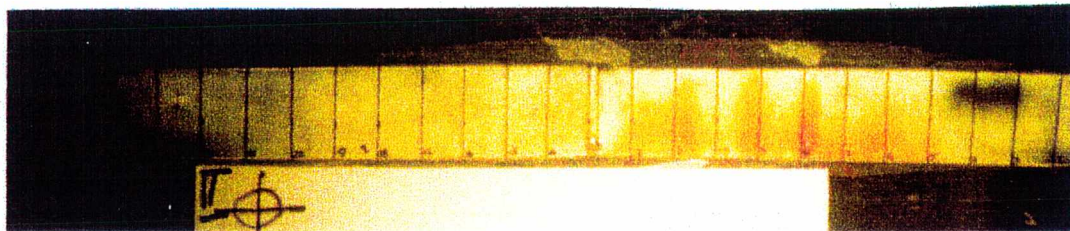
Rys. B.6 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=45\text{ kN}$)



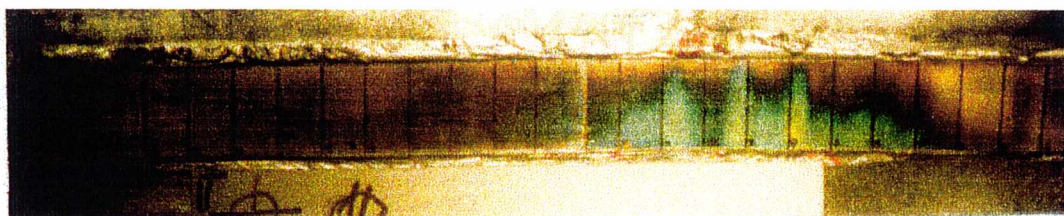
Rys. B.7 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)



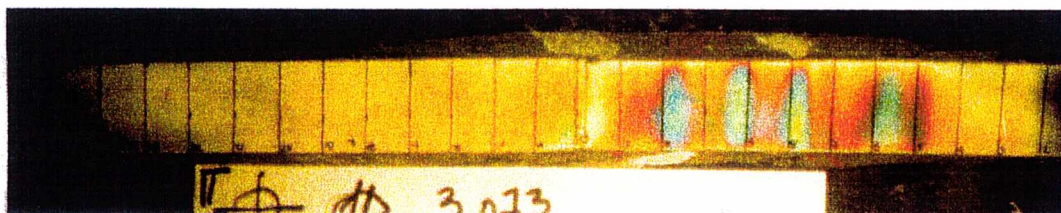
Rys. B.8 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)



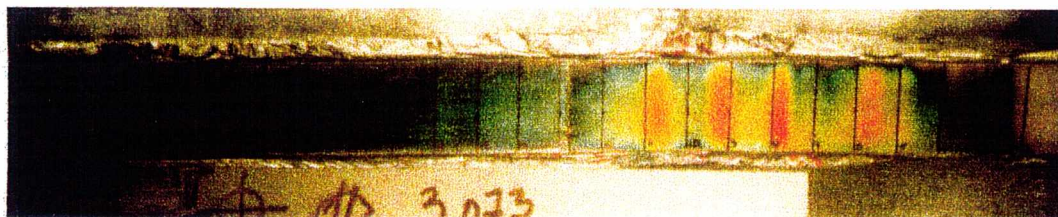
Rys. B.9 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=15\text{ kN}$)



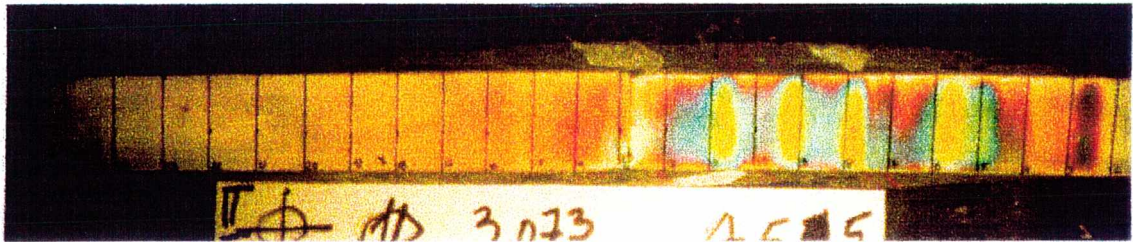
Rys. B.10 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=15\text{ kN}$)



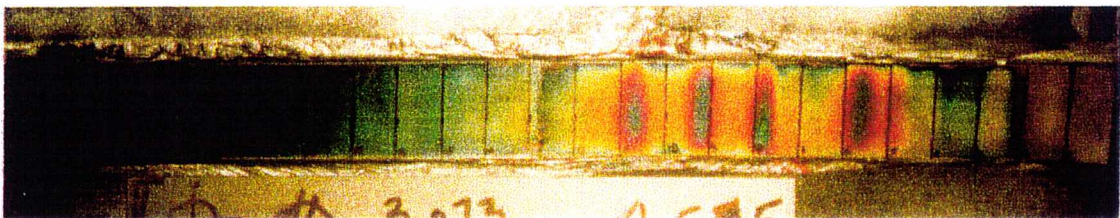
Rys. B.11 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=30\text{ kN}$)



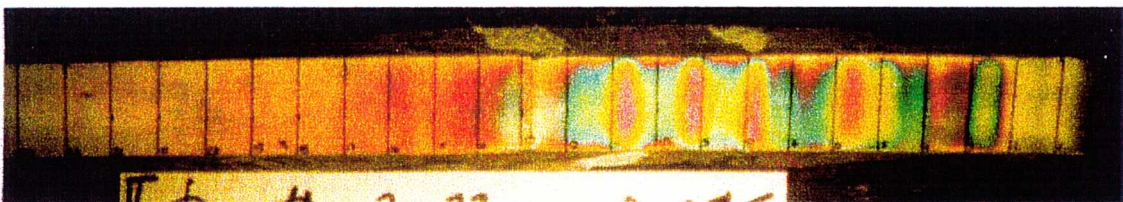
Rys. B.12 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=30\text{ kN}$)



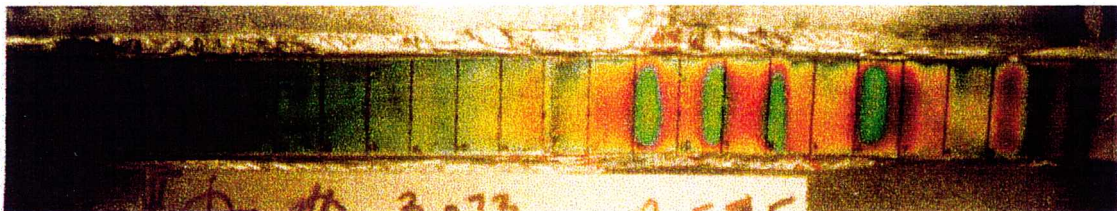
Rys. B.13 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=45\text{ kN}$)



Rys. B.14 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=45\text{ kN}$)



Rys. B.15 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy całkowite ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)



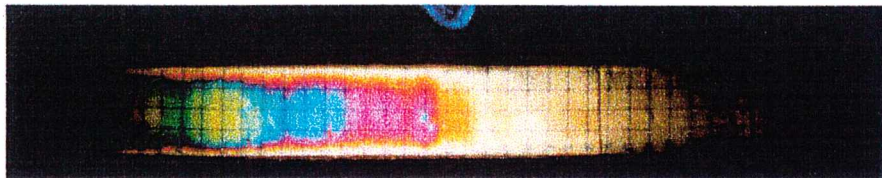
Rys. B.16 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu A izochromy połówkowe ($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy

a) izochromy połówkowe

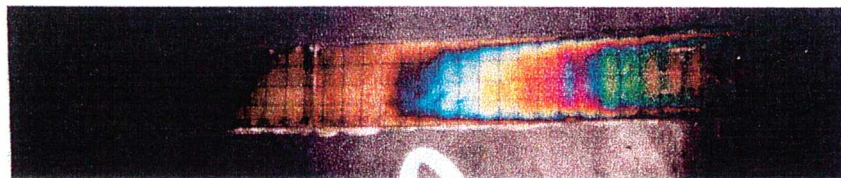


b) izochromy całkowite

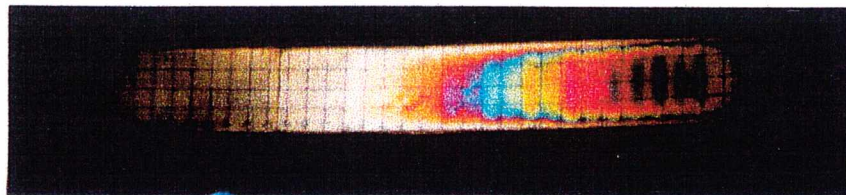


Prawy skraj taśmy

a) izochromy połówkowe



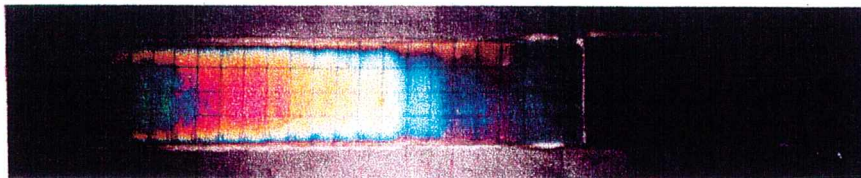
b) izochromy całkowite



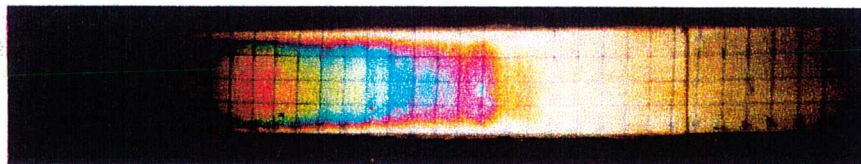
Rys. B.17 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu C
($L_e=5.5$ m, $e=75$ mm, $F_N=60$ kN)

Lewy skraj taśmy

a) izochromy półówkowe

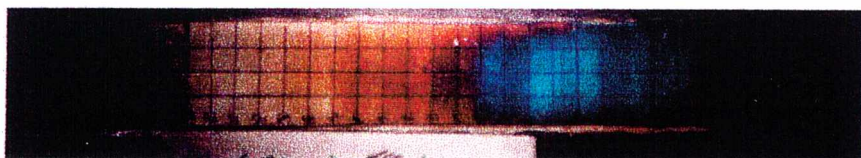


b) izochromy całkowite

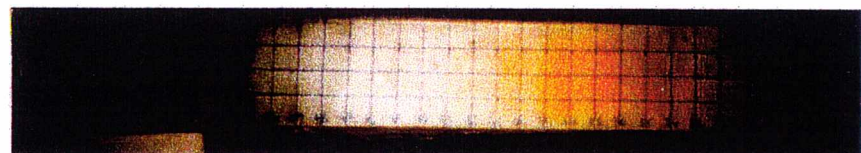


Rejon środka taśmy

a) izochromy półówkowe

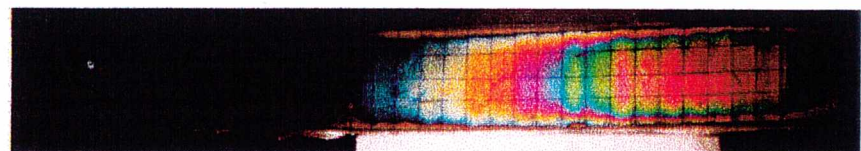


b) izochromy całkowite

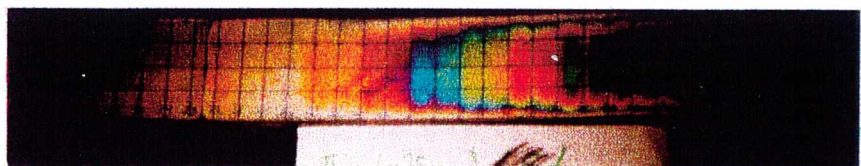


Prawy skraj taśmy

a) izochromy półówkowe



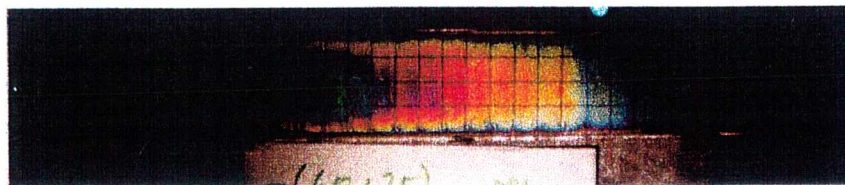
b) izochromy całkowite



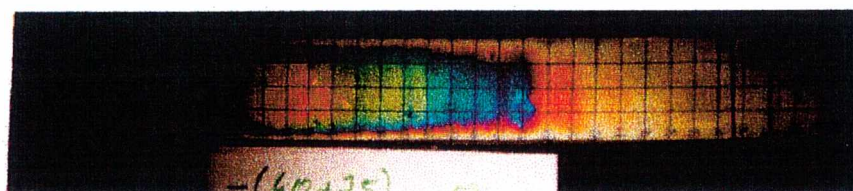
Rys. B.18 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu C
($L_e=5.5\text{ m}$, $e=0$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy

a) izochromy połówkowe

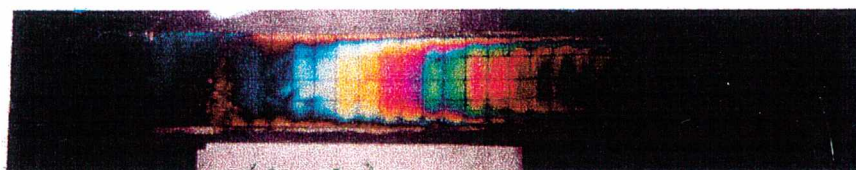


b) izochromy całkowite

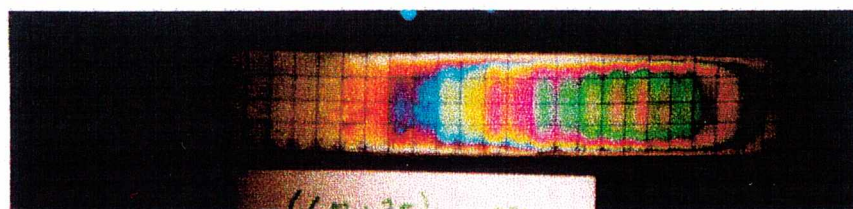


Prawy skraj taśmy

a) izochromy połówkowe



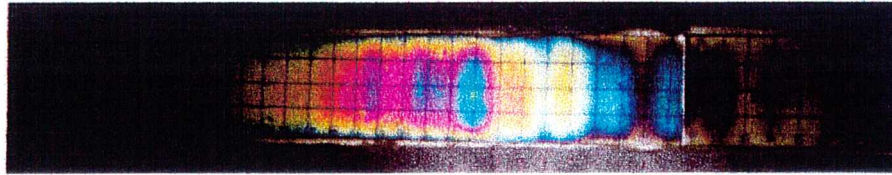
b) izochromy całkowite



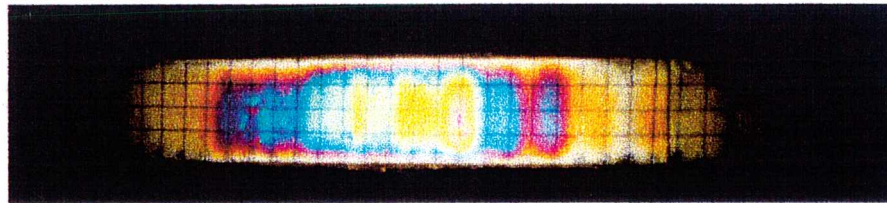
Rys. B.19 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu C
($L_e=5.5$ m, $e=-40$ mm, $F_N=60$ kN)

Lewy skraj taśmy

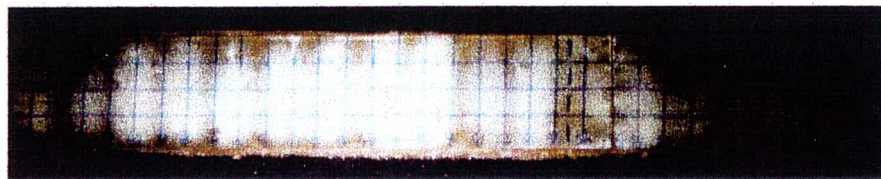
a) izochromy połówkowe



b) izochromy całkowite

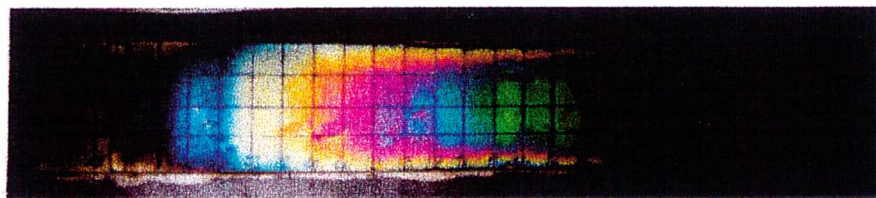


Rejon środka taśmy
izochromy połówkowe

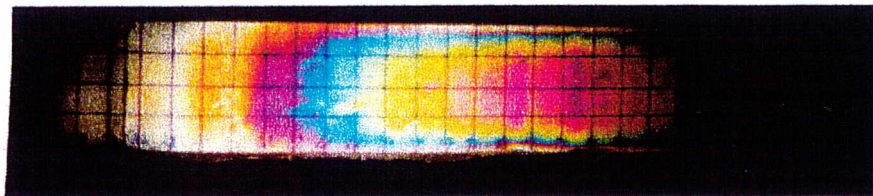


Prawy skraj taśmy

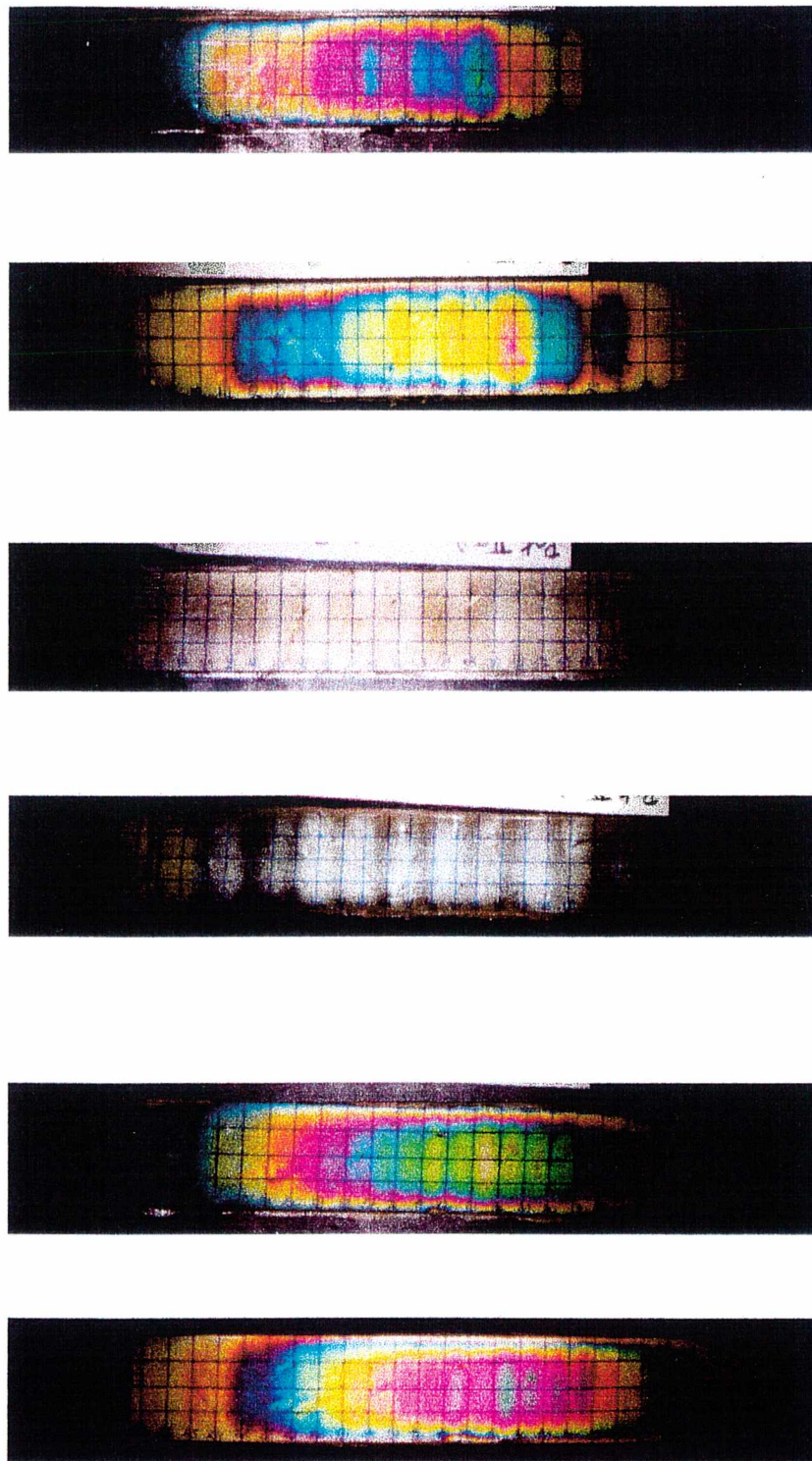
a) izochromy połówkowe



b) izochromy całkowite



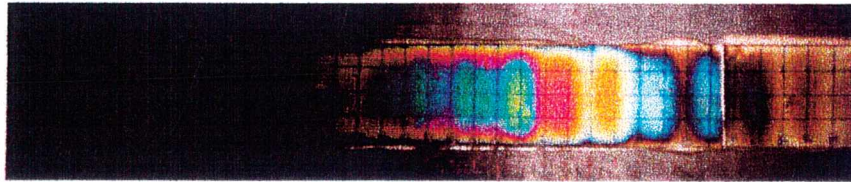
Rys. B.20 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu C
($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)



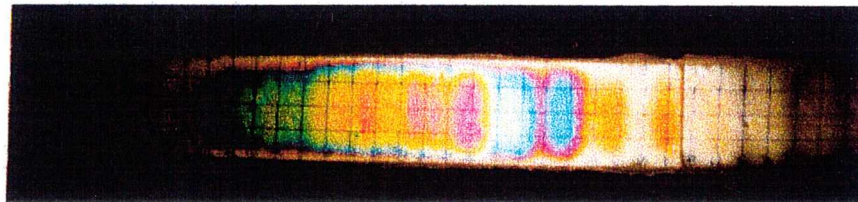
Rys. B.21 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu C
($L_e=7.5$ m, $e=0$, $F_N=60$ kN)

Lewy skraj taśmy

a) izochromy połówkowe

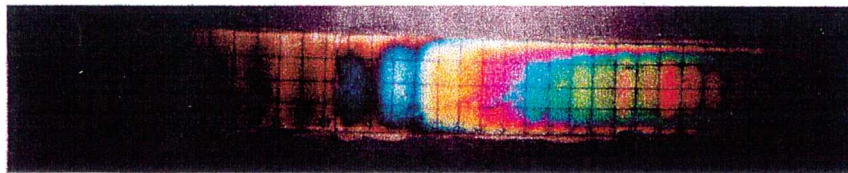


b) izochromy całkowite

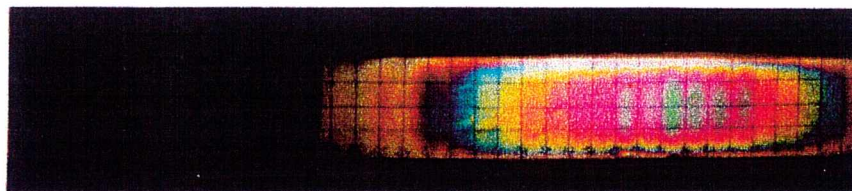


Prawy skraj taśmy

a) izochromy połówkowe

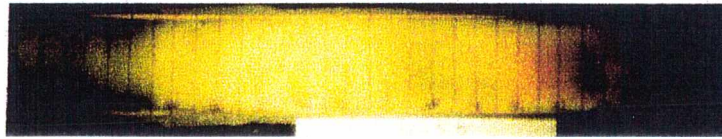


b) izochromy całkowite

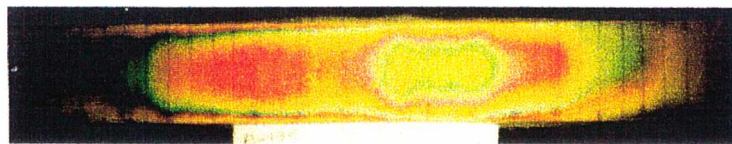


Rys. B.22 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu C
($L_e=7.5\text{ m}$, $e=-40\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite

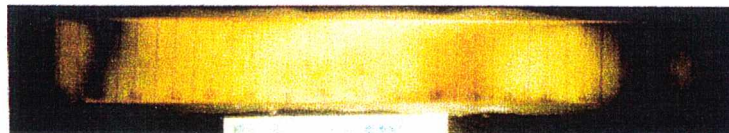


Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

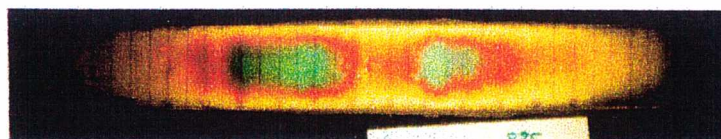


Rys. B.23 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=5.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite



Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

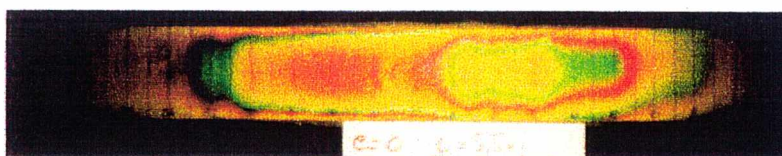


Rys. B.24 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=8.25\text{ m}$, $e=-40\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite



Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

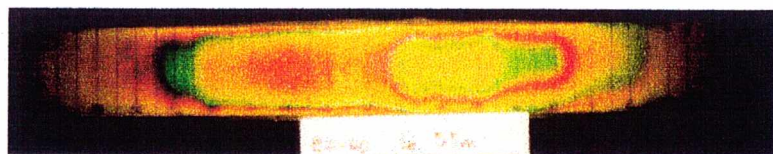


Rys. B.25 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=0$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite

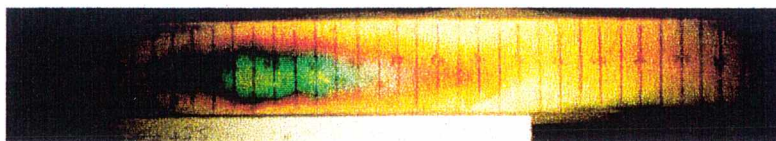


Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

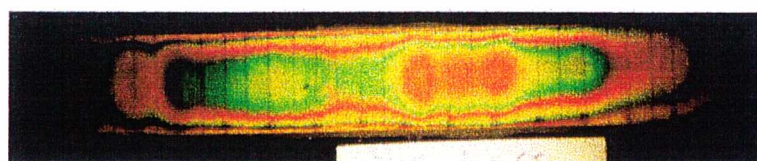


Rys. B.26 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D ($L_e=5.5\text{ m}$, $e=-40\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite



Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

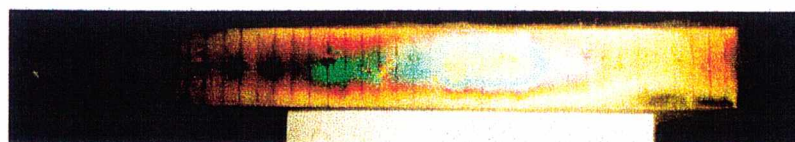


Rys. B.27 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=6.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite



Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

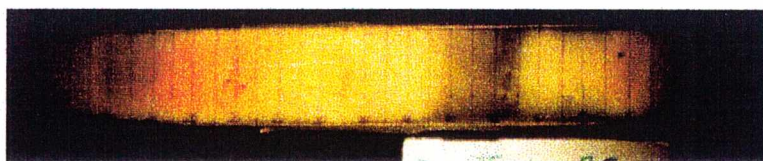


Rys. B.28 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=6.5\text{ m}$, $e=-40\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite

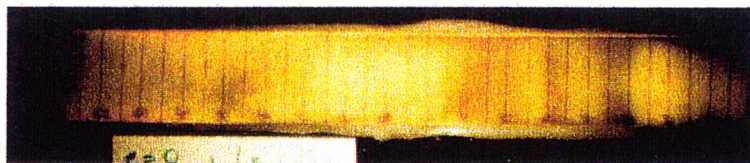


Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

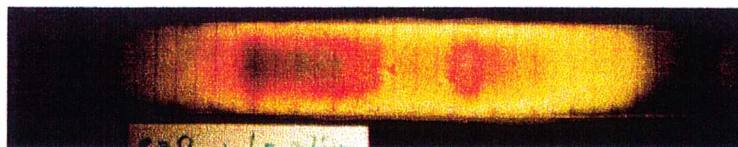


Rys. B.29 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=7.5\text{ m}$, $e=75\text{ mm}$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite

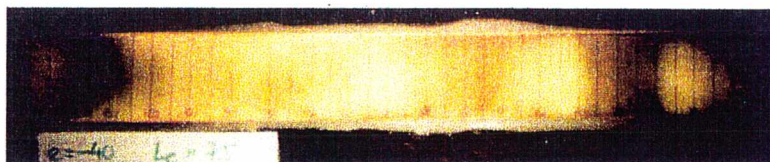


Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

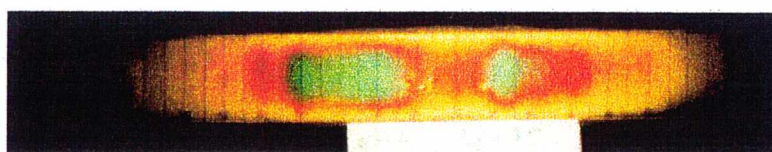


Rys. B.30 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=7.5\text{ m}$, $e=0$, $F_N=60\text{ kN}$)

Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite



Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite

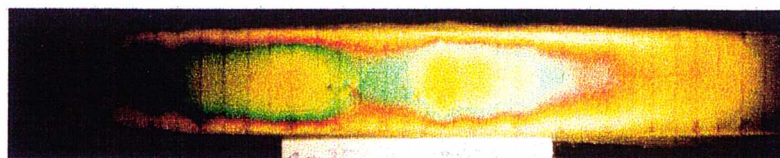


Rys. B.31 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=7.5$ m, $e=-40$ mm, $F_N=60$ kN)

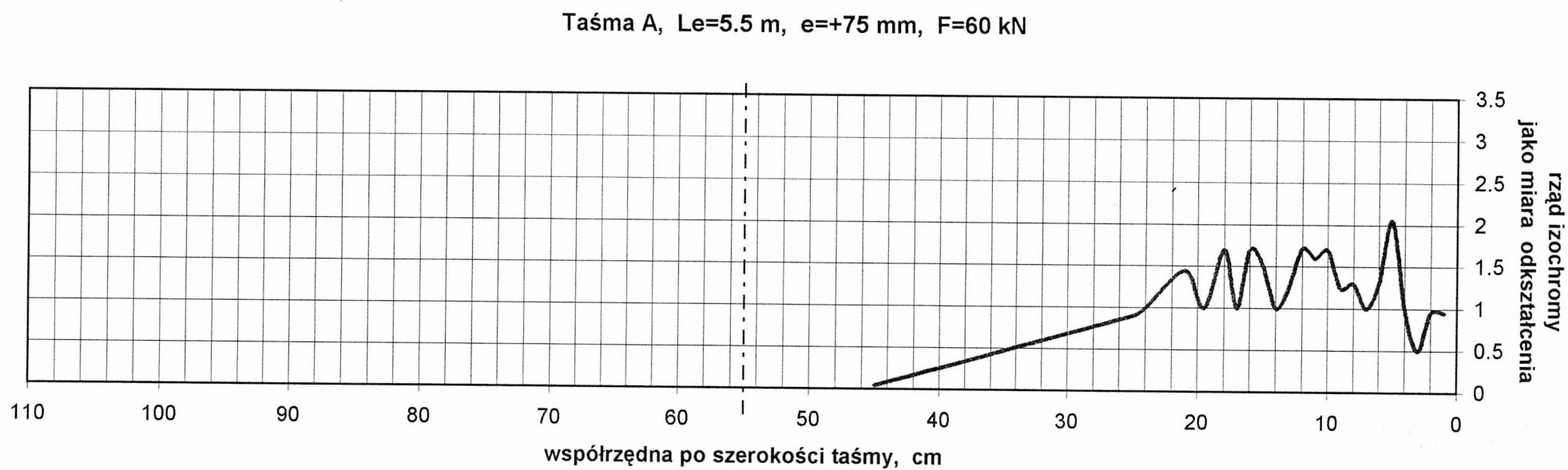
Lewy skraj taśmy - izochromy całkowite



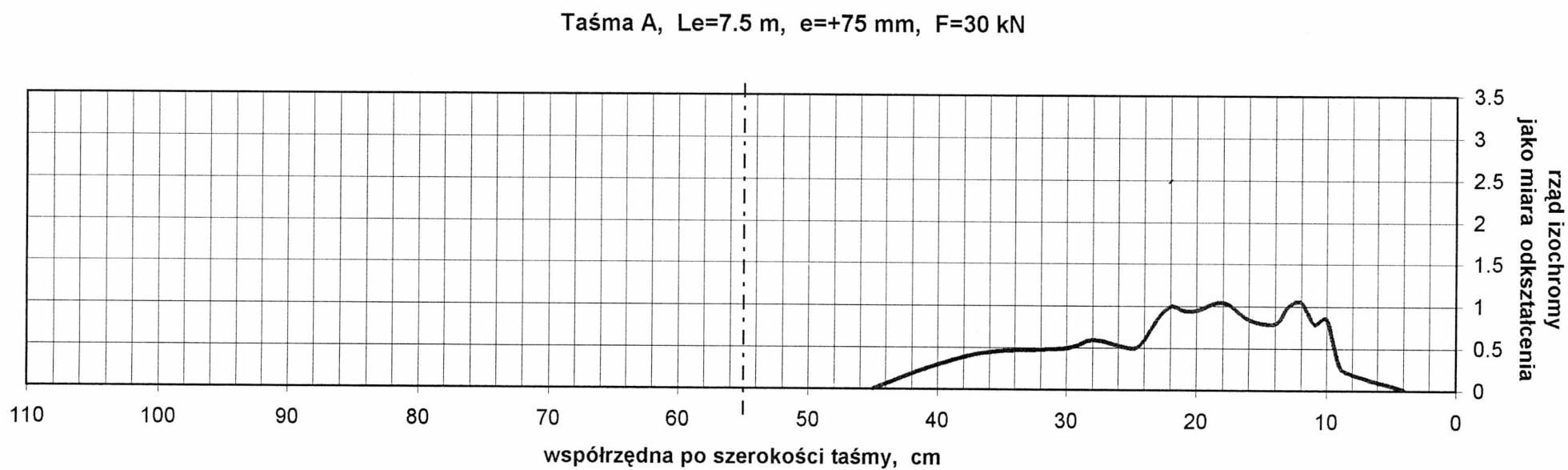
Prawy skraj taśmy - izochromy całkowite



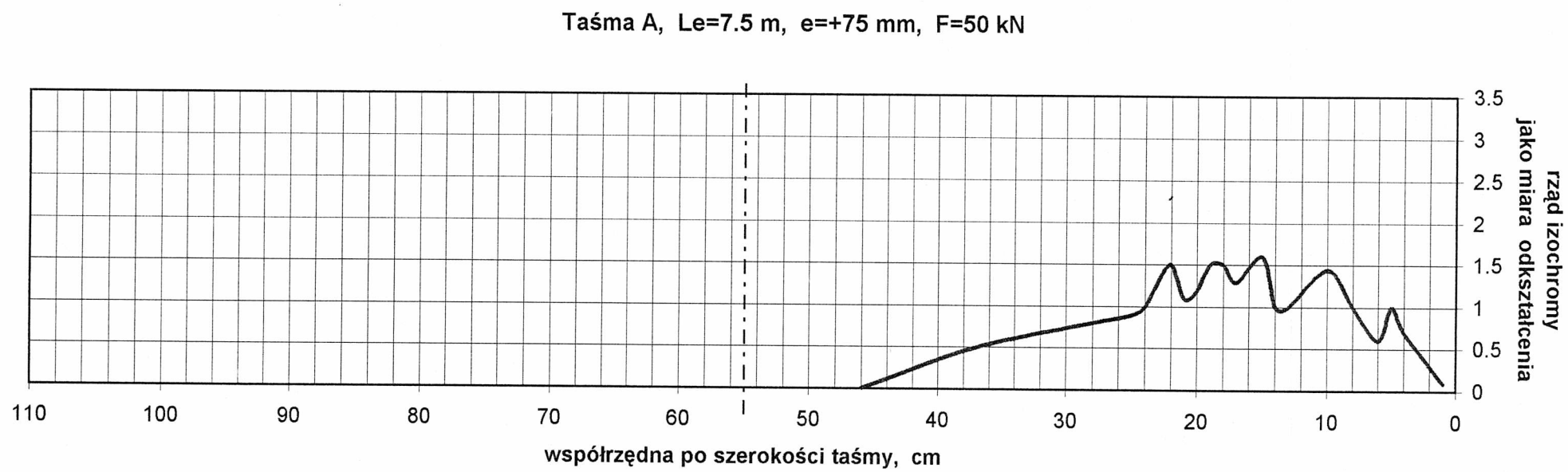
Rys. B.32 Efekt elastooptyczny w badaniach pola odkształceń taśmy typu D
($L_e=8.25$ m, $e=75$ mm, $F_N=60$ kN)



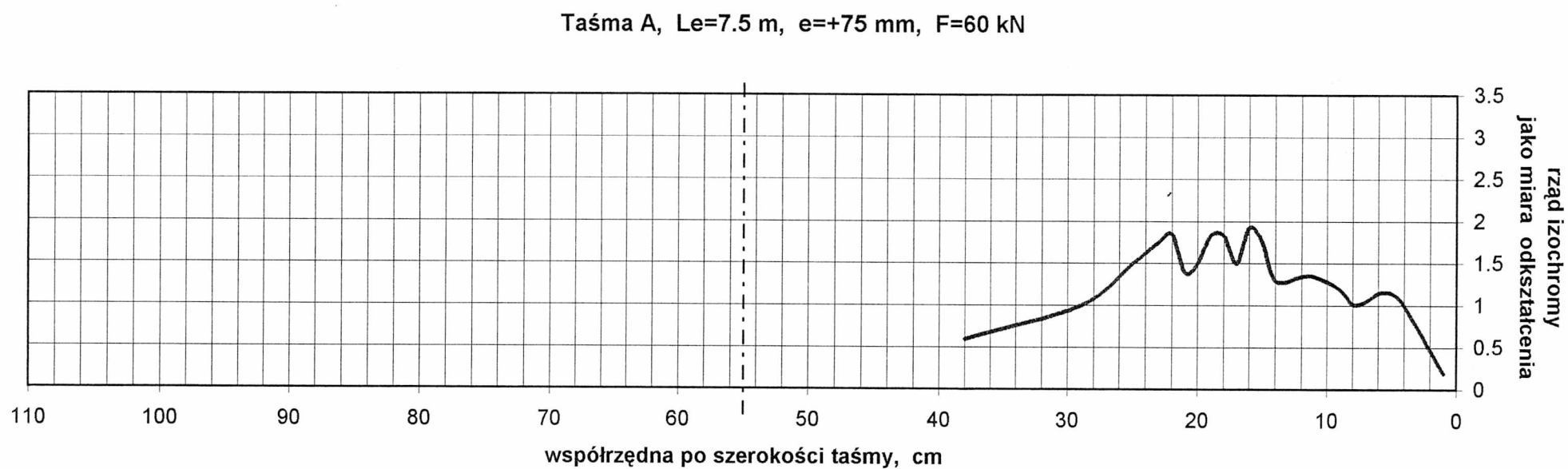
Rys. B.33 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



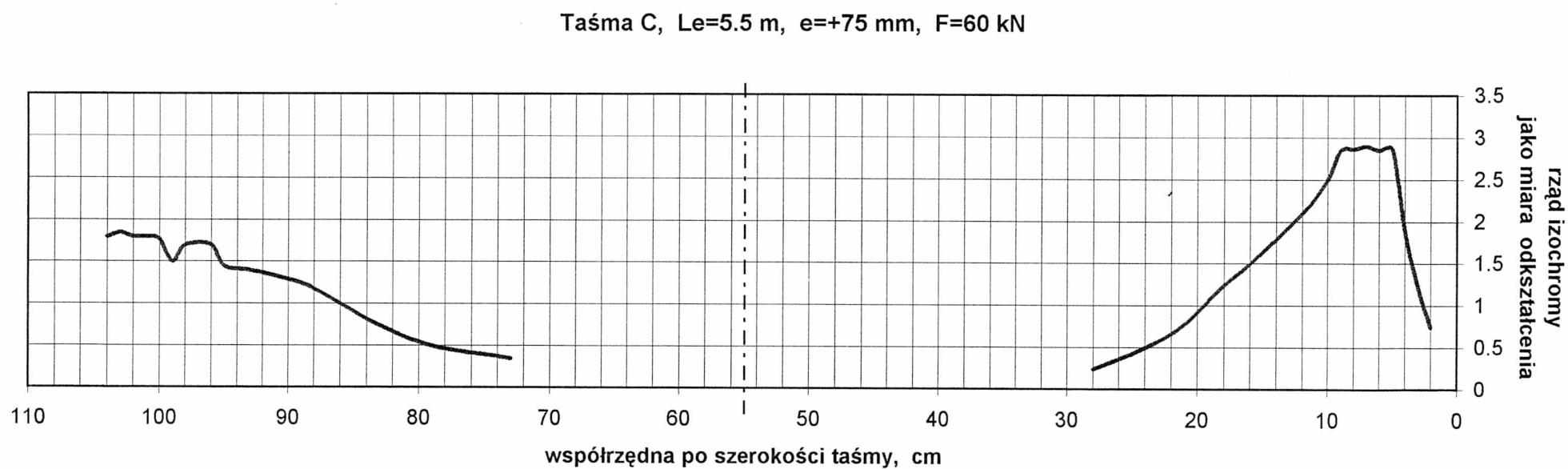
Rys. B.34 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



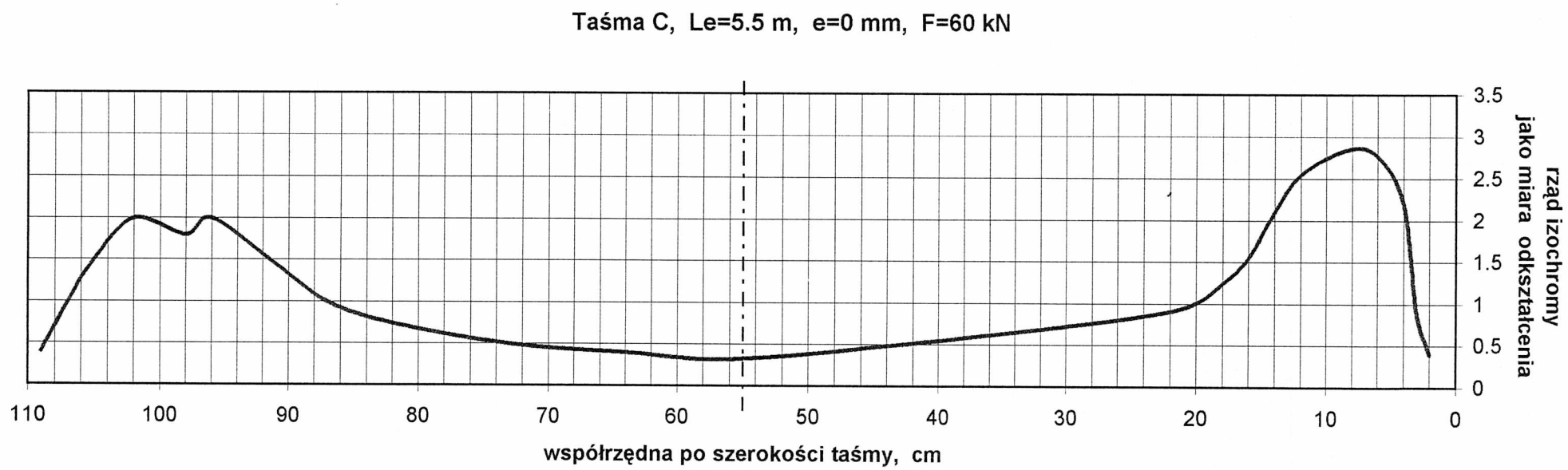
Rys. B.35 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



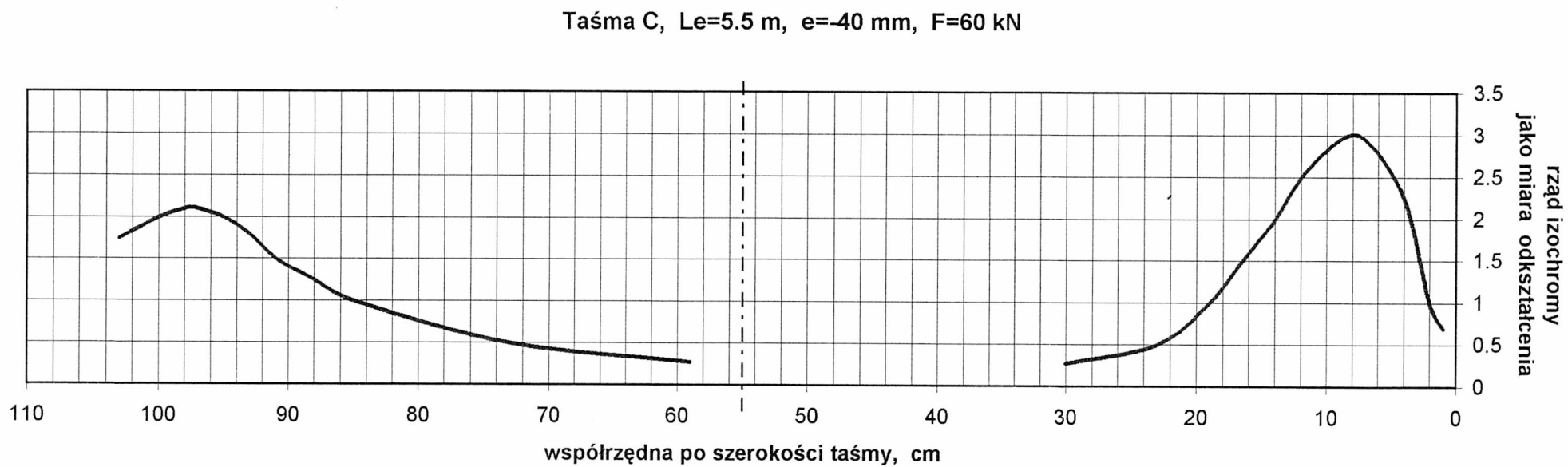
Rys. B.36 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



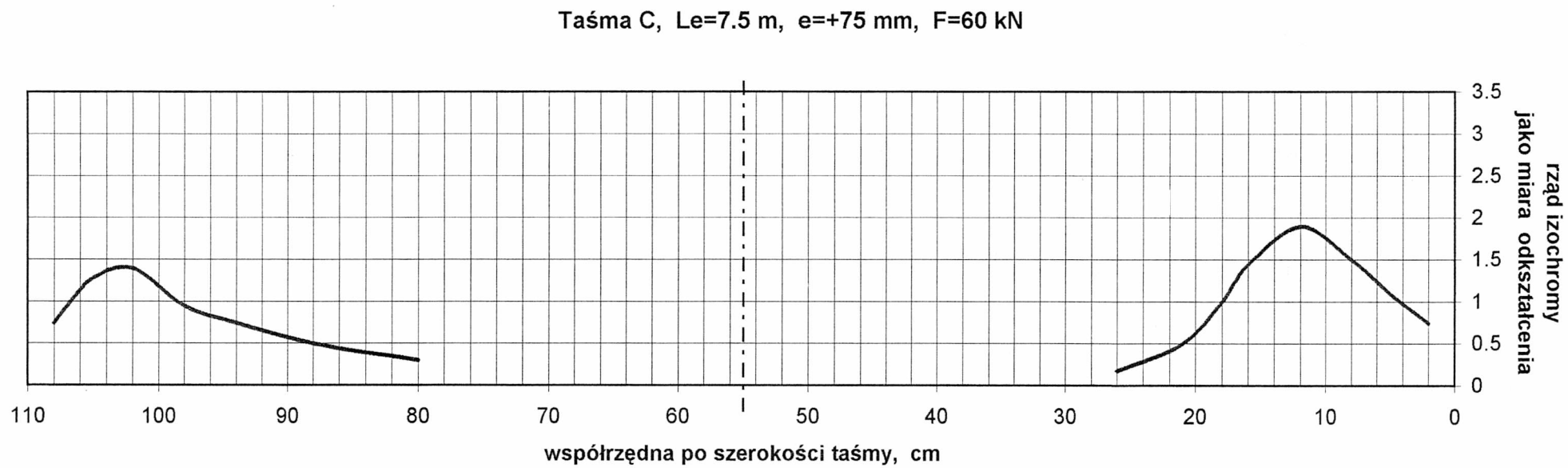
Rys. B.37 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



Rys. B.38 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



Rys. B.39 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna

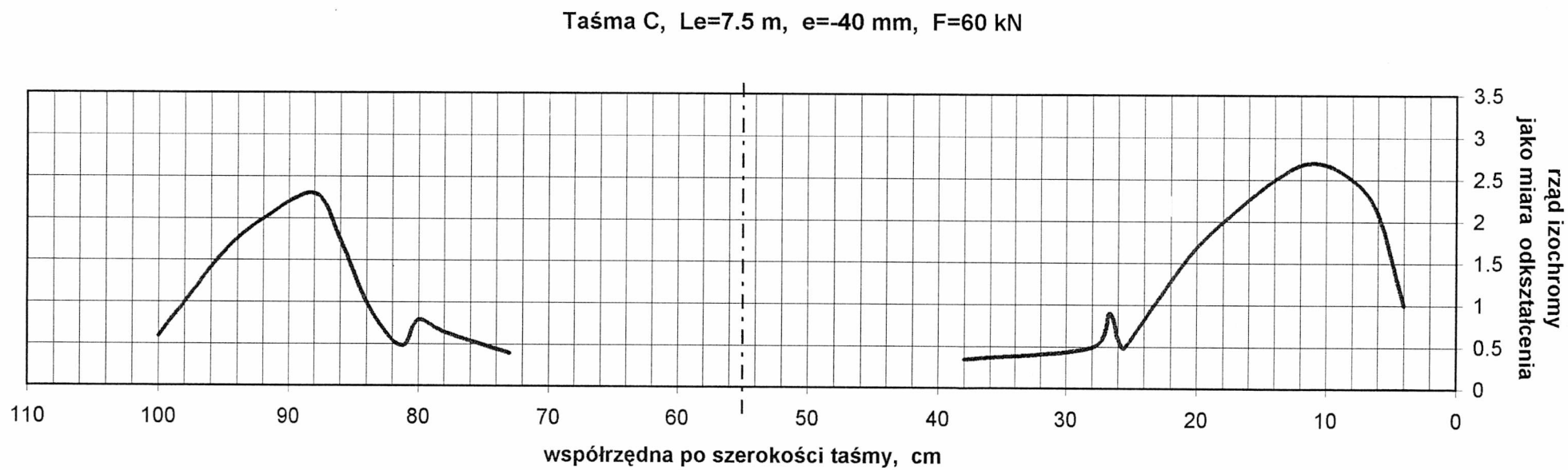


Rys. B.40 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna

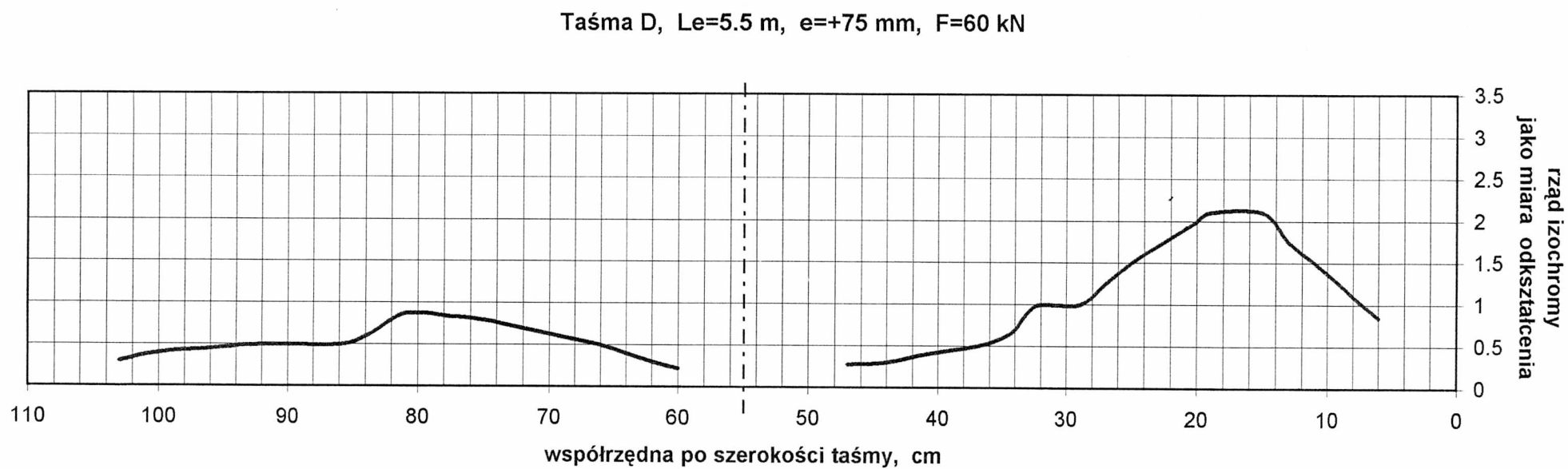
Taśma C, $L_e=7.5$ m, $e=0$ mm, $F=60$ kN



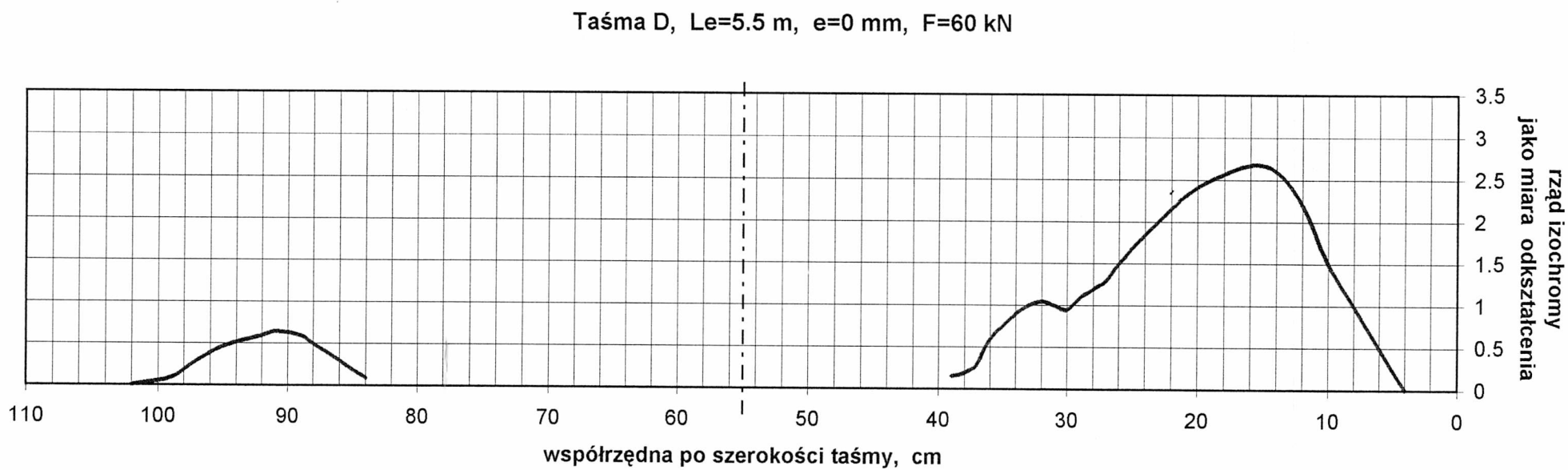
Rys. B.41 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



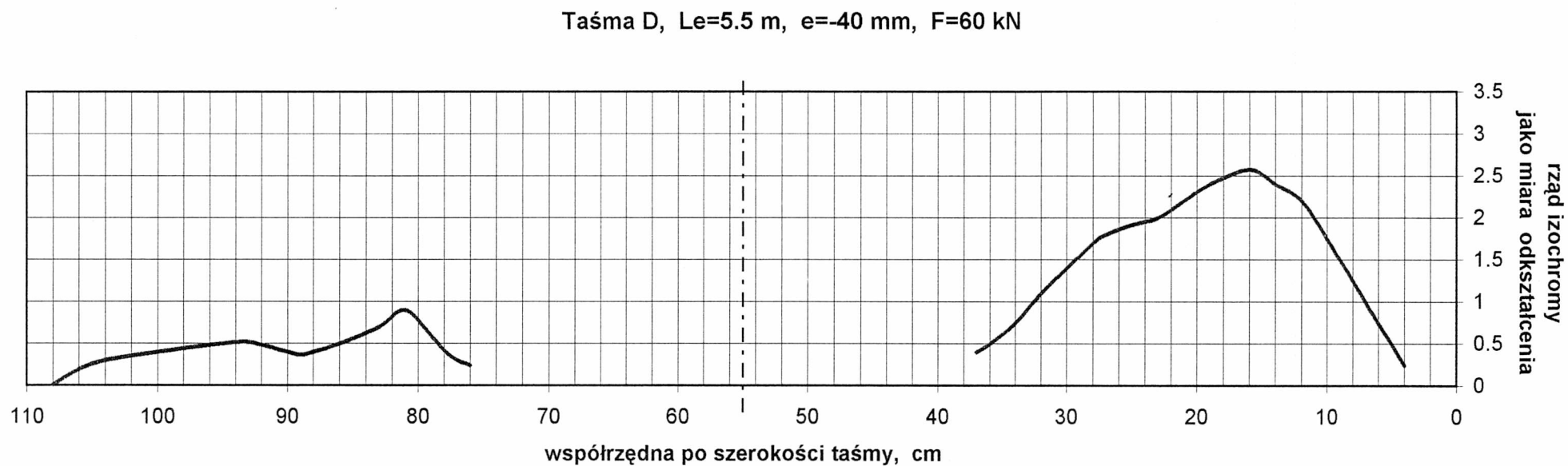
Rys. B.42 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



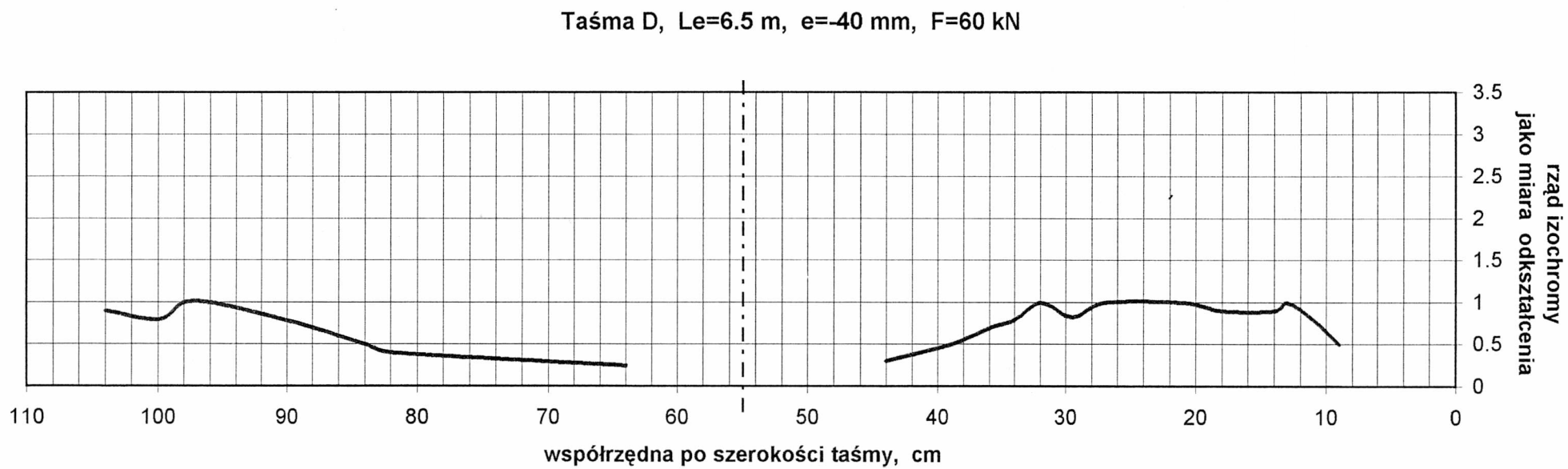
Rys. B.43 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



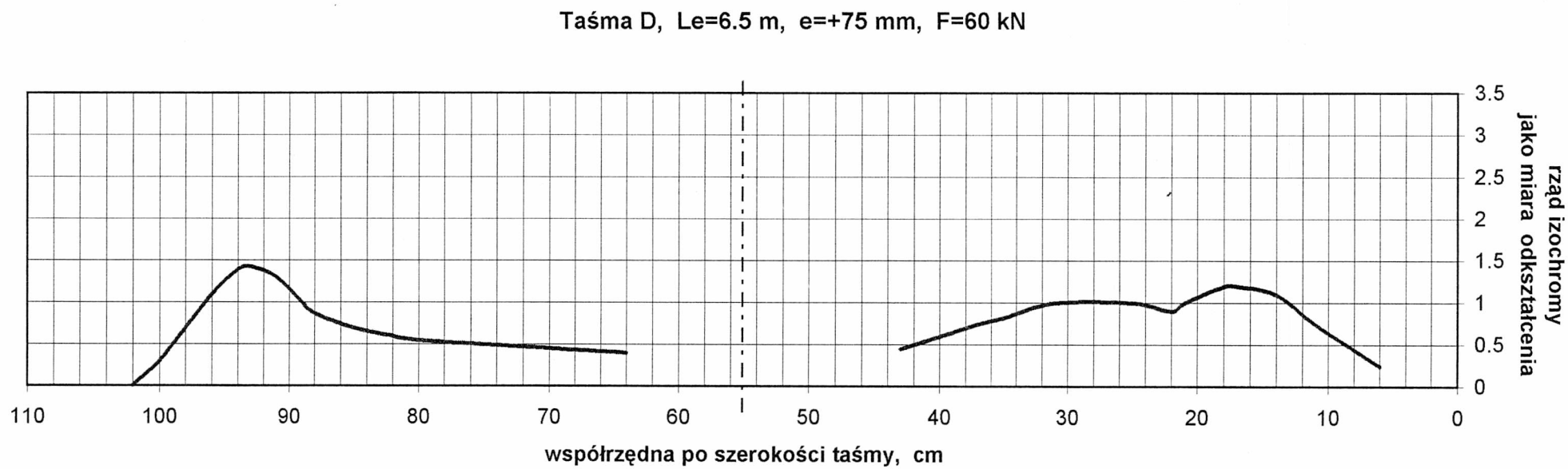
Rys. B.44 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



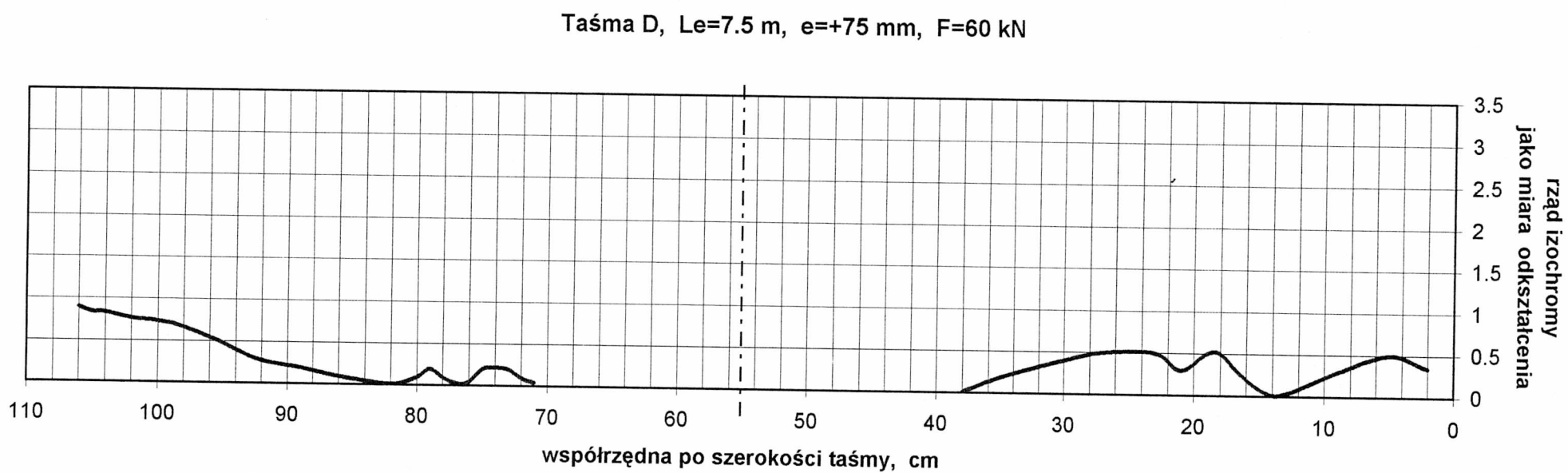
Rys. B.45 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



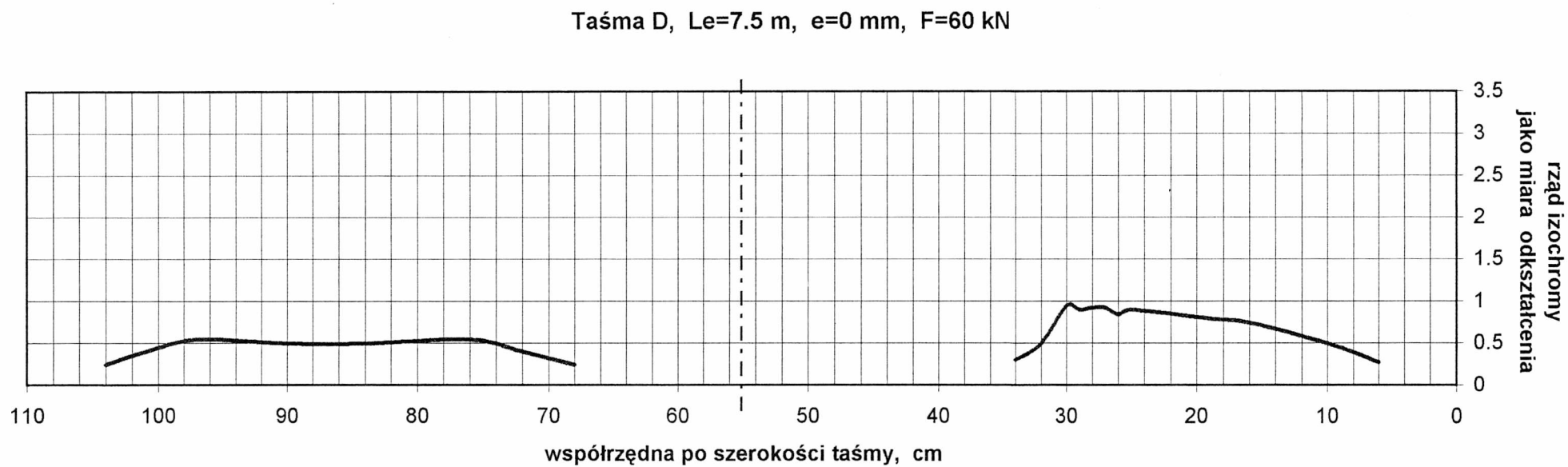
Rys. B.46 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



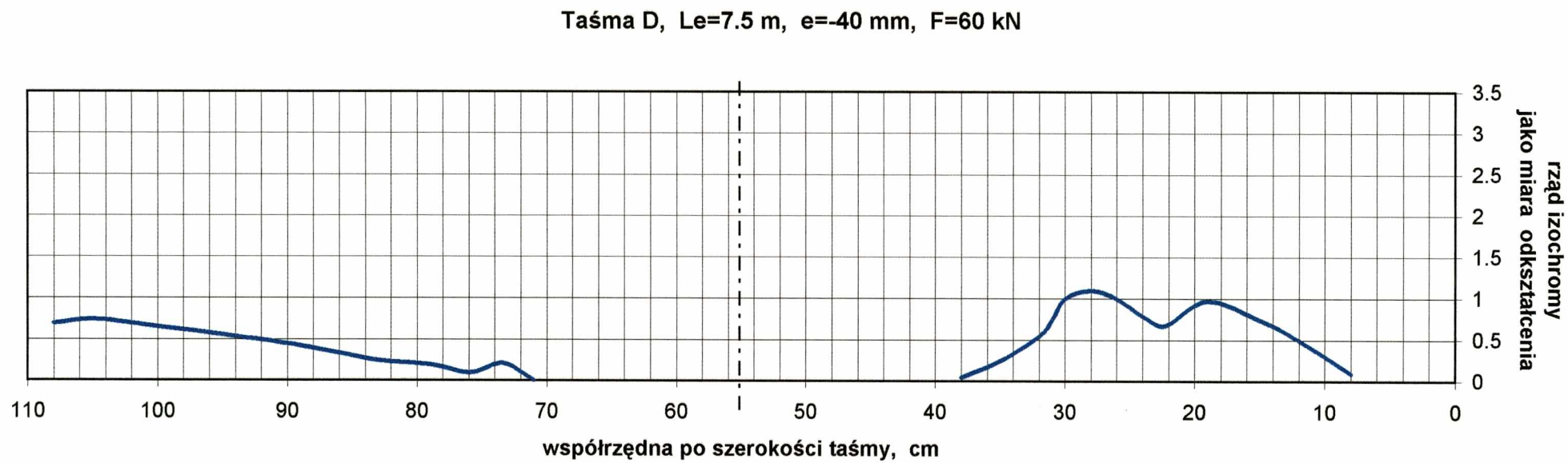
Rys. B.47 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



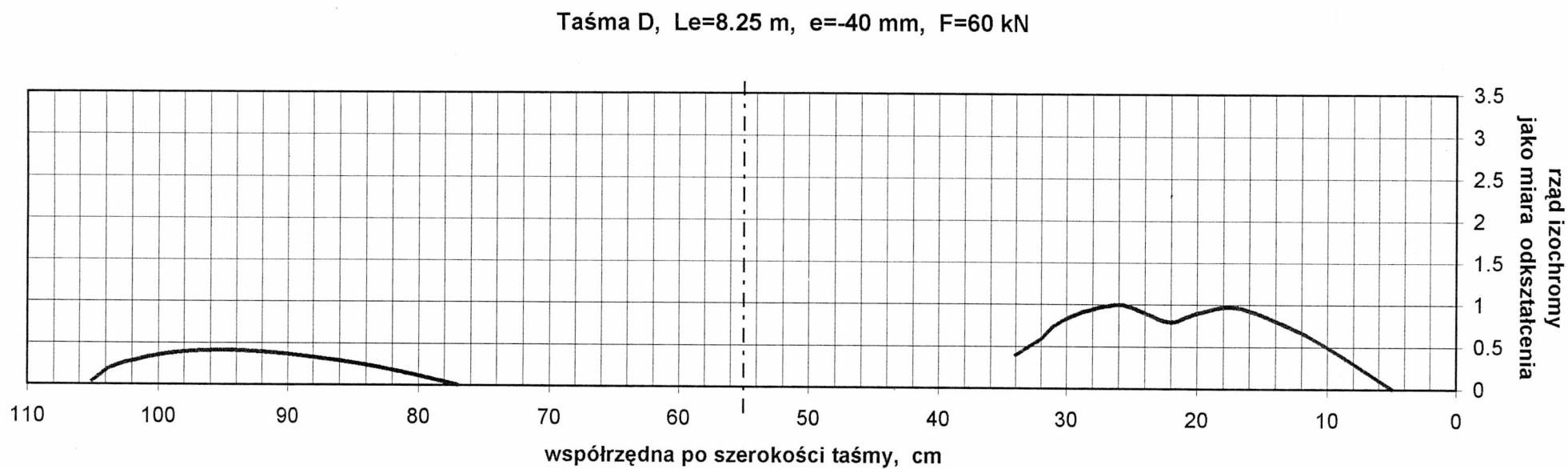
Rys. B.48 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



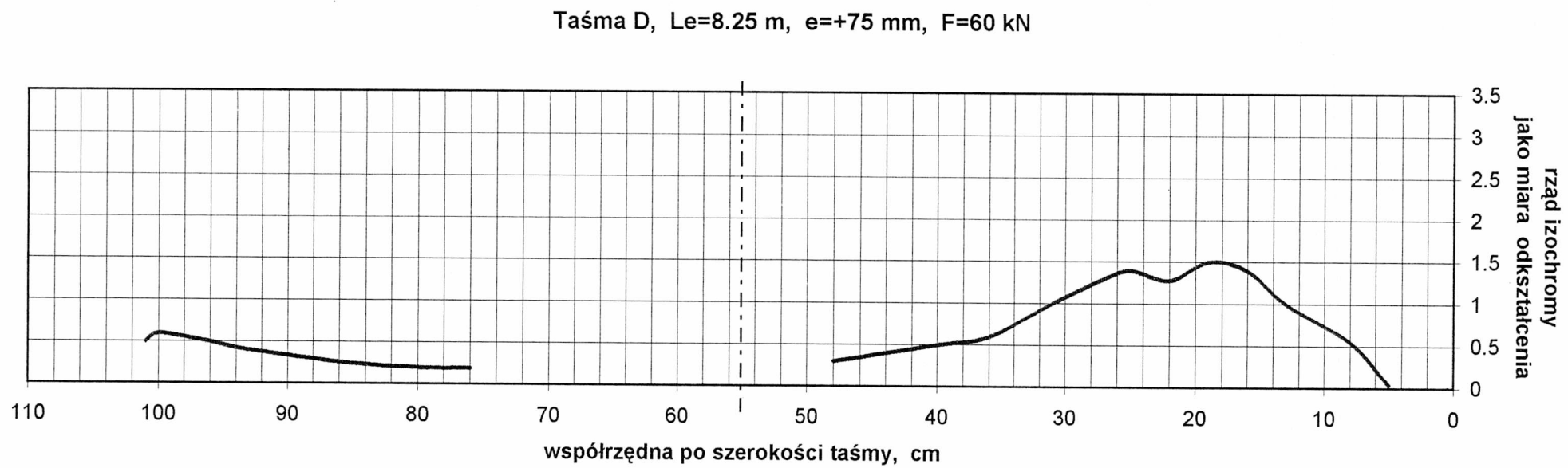
Rys. B.49 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



Rys. B.50 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



Rys. B.51 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna



Rys. B.52 Rozkład różnicy odkształceń głównych po szerokości taśmy w rejonie bębna