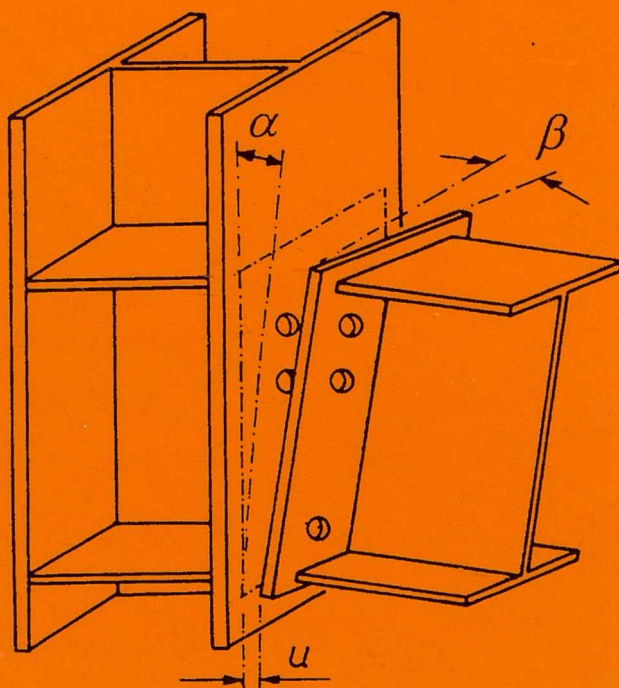


ANTONI BIEGUS

Nośność graniczna śrubowych styków doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Politechnika Wrocławska



Antoni Biegus

**Nośność graniczna
śrubowych styków doczołowych
z imperfekcjami geometrycznymi**

Wrocław 1998

Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

Recenzent
Jan BRÓDKA

Opracowanie redakcyjne i korekta
Danuta SOWIŃSKA

Opracowanie techniczne i skład komputerowy
Antoni BIEGUS

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISBN 83-7085-331-5

Ark. Wyd. 9,5. Ark. Druk. 8,5. Papier offset. Kl. III. 70g. B1
Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. Nr 167/98

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
1. WPROWADZENIE	7
1.1. Wstęp	7
1.2. Przedmiot i cel pracy	14
2. ANALIZA STANU WIEDZY DOTYCZĄCEJ ŚRUBOWYCH. POŁĄCZEŃ DOCZOŁOWYCH	18
3. LOSOWE IMPERFEKCJE GEOMETRYCZNE ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH	39
4. OSZACOWANIE WPŁYWU IMPERFEKCJI ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH NA WYTEŻENIE KONSTRUKCJI	51
4.1. Wprowadzenie	52
4.2. Oszacowanie wyteżenia konstrukcji z wadą styku doczołowego u	54
4.3. Oszacowanie wyteżenia konstrukcji z wadą styku doczołowego v	59
4.4. Oszacowanie wyteżenia konstrukcji z wadą styku doczołowego w	63
4.5. Oszacowanie wyteżenia konstrukcji z wadą styku doczołowego α	67
4.6. Oszacowanie wyteżenia konstrukcji z wadą styku doczołowego β	73
4.7. Oszacowanie wyteżenia konstrukcji z wadą styku doczołowego γ	78
4.8. Analiza montażowego wyteżenia konstrukcji o podatnych węzłach z wadami geometrycznymi styków doczołowych	81
4.9. Synteza analiz oszacowań wyteżeń konstrukcji wywołanych imperfekcjami śrubowych styków doczołowych	91
5. OSZACOWANIE NOŚNOŚCI GRANICZNEJ ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH Z IMPERFEKCJAMI GEOMETRYCZNYMI	93
6. ANALIZA DOPUSZCZALNYCH TOLERANCJI WYKONANIA ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH	109
7. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE	124
LITERATURA	131

PRZEDMOWA

We współczesnych stalowych konstrukcjach budowlanych do scalania elementów wysyłkowo-montażowych na budowie są przede wszystkim stosowane połączenia śrubowe. Z uwagi na sposób wzajemnego usytuowania łączonych elementów oraz wyłączenia łączników, dzieli się je na zakładkowe oraz doczołowe. W połączeniach zakładkowych kierunek głównej składowej obciążenia złącza jest prostopadły do osi łączników. Cechą charakterystyczną połączeń doczołowych jest wyposażenie styków łączonych elementów w blachy czołowe, prostopadłe do osi działającego obciążenia, osie łączników zaś są równoległe do kierunku wyłączenia styku. W połączeniach doczołowych stosuje się zazwyczaj śruby o wysokiej wytrzymałości, które po kontrolowanym dokręceniu ich nakrętek sprężają styk. W modelu obliczeniowym szacowania nośności doczołowych połączeń sprężonych zakłada się idealne przyleganie elementów czołowych łączonych części składowych konstrukcji. Równocześnie w realizowanych konstrukcjach identyfikuje się wady geometryczne styków doczołowych, polegające na braku przylegania blach czołowych w złączach. Imperfekcje geometryczne doczołowych styków śrubowych powodują technologiczne wstępne wyłączenie montażowe konstrukcji, zmniejszenie nośności połączeń prętów w węzłach oraz zmiany prognozowanego zachowania się konstrukcji (wady styków mogą na przykład zmieniać schemat statyczny ustroju).

Analiza następstw występowania integralnych wad śrubowych styków doczołowych prezentowana w pracy ma na celu zwrócenie szczególnej uwagi – zarówno w fazie projektowania, jak i realizacji w warsztatach oraz scalania na budowie – na wagę analizowanego zagadnienia dla bezpieczeństwa i niezawodnej eksploatacji budowli z takimi połączeniami prętów w węzłach. Świadomość konsekwencji występowania wad geometrycznych śrubowych styków doczołowych powinna być analizowana w aspekcie możliwości dotrzymania postulowanej dokładności wykonania konstrukcji przez wykonawcę, a przede wszystkim nakłada na inspektorów dokonujących odbioru konstrukcji obowiązek szczególnie wnikliwej kontroli śrubowych styków doczołowych i niedopuszczalność akceptacji złych, niechlujnych

(prostackich) nawyków budowlanych przedsiębiorstw wykonawczych. Dlatego też prezentowanych badań nie należy rozumieć jako przyzwolenie na występowanie wad złączy doczołowych większych, niż dopuszczają to odpowiednie przepisy zawarte w normach i akceptację złych nawyków montażystów, lecz jako zwrócenie uwagi na jednoznacznie negatywne implikacje występowania imperfekcji połączeń konstrukcji scalanych na śrubowe styki doczołowe i konieczność odrzucania (dyskwalifikacji) elementów nieprawidłowo wykonanych lub też ich naprawę. Równocześnie w pracy dokonano statyczno-wytrzymałościowej analizy następstw występowania wad styków doczołowych i przedstawiono możliwości dopuszczenia ich w konstrukcji, gdy uda się pomniejszyć ich szkodliwość zabiegami montażowymi (pod warunkiem, że w wyniku końcowym ich ujemny wpływ zostanie zminimalizowany).

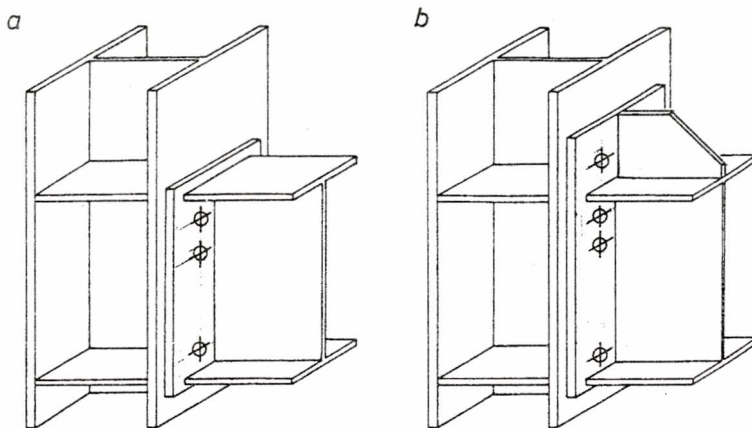
W pracy dokonano identyfikacji rodzajów i źródeł powstawania imperfekcji badanego typu połączeń montażowych oraz przeanalizowano wpływ ich występowania na nośność i bezpieczeństwo konstrukcji z takimi stykami śrubowymi. Zaproponowano sposób szacowania wstępnego technologicznego wyteżenia konstrukcji (montażowych sił wewnętrznych) wywołanego wadami styków doczołowych. Opracowano model obliczeniowy szacowania nośności połączeń doczołowych z imperfekcjami, polegającymi na braku idealnego przylegania blach czołowych scalanych elementów wysyłkowo-montażowych. Dokonano analizy dopuszczalnych tolerancji wykonania śrubowych styków doczołowych w aspekcie ich oddziaływania na nośność graniczną i bezpieczeństwo ustroju. Na podstawie prezentowanych badań i analiz wpływu wad geometrycznych styków śrubowych na nośność graniczną konstrukcji sformułowano wiele praktycznych wniosków dla projektantów oraz wykonawców ustrojów z takimi połączeniami.

Praca jest adresowana do projektantów konstrukcji stalowych, rzeczoznawców budowlanych, inżynierów poszukujących wiedzy dostosowanej do współczesnych potrzeb, wykonawców i inspektorów nadzoru zajmujących się realizacją konstrukcji stalowych. Sformułowano w niej ponadto wiele zadań i zagadnień, które mogą być podjęte jako tematy badawcze dysertacji doktorskich i habilitacyjnych.

1. WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Prostota kształtów śrubowych połączeń doczołowych (rys. 1.1) sprawia, iż są one chętnie stosowane do scalania ramowych konstrukcji stalowych. Złącza tego typu są obliczane i konstruowane tak, aby wykazywały zdolność do przenoszenia momentów zginających M , sił poprzecznych V oraz sił osiowych N .



Rys. 1.1

Zalety wytrzymałościowe tego typu styków montażowych ujawniają się zwłaszcza po ich sprężeniu (przez wprowadzenie naciągu śrub po kontrolowanym dokręceniu nakrętek łączników). W modelu obliczeniowym sprężonych połączeń doczołowych przyjmuje się idealne przyleganie blach czołowych belek (rygli) lub blachy czołowej belki i pasa słupa. Sprężenie

styku przez dokręcenie śrub w złączu wywołuje naprężenia dociskowe w elementach przylgowych (blachach czołowych, pasach słupów) powodując, iż siły wewnętrzne od obciążeń zewnętrznych nie zmieniają amplitud wyteżeń śrub. Brak zmian wyteżeń śrub w sprężonych połączeniach doczołowych jest szczególnie ważny dla konstrukcji obciążonych dynamicznie, gdyż śruby charakteryzuje mała wytrzymałość na obciążenia zmienne.

Prostota i łatwość pasowania elementów wysyłkowo-montażowych w stykach i węzłach mają korzystny wpływ na dokładność montażu. Istotną cechą ważną z tego względu jest możliwość *gubienia* losowych imperfekcji geometrycznych połączeń. Na przykład wykonanie połączenia zakładowego na śruby o otworach owalnych lub z zastosowaniem przyspawanej nakładki jest łatwiejsze niż złącze na śruby pasowane, które wymaga dokładnego ustawienia elementów i *zgrania* otworów na łączniki. Pod tym względem doczołowe połączenia śrubowe (zwłaszcza w obiektach wielokondygnacyjnych i wielonawowych) są trudne technologicznie, z powodu konieczności zapewnienia idealnego przylegania powierzchni przylgowych złączy oraz pasowania otworów w elementach czołowych styku. Położenie elementu w przestrzeni określa 6 parametrów (stopni swobody): trzy współrzędne u , v , w wzdłuż trzech osi x , y , z oraz trzy kąty obrotu wokół tych osi α , β , γ (rys. 1.2). Scalanie elementów wysyłkowo-montażowych, łączonych z zastosowaniem doczołowych styków śrubowych, wymaga ograniczenia tych 6 stopni swobody. Pod tym względem na przykład oparcie słupa na podporze kulistej nieprzesuwnej (możliwy obrót wzdłuż trzech osi) oraz oparcie belki na podporze przegubowo przesuwnej (możliwe przemieszczenia wzdłuż dwóch osi oraz obrót względem jednej osi) wymagają podczas montażu ograniczenia mniejszej liczby stopni swobody niż połączenia doczołowe, a co za tym idzie, są łatwiejsze w montażu. Potrzebna precyzja wykonania doczołowych połączeń śrubowych stawia szczególnie wymagania zarówno przed projektantem, jak i wykonawcą oraz inspektorem nadzoru, gdyż imperfekcje geometryczne takich styków wywołują nie tylko komplikacje w trakcie montażu, ale również powodują zmiany prognozowanego zachowania się konstrukcji. Ponadto rozwarcia wadliwych styków są niedopuszczalne, gdyż tworzą się szczególnie sprzyjające warunki dla korozji konstrukcji stalowych.

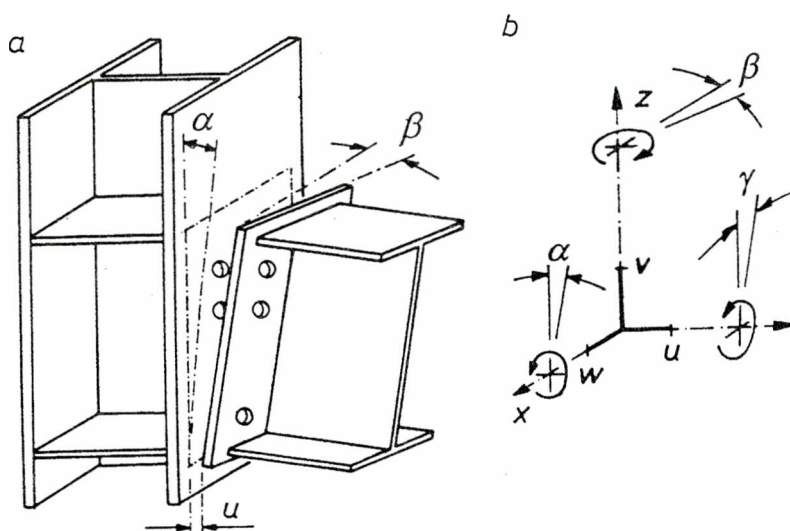
Śrubowe połączenia doczołowe charakteryzuje duża wrażliwość na losowe imperfekcje geometryczne [9], [25], [30], [35], [36], [50]–[52], [58], które powodują nie tylko zmniejszenie nośności złącza, ale mogą wywołać również wstępne wyteżenia technologiczne ustroju nośnego lub jego geometryczną zmienność. W stosowanych modelach obliczeniowych szacowania nośności śrubowych połączeń doczołowych, nie są uwzględniane losowe odchyłki wykonawcze, gdyż zakłada się poprawne wykonanie złączy. Dlatego też w realizacji konstrukcji z tego typu stykami doczołowymi należy ograniczać wielkości wad geometrycznych i zwracać szczególną uwagę na dokładność wykonania elementów wysyłkowo-montażowych ustroju. Graniczne wartości imperfekcji geometrycznych styków określa się na podstawie

analiz statyczno-wytrzymałościowych następstw ich występowania w konstrukcji na nośność i bezpieczeństwo eksploatacji budowli.

Zasadnicze parametry geometryczne styków doczołowych, które należy kontrolować w takim przypadku są następujące:

- kąty nachylenia blach czołowych względem osi podłużnych elementów, tj. odchyłki katowe względem osi przekrojów prętów: silniejszej – α i słabszej – β ,
- skręcenia stykających się powierzchni przylgowych styków względem osi podłużnych prętów; odchyłki katowe – γ ,
- długości elementów ograniczone blachami czołowymi; odchyłka długości elementu – u ,
- odległości między otworami na śruby w obrębie blachy czołowej; odchyłki – Δ ,
- odchyłki osi przekroju poprzecznego pręta i położenia elementów przylgowych; odchyłki liniowe – w i – v w płaszczyźnie stykających się elementów wzdłuż osi przekroju poprzecznego silniejszej i słabszej,
- płaskość powierzchni przylgowych elementów (blach czołowych belek, pasów słupów) połączeń doczołowych; krzywizny powierzchni przylgowych – δ , – ρ ,
- prostoliniowość słupów i belek, do których łączy się śrubowymi stykami doczołowymi elementy prętowe; wstępne mimośrodory osi prętów – e .

Imperfekcje śrubowych styków doczołowych pokazano na rys. 1.2 oraz rys. 2.9, 3.1, 3.2 i 3.4 oraz tabl. 1.2, poz. 5.



Rys. 1.2

Z uwagi na założony model obliczeniowy szacowania nośności styków doczołowych szczególnie ważnym zagadnieniem jest realizacja przylegania powierzchni stykowych złączy

(blach czołowych belek lub blach czołowych belek i pasów słupów). Dlatego też jest istotne zapewnienie odpowiednich kątów stykających się wzajemnie elementów składowych konstrukcji (zminimalizowanie odchyłek kątowych α i β). Najtrudniejsze technologicznie jest uzyskanie odpowiednio płaskich powierzchni styków, co wymaga często wstępnego odchyłania kątowego blach czołowych (aby po wykonaniu spoin odchyłka kątowa była zminimalizowana) oraz stosowania odpowiedniej dla danego rodzaju złącza technologii i kolejności spawania. W razie dużych odchyłek powierzchni przylgowych styków blachy czołowe się frezuje. Jeśli w styku występują duże odchyłki długości elementów łączonych, to stosuje się blachy wypełniające o indywidualnie dobieranych grubościach.

Eurokod 3 [61] zaleca stosowanie blach wypełniających (przekładek) o grubościach minimalnych: 2 mm dla styków w konstrukcjach nie narażonych na bezpośrednie oddziaływanie czynników atmosferycznych i 4 mm w przypadku styków nie osłoniętych.

Śrubowe połączenia doczołowe z zastosowaniem łączników o wysokiej wytrzymałości rozpoczęto stosować w Polsce na szerszą skalę w latach siedemdziesiątych; aktualna wówczas norma dotycząca warunków wykonania i odbioru konstrukcji stalowych nie podawała informacji na temat realizacji takich styków. Wynikiem obszernych badań śrubowych połączeń doczołowych przeprowadzonych w Centralnym Ośrodku Badawczo-Projektowym Konstrukcji Stalowych *Mostostal* w Warszawie było opracowanie między innymi pierwszych wytycznych [54] dotyczących obliczania i realizacji takich połączeń.

Wytyczne projektowania wykonania i odbioru doczołowych połączeń elementów konstrukcji stalowych sprężonych śrubami o wysokiej wytrzymałości [54] podają tolerancje wykonania elementów styków doczołowych, które są zamieszczone w tabl. 1.1.

Tablica 1.1. Tolerancje wykonania elementów łączonych na doczołowe styki śrubowe [54]

1	Odchyłki długości rygli ram [mm] (ujemne)	Długość elementu [m]				
		2–4	4–8	8–16	16–32	ponad 32
		–2	–3	–5	–8	–12
2	Odchyłki między kątami cięcia obu końców kształtownika oraz kąta teoretycznego na wysokości profilu [mm]	Wysokość kształtownika <i>h</i> [mm]				
		≤500		500–1000	1000–2000	
		2	3	4		
3	Odchyłki odległości między otworami w styku	± 0,5 mm				
4	Odchyłki płaskości powierzchni stykowych	–1 mm na odcinku 500 mm				

Według [54] długość elementów wysyłkowo-montażowych ram należy wykonywać w tolerancjach ujemnych, a wielkość odchyłki u jest uzależniona od rozpiętości łączonego elementu i wynosi od 2 do 12 mm. W pozycji 2. tabl. 1.1 podano odchyłkę kątową α (rozwartość szczeliny w styku), uzależniając ją od wysokości łączonego dźwigara. Stosowane w połączeniach doczołowych otwory średnio dokładne należy według [54] wykonać z dokładnością odległości między nimi $\pm 0,5$ mm. Odchyłka płaskości powierzchni przylgowych styku doczołowego nie powinna według [54] przekraczać 1 mm na odcinku 500 mm. Należy zauważyć, iż wielkości tolerancji wykonania elementów łączonych doczołowo według [54] są odnoszone do wymiarów (długości i wysokości elementów) skalanych w ustrój nośny prętów i nie zależą one od sztywności tych prętów oraz sztywności konstrukcji (prętów, węzłów). Potrzeba uzależnienia wielkości dopuszczalnej imperfekcji styków doczołowych od sztywności zarówno elementu łączonego, jak i sztywności konstrukcji, do której jest łączony element z wadliwym stykiem wynika z faktu, iż redystrybucja sił wewnętrznych, związana z likwidacją imperfekcji po dokręceniu śrub w styku, zależy od parametrów sztywnościowych i geometrycznych całego ustroju. W wytycznych [54] nie określono dopuszczalnych wielkości wad kątowych β (odchyłek nachylenia blach czołowych względem słabszej osi przekroju) oraz γ (skręceń blach czołowych w płaszczyźnie styku), a także wad liniowych v i w (przemieszczeń pionowych i poziomych blach w płaszczyźnie styku).

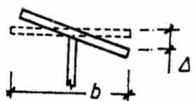
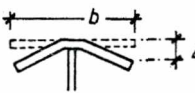
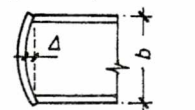
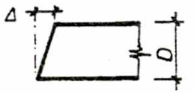
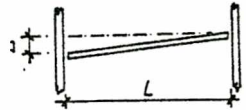
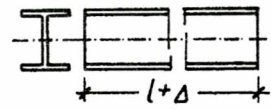
Proponowane według [54] dopuszczalne odchyłki styków doczołowych ograniczały się jedynie do tolerancji wykonania elementów z takim typem złącza i nie podawały ograniczeń niedokładności wykonania całości konstrukcji (na przykład losowych strzałek wygięcia słupów e , losowego usytuowania osi słupów i osi belek v oraz w), które również mogą wywierać wpływ na wystąpienie wstępnych wyiężeń ustroju. W związku z ukazaniem się normy [65] wytyczne [54] są nieaktualne.

Obecnie obowiązująca norma dotycząca wymagań, warunków wykonania i odbioru budowlanych konstrukcji stalowych [65] w kilku miejscach odnosi się do zagadnień dokładności wykonania konstrukcji z zastosowaniem śrubowych styków doczołowych. Wielkości dopuszczalnych odchyłek wykonania konstrukcji oraz montażu według [65], związane z omawianym zagadnieniem zestawiono w tabl. 1.2.

W punkcie 4.5 norma [65] określa wymagania dotyczące powierzchni docisku żądając, by były spełnione wymagania prostopadłości do kierunku docisku według poz. 4. w tabl. 1.2. Ponadto w punkcie 4.7.8 norma [65] określa wymagania płaskości powierzchni kontaktowych styków. Szczelina w dowolnym kierunku, pod liniałem przyłożonym do powierzchni stykowych elementów przewidzianych do *stykowania*, nie może być większa niż 0,5 mm.

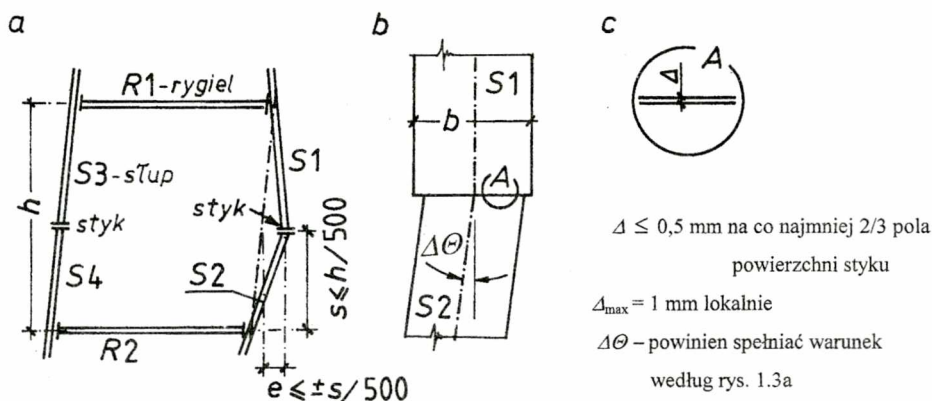
Odchyłka długości L od wymiarów nominalnych elementów wysyłkowo-montażowych, obrobionych do styku dociskowego (tabl. 1.2, poz. 8.), mierzona w osi lub w narożu nie może przekraczać $\pm (1 \text{ mm} + L/10\,000)$.

Tablica 1.2. Wybrane odchyłki dopuszczalne według PN-96/B-06200 [65]

Nr	Rodzaj odchyłki	Parametr	Odchyłka dopuszczalna
1	Prostotałość pasów 	Odchyłka od kąta prostego	$ \Delta = \text{większa z:}$ (0,01b; 5 mm)
2	Płaskość pasów 	Odchyłka od płaskości:	$ \Delta = \text{większa z:}$ (b/150; 3 mm)
3	Deformacja blachy 	Deformacja Δ blachy:	$ \Delta = \text{większa z:}$ (b/150; 3 mm)
4	Prostokątność krawędzi 	Prostotałość do osi podłużnej: – część nieobrobiona dla podparcia dociskowego, – część obrobiona dla podparcia dociskowego	$\Delta = \pm D/300$ $\Delta = \pm D/1000$
5	Położenie otworów okrągłych 	Odchyłka Δ osi otworu od jego projektowanego położenia w grupie otworów	$\Delta = \pm 2 \text{ mm}$
6	Przesunięcia osi słupów 	Usytuowanie w planie osi słupa w poziomie stopy w stosunku do położenia projektowanego	$\Delta = \pm 5 \text{ mm}$
7	Poziom belki w połączeniu ze słupem 	Poziom na przeciwnym końcu belki	$ \Delta = \text{mniejsza z:}$ (0,002 L; 10 mm)
8	Długość 	Długość mierzona w osi lub w narożu z pasem – elementów na obu końcach obrobionych do styków doczołowych, – pozostałych elementów	$\Delta = \pm(1\text{mm} + L/10\ 000)$ $\Delta = \pm(2 \text{ mm} + L/1000)$

Odchyłka Δ osi otworu od jego projektowanego położenia w grupie otworów (poz. 5. w tabl. 1.2) nie powinna przekraczać ± 2 mm.

W punkcie 7. dotyczącym montażu norma [65] żąda, aby w doczołowych połączeniach, w których jest wymagany docisk na całej powierzchni styku blach czołowych, szczeliny po dokręceniu śrub nie powinny być większe niż podano na rys. 1.3. Jeśli w styku występują szczeliny większe, to należy stosować odpowiednio dopasowane podkładki z miękkiej stali, których liczba nie powinna być większa niż trzy i powinny być one ustabilizowane spoinami.



Rys. 1.3

Występujące w ustroju, przedstawione w tablicy 1.2, wybrane dopuszczalne odchyłki geometryczne osi systemu konstrukcyjnego oraz wykonania elementów wysyłkowo-montażowych mogą wywoływać komplikacje montażowe nawet wtedy, gdy śrubowe styki doczołowe zostały wykonane poprawnie.

Dlatego też zagadnienie imperfekcji doczołowych połączeń montażowych należy analizować z uwzględnieniem wad geometrycznych elementów składowych i systemu konstrukcyjnego. W odniesieniu do słupów norma [65] ogranicza wielkość losowego mimośrodu osi do 5 mm (wiersz 6 tabl. 1.2), odchyłka zaś usytuowania belki (rygla) na przeciwnych końcach (wiersz 7 tabl. 1.2) nie powinna przekraczać wartości mniejszej z: $0,002 L$ oraz 10 mm (przy czym L – rozpiętość belki). Norma [65] określa ponadto wiele innych imperfekcji, na przykład w wierszu 1 i 2 tabl. 1.2 podano odchyłkę prostopadłości pasa do środniczki oraz płaskości pasa w spawanym z blach dźwigarze dwuteowym, która może sięgać od 3 do 5 mm. Deformacje blachy oraz brak prostopadłości krawędzi elementów mogą sięgać kilku milimetrów (wiersz 3 i 4 tabl. 1.2).

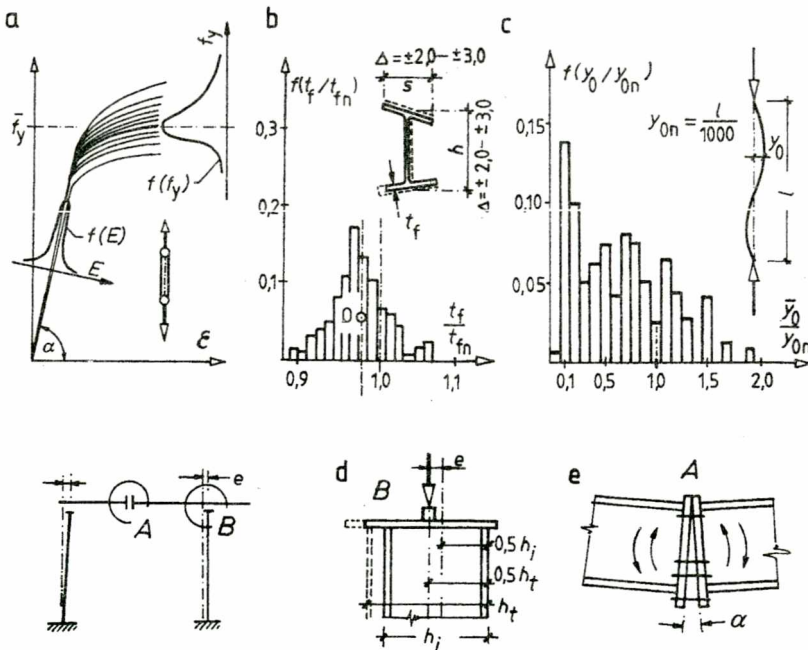
Analizując wymagania [65] w odniesieniu do tolerancji wykonania połączeń doczołowych należy stwierdzić, iż są one rygorystyczne i mogą być wyegzekwowane w obiektach realizowanych przez wytwórnie dysponujące odpowiednim oprzyrządowaniem i specjalistami o wysokich kwalifikacjach.

1.2 Przedmiot i cel pracy

W budowlanych prętowych systemach konstrukcyjnych wyróżnić można elementy sprawcze (krytyczne) w postaci prętów (belek, słupów) oraz węzłów (styków). Bezpieczeństwo systemu konstrukcyjnego w ujęciu normy PN-90/B-03200 [63] sprowadza się do kontroli stopnia wykorzystania nośności elementów sprawczych w odniesieniu do prognozowanych sił wewnętrznych, które mogą w nich wystąpić.

Element sprawczy (krytyczny) definiuje się jako część systemu konstrukcyjnego, na przykład: pręt, przekrój elementu, połączenie, których nośność można analizować niezależnie. Nośność graniczna elementów sprawczych jest funkcją losową $R(\omega)$. Na losowość (ω) nośności $R(\omega)$ składa się wiele czynników, z których najważniejszymi są następujące:

- losowa wytrzymałość materiału – $f_y(\omega)$ (rys. 1.4a),
- losowe charakterystyki geometryczne przekrojów poprzecznych prętów, na przykład: $A(\omega)$, $W(\omega)$, $J(\omega)$ (rys. 1.4b),
- losowe imperfekcje geometryczne osi prętów (mimośrod osi prętów) – $y_0(\omega)$, (rys. 1.4c),
- losowe imperfekcje systemu konstrukcyjnego (wywołujące na przykład mimośrod przekazywania obciążeń) – $e(\omega)$, (rys. 1.4d),
- losowe imperfekcje technologiczno-konstrukcyjne (na przykład wady kątowe styków doczołowych – $\alpha(\omega)$, rys. 1.4e).



Rys. 1.4

Na rysunku 1.4a pokazano losowe realizacje ścieżek równowagi statycznej stali $\sigma(\varepsilon)$ uzyskane w statycznych próbach wytrzymałościowych.

Na rysunku 1.4b pokazano histogram losowego rozkładu grubości pasów dwuteowników, uzyskany z badań populacji $n = 5000$ sztuk [2].

Na rysunku 1.4c pokazano histogram wstępnych imperfekcji geometrycznych osi prętów ściskanych, uzyskany dla zbadanej populacji $n = 85$ elementów [49].

Na rysunku 1.4d pokazano wpływ losowej geometrii systemu konstrukcyjnego na mimośrodowe wyężenie słupa.

Na rysunku 1.4e pokazano wadę braku przylegania blach przylgowych w śrubowym styku doczołowym.

Przedmiotem pracy jest analiza i synteza wpływu losowych imperfekcji geometrycznych doczołowych styków śrubowych na nośność zarówno połączeń, jak i konstrukcji z wadliwymi złączami.

W pracy będą więc rozważone styki doczołowe, rozciągane i zginane, w których kierunek głównej składowej obciążenia złącza jest równoległy do osi śrub. Przyjmuje się, iż styki doczołowe są obarczone wstępnymi imperfekcjami niedoskonałości wykonania połączeń jako wielkości integralnej, stanowiącej sumę losowych odchyłek geometrycznych przekroju poprzecznego (rys. 1.4b), losowych wygięć osi prętów (rys. 1.4c), losowych osi systemu konstrukcyjnego (rys. 1.4d) oraz losowych imperfekcji wykonawstwa warsztatowego złącza (rys. 1.4e).

Losowe wady kształtu przekrojów poprzecznych prętów, osi podłużnych elementów wysyłkowo-montażowych, osi geometrycznych systemu konstrukcyjnego oraz geometrii styków doczołowych są stochastycznie niezależne. W przyjętym modelu obliczeniowym szacowania wyężenia konstrukcji z imperfekcjami geometrycznymi zgrupowano je w wielkość integralną, przyporządkowaną śrubowym stykom doczołowym (generującą losową nośność graniczną połączenia oraz ustroju z wadliwymi złączami śrubowymi).

Celem pracy jest analiza wyężenia elementów prętowych ustroju oraz doczołowych styków śrubowych, a także zachowania się konstrukcji z takimi połączeniami prętów w węzłach, przy czym zakłada się, iż złącza doczołowe są obarczone integralnymi losowymi imperfekcjami geometrycznymi. W pracy dokonano identyfikacji mechanizmów powstawania montażowych sił wewnętrznych w prętach i śrubowych stykach doczołowych, wywołanych losowymi imperfekcjami geometrycznymi połączeń większymi niż podaje norma [65] i dociąganiem śrub w złączach, a także następstw występowania wad w połączeniach na nośność graniczną, zmianę schematu statycznego oraz prognozowane zachowanie się konstrukcji.

Aplikacyjnym wynikiem prowadzonych badań jest opracowanie propozycji szacowania wstępnego losowego wyężenia technologicznego ustroju scalanego, z zastosowaniem śrubowych styków doczołowych, obarczonych wstępnymi imperfekcjami geometrycznymi,

(która może być wykorzystana przez rzeczoznawców opracowujących opinie o takich obiektach). Zaproponowano ponadto modele obliczania nośności śrubowych połączeń doczołowych, w których występują wady geometryczne (w złożonych stanach wyłączenia). Na podstawie wykonanych badań oraz analiz zaproponowano kryteria ustalania tolerancji wykonania warsztatowego, montażu i odbioru konstrukcji stalowych, łączonych na doczołowe styki śrubowe, a także podano wskazówki dotyczące projektowania i konstruowania takich połączeń.

Obliczeniowego podejścia do szacowania wyłączenia konstrukcji z integralnymi wadami styków doczołowych nie można ująć metodą ogólną, gdyż wady ustroju bywają różne, a skutki ich występowania zależą również, między innymi, od schematu statycznego, schematu obciążenia, schematu geometrycznego systemu konstrukcyjnego oraz technologii montażu. Dlatego też w pracy zwrócono szczególną uwagę na wyjaśnienie mechanizmów powstawania technologicznych montażowych wyłączeń ustroju, stanowiących następstwo patologicznych metod realizacji konstrukcji z takimi wadliwie wykonanymi połączeniami. Identyfikacja źródeł powstania i następstw występowania integralnych wad śrubowych styków doczołowych konstrukcji prętowych ma na celu zwrócenie szczególnej uwagi, zarówno w fazie projektowania, jak i realizacji w warsztatach oraz scalania na budowie, na wagę analizowanego zagadnienia dla bezpieczeństwa i niezawodnej eksploatacji budowli z takimi połączeniami prętów w węzłach.

Nieuniknione występowanie wad jest oczywiste i uwzględniają je normy [65], [66] w postaci określonych (ograniczonych) wartości odchyłek podczas wytwarzania i montażu elementów konstrukcji stalowych. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe konstrukcji, z rozważanym typem śrubowych styków doczołowych, prowadzi się zakładając idealną geometrię systemu konstrukcyjnego oraz idealne przyleganie stykających się elementów przyłgowych w węźle. Występujące w metodzie stanów granicznych [63] częściowe współczynniki bezpieczeństwa uwzględniają losowe cechy niejednorodności materiału oraz losowych imperfekcji geometrycznych przekroju pręta, osi pręta i całej konstrukcji nie przekraczających wartości podanych w normie [65]. Występowanie integralnych wad styków doczołowych przekraczających wartości graniczne podane w normie [65] stanowi istotne odstępstwo od założonego modelu, gdyż prowadzi do innej redystrybucji sił wewnętrznych w ustroju oraz zmienia prognozowane zachowanie się konstrukcji. W takim przypadku jest niedopuszczalna akceptacja konstrukcji z wadami większymi niż graniczne według [65] i wyrażenie zgody na jej eksploatację bez naprawy imperfekcji połączeń lub oszacowania zmniejszonej nośności oraz bezpieczeństwa ustroju. Świadomość następstw występowania wad geometrycznych śrubowych styków doczołowych powinna być analizowana w aspekcie możliwości dotrzymania postulowanej dokładności wykonania konstrukcji przez wykonawcę, a przede wszystkim nakłada na inspektorów dokonujących odbioru konstrukcji obowiązek szczególnie wnikliwej kontroli takich połączeń śrubowych.

Podsumowując należy wyraźnie podkreślić, iż zasadniczym celem pracy jest analiza i synteza jednoznacznie negatywnych implikacji występowania imperfekcji połączeń konstrukcji scalanych na śrubowe styki doczołowe. Dlatego też prezentowanych badań nie należy rozumieć jako przyzwolenie na występowanie wad złączy doczołowych, lecz zwrócenie uwagi zarówno projektantom, jak i wykonawcom oraz dozorowi technicznemu na ważność poprawnej realizacji konstrukcji z takim typem połączeń.

2. ANALIZA STANU WIEDZY DOTYCZĄCEJ ŚRUBOWYCH POŁĄCZEŃ DOCZOŁOWYCH

Z uwagi na sposób wzajemnego usytuowania łączonych elementów oraz wyłączenie łączników, połączenia śrubowe dzieli się na zakładkowe i doczołowe.

Połączenia zakładkowe, w których kierunek głównej składowej wyłączenia jest prostopadły do osi łączników, przenoszą siły wewnętrzne przez ścinanie łączników i docisk trzpieni śrub do ścianek otworów, a w przypadku sprężenia złączy przez tarcie powierzchni stykających się elementów.

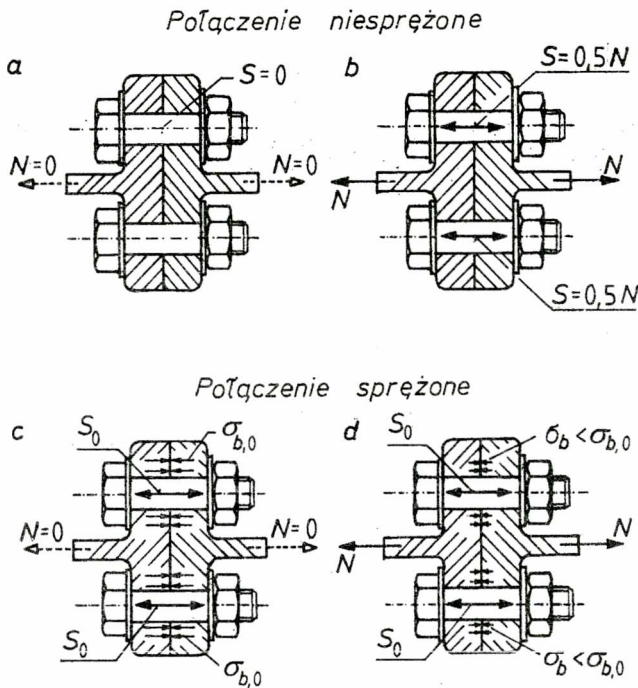
Połączenia doczołowe są stosowane w stykach i węzłach ram pełnościennych, a także niekiedy w stykach prętów kratownic i do łączenia ściągów (rys. 2.3). W ogólnym przypadku wyłączenia przenoszą momenty zginające M , siły podłużne N , siły poprzeczne V i wówczas mamy do czynienia z połączeniem ścinanym i rozciągany (od momentu M i siły podłużnej N). W takich złączach kierunek głównej składowej obciążenia jest równoległy do osi łączników. Połączenia doczołowe niesprężone przenoszą siły przez rozciąganie śrub. Sprężenie tych połączeń umożliwia przekazywanie obciążeń rozciągających wskutek zmniejszenia naprężeń dociskowych w stykach między blachami czołowymi (rys. 2.1d). Połączenie doczołowe charakteryzuje mała odkształcalność oraz znaczna nośność.

W połączeniach zwykłych (niesprężanych) siły wewnętrzne w styku M , N i V powodują ścinanie, docisk i rozciąganie trzpienia śruby. Sprężenie tych połączeń umożliwia przekazywanie obciążeń rozciągających od M i N , wskutek zmniejszenia naprężeń dociskowych w strefie rozciąganej styku, podczas gdy siła ścinająca V jest przenoszona przez tarcie między powierzchniami przylgowymi łączonych elementów w ściskanej części złącza.

Cechą charakterystyczną śrubowych połączeń doczołowych jest wyposażenie styku łączonych elementów w blachy czołowe (prostopadle do osi działającego obciążenia) z otworami na łączniki. W otworach blach czołowych są umieszczone śruby, których osie są równoległe do wypadkowej sił wewnętrznych w styku. W złączach tych wykorzystuje się zdolność śrub do przenoszenia sił rozciągających. Dlatego też, z uwagi na charakter wyłącze-

nia, w złączach takich są preferowane śruby o wysokiej wytrzymałości klasy 8.8, 10.9, 12.9. W przypadku doczołowych połączeń niesprężanych trzpienie śrub są rozciągane po wystąpieniu obciążeń w złączy (patrz rys. 2.1b). Przed wystąpieniem obciążenia w połączeniu trzpienie śrub nie są wyteżone (rys. 2.1a).

W śrubowych, doczołowych połączeniach sprężanych dokonuje się wstępnego naciągu śrub w złączy, wskutek czego trzpienie łączników są rozciągane przed wystąpieniem obciążeń w stykach (rys. 2.1c).



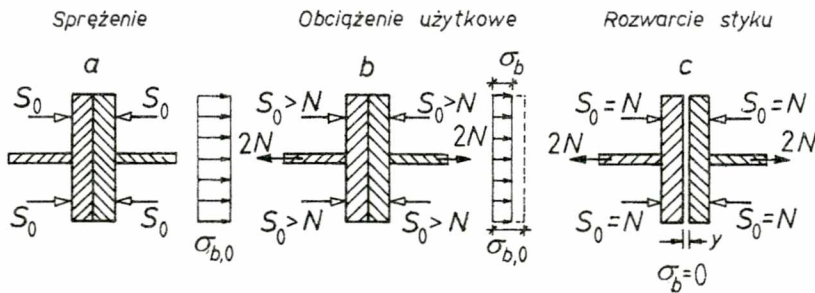
Rys. 2.1

Przedstawione na rysunku 2.1 schematy wyteżenia śrubowych styków doczołowych można przyjmować dla symetrycznie skonstruowanych i obciążonych połączeń o dostatecznie grubych blachach czołowych. W szacowaniu nośności granicznej rzeczywistych śrubowych połączeń doczołowych uwzględnia się odkształcalność blach czołowych (efekt dźwigni według normy [63]) oraz nierównomierny rozdział sił w łącznikach (według [63] przyjmuje się współczynniki rozdziału wyteżeń śrub ω). W modelu obliczeniowym sprężonych połączeń doczołowych, w których wprowadza się wstępny naciąg (sprężenie) trzpieni śrub przez dokręcenie nakrętek łączników zakłada się, że idealnie przylegające do siebie blachy są sprężyste i odpowiednio grube.

W doczołowych śrubowych stykach sprężonych analizuje się następujące stany graniczne:

- nośności, w którym naprężenia w śrubie osiągają wytrzymałość na rozciąganie materiału łącznika,
- rozwarcia połączenia, w którym określa się najmniejsze obciążenie powodujące zanik naprężeń normalnych (dociskowych σ_b) w styku między blachami czołowymi wokół śrub.

Projektowanie doczołowych połączeń sprężonych ze względu na rozwarcie styku jest uzasadnione w złączach obciążonych dynamicznie, aby zapobiec zmęczeniu stali w śrubach, a także wtedy, gdy jest wymagana duża sztywność połączeń. Bezpieczeństwo eksploatacji sprężonych, doczołowych połączeń śrubowych (zarówno zginanych, jak i rozciąganych), jest uzależnione [63] od spełnienia warunku, aby obciążenie zewnętrzne nie spowodowało rozwarcia styku. Będzie to występowało podczas zaniku naprężeń docisku między blachami czołowymi wokół najbardziej wyężonej śruby. Schemat wyężenia śrubowego styku doczołowego w kolejnych fazach obciążania przedstawiono na rys. 2.2.

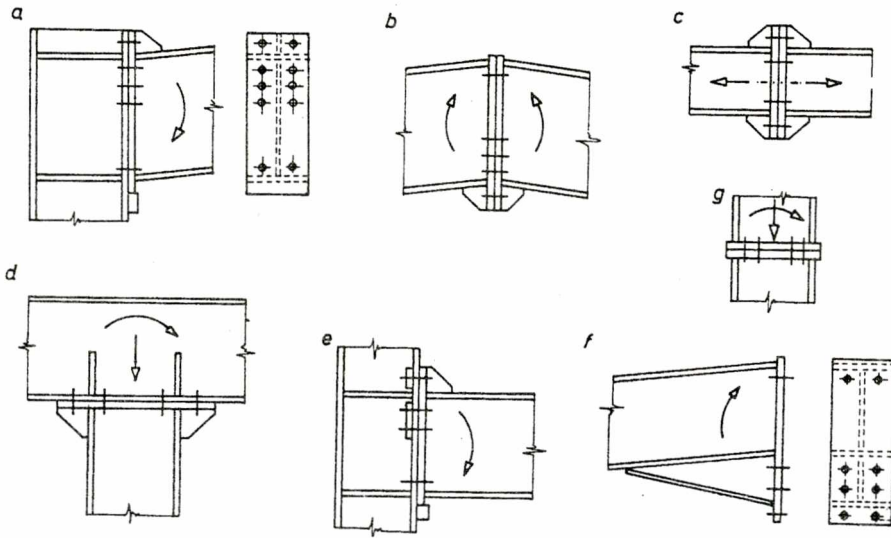


Rys. 2.2

Obszerne informacje dotyczące wyężenia, obliczania i projektowania śrubowych połączeń doczołowych podano w pracach [6], [11], [38], [42]. W pracach [4], [39] podano informacje dotyczące obliczania i konstruowania rozważanego typu połączeń, dla przypadków nie ujętych w normie [63]. Są one wynikiem obszernych badań doświadczalnych, przeprowadzonych na doczołowych stykach belek dwuteowych z różną liczbą śrub w złączach, wykonanych przez Jana Augustyna, Jana Łagunę i Władysława Śliwkę [3], [4], [38], [39] w Centralnym Ośrodku Badawczo-Projektowym Konstrukcji Metalowych *Mostostal* w Warszawie.

Na rysunku 2.3 pokazano charakterystyczne śrubowe połączenie doczołowe, służące do scalania podczas montażu stalowych elementów wysyłkowo-montażowych. Na rysunku 2.3a przedstawiono styk słupa z ryglem, na rysunku 2.3b zaś styk montażowy rygla w środku rozpiętości w ramie portalowej. Montażowy styk ściągę obciążonego podłużną siłą rozciągającą pokazano na rysunku 2.3c. Połączenie doczołowe słupa obciążone momentem zginającym i siłą podłużną (na przykład w ramie wielokondygnacyjnej) pokazano na rysunku 2.3g.

Doczołowy uźebrowany styk montażowy ciągłego rygla ze słupem przedstawiono na rysunku 2.3d. Połączenie doczołowe ciągłego słupa z belką w ramie wielokondygnacyjnej pokazano na rysunku 2.3e. W połączeniu tym, oprócz żeber usztywniających środek słupa, zastosowano w złączu podkładki (*blachy tylne*) pod śrubami, zwiększające nośność i sztywność pasa słupa w miejscu przekazywania obciążenia przez belkę. Na rysunku 2.3f przedstawiono konstrukcję doczołowego połączenia rygla z tzw. trzecim pasem. W przypadku doczołowych połączeń belek wysokich stosuje się również blachy czołowe, składające się z kilku części, które pokazano na rysunku 7.2c.



Rys. 2.3

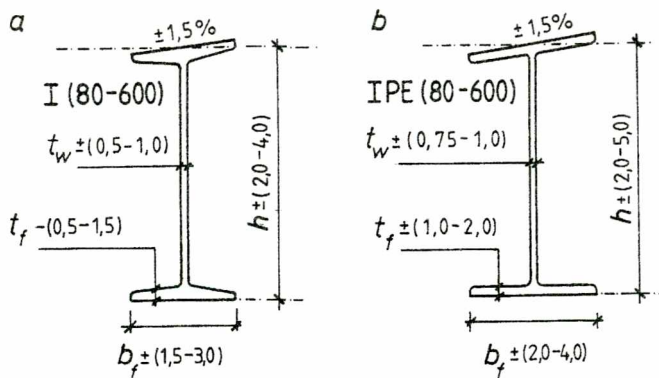
Jak już wspomniano, podstawowym założeniem w stosowanym modelu obliczeniowym szacowania nośności śrubowych połączeń doczołowych [63] jest idealnie przyleganie stykających powierzchni przylgowych złącza. Taka sytuacja będzie występowała wówczas, gdy powierzchnie przylgowe blach będą frezowane i konstrukcja będzie wykonana bez wstępnych imperfekcji geometrycznych styków.

Rzeczywiste wymiary elementów wysyłkowo-montażowych, z których scala się ustrój nośny, różnią się od parametrów geometrycznych założonych przez projektanta. Wynika to przede wszystkim z niedoskonałości wykonania, powstających w kolejnych fazach produkcji i te imperfekcje nakładają się na siebie. Powstawanie niedoskonałości geometrycznych elementów wysyłkowo-montażowych rozpoczyna się w hucie w trakcie formowania kształtowników stalowych, a kończy się po zmontowaniu obiektu na placu budowy.

Oprócz niedoskonałości geometrycznych elementy wysyłkowo-montażowe są obarczone wstępnymi imperfekcjami technologicznymi, które rozumie się jako naprężenia wstępne, rozłożone nierównomiernie w obszarze przekroju poprzecznego elementów, a także na ich długości. Są to naprężenia normalne, zwykle wzdłuż osi pręta, które w przekroju poprzecznym tworzą układ zrównoważony, tak że ich wypadkowa równa się zeru. Powstanie naprężeń wstępnych (reszkowych, rezydualnych) powoduje, że w elementach konstrukcji, jeszcze przed przyłożeniem obciążeń zewnętrznych, mogą występować naprężenia normalne, o dużych wartościach. Naprężenia te, sumując się z naprężeniami od przyłożonych obciążeń zewnętrznych, mogą spowodować przyspieszenie wystąpienia uplastycznienia materiału. W tym sensie występujące naprężenia wstępne są imperfekcją zmniejszającą nośność elementu. Najważniejszymi procesami wytwórczymi, w których powstają naprężenia wstępne są walcowanie, spawanie, a także prostowanie i gięcie na zimno. W pracy nie rozważa się imperfekcji technologicznych związanych z naprężeniami walcowniczymi i spawalniczymi.

W trakcie całego procesu realizacji części składowe elementów wysyłkowo-montażowych są poddawane różnego rodzaju zabiegom technologicznym: walcowaniu (tolerancje walcownicze), trasowaniu (błędy pomiaru), cięciu i wierceniu otworów (niedoskonałości narzędzi obróbki), spawaniu (odkształcenia spawalnicze), transportowi (odkształcenie transportowe) i w końcu montażowi. Niedoskonałości większości z tych procesów technologicznych tworzą imperfekcje geometryczne elementów wysyłkowo-montażowych. Dlatego też w rzeczywistych stykach doczołowych należy liczyć się z występowaniem imperfekcji geometrycznych, które objawiają się brakiem idealnego przylegania stykających się elementów (np. blach czołowych, blach czołowych belek i pasów słupów). Podzielono je umownie na trzy grupy:

- imperfekcje losowej geometrii przekrojów poprzecznych kształtowników łączonych prętów,
- imperfekcje losowej geometrii osi podłużnych łączonych elementów,
- niedoskonałości wykonania śrubowych styków doczołowych.



Rys. 2.4

Konstruując połączenia doczołowe zakłada się idealne kształty geometryczne przekrojów poprzecznych łączonych elementów. Wymiary i charakterystyki geometryczne elementów składowych stalowych konstrukcji budowlanych (na przykład wyrobów hutniczych), podawane w normach i katalogach [14], dotyczą wartości nominalnych. W rzeczywistości wymiary przekroju poprzecznego profilu są obciążone losowymi odchyłkami, mieszczącymi się w dopuszczalnych przez warunki techniczne tolerancjach wymiarowych, które podają odpowiednie normy hutnicze [66–73].

Na rysunku 2.4 przedstawiono tolerancje wymiarów dwuteowników stalowych według polskich norm hutniczych.

W pracy [2] przedstawiono wyniki badań losowej geometrii przekrojów poprzecznych populacji $n = 5000$ sztuk profili dwuteowych. Z analizy uzyskanych doświadczalnie [2] histogramów grubości półek i wysokości profili wynika, iż parametry średnie badanych wielkości były mniejsze od nominalnych oraz iż można je aproksymować rozkładem normalnym. Zagadnienie losowych odchyłek geometrycznych przekrojów poprzecznych kształtowników stalowych przedstawiono w pracy [8].

Imperfekcje przekroju poprzecznego kształtowników walcowanych na gorąco są wynikiem, między innymi zużycia walców, na których następuje ich profilowanie oraz odkształceń w trakcie stygnięcia wyrobów po ukształtowaniu.

Zmiany szerokości stopek i wysokości dwuteowników, ceowników i kątowników są zazwyczaj małe, zmiany grubości stopek i średników kształtowników walcowanych natomiast mogą być duże. Stopki dwuteowników mają tendencje do pocieniania się (patrz rys. 1.4b), średniki zaś do pogrubiania się [2].

Dopuszczalne przez polskie normy hutnicze odchyłki wymiarów przekroju poprzecznego dwuteowników normalnych i równoległościennych podano w tablicy 2.1. Polskie normy hutnicze dopuszczają odchyłki wysokości dwuteowników (od 2 do 5 mm), szerokości ich półek (od 2 do 4 mm), nieprostotałości półek do średników (do 1,5%), a także grubości ścianek profilu (od 0,5 do 2,0 mm). Wielkości tych dopuszczalnych odchyłek w normach hutniczych uzależniono od wysokości dwuteowników.

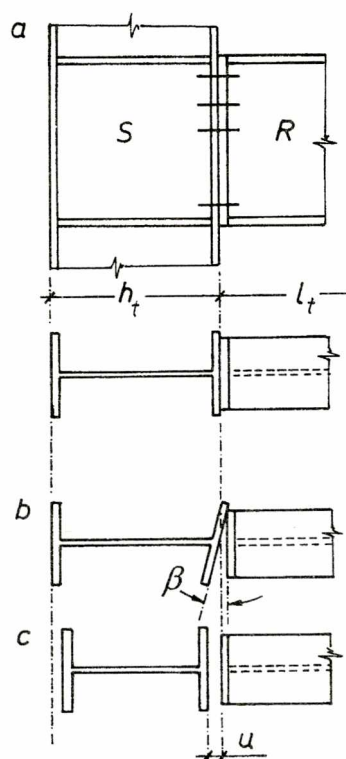
Podobnych, jak pokazano na rysunku 2.4 następstw losowych odchyłek przekroju poprzecznego kształtowników należy spodziewać się w przypadku dźwigarów (słupów, belek) spawanych z blach o losowych wymiarach grubości i szerokości. Norma [65] dopuszcza określone wielkości odchyłek wykonania dźwigarów spawanych z blach:

- brak prostotałości pasów (patrz tabl. 1.2 wiersz 1),
- brak płaskości pasów (patrz tabl. 1.2 wiersz 2),
- mimośród położenia pasa względem środka $\Delta = \pm 5$ mm,
- odchyłka wysokości h przekroju dźwigara $\Delta = \pm 3$ mm dla $h \leq 900$ mm,
 $\Delta = \pm 5$ mm dla $900 < h \leq 1800$ mm,
 $\Delta = (+8$ mm; -5 mm) dla $h > 1800$ mm.

Tablica 2.1. Dopuszczalne tolerancje wykonania dwuteowników normalnych i równoległościennych [69]

DWUTEOWNIKI NORMALNE według PN-91/H-93407				
Wyróżnik oznaczenia I	Dopuszczalne odchyłki [mm]			
	h	b_f	t_w	t_f
80–140	$\pm 2,0$	$\pm 1,5$	$\pm 0,5$	–0,5
160				–1,0
180–200		$\pm 2,0$		
220	$\pm 3,0$			–1,5
240–260				
280–300		$\pm 2,5$		
320		$\pm 3,0$	$\pm 0,5$	
340–380			$\pm 0,7$	
400	$\pm 0,8$			
425	$\pm 4,0$			–1,5
450–500				
550–600				
DWUTEOWNIKI RÓWNOLEGŁOŚCIENNE według PN-91/H-93406				
Wyróżnik oznaczenia IPE	Dopuszczalne odchyłki [mm]			
	h	b_f	t_w	t_f
80–120	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
140–180	$+ 3,0$ $-2,0$	$+ 3,0$ $-2,0$	$\pm 0,75$	$\pm 1,5$
200–270	$\pm 3,0$	$+ 3,0$		
300–360		$\pm 4,0$	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
400				
450–500				
550–600				

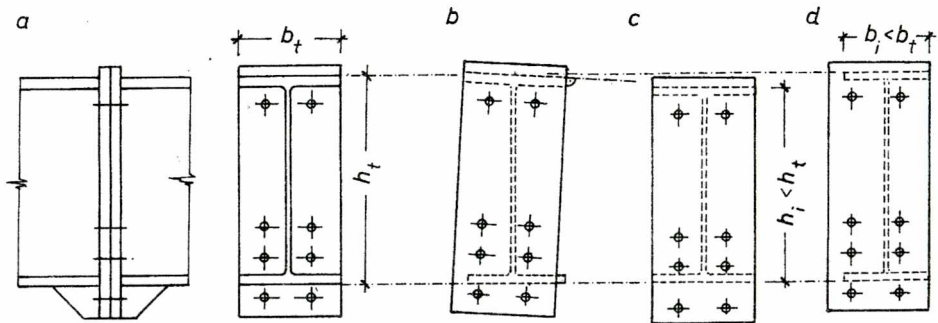
Na rysunku 2.5 przedstawiono skutki występowania losowych odchyłek przekroju poprzecznego dwuteowego słupa S w styku doczołowym z ryglem R . W połączeniu pokazanym na rys. 2.5a przyjęto, iż rygiel R został wykonany poprawnie, a jego długość została wyznaczona dla teoretycznej wysokości dwuteowego słupa h_t . W przypadku wykonania słupa o losowym skróceniu pasa (braku prostokątności półki do środka) w styku (rys. 2.5b) wystąpi zbieżna szczelina, a wymuszony montaż elementów przez dociągnięcie śrub w styku wywoła skrócenie słupa i zginanie rygla R . Wstępne siły wewnętrzne w śrubowym styku doczołowym i łączonych elementach mogą wystąpić również wtedy, gdy dwuteowy walcowany kształtownik słupa S jest niższy (rys. 2.5c) lub wyższy od wysokości nominalnej oraz w wadliwym połączeniu nie zastosuje się odpowiednio dobranych podkładek wyrównujących (aby spełnione były wymagania normy [65]).



Rys. 2.5

Losowość wymiarów przekrojów poprzecznych prętów może być również przyczyną powstawania wad styków doczołowych w razie nie uwzględnienia odchyłek geometrycznych kształtowników, zarówno na etapie sporządzania rysunków przez projektanta, jak i wykonawstwa warsztatowego konstrukcji.

Na rysunku 2.6b, c oraz d pokazano wadliwe usytuowanie blach czołowych, stanowiące następstwo założenia przez projektanta oraz wykonawcę nominalnych wymiarów i kształtów przekroju belki dwuteowej (rys. 2.6). *Dowiązkiwanie* się w wymiarowaniu geometrycznym podczas sporządzania rysunków oraz zespalandu w warsztacie części składowych do losowych parametrów geometrycznych przekroju prowadzi zazwyczaj do powstawania imperfekcji złączy. Na rysunku 2.6b pokazano skrócenie blachy czołowej względem przekroju belki, stanowiące następstwo *pasowania* jej pasa górnego, który nie jest prostokąty do środka dźwigara dwuteowego. Na rysunku 2.6c oraz d pokazano wadliwe usytuowanie blach czołowych, wynikające z przyjęcia nominalnej wysokości i szerokości dźwigara, gdy zastosowano dwuteownik o losowej wysokości i szerokości pasa.



Rys. 2.6

Uznając fakt losowości kształtu przekroju poprzecznego kształtowników, należy sporządzając rysunki *dowiazywać* się do osi przekrojów poprzecznych i osi podłużnych elementów. Scalając części składowe elementów wysyłkowo-montażowych w wytwórni należy *dowiazywać* się do rzeczywistych (wytrasowanych dla losowej geometrii) osi przekrojów poprzecznych i osi podłużnych elementów.

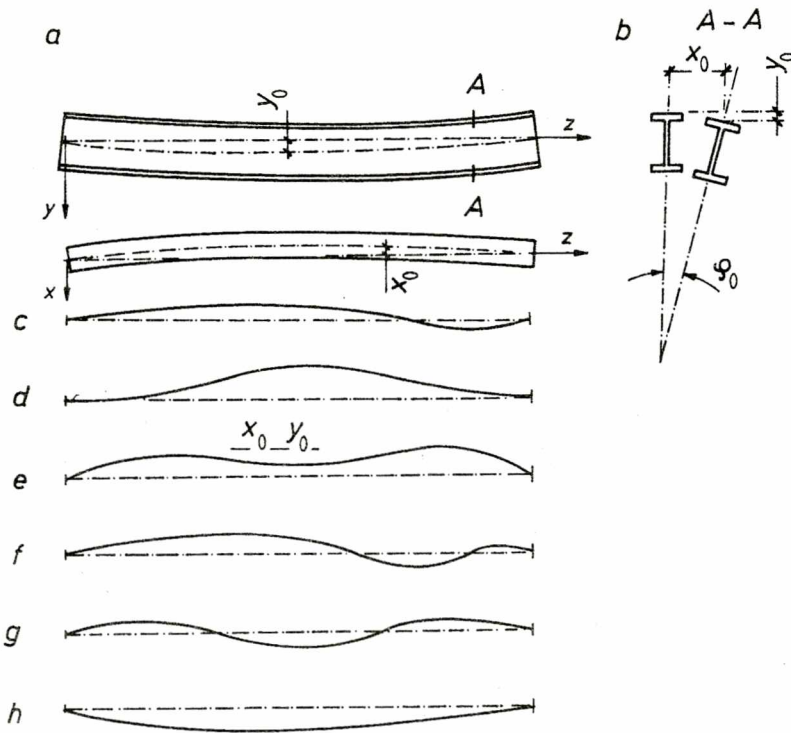
Pomijanie w trakcie projektowania i rysowania losowych wymiarów geometrycznych elementów oraz losowych wymiarów powstających w trakcie wykonawstwa (to znaczy trasowania, cięcia, wiercenia otworów) oraz w trakcie łączenia za pomocą spoin jest często spotykanym błędem grafiki inżynierskiej.

Podobnych, jak pokazano na rys. 2.5 oraz 2.6, następstw losowych odchyłek przekroju poprzecznego kształtowników należy spodziewać się w odniesieniu do dźwigarów (słupów, belek) spawanych z blach o losowych wymiarach grubości i szerokości, a norma [65] dopuszcza określone wielkości odchyłek ich wykonania (patrz tabl. 1.2, wiersz 1 i 2).

Imperfekcje osi podłużnej prętów dotyczą przede wszystkim odchylenia rzeczywistych osi od teoretycznego położenia osi podłużnych w postaci linii prostej (mimośród $e_0 = 0$). Idealna teoretyczna oś pręta nie wykazuje również skręcenia głównych płaszczyzn kształtownika (kąt skręcenia $\varphi_0 = 0$).

Skutki występowania imperfekcji geometrycznych przekrojów poprzecznych oraz mimośródów prętów na ich wyężenie analizował między innymi Jan Bródka [16], [19].

Odchylenia geometryczne osi rzeczywistych prętów od założonego modelu teoretycznego są wynikiem zarówno losowej geometrii przekrojów poprzecznych kształtowników, jak i odkształceń powstających w trakcie procesów wytwórczych elementów podczas ich profilowania (walcowania na gorąco), a także poddawania elementów zabiegom termicznym i mechanicznym. Powstają one również w trakcie transportu elementów z wytwórni na plac budowy oraz scalania podczas montażu.



Rys. 2.7

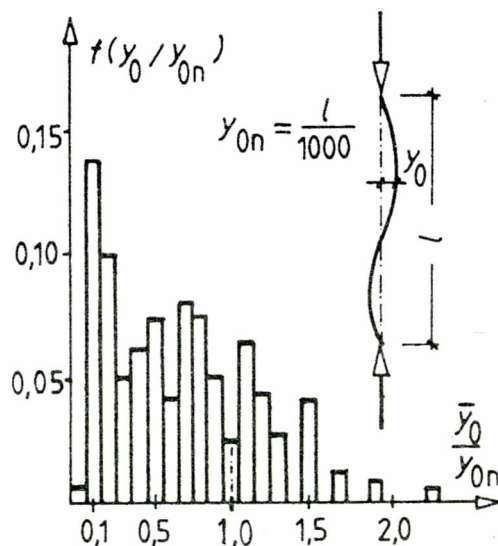
Na rysunku 2.7 pokazano przykładowe wygięcia wstępne osi pręta (linią ciągłą oznaczono kształt wygięcia osi podłużnej pręta) względem silniejszej i słabszej osi przekroju.

Odchylenia geometryczne osi podłużnych od założonego modelu teoretycznego pręta idealnego są wynikiem zarówno losowej geometrii przekroju poprzecznego, jak i skutkiem procesów wytwórczych elementów podczas jego kształtowania (walcowania na gorąco), a także poddawaniu elementów procesom termicznym (spawanie) i mechanicznym w wytwórni, w trakcie transportu i montażu. Statystycznie opracowane wyniki badań losowych imperfekcji geometrycznych (rys. 2.8) stanowią podstawę do normowego kalibrowania współczynników niestateczności.

Występowanie analizowanych losowych imperfekcji geometrycznych jest szczególnie istotne dla elementów konstrukcyjnych, których przekroje lub ich części mogą ulegać utracie stateczności. Dlatego też normy odbioru konstrukcji stalowych ograniczają wartości niedoskonałości początkowych ustroju przez określenie dopuszczalnych wstępnych wygięć osi lub wypukłości płaszczyzn, a wpływ imperfekcji na nośność w normach projektowania konstrukcji uwzględnia się przez odpowiednie wykalibrowanie współczynników niestateczności. Na przykład do kalibrowania krzywych wyboczeniowych w Eurokodzie 3 [61]

założono, w zależności od rodzaju profilu, wstępne mimośrodowe, które wynoszą: $e_{0d} = l/150$; $e_{0c} = l/200$; $e_{0b} = l/250$; $e_{0a} = l/500$ (gdzie l – długość pręta).

Norma [65], określająca warunki techniczne odbioru konstrukcji dopuszcza wstępne nieprostoliniowości dla obu osi pręta o wartości strzałki wygięcia $|\Delta|$ większej z wartości: $[l/1000; 3 \text{ mm}]$, gdzie l – długość pręta]. Na rysunku 2.8 pokazano histogram losowych wstępnych wygięć prętów, uzyskany z badań populacji 85 elementów [49].



Rys. 2.8

Z analizy histogramu wstępnych imperfekcji prętów, przedstawionych na rys. 2.8 wynika, iż w badanym przypadku zdecydowana ich większość była mniejsza od wartości dopuszczalnej $y_{0n} = l/1000$ oraz że można je aproksymować rozkładem niesymetrycznym.

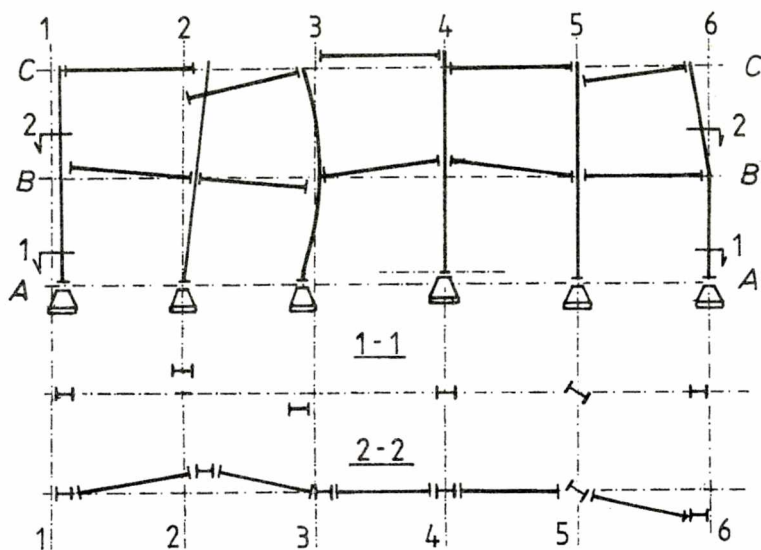
Oprócz wstępnych mimośrodów osi prętów należy również liczyć się z losowym usytuowaniem węzłów konstrukcji, to jest z imperfekcjami montażowymi elementów ustroju. Wartości dopuszczalnych odchyłek montażowych określa norma [65], a niektóre z nich podano w tabl. 1.2. Z analizy dopuszczalnych tolerancji montażowych określonych w normie [65] wynika, iż po scaleniu elementów wysyłkowo-montażowych w ustrój nośny mogą w nim wystąpić przesunięcia węzłów konstrukcji sięgające $\pm 10 \text{ mm}$. Wartości te mogą być niekiedy większe, gdy lokalne mimośrodowe osi prętów sumują się z losowymi przemieszczeniami usytuowania węzłów ustroju.

Na rysunku 2.9 pokazano schemat zestawczo-montażowy stalowej konstrukcji ramowej, w której występują geometryczne wady montażu systemu, stanowiące następstwo losowe.

wej geometrii przekrojów poprzecznych kształtowników oraz osi podłużnych elementów wysyłkowo-montażowych, a także losowości posadowienia konstrukcji na fundamentach.

Rysunek 2.9 ma na celu prezentację rodzajów wad połączeń doczołowych i patologicznych sytuacji montażowych, gdy nie zastosowano żadnych zabiegów umożliwiających złagodzenie skutków wad geometrycznych, zdecydowanie przekraczających dopuszczalne odchyłki podane w [65]. Tak beznadziejna sytuacja montażowa nie wystąpi, gdy będą dotrzymane wymagania podane w normie [65], próbny montaż, a także zastosuje się regulację i rektyfikację konstrukcji w trakcie prawidłowego montażu.

Na rysunku 2.9 pokazano następujące wady: przesunięcia osi słupów (w osi 1, 2, 3, 6), pochylenia słupów (w osi 2, 6), skrócenie słupa (w osi 5), wygięcie słupa (w osi 3), a także odchyłki w posadowieniu słupa na fundamencie (w osi 4) i poziomów usytuowania końców belek (w polach 3-4 i 4-5). Należy zaznaczyć, iż przedstawione na rys. 2.9 imperfekcje i komplikacje montażowe mogą powstać w konstrukcji, w której styki doczołowe zostały wykonane poprawnie (bez imperfekcji geometrycznych złączy omówionych w rozdziale 3).

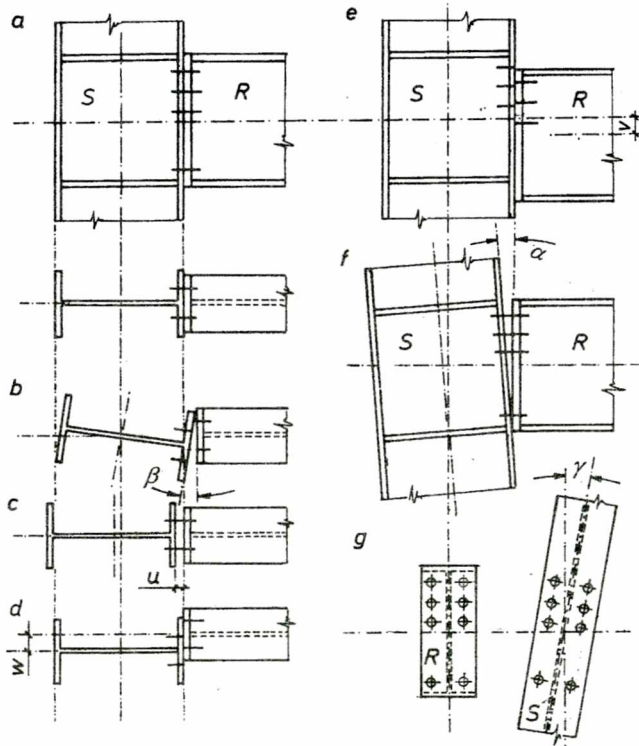


Rys. 2.9

Na rysunku 2.10 pokazano wpływ występowania losowych przemieszczeń oraz skrócenia osi prętów na komplikacje montażowe doczołowego styku śrubowego rygla R ze słupem S . Na rysunku 2.10 pokazano szczegóły konstrukcyjne wad połączeń montażowych ustroju pokazanego na rysunku 2.9.

Poprawnie scalony śrubowy styk doczołowy przedstawiono na rys. 2.10a. W wyniku skrócenia osi słupa w styku wystąpi zbieżna szczelina o kącie rozwarcia β (rys. 2.10b).

Losowe wygięcia osi prętów oraz losowe przemieszczenia węzłów powodują wystąpienie szczeliny u (rys. 2.10c) oraz przesunięcie w (rys. 2.10d) i v (rys. 2.10e) otworów na śruby w paśmie słupa względem otworów w blasze czołowej rygla. Ponadto w złączu takim może wystąpić zbieżna szczelina o kącie rozwarcia α (rys. 2.10f), stanowiąca następstwo wygięcia osi podłużnej słupa oraz wzajemne skrócenie płaszczyzn przylgowych styku γ (rys. 2.10g).



Rys. 2.10

Podsumowując analizę losowych imperfekcji geometrycznych przekrojów poprzecznych kształtowników oraz osi prętów, a także losowych odchyłek montażowych elementów wysyłkowo-montażowych scalonych w ustrój nośny elementów należy stwierdzić, iż w doczołowych stykach śrubowych mogą wystąpić wady połączeń: liniowe u , v , w oraz kątowe α , β , γ . Identyczne wady mogą wystąpić w wyniku niedoskonałości wykonania styku, a zagadnienie to omówiono szerzej w rozdziale 3.

Scalanie konstrukcji z elementów wysyłkowo-montażowych, łączonych na doczołowe styki śrubowe, w których występują wstępne imperfekcje liniowe i kątowe, zdecydowanie przekraczające wielkości dopuszczalne podane w normie [65], powoduje powstawanie wstępnych wyteżeń, zarówno konstrukcji, jak i śrubowych połączeń. Są to wstępne obciążenia

konstrukcji o charakterze technologicznym (losowe siły montażowe), które powinny być uwzględnione w analizach nośności granicznej ustrojów z rozpatrywanym typem połączeń.

Zagadnieniem analizy wpływu rzeczywistych niedoskonałości geometrycznych doczołowych śrubowych styków ram na ich wyężenie zajmowała się Elżbieta Urbańska-Galewska [50]–[52]. W swych pracach proponuje ona szacować parametry losowych sił wewnętrznych wywołanych wadami kątowymi α_i styków ramy portalowej, zmodyfikowaną metodą elementów skończonych. Proponowana modyfikacja polega na wprowadzeniu do klasycznego układu równań metody elementów skończonych

$$[K] \{V\} = \{P\}, \quad (2.1)$$

gdzie $[K]$ – macierz sztywności konstrukcji,

$\{V\}$ – wektor nieznanych przemieszczeń węzłów konstrukcji,

$\{P\}$ – wektor obciążeń zewnętrznych konstrukcji,

dodatkowego członu reprezentującego stochastycznie cechy konstrukcji.

Współrzędne węzłów konstrukcji składają się z części deterministycznej (x_{oi} , y_{oi}) i stochastycznej (α_i , β_i)

$$x_i = x_{oi} + \alpha_i, \quad (2.2)$$

$$y_i = y_{oi} + \beta_i. \quad (2.3)$$

Poszczególne elementy macierzy sztywności wyznacza się z równania

$$[K] = \int [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot dv, \quad (2.4)$$

gdzie $[D]$ – macierz zależności naprężenie–odkształcenie,

$[K] = [K(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)]$ – macierz sztywności zależna od losowych kątów α_1 , α_2 połączenia rygla ze słupem i α_3 połączenia rygla w środku rozpiętości,

$[B]$ – macierz odkształceń węzłowych.

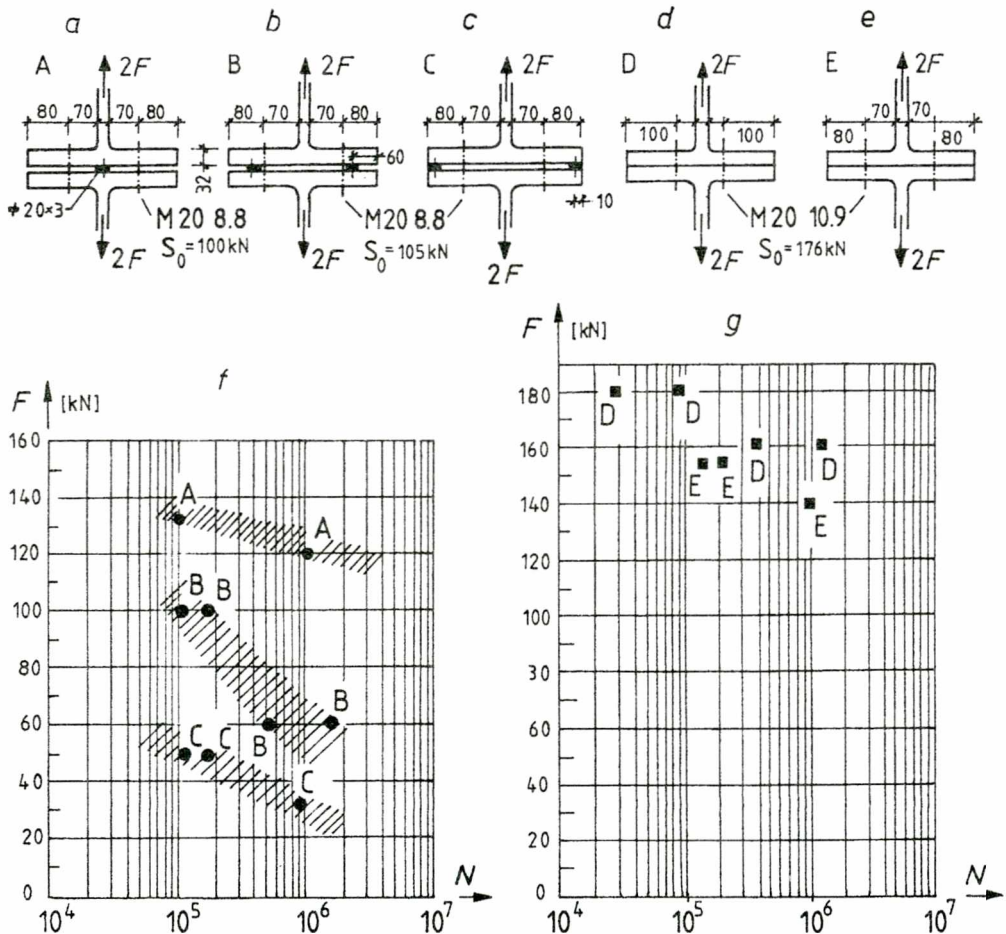
Dodatkowe siły wewnętrzne, powstające na skutek wadliwego wykonania doczołowych styków wyznaczono w [50] na podstawie zebranego materiału pomiarowego metodą tworzenia zbioru realizacji. Rozpatrywano wady katowe połączeń doczołowych w ramie portalowej złączy rygla ze słupami α_1 i α_2 oraz rygla w środku jego rozpiętości α_3 .

Zagadnieniem sił wewnętrznych w przestrzennych strukturach zbudowanych z prętów o losowych długościach zajmowali się Zbigniew Kowal i Wiesław Paczkowski [34]. Autorzy tej pracy analizowali przestrzenny ustrój prętowy o regularnej budowie i prętach połączonych przegubowo. W analizowanym modelu uwzględniono wpływ losowych długości prętów struktury przestrzennej na rozkład sił wewnętrznych w ustroju. Wyprowadzono wzory

określające parametry losowych sił wewnętrznych, wywołanych losowymi długościami i montażowymi imperfekcjami prętów łączonych w węzłach przegubowych. Zbudowano program do numerycznego rozwiązywania analizowanego problemu, a zagadnienie zilustrowano przykładem.

Deformacje związane z odkształceniami spawalniczymi (rys. 2.12) oraz stosowanie nieodpowiednich technologii w trakcie wykonywania styków doczołowych sprawiają, iż często występującą wadą połączeń jest brak płaskości powierzchni przylgowych styku śrubowego. Objawia się to krzywiznami powierzchni stykowych złączy i jedynie lokalnym przyleganiem elementów w styku.

Zagadnienia wpływu niedoskonałości początkowych, w postaci braku płaskości elementów przylgowych połączeń na ich nośność, były przedmiotem badań przedstawionych między innymi w pracach [1], [15], [25], [35], [36], [40].

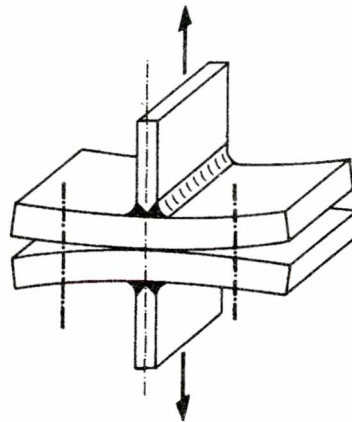


Rys. 2.11

W 1979 roku Bouwman w Am Stevin Laboratorium w Delft [15] wykonał badania nośności doczołowych, rozciąganych styków śrubowych z trzema rodzajami imperfekcji złączy. Analizowano następujące przypadki kontaktu powierzchni przylgowych rozciąganych śrubowych połączeń doczołowych: w osi obciążenia styku (typ A, rys. 2.11a), obok osi śrub (typ B, rys. 2.11b), na brzegu elementu czołowego (typ C, rys. 2.11c). Imperfekcje połączeń doczołowych symulowano wkładając płaskowniki między powierzchniami kontaktowymi złączy. Połączenia doczołowe na śruby M20 klasy 8.8 wstępnie sprężano siłami S_0 , które wynosiły: $S_0 = 100$ kN – typ A, $S_0 = 105$ kN – typ B i C.

Na rysunku 2.11f pokazano wykresy nośności trzech typów badanych połączeń w funkcji liczby cykli obciążania N . Z analizy wykresów pokazanych na rys. 2.11f wynika, że największy spadek nośności połączeń obciążonych dynamicznie wystąpił dla imperfekcji typu B, najmniejszą nośność wykazują zaś połączenia z wadą typu C. Badania te wykazały duży wpływ miejsca usytuowania powierzchni kontaktu w obrębie styku doczołowego na ich nośność. Występowanie wad połączeń, polegających na przyleganiu tylko brzegów elementów czołowych jest szczególnie niekorzystne dla takich złączy. We wnioskach Bouwman [15] proponuje stosowanie w kołnierзовych stykach elementów rurowych podkładek (uszczerek) realizujących typ A wyężenia styku (patrz rys. 5.8b). Na rysunku 2.11g pokazano wykresy nośności dwóch typów połączeń bez imperfekcji geometrycznych blach czołowych o konstrukcji przedstawionej na rys. 2.11d i e w funkcji liczby cykli obciążania N .

Lacher [35], [36] analizował wpływ wad geometrycznych powierzchni przylgowych blach styków doczołowych na siły efektu dźwigni w śrubach sprężających złącza doczołowe. W pracach swych wykazał, że losowe usytuowanie powierzchni kontaktowych między blachami czołowymi, wynikające na przykład z odkształceń spawalniczych (patrz rys. 2.12) powoduje nieosiowe wyężenie śrub w połączeniach. Analizując wady pokazane na rys. 2.11a, b i c oraz wykorzystując badania przedstawione w [15] podał współczynniki powiększające siłę efektu dźwigni w połączeniach z imperfekcjami blach czołowych śrubowych połączeń doczołowych.



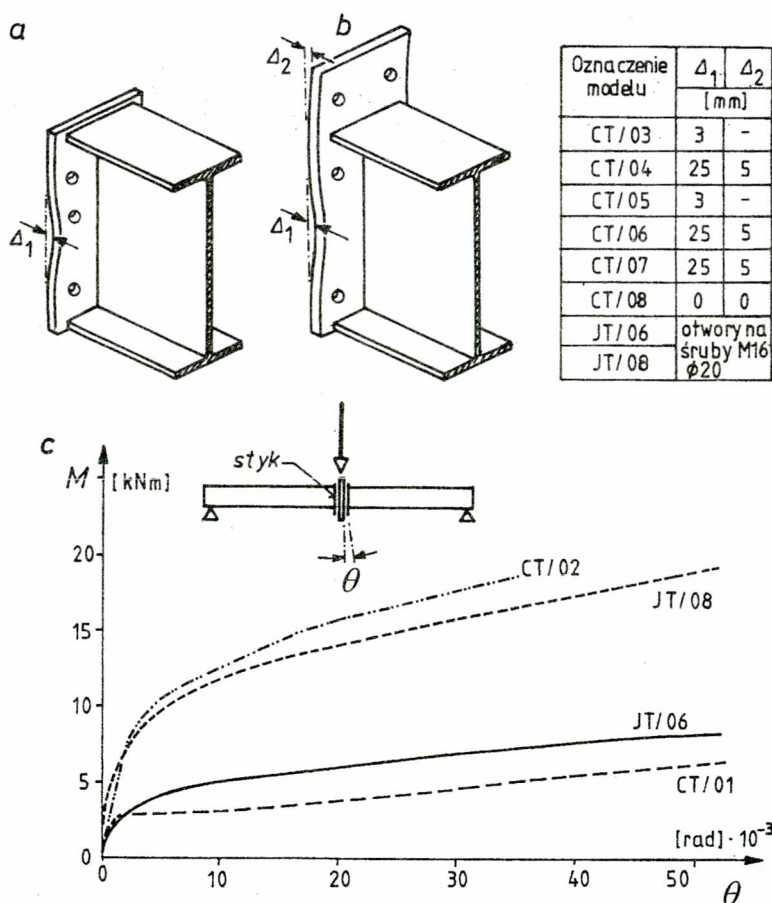
Rys. 2.12

W pracy [25] przedstawiono wyniki badań ośmiu typowych zginanych połączeń doczołowych belek ze słupami, w których występują dwa typy wad styków. W badaniach eksperymentalnych analizowano wpływ powiększonych otworów na śruby w elementach czołowych oraz deformacji spawalniczych blach czołowych belek (rys. 2.13) na zachowanie

się oraz nośność zginanych styków. W badanych połączeniach doczołowych na śruby M16 klasy 8.8 i 4.6 wykonano powiększone otwory o średnicy 20 mm. W tabelce na rys. 2.13 podano wielkości deformacji blach czołowych badanych modeli.

Z prezentowanych w pracy [25] badań wynika, że powiększone otwory na śruby w elementach przyłgowych styków nie powodują zmniejszenia nośności złączy, wpływają jednak na zmianę zależności krzywej charakterystyki węzła $M(\theta)$, gdzie M – moment zginający, θ – kąt obrotu. Wpływ ten może być istotny w przypadku nośności połączenia z warunku poślizgu (gdy w styku oprócz momentu zginającego występują duże siły poprzeczne).

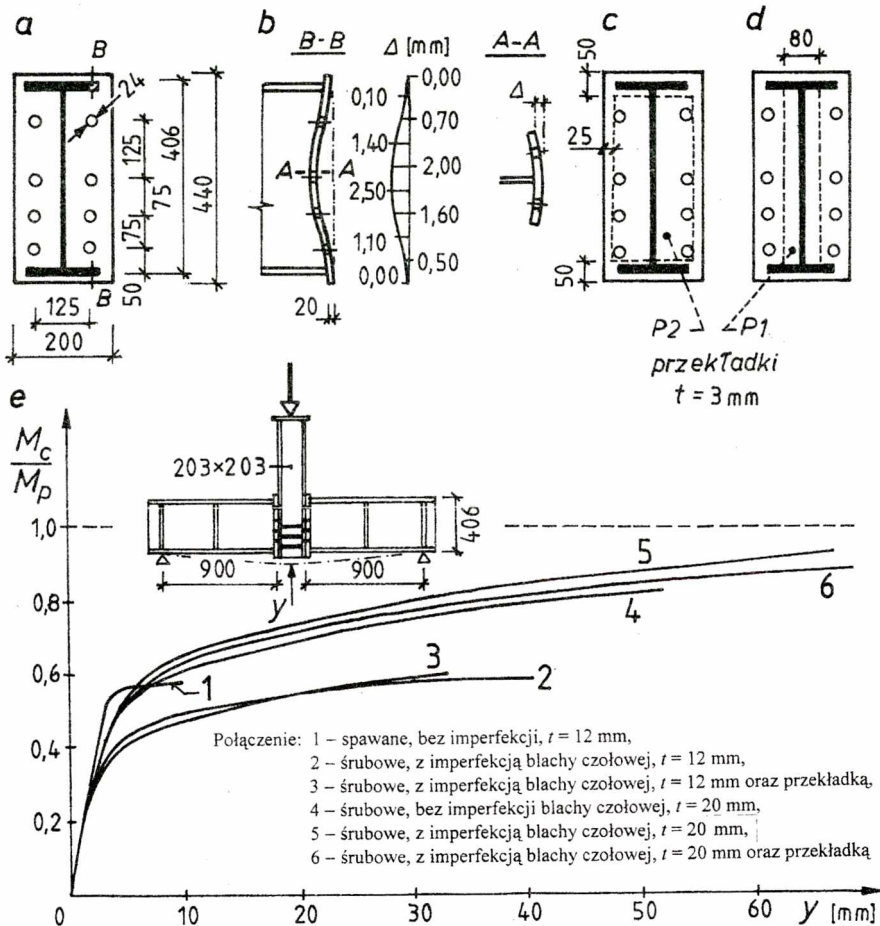
Deformacje spawalnicze blach czołowych badanych modeli nie zmieniały znacząco nośności śrubowych styków doczołowych, pod warunkiem iż śruby w połączeniu nie dokręca się w celu likwidacji braku płaskości powierzchni przyłgowych złączy montażowych ustroju.



Rys. 2.13

Dlatego też korzystniej jest w takim przypadku dociągać śruby zwykłe siłą ramienia ludzkiego, wywieraną kluczem płaskim, niż próbować likwidować deformacje blach czołowych. Efekt wad geometrycznych blach czołowych badanych połączeń nie wpływał znacząco na krzywą charakterystyki węzła $M(\theta)$ w porównaniu ze stykiem wykonanym poprawnie.

W pracy [40] przedstawiono badania doczołowych połączeń belek dwuteowych o wysokości 406 mm i szerokości pasów 140 mm ze słupami z dwuteowników szerokostopowych 206×206 mm (rys. 2.14). Połączenia doczołowe badanych styków zaprojektowano na śruby M22. Blachy czołowe belek o grubościach 20 mm i 12 mm były losowo zdeformowane w następstwie odkształceń spawalniczych. Na rysunku 2.14b pokazano odkształcenia blachy czołowej o grubości 20 mm przed obciążeniem styku.



Rys. 2.14

Oprócz połączeń z odkształconymi blachami czołowymi badano styki, w których zastosowano między elementami przylgowymi połączeń dwa typy przekładek pokazane na rys. 2.14c, d.

Na rysunku 2.14e przedstawiono zależności M_c/M_p w funkcji przemieszczeń pionowych y badanych modeli (M_c – moment zginający działający w styku, M_p – nośność plastyczna przekroju belki). Prezentowane w pracy [40] wyniki badań nośności zginanych śrubowych połączeń doczołowych potwierdzają wnioski z pracy [25]. Z analizy wykresów pokazanych na rys. 2.14e wynika, iż istotne znaczenie dla nośności styków miała grubość blach czołowych złączy. Stosowanie przekładek między elementami przylgowymi śrubowych styków doczołowych o wymiarach mniejszych niż wymiary blach czołowych (takie rozwiązanie konstrukcyjne proponował Bouwman [15] w celu idealizacji schematu wyężenia styku pokazanego na rys. 2.12a) nie powodowało zmian nośności badanych modeli.

W pracy [1] analizowano wpływ niedoskonałości początkowych wykonania styków śrubowych w ramach poddanych obciążeniom statycznym i przemiennym. Do rozważań przyjęto połączenie pasów belek dwuteowych z półkami słupów z zastosowaniem kątowników (bez połączenia środnika belki). Rozpatrzono błędy wykonania połączeń polegające na powiększonych otworach na śruby, braku śrub w złączach, odkształceniach elementów przylgowych. We wnioskach pracy [1] stwierdzono, że analizowane niedoskonałości początkowe styków śrubowych wpływają na zwiększone przemieszczenia poziome konstrukcji, zmniejszenie sztywności poprzecznej ram i w modelu obliczeniowym szacowania nośności ustroju należy uwzględnić niedoskonałości początkowe wykonania styków w odpowiedniej modyfikacji zależności krzywej charakterystyki węzłów $M(\theta)$, gdzie M – moment zginający, θ – kąt obrotu.

PODSUMOWANIE

Z analizy stanu wiedzy dotyczącej śrubowych połączeń doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi wynikają następujące wnioski syntetyczne:

1. W modelu obliczeniowym szacowania nośności śrubowych styków doczołowych nie uwzględnia się losowych cech geometrycznych złączy, zakładając ich poprawne wykonanie i montaż oraz idealne przyleganie stykających się powierzchni przylgowych.
2. Założenie o idealnym przyleganiu stykających się powierzchni przylgowych w doczołowych stykach śrubowych nie może być w pełni zaakceptowane w świetle występujących następujących imperfekcji geometrycznych: przekrojów poprzecznych prętów, mimośro-

dów osi elementów i przemieszczeń losowych węzłów oraz niedoskonałości wykonania złączy doczołowych. Dlatego też jest celowe analizowanie modeli obliczeniowych złączy, w których uwzględnia się ich wstępne niedoskonałości geometryczne.

3. W ogólnym przypadku w wadliwym śrubowym styku doczołowym mogą wystąpić geometryczne wady liniowe u , v , w , kątowe α , β , γ oraz braku płaskości powierzchni przylgowych. Są to wstępne imperfekcje geometryczne złączy o charakterze losowym.
4. Wstępne losowe wady śrubowych styków doczołowych złączy utrudniają i komplikują montaż konstrukcji, likwidacja ich przez dokręcenie śrub w stykach prowadzi natomiast nie tylko do montażowego wyteżenia połączeń, ale również prętów ustroju. Konsekwencją występowania losowych imperfekcji geometrycznych w stykach jest więc wstępne technologiczne wyteżenie ustroju.
5. Występowanie sześciu składowych imperfekcji geometrycznych u , v , w , α , β , γ w rozważanym typie połączeń może wywołać powstanie w nim dwukierunkowego zginania momentami M_x , M_y , ścinania od sił poprzecznych V_x , V_y oraz momentu skręcającego M_s oraz ściskania lub rozciągania siłą podłużną N . Brak płaskości powierzchni przylgowych elementów czołowych w styku może prowadzić do zmiany modelu wyteżenia śrub w złączy i przeciążenia łączników. Zagadnienie złożonego stanu wyteżenia śrubowych połączeń doczołowych nie jest analizowane w literaturze przedmiotu [11], [38].
6. Wstępne wyteżenie ustroju wywołane wadami styków elementów wysyłkowo-montażowych było dotychczas analizowane w odniesieniu do trzech [51] lub jednej [34] składowej imperfekcji geometrycznych połączeń prętów w węzłach. Analiza literatury dotyczącej wyznaczania sił wewnętrznych, z uwzględnieniem losowych cech geometrycznych połączeń prętów w węzłach, wykazała brak rozwiązania ogólnego zagadnienia dla przypadku występowania w styku sześciu składowych imperfekcji: u , v , w , α , β , γ .
7. Rzeczywiste położenia elementów wysyłkowo-montażowych nie pokrywają się z teoretycznymi z powodu oddziaływań technologicznych o charakterze losowym, które powodują powstawanie odchyłek wymiarów rzeczywistych od ustalonych. Dlatego też jest szczególnie ważne ustalenie zarówno dla produkcji montażu, jak i bezpiecznej eksploatacji odpowiednich tolerancji wykonania konstrukcji ze śrubowymi połączeniami doczołowymi. Postulat ten odnosi się zarówno do fazy projektowania, konstruowania, sporządzania rysunków [62], jak i tolerancji wykonania elementów wysyłkowo-montażowych oraz dopuszczalnych odchyłek montażu [65].
8. W świetle wniosku 7. jest celowe opracowanie wytycznych realizacji i odbioru doczołowych połączeń śrubowych w powiązaniu z normami klas dokładności i odpowiadającym im tolerancji wykonania konstrukcji.
9. Dopuszczalne odchyłki geometryczne wykonania połączeń doczołowych oraz montażu konstrukcji [65] są odnoszone do wymiarów geometrycznych prętów, co należy uznać za

miarę nieobiektywną, gdyż implikacje występowania imperfekcji na dodatkowe wyężenie konstrukcji zależą również do sztywności prętów i podatności węzłów.

10. Zdecydowanie negatywne oddziaływanie losowych integralnych imperfekcji geometrycznych styków na nośność graniczną i bezpieczeństwo konstrukcji scalanych, z zastosowaniem połączeń doczołowych, powinno być usankcjonowane w zastrzonych przepisach dotyczących badania konstrukcji podczas odbioru nie tylko w odniesieniu do kontroli połączeń prętów w węzłach, ale również losowych odchylek osi prętów i kształtów przekrojów poprzecznych.

3. LOSOWE IMPERFEKCJE GEOMETRYCZNE ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH

Jak wykazują badania [9], [12], [15], [25], [30], [35], [40], [50], [51], [58] w stykach konstrukcji scalonych na śrubowe połączenia doczołowe występują wady złączy, zmniejszające ich nośność graniczną oraz zmieniające prognozowane zachowanie się ustroju. Powstają one również w trakcie wykonawstwa warsztatowego elementów wysyłkowo-montażowych, wskutek niedokładności metod pomiarowych (trasowania), ograniczonej dokładności narzędzi obróbki (przecinarek, nożyc, palników, wiertarek) i w dużym stopniu zależą od kwalifikacji wykonawcy. Projektant znając zasady technologii wytwarzania, stosując rozwiązania konstrukcyjne, umożliwiające niwelowanie błędów wykonania, a także umiejętnie operując liniami wymiarowymi na rysunkach roboczych, może przyczynić się do zmniejszenia do minimum niedokładności wykonania rozważanego typu połączeń śrubowych.

Wykonanie konstrukcji idealnej, to znaczy całkowicie zgodnej z dokumentacją techniczną, jest raczej sporadyczne i rzeczywiste stalowe ustroje budowlane są obarczone wstępnymi losowymi imperfekcjami geometrycznymi.

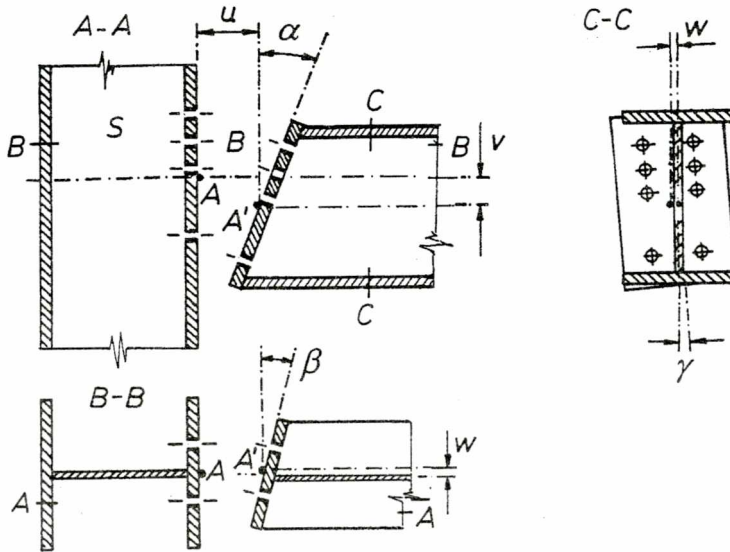
Na rysunku 3.1 pokazano losowe imperfekcje geometryczne śrubowego styku doczołowego połączenia belki R ze słupem S , powstałe w wyniku wadliwego (niezgodnego z normą [65]) wykonania w wytwórni konstrukcji stalowej złącza śrubowego.

W celu ułatwienia analizy wpływu losowego usytuowania elementów przyłgowych w styku śrubowym na wyężenie ustroju, występujące w złączu wady geometryczne rozdzielono na przemieszczenia liniowe u , v oraz w i obroty α , β oraz γ .

Imperfekcja geometryczna u polega na zmianie długości łączonego elementu (belki, rygla) w odniesieniu do teoretycznej płaszczyzny styku doczołowego.

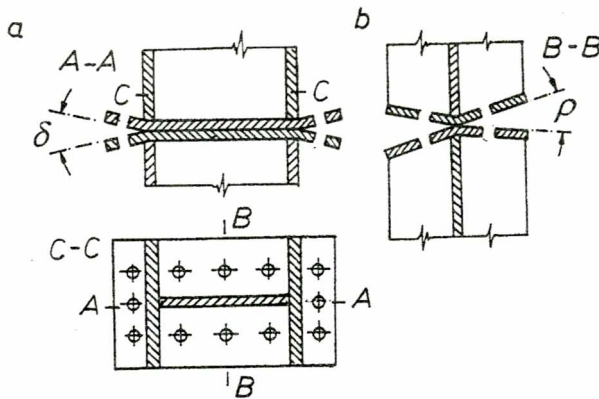
Imperfekcje geometryczne v oraz w są przemieszczeniami pionowymi i poziomymi w płaszczyźnie blachy czołowej względem teoretycznej osi podłużnej łączonego elementu.

Imperfekcje kątowe α i β polegają na zmianie kąta nachylenia blachy czołowej względem słabszej i silniejszej osi bezwładności przekroju łączonego elementu, kąt γ zaś opisuje odchyłkę skręcenia blachy czołowej w płaszczyźnie styku względem osi podłużnej elementu.



Rys. 3.1

Oprócz przedstawionych na rys. 3.1 imperfekcji geometrycznych styków mogą wystąpić w nim wady braku płaskości stykających się powierzchni przylgowych, to jest braku przylegania lokalnego – δ i ogólnego – ρ stykających się elementów. Te wady geometryczne przedstawiono na rys. 3.2 na przykładzie styku doczołowego słupa i mogą one powstać w wyniku na przykład odkształceń spawalniczych.



Rys. 3.2

Zidentyfikowane w badaniach konstrukcji losowe imperfekcje geometryczne styków doczołowych są kombinacją rozseparowanych, pokazanych na rys. 3.1 i 3.2, wad analizowanego typu połączeń.

Badania losowej geometrii styków doczołowych jednokondygnacyjnych ram stalowych prowadziła Elżbieta Urbańska-Galewska [50]–[52].

W tablicy 3.1 przedstawiono parametry statystyczne losowych imperfekcji geometrycznych styków doczołowych, uzyskane w badaniach przez Urbańską-Galewską [51].

Tablica 3.1 Wyniki badań losowych imperfekcji śrubowych styków doczołowych [51]

IMPERFEKCJE DOCZOŁOWYCH STYKÓW RAMY PORTALOWEJ	WADY STYKÓW	$E(\Delta)$	$D(\Delta)$	v_{Δ}
	KĄTOWE	[rad] · 10 ⁻³		[%]
	α_S	0,872	0,0681	0,7883
	α_{RS}	3,194	0,0209	0,6544
	α_{RR}	3,839	0,0166	0,4341
	β_S	6,265	0,0688	1,0979
	β_{RS}	2,164	0,0255	1,1787
	β_{RR}	4,462	0,0401	0,9567
	γ_S	1,187	15,485	1304,8
	γ_{RS}	0,890	15,469	1738,0
	γ_{RR}	7,696	19,330	251,1
	LINIOWE	[mm]		[%]
	μ_S	-1,128	0,5244	46,489
	μ_R	-1,472	0,4611	31,320
	w_S	-1,580	3,7131	234,4
	w_{RS}	0,383	2,8223	736,9
	w_{RR}	-0,165	5,1686	3132,5

Badano odchyłki kątowe α , β , γ oraz liniowe w , a także płaskość blach czołowych μ styków elementów wysyłkowo-montażowych jednokondygnacyjnych ram stalowych o dwuteowych przekrojach słupów S i rygli R .

W tablicy 3.1 podano wartości oczekiwane $E(\Delta)$, odchylenia standardowe $D(\Delta)$ oraz współczynniki zmienności v_{Δ} badanych wielkości imperfekcji $\Delta = \alpha, \beta, \gamma, w, \mu$. Badano imperfekcje blach czołowych: słupów S w połączeniu z ryglami Δ_{RS} , rygli R w połączeniu ze słupami Δ_{RS} oraz rygli R w środku ich rozpiętości Δ_{RR} .

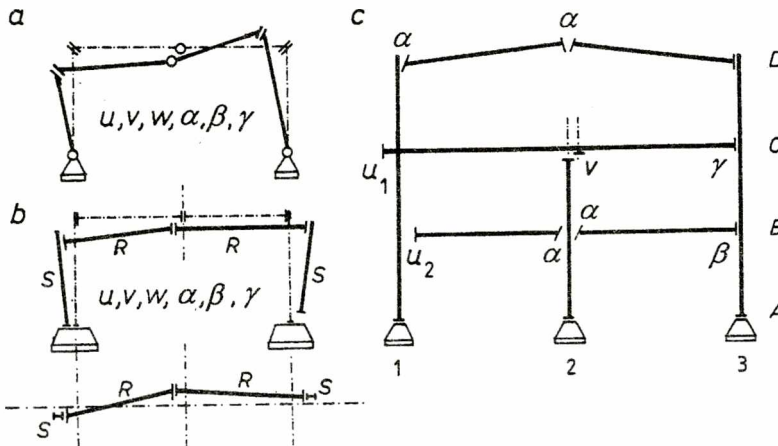
Z badań [50] wynika między innymi, iż losowe cechy odchyłek geometrycznych styków doczołowych można aproksymować z wystarczającą dokładnością rozkładem normalnym, wartości oczekiwane odchyłek kątowych i liniowych od założonych teoretycznie mogą być natomiast zdecydowanie mniejsze od ich odchyłeń standardowych.

Losowe wady geometryczne styków doczołowych powstają w trakcie procesu wytwarzania elementów wysyłkowo-montażowych, w wyniku losowego charakteru i niedoskonałości operacji technicznych (cięcia, pasowania, wiercenia otworów, spawania). Powodują one zmianę geometrii nie tylko w obrębie styku, ale i całej konstrukcji w stosunku do założonych teoretycznie osi oraz płaszczyzn ustroju (np. zmieniają rozpiętość ramy, wywołują brak płaskości ustroju, co pokazano na rys. 3.3). Wady i niedoskonałości wykonawstwa warsztatowego elementów wysyłkowo-montażowych komplikują lub uniemożliwiają poprawne scalenie ustroju nośnego i należy je usunąć w trakcie montażu tak, aby konstrukcja spełniała wymagania normy [65]. Prowadzi to do indywidualnego dopasowywania poszczególnych elementów, a niekiedy do dyskwalifikacji elementów z imperfekcjami. Geometryczne niedoskonałości wykonania elementów wysyłkowo-montażowych mogą powodować zmniejszenie nośności styków doczołowych, powstawanie wstępnych losowych sił wewnętrznych w konstrukcji, a niekiedy prowadzą do zmian założonych w modelach obliczeniowych schematów statycznych projektowanych ustrojów.

W zależności od typu styku doczołowego (sprężany bądź niesprężany), po wykonaniu identyfikacji rodzaju i wielkości imperfekcji geometrycznych złączy, schematu statycznego ustroju i jego statycznej niewyznaczalności, schematu geometrycznego systemu konstrukcyjnego można niekiedy dopuścić do montażu i eksploatacji budowli z wadami styków lub też nakazać usunięcie występujących wad. Omawiane zagadnienie będzie analizowane na przykładzie ram pokazanych na rys. 3.3.

Na rysunku 3.3a przedstawiono schemat zestawczo-montażowy trójpřzegubowej ramy statycznie wyznaczalnej, w której wady styków doczołowych połączenia słupa z rygłem powodują jedynie zmianę usytuowania osi prętów w stosunku do założonej teoretycznej siatki geometrycznej ustroju. Likwidacja wad styków $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$ przez dokręcenie śrub i sprężenie styków nie wywołuje w tym przypadku dodatkowego wyężenia ustroju nośnego, lecz jedynie zmianę jego kształtu geometrycznego. Dlatego też, gdy występuje ograniczona wielkość tych imperfekcji geometrycznych i spełnione są inne wymagania normy [65], można

wtedy taki obiekt dopuścić do eksploatacji. Wówczas jednak należy się liczyć z możliwością wystąpienia komplikacji z montażem rygli i płatwi. Ponadto, gdy płatwie lub rygle są np. zaprojektowane jako elementy ciągłe, powstaną w nich wówczas dodatkowe siły wewnętrzne.



Rys. 3.3

Podobnie omawiane zagadnienie przedstawia się dla ramy statycznie niewyznaczalnej z wadami $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$ śrubowych styków doczołowych, w której istnieją możliwości regulacji systemu geometrycznego na fundamentach (rys. 3.3b). Można wówczas dokręcić śruby w stykach i sprężyć śrubowe połączenia doczołowe, w konsekwencji czego konstrukcja zmieni swą geometrię w stosunku do założonej w projekcie. W takim przypadku, gdy istnieje możliwość regulacji posadowienia ramy na fundamencie, w ustroju nośnym nie powstaną dodatkowe siły wewnętrzne. Należy jednak zaznaczyć, iż decyzję o dopuszczeniu do eksploatacji badanej ramy z imperfekcjami geometrycznymi należy podejmować analizując skutki zmian geometrycznych systemu konstrukcyjnego na wyężenie pozostałych elementów systemu konstrukcyjnego (np. ciągłych płatwi lub rygli, mimośrodowego obciążenia fundamentu).

Występowanie imperfekcji geometrycznych połączeń $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$ w konstrukcjach statycznie niewyznaczalnych (łączonych na styki doczołowe), o wartościach większych niż dopuszcza to norma [65] powoduje, w razie dokręcania łączników, wprowadzanie montażowych wstępnych wyężień styków i prętów ustrojów. Powoduje to zmniejszenie nośności granicznych konstrukcji z wadliwymi śrubowymi stykami doczołowymi. Sytuacja taka będzie występowała w razie braku naprawy wadliwych połączeń i niewykonania odpowiedniej regulacji geometrii systemu konstrukcyjnego.

Analizowane zagadnienie będzie rozważane na przykładzie trzykondygnacyjnej dwunawowej ramy, o schemacie pokazanym na rys. 3.3c, montowanej z ciągłych słupów, do których łączy się rygle z zastosowaniem śrubowych styków doczołowych. Przyjęto, że

w śrubowych stykach doczołowych (projektowanych jako sztywne) konstrukcji pokazanej na rys. 3.3c występują wstępne imperfekcje α , β , γ , u , v , w o wielkościach większych niż dopuszcza to norma [65] i nie wykonano naprawy wadliwych połączeń. Będą analizowane następstwa niedopuszczalnego dociągania śrub w takich stykach, w celu likwidacji ich wad.

Wymuszony montaż ciągłego słupa w osi 1 (na poziomach B i C) z ryglami o losowych długościach (z wadami u_i) spowoduje jego wstępne zginanie.

Połączenie rygla na poziomie C ze słupem w osi 3, gdy występuje imperfekcja γ w styku powoduje skręcanie rygla oraz zginanie słupa w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny analizowanej ramy.

Skręcanie słupa oraz zginanie rygla w płaszczyźnie prostopadłej do analizowanej ramy wystąpi w razie dokręcenia śrub w styku z wadą β (połączenie rygla na poziomie B ze słupem w osi 3).

Likwidacja imperfekcji kątowych α_i w stykach doczołowych rygli w kalenicy oraz rygli ze słupami na poziomie D wywołuje dodatkowe wyężenie giętne w prętach zbiegających się w wadliwych stykach.

Likwidacja niewłaściwego usytuowania styku łączącego słup w osi 2 z rygłem na poziomie C o wielkości v jest związana z wprowadzeniem zginania.

Należy w tym miejscu podkreślić, iż w każdym przypadku likwidacji imperfekcji geometrycznych złączy przez dokręcanie w nich śrub prowadzi nie tylko do wywołania wstępnych obciążeń technologicznych prętów zbiegających się w wadliwych połączeniach, ale również wstępnych wyżeń styków.

Montaż konstrukcji z patologicznymi wielkościami wad złączy jest niedopuszczalny. Należy ponadto zaznaczyć, iż nie wszystkie rodzaje imperfekcji geometrycznych styków można zlikwidować przez dokręcanie śrub w złączach. W przypadku prętów krótkich o dużej sztywności, a także wad braku płaskości stykających się płaszczyzn blach czołowych δ i ρ dokręcanie śrub może powodować wyczerpanie ich nośności na zerwanie.

Przedstawione skutki patologicznej sytuacji montażowej konstrukcji z wadami styków doczołowych mogą być zdecydowanie zminimalizowane po wykonaniu regulacji i przesunięć słupów na podporach i ich lokalnego przechylenia na wysokości, umieszczeniu w stykach przekładek płaskich lub klinowych, niewykonywaniu styków lub węzłów z pełnym naciąganiem (sprężeniem śrub), wreszcie dyskwalifikacji elementów, jeśli nie można ich naprawić przed scaleniem, tak aby można było zmontować konstrukcję zgodnie z wymogami norm projektowania [63] i odbioru [65].

Aktualna norma [65] zawiera wiele sformułowań i wymagań odnośnie do omawianych problemów związanych z montażem.

Ta norma (PN-96/B-06200) nakazuje w punkcie 7.5:

Wykonawca powinien wykonywać roboty tak, aby żadna część konstrukcji nie została podczas montażu przeciążona lub trwale odkształcona.

Stałe połączenia elementów konstrukcji powinny być wykonane dopiero po dospawaniu styków i wyregulowaniu całej konstrukcji lub jej niezależnej części.

Przekładki stosowane w połączeniach do regulacji konstrukcji należy wykonywać ze stali o takich samych właściwościach plastycznych i grubości, nie większej niż 4 mm, a po osadzeniu zabezpieczyć przed wypadnięciem.

Otwory na śruby zaleca się dopasować za pomocą przebijaków, a w razie konieczności rozwiercenia.

W przypadkach, w których zastosowanie przekładek nie pozwala na wyregulowanie konstrukcji jest konieczna odpowiednia korekta elementów w warsztacie lub na budowie po uzgodnieniu z projektantem.

Norma ta nakazuje w punktach 6.2. i 6.3:

Przekładki do śrub osadzonych w otworach powiększonych należy stosować według wymiarów określonych w projekcie pod łbem lub nakrętką do osi śruby.

Nakrętka i łeb śruby powinny bezpośrednio i przez podkładki dokładnie przylegać do powierzchni łączonych części.

Norma ta nakazuje w punkcie 4.7:

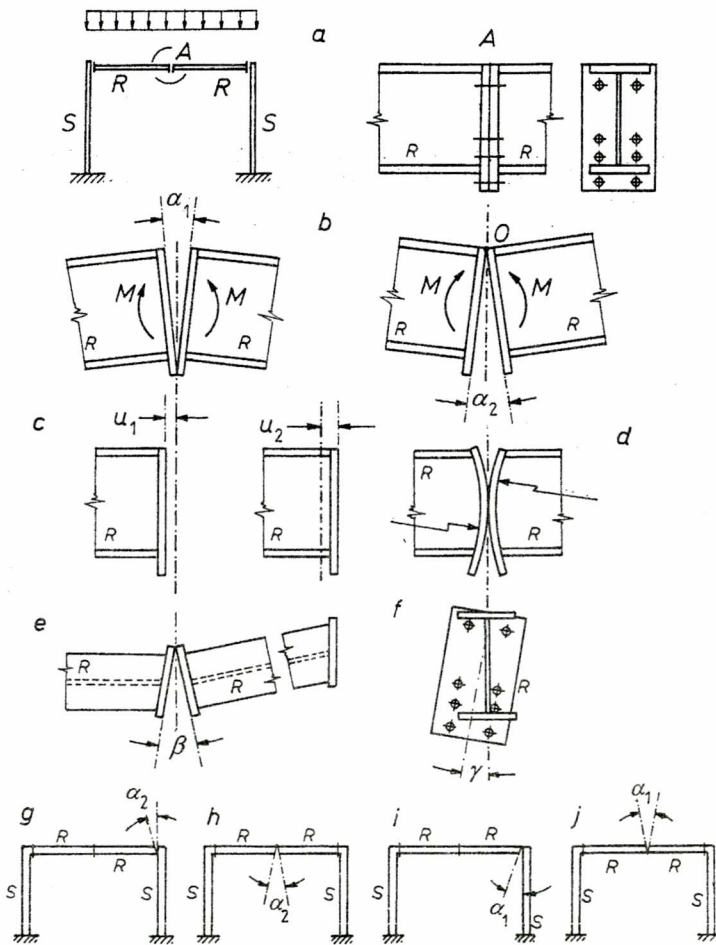
Części składowe powinny być tak składane, aby po scaleniu elementu nie powstały uszkodzenia przekraczające dopuszczalne odchyłki wykonania.

Naprowadzenie otworów sworzniami lub kołkami nie powinno powodować ich wydłużenia więcej niż 0,5 mm. Jeśli otwory nie mogą być naprowadzone bez nadmiernej ich deformacji, to części należy odrzucić, chyba że dopuszczalne jest odpowiednie rozwiercenie otworów.

Respektowanie i przestrzeganie zaleceń i wymagań dotyczących wykonania konstrukcji [65] jest podstawowym obowiązkiem zarówno wykonawcy, jak i dozoru technicznego. Nie wolno przez niechlujne wykonawstwo oraz nieodpowiedzialny montaż doprowadzać do zmniejszania nośności granicznej konstrukcji. Dlatego też prowadzonych badań i analiz nie należy interpretować jako przyzwolenie i akceptację występowania imperfekcji geometrycznych śrubowych styków doczołowych, lecz prezentację zdecydowanie negatywnych skutków ich występowania w ustroju, wykazanie niedopuszczalności likwidacji wad jedynie przez dociągnięcie śrub oraz próbę oszacowania w takich przypadkach nośności konstrukcji z wadami połączeń.

Imperfekcje geometryczne styków doczołowych mogą prowadzić do zmiany założonego w obliczeniach statycznych schematu statycznego ustroju.

Rozpatruje się ramę statycznie niewyznaczalną [58], o schemacie statycznym pokazanym na rys. 3.4a, w której zastosowano śrubowe styki doczołowe do scalenia elementów wysyłkowo-montażowych ustroju.



Rys. 3.4

Na rysunku 3.4b pokazano imperfekcje kątowe styku doczołowego: α_2 – o rozwarcium zgodnym z kierunkiem działającego w połączeniu momentu zginającego (szczelina znajduje się w strefie rozciąganej połączenia) oraz α_1 – o rozwarcium przeciwnym do kierunku działającego momentu zginającego w styku (szczelina znajduje się w strefie ściskanej złącza).

W razie możliwości występowania zmian kierunku momentu zginającego w analizowanym połączeniu, zbieżne szczeliny w styku doczołowym o kącie α_1 nie mogą być zaakceptowane. Jeśli w analizowanej ramie portalowej w styku, w środku rozpiętości rygła obciążonego statycznym obciążeniem monotonicznie narastającym, nie występuje zmiana znaku momentu zginającego, to można dopuścić do występowania zbieżnej szczeliny o kącie α_2 .

Występowanie imperfekcji kątowej α_1 w styku w środku rozpiętości rygla analizowanej ramy (rys. 3.4a) nie odpowiada założonemu schematowi konstrukcji, gdyż pod wpływem wzrastających obciążeń do chwili *zamknięcia* się zbieżnej szczeliny węzeł ten ma cechy przegubu. Konsekwencją takiej sytuacji, gdy nie naprawi się wadliwego styku, jest zmienność schematu statycznego ramy (z taką imperfekcją połączenia doczołowego) w funkcji obciążenia zewnętrznego. Jeśli nie jest możliwa naprawa elementów wysyłkowo-montażowych z takimi imperfekcjami śrubowych styków doczołowych, to należy je dyskwalifikować.

Na rysunku 3.4i oraz j pokazano schematy ram o węzłach doczołowych z imperfekcjami kątowymi α_1 . Dla obciążeń pionowych (rys. 3.4a), ramy z takimi wadami styków należy traktować do chwili *zamknięcia* zbieżnych szczelin jako dwukrotnie statycznie niewyznaczalne. Jeżeli w analizowanej ramie, o schematach pokazanych na rys. 3.4g oraz h występują wady kątowe α_2 , polegające na braku przylegania stykających się elementów, to dla całego zakresu obciążeń pionowych konstrukcja spełnia kryteria trzykrotnie statycznie niewyznaczalnej.

Na rysunku 3.4c przedstawiono wadę długości rygla analizowanej ramy portalowej: u_1 – imperfekcja ujemna (rygiel za krótki), u_2 – imperfekcja dodatnia (rygiel za długi). Jeśli nie istnieje możliwość regulacji posadowienia słupów, to w każdym przypadku wymuszony montaż rygli z imperfekcjami u_i prowadzi do wywołania wstępnego zginania słupów. Ponadto, jeśli rygle są zbyt długie, to powstaną w nich montażowe wyteżenia ściskające, wymuszony zaś montaż rygli zbyt krótkich (przez dokręcanie śrub w stykach) spowoduje powstanie wstępnych sił rozciągających w ryglach oraz śrubach połączeń doczołowych. W ramach układów jednokondygnacyjnych istnieje zazwyczaj możliwość regulacji posadowienia słupów na fundamentach, co stwarza warunki likwidacji imperfekcji długości rygli. W ramach konstrukcji wielokondygnacyjnych, w takich sytuacjach montażowych należy stosować przekładki o odpowiednio dobranych grubościach.

Imperfekcję kątową β styku doczołowego w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny analizowanej ramy pokazano na rys. 3.4e i polega ona na występowaniu w złączu zbieżnej szczeliny. Podobnie jak w przypadku analizowanej imperfekcji kątowej α_i , w zależności od kierunku działającego obciążenia, połączenie z wadą β będzie zachowywać się jako przegubowe lub też będzie zdolne przenosić momenty zginające. W przypadku zamocowania słupów w fundamencie, a następnie dokręceniu śrub w połączeniach z wadami kątowymi β w stykach rygli ze słupami, wywołuje się wstępne skręcanie słupów oraz wstępne zginanie rygla w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy.

Imperfekcje kątowe α , β , o wielkościach większych od określonych w [65], należy usunąć stosując odpowiednio dobrane podkładki klinowe.

Na rysunku 3.4d pokazano wadę braku płaskości stykających się płaszczyzn blach czołowych. Dokręcanie śrub w takim styku prowadzić może do wyczerpania ich nośności na

zerwanie. Taka wada połączenia doczołowego powinna być bezwzględnie usunięta przez sfrezowanie płaszczyzn przylgowych blach czołowych.

Skręcanie rygla oraz zginanie słupów analizowanej ramy, o słupach zamocowanych sztywno w fundamentach wywoła wymuszony montaż ustroju z wadami kątowymi γ styków doczołowych. Usunięcie tych wad śrubowych styków doczołowych o niedużych wielkościach jest niekiedy możliwe przez rozwiercanie otworów i zastosowanie podkładek po łbami i nakrętkami łączników.

Likwidacja wad kątowych β i γ styków doczołowych, przez dokręcenie śrub w złączach, powoduje deformację ramy (brak płaskości) i wystąpienie przemieszczeń węzłów i prętów ustroju, prostopadłych do płaszczyzny ramy. W takim przypadku powstaną w ustroju montażowe siły wewnętrzne od mimośrodowych obciążeń zarówno słupów, jak i rygli ram. Brak płaskości płaszczyzn przylgowych styków doczołowych pokazany na rys. 3.4d może powodować również zmianę schematu statycznego węzłów oraz zmniejszenie nośności połączeń śrubowych.

WNIOSKI

Analiza wyteżeń oraz zachowania się konstrukcji z wadliwymi śrubowymi stykami doczołowymi umożliwia sformułowanie następujących wniosków:

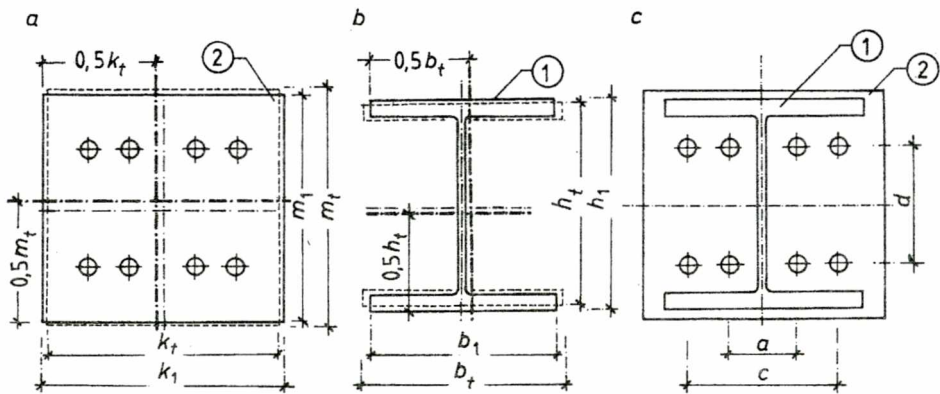
1. Niedoskonałości technologiczne, powstające w trakcie wykonywania śrubowych styków doczołowych, w wytwórniach konstrukcji stalowych mogą powodować powstawanie wad geometrycznych połączeń: kątowych α , β , γ i liniowych u , v , w oraz braku płaskości powierzchni przylgowych.
2. Imperfekcje geometryczne śrubowych styków doczołowych, o wielkościach przekraczających podane w normie dotyczącej wykonawstwa i odbioru konstrukcji stalowych [65] powinny być bezwzględnie usunięte, z powodu zdecydowanie negatywnego ich oddziaływania na nośność graniczną ustroju. Naprawy wadliwych śrubowych styków doczołowych można dokonać przez regulację systemu geometrycznego konstrukcji, stosowanie podkładek płaskich i klinowych między płaszczyznami przylgowymi złączy, rozwiercanie otworów na śruby i stosowanie podkładek pod łbami i nakrętkami łączników.
3. W odniesieniu do ram parterowych z wadami styków doczołowych α , β , γ , u , v , w , w których istnieje możliwość regulacji geometrii systemu konstrukcyjnego na fundamentach, można niekiedy zaakceptować imperfekcje śrubowych połączeń, gdy nie prowadzi to do wstępnego wyteżenia ustroju nośnego. Należy jednak wówczas liczyć się ze zmianą usy-

tuowania założonych teoretycznie osi systemu konstrukcyjnego, co może niekiedy prowadzić do wstępnego wyłączenia elementów dobudowywanych do ramy (na przykład ciągłych rygli, płatwi).

4. Wymuszony montaż konstrukcji z wadami geometrycznymi styków $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$ przez dokręcenie śrub w złączach konstrukcji statycznie niewyznaczalnych jednokondygnacyjnych, w których nie ma możliwości regulacji geometrii systemu na fundamentach oraz ram wielokondygnacyjnych, wywołuje montażowe wyłączenie zarówno śrubowych połączeń, jak i prętów ustroju. Są to wstępne obciążenia technologiczne węzłów wywołujące dwukierunkowe zginanie momentami M_x, M_y , ścinanie siłami poprzecznymi V_x, V_y oraz momentem skręcającym M_s i rozciąganie (ściskanie) siłą osiową N , zmniejszające nośność eksploatacyjną konstrukcji. Z tych też względów taki patologiczny montaż jest niedopuszczalny.
5. Imperfekcje śrubowych styków doczołowych α, β , polegające na występowaniu zbieżnych szczelin, o rozwarciu przeciwnym do wywołwanego działającym w połączeniu momentem zginającym, mogą prowadzić do zmiany schematu statycznego ustroju, a niekiedy do jego geometrycznej zmienności.
6. Brak płaskości płaszczyzn przyłgowych stykających się powierzchni w styku doczołowym prowadzi do zmniejszenia nośności i sztywności połączenia oraz do zmiany założonego w modelu obliczeniowym schematu statycznego ustroju. Ponadto nie jest wtedy realizowany założony w modelu szacowania nośności złącza schemat wyłączenia połączenia (sprężenia blach czołowych) i śruby mogą niekiedy bezpośrednio przejmować siły od obciążeń zewnętrznych.
7. Z badań doświadczalnych odchyłek geometrycznych Δ połączeń [50] wynika, iż można je aproksymować rozkładem normalnym, oraz że losowe ich parametry opisują wartości oczekiwane $E(\Delta)$, o wielkościach często bliskich zeru, odchylenia standardowe imperfekcji zaś mogą być zdecydowanie większe $D(\Delta) \gg E(\Delta)$, gdzie $\Delta = \alpha, \beta, \gamma, u, v, w$.
8. Istotnym elementem wpływającym na dokładność wykonania styków konstrukcji jest odpowiednia prezentacja graficzna konstrukcji na rysunkach warsztatowych. Uznając losowy charakter kształtu przekrojów poprzecznych prętów i wymiarów części składowych styków oraz powstawanie odchyłek geometrycznych w kolejnych operacjach technologicznych wykonawstwa styków, należy uwzględniać w sporządzaniu rysunków hierarchię ważności wymiarów oraz sugerować sposób trasowania i scalania części składowych elementów wysyłkowo-montażowych.
9. Właściwe sporządzanie rysunków warsztatowych, stwarzające warunki minimalizacji powstawania wad geometrycznych elementów, polega na stosowaniu zasady *gubienia* odchyłek wymiarowych oraz *dowiązywania* linii wymiarowych do punktów i płaszczyzn zapewniających poprawne scalanie elementów wysyłkowo-montażowych podczas montażu.

Przykład wymiarowania doczołowego styku słupa, w którym uwzględniono wymienione postulaty przedstawiono na rys. 3.5.

Na rysunku 3.5c żąda się od wykonawcy symetrycznego usytuowania blachy czołowej (rys. 3.5a) o losowych wymiarach $k_1 \times m_1$ (różnych od wartości założonych teoretycznie – $k_t \times m_t$) względem słupa (rys. 3.5b) o losowej wysokości h_1 i szerokości pasa b_1 (różnych od wartości nominalnych – $h_t \times b_t$), położenie otworów na śruby zaś należy wymiarować względem wytrasowanych rzeczywistych osi słupa i blachy. W razie przyjęcia nominalnych wymiarów blachy czołowej oraz przekroju słupa i wytrasowaniu na ich podstawie położenia osi (oznaczonych grubą linią na rys. 3.5a i b), a następnie scaleniu tych elementów w styku doczołowym powstaną wady geometryczne złącza.



Rys. 3.5

10. Wady braku płaskości powierzchni przylgowych styków doczołowych powstają w wyniku niewłaściwej technologii wykonania badanego typu złącza. W celu ograniczenia ich wielkości należy stosować odchylanie blach od położenia projektowanego, stosowanie właściwej technologii spawania, a także frezowanie powierzchni przylgowych styków doczołowych.

4. OSZACOWANIE WPŁYWU IMPERFEKCJI GEOMETRYCZNYCH ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH NA WYTEŻENIE KONSTRUKCJI

4.1. Wprowadzenie

W rozdziale tym zanalizowano zagadnienie wpływu występowania wstępnych imperfekcji geometrycznych w śrubowych stykach konstrukcji scalanych, z zastosowaniem doczołowych połączeń śrubowych, na powstawanie wstępnych, montażowych sił wewnętrznych w prętach i węzłach ustroju.

Rozważania i analizy są prowadzone przy założeniu, że likwidacja odchyłek geometrycznych odbywa się jedynie przez dociągnięcie śrub w wadliwych złączach. Należy w tym miejscu wyraźnie zaznaczyć, iż postępowanie takie jest niezgodne z zasadami poprawnej realizacji konstrukcji oraz normy [65], prowadzone analizy mają zaś na celu oszacowanie skutków wadliwego montażu, a także mogą być przydatne dla projektantów i rzeczoznawców budowlanych w podejmowaniu decyzji odnośnie do konstrukcji z imperfekcjami złączy śrubowych większymi niż dopuszcza to norma [65]. Dlatego też prezentowanych badań nie należy interpretować jako możliwość rozluźnienia wymagań normy [65] w tym zakresie.

Przyjmuje się, iż w połączeniach występują wady geometryczne o charakterze integralnym, stanowiące wielkości reprezentujące losowe odchyłki geometryczne przekrojów poprzecznych prętów, losową geometrię systemu konstrukcyjnego oraz niedoskonałości wykonania doczołowych styków śrubowych. Wady te w dalszej części tego rozdziału określać się będzie mianem wad styków doczołowych.

Analizowane więc będzie zagadnienie wstępnego wyteżenia ustroju, spowodowane integralnymi imperfekcjami o charakterze geometryczno-technologicznym. Integralne wady

geometryczne przyporządkowuje się stykom elementów wysyłkowo-montażowych, rozpatrując oddzielny wpływ ich składowych liniowych u , v , w oraz kątowych α , β , γ na wyężenie prętów i węzłów. Badania wpływu rozseparowanych imperfekcji u , v , w oraz α , β , γ na nośność ustroju ma na celu identyfikację mechanizmów powstawania dodatkowych wstępnych sił wewnętrznych oraz skutków ich występowania na wyężenie styków i prętów konstrukcji. W rzeczywistych konstrukcjach z takimi połączeniami identyfikuje się wady stanowiące wypadkową imperfekcji kątowych i liniowych.

Analiza konstrukcji z rozważanymi imperfekcjami geometrycznymi jest możliwa z zastosowaniem dostępnych programów komputerowych. Wstępne siły wewnętrzne w konstrukcji, wywołane imperfekcjami geometryczno-technologicznymi, można wyznaczyć rozpatrując schemat statyczny badanego ustroju obciążonego wymuszonymi przemieszczeniami u , v , w lub obrotami α , β , γ wadliwych węzłów. Uzyskane w ten sposób rozwiązania numeryczne rozkładu sił wewnętrznych, wywołanych losowymi imperfekcjami, nie stwarzają przesłanek do syntezy badanego zagadnienia i nie uzyskuje się podstaw do sformułowania wniosków o charakterze ogólnym. Możliwe to jest dopiero po wykonaniu wielu obliczeń numerycznych dla zmiennych parametrów sztywnościowych prętów oraz geometrii systemów konstrukcyjnych.

Dlatego też, w celu umożliwienia wyciągnięcia z badań wpływu imperfekcji styków doczołowych na wyężenie ustroju wniosków o charakterze ogólnym, proponuje się podejście analityczne. W tym celu ze schematu ogólnego konstrukcji wydziela się zastępczy prętowy ustrój, złożony z elementów bezpośrednio przylegających do wadliwego styku doczołowego, z odwzorowaniem sztywności prętów i podatności połączeń elementów w węzłach w schemacie ogólnym. Siły wewnętrzne w prętach i węzłach tak przyjętego schematu zastępczego ustroju wyznacza się z wykorzystaniem założeń metody Crossa [13]. Proponowane podejście do analizy wyężenia ustroju wywołanego imperfekcjami geometrycznymi stanowi bezpieczne oszacowanie od góry rzeczywistych sił w konstrukcji z takimi wadami, gdyż propagację skutków występowania odchylek geometrycznych styków ogranicza się tylko do prętów bezpośrednio przylegających do wadliwego złącza. Dokładność oszacowań wyężeń ustroju z analizowanymi wadami styków można zwiększyć przyjmując schematy ustrojów zastępczych, złożone z większej liczby prętów i przeprowadzając stosowne iteracje momentów przywęzłowych ustroju.

W przyjmowanych zastępczych schematach i modelach obliczeniowych szacowania wyężenia montażowego ustroju wywołanych imperfekcjami styków doczołowych (przedstawionych w rozdziałach 4.2–4.7) przyjęto ponadto, iż nie uwzględnia się wydłużeń i skróceń prętów oraz odkształceń elementów przylgowych (blach czołowych, pasów słupów) oraz wydłużeń śrub [42] w stykach doczołowych. Założenie o pomijaniu w analizach statycznych wydłużalności elementów prętowych i łączników [42] ma swoje uzasadnienie w świetle wielkości tych odkształceń (rzędu do 1%) w odniesieniu do odkształceń konstrukcji.

Duże odkształcenia elementów przylgowych złączy występują w przypadku stosowania cienkich (podatnych) blach czołowych styków doczołowych. Należy się wówczas jednak spodziewać zmniejszenia sił wewnętrznych, wywołanych likwidacją losowych imperfekcji styków doczołowych. Stosowane powszechnie połączenia doczołowe należą do połączeń mało podatnych, a nie do połączeń sztywnych, wskutek podatności blach czołowych i stopek kształtowników. Założenie o sztywnych blachach czołowych, których odkształceń nie uwzględnia się w wyznaczaniu wstępnych sił wewnętrznych ustroju, należy traktować jako górne, bezpieczne oszacowania wyężenia ustroju w przypadkach patologicznego naciągania śrub w wadliwych połączeniach doczołowych. Badania podatnych połączeń doczołowych z odchyłkami geometrycznymi [15], [36] wykazały bardzo duży wpływ imperfekcji na stan rozwarcia styku i stan graniczny nośności połączeń dla obciążeń wielokrotnie zmiennych oraz mały wpływ na stan graniczny nośności węzłów pod obciążeniem statycznym wobec odkształcalności elementów przylgowych złączy. Analizę montażowego wyężenia konstrukcji o podatnych śrubowych stykach doczołowych z wadami geometrycznymi złączy przedstawiono w rozdziale 4.8.

W przedstawionych badaniach, analizach oraz przykładach rozpatruje się skutki występowania imperfekcji geometrycznych styków doczołowych, zdecydowanie przekraczających dopuszczalne wielkości podane w normie [65] na wyężenie ustroju, gdy nie naprawiono wadliwych połączeń, w razie zastosowania niewłaściwego (błédnego) montażu konstrukcji.

W modelu obliczeniowym likwidacji wad geometrycznych styków przez wymuszone dokręcenie śrub w styku przyjęto ponadto, iż sprężanie łączników w złączu będzie prawie jednocześnie i nie wystąpi wyczerpanie nośności śrub, powierzchnie przylgowe stykających się elementów są natomiast płaskie. Analizę skutków braku płaskości elementów przylgowych styków doczołowych na wyężenie węzłów ustroju podano w rozdziale 5.

W zastępczych schematach obliczeniowych przedstawionych na rysunkach 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9 i 4.11 przyjęto, iż wady śrubowych styków doczołowych występują w połączeniach końców p prętów pr z węzłami i konstrukcji, a więc w złączach $i-p$ (w jednym styku). Analiza tylko jednego rodzaju wady zlokalizowanej w jednym tylko węźle ma na celu wyjaśnienie mechanizmów powstawania montażowych wyężeń ustroju. W konstrukcjach rzeczywistych należy się liczyć z występowaniem wad w wielu węzłach, o wartościach stanowiących wypadkowe imperfekcji liniowych i kątowych. Ponadto wyężenie montażowe, wywołane patologicznym wykonawstwem, zależeć będzie od technologii i kolejności montażu elementów.

Analiza wyężenia konstrukcji wywołanej wieloma różnymi, zlokalizowanymi w kilku węzłach, wadami o różnych wielkościach, z uwzględnieniem przyjętej technologii montażu jest możliwa z zastosowaniem zaproponowanych ogólnych modeli obliczeniowych (we wzorach ogólnych należy uwzględnić odpowiednie wielkości wad oraz sumowanie sztywności prętów, w zależności od usytuowania wady). Uzyskane ogólne rozwiązania analityczne

umożliwiają szacowanie wyteżeń montażowych, stanowiących następstwo patologicznej sytuacji montażowej, zarówno gdy wadliwy styk doczołowy znajduje się w środkowej, jak i w skrajnej części ustroju nośnego.

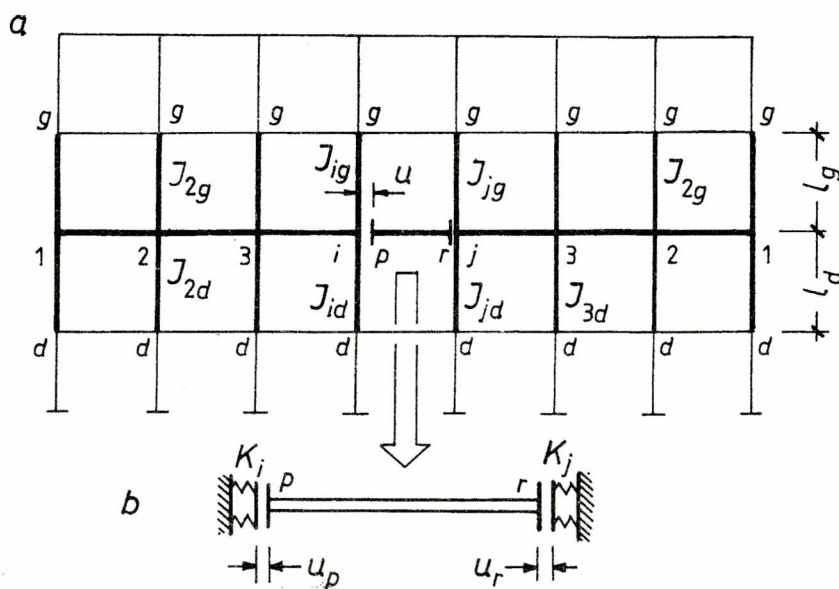
Możliwości prowadzenia analiz wpływu patologicznej technologii likwidacji pojedynczych wad geometrycznych, usytuowanych w węzłach skrajnych, na montażowe wyteżenie ustroju pokazano w przykładach obliczeniowych 2–6 zamieszczonych w pracy. Badanie wyteżeń montażowych konstrukcji z wadliwymi stykami usytuowanymi w środkowej części ustroju przedstawiono w przykładzie obliczeniowym 1. Dla uwypuklenia niedopuszczalności występowania wad w stykach większych niż ogranicza to norma PN-96/B-06200 analizowano w przykładach obliczeniowych 1–6 sytuacje montażowe, szczególnie niekorzystne, gdy po wstępnym scaleniu ustroju (bez dociągania śrub) następnie dociąga się śruby w wadliwym styku, wywołując powstanie montażowych sił wewnętrznych.

Analiza najniekorzystniejszego usytuowania wadliwych śrubowych styków doczołowych powinna być prowadzona z uwzględnieniem schematu statycznego ustroju oraz przyjętej technologii scalania elementów wysyłkowo-montażowych. Procedury i schematy statyczne stają się wówczas bardziej złożone i wymagają dochodzenia analitycznego w wielu krokach i sytuacjach montażowych, których hipotetyczne uzasadnienie jest bardzo złożone. Urealnienie analiz uwzględniających występowanie wielu wad o różnych wielkościach w różnych węzłach ustroju wymaga przyjęcia bardzo złożonych modeli probabilistycznych, co wykracza poza zakres prowadzonych badań.

4.2. Oszacowanie wyteżenia konstrukcji z wadą styku doczołowego u

Rozpatrzono stalowe ramy jednokondygnacyjne i wielopiętrowe, scalane na montażu z elementów wysyłkowo-montażowych na śrubowe styki czołowe. Przyjęto, iż elementy składowe konstrukcji są obciążone wstępnymi imperfekcjami ich długości u . W przypadku ram jednokondygnacyjnych (rys. 3.3a) występujące wady geometryczne długości u elementów wysyłkowo-montażowych mogą być pominięte w analizach, gdyż istnieje możliwość regulacji geometrii ustroju w posadowieniu na fundamentach.

Nieco inny skutek wywołują wady długości elementów wysyłkowo-montażowych dla ram wielokondygnacyjnych (rys. 4.1a), scalanych na montażu z ciągłych słupów S_i oraz rygli R_i w przypadku likwidacji szczelin w łączach drogą dociągania śrub w styku i nie zastosowania podkładek wyrównujących.



Rys. 4.1

Patologiczna technologia montażu, polegająca na dokręcaniu śrub w stykach czołowych i likwidacji szczelin między blachami czołowymi (lub blachą czołową a pasem słupa) powoduje wprowadzenie dodatkowych sił wewnętrznych w ustrój nośny. Konsekwencją takiej sytuacji jest zginanie elementów, do których łączy się element z imperfekcją u , rozciąganie elementu z wadą geometryczną u oraz rozciąganie elementów równoległych do niego oraz rozciąganie śrub w stykach doczołowych.

Dokręcenie śrub w styku łączącym element z imperfekcją jego długości u powoduje wygięcie elementów, do których jest łączony element z wadą geometryczną o wielkości u_s , wydłużenie elementu wadliwego o wielkości u_R , wydłużenie łączników w stykach o wielkości u_L , a także odkształcenie blach czołowych lub blach czołowych i pasów słupów w stykach doczołowych.

Z analiz wynika, iż wydłużenie rygla u_R , wywołane wystąpieniem montażowych sił rozciągających, w wadliwym elemencie wysyłkowo-montażowym jest rzędu do 1% wielkości wygięcia u_s elementów zginanych. Wydłużenia śrub u_L w stykach doczołowych, powstające w trakcie likwidacji imperfekcji długości elementów wysyłkowo-montażowych są rzędu do 1% wygięcia u_s elementów zginanych w obrębie styków.

Odkształcenia blach czołowych oraz pasów elementów wysyłkowo-montażowych zależą od grubości blach czołowych i pasów, uźebrowań, zastosowanych podkładek pod śrubami, a także rozmieszczenia śrub w styku doczołowym. Z analizy ścieżek równowagi statycznej węzłów doczołowych [3], [4], [39] wynika, iż nieliniowych, dużych odkształceń

węzłów należy się spodziewać w fazie ich wyteżeń bliskich nośności granicznej, a w początkowej zaś, sprężystej fazie obciążania styku, odkształcenia są sprężyste i nieduże.

W przyjętym do rozważań modelu obliczeniowym szacowania wyteżeń wielokondygnacyjnych konstrukcji z imperfekcjami długości elementów wysyłkowo-montażowych przyjęto, iż styki doczołowe są dostatecznie sztywne i można nie uwzględniać w analizach ich odkształceń. Ponadto nie uwzględnia się w przyjętym modelu obliczeniowym wydłużeń elementów u_R i śrub u_L [42]. Założenia te są bezpieczne, gdyż prowadzą do uzyskania górnych oszacowań wyteżeń ustroju wywołanych omawianym typem imperfekcji geometrycznej.

W zastępczym schemacie obliczeniowym przyjęto, że dodatkowe wyteżenie elementów ustroju, spowodowane likwidacją wady geometrycznej długości u , ogranicza się do górnej i dolnej kondygnacji w obrębie elementu wadliwego. Zastępczy schemat obliczeniowy rozważanego zagadnienia pokazano na rys. 4.1b. Obliczeniowy schemat zastępczy ustroju przyjęto w postaci pręta o długości l_{pr} , z imperfekcją długości u , który zamocowano na jego końcach w podporach o podatnościach K_i oraz K_j .

Podatność podpór pręta K_i oraz K_j wyznacza się jako siły potrzebne dla jednostkowych przemieszczeń poziomych słupów połączonych z ryglami na poziomie wadliwego elementu i wynoszą one

$$K_i = \sum_l c_{ig} E J_{ig} l_{ig}^{-3} + \sum_l c_{id} E J_{id} l_{id}^{-3}, \quad (4.1)$$

$$K_i = K_j \quad \text{dla} \quad i = j, \quad (4.2)$$

gdzie $l_{ig}, l_{id}, l_{jg}, l_{jd}$ – długości prętów,

$J_{ig}, J_{id}, J_{jg}, J_{jd}$ – momenty bezwładności przekroju prętów,

E – moduł Younga,

$c_{ig} = c_{id} = 3$ – dla prętów zamocowanych na jednym końcu przegubowo, na drugim zaś w sposób sztywny,

$c_{ig} = c_{id} = 12$ – dla prętów zamocowanych obustronnie sztywno,

$c_{ig} = c_{id} = 0$ – dla prętów zamocowanych obustronnie przegubowo.

Dokręcenie śrub w styku doczołowym z imperfekcją długości rygla poziomego u powoduje przemieszczenia poziome (wygięcia) słupów układu. W przyjętym schemacie obliczeniowym (rys. 4.1b) wywołuje to wydłużenie sprężyn o wartościach u_i oraz u_j , przy czym

$$u = u_i + u_j. \quad (4.3)$$

Aby doprowadzić do przylegania elementów czołowych w styku należy wprowadzić siłę osiową N przez dokręcenie śrub.

Przemieszczenia węzłów ramy u_i oraz u_j wynoszą

$$u_i = \frac{N}{K_i}, \quad (4.4)$$

$$u_j = \frac{N}{K_j}. \quad (4.5)$$

Po przekształceniu wzoru (4.3) oraz uwzględnieniu zależności (4.4) i (4.5) wartości siły osiowej N , która powstanie po dokręceniu śrub w styku doczołowym oraz w wadliwym elemencie wynosi

$$N = u \left(\frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_j} \right)^{-1}. \quad (4.6)$$

Przyjmując model równomiernego rozkładu sił na n łączników w stykach doczołowych, siły w śrubach złącza wynoszą

$$N_L = N/n. \quad (4.7)$$

Wprowadzenie w wadliwym elemencie siły osiowej N , jako obciążenia technologicznego, powoduje zginanie słupów w kondygnacjach przyległych do analizowanego pręta. Tak więc słupy po lewej stronie wadliwego pręta (rys. 4.1a) będą zginane w wyniku przemieszczeń u_i , po lewej stronie zaś wskutek przemieszczeń u_j ustroju.

W przypadku ciągłych słupów i jednakowych wysokości l kondygnacji górnej (g) i dolnej (d) analizowanego fragmentu ramy, momenty zginające w słupach na poziomach wadliwego elementu $M_{ig} = M_{id} = M_i$ oraz na poziomach ich zamocowania w górnej i dolnej kondygnacji $M_{gi} = M_{di} = M_i$ wynoszą

$$M_i = M \frac{J_{ig} + J_{id}}{\sum_i (J_{ig} + J_{id})}, \quad (4.8)$$

gdzie

$$M = 6u_i El^{-2} \sum_i (J_{ig} + J_{id}). \quad (4.9)$$

Jeśli występują zróżnicowane warunki zamocowania słupów w węzłach górnych – g i dolnych – d , to montażowe siły wewnętrzne w ustroju należy wyznaczyć analizując adekwatny schemat ramy obciążonej przemieszczeniem u_i .

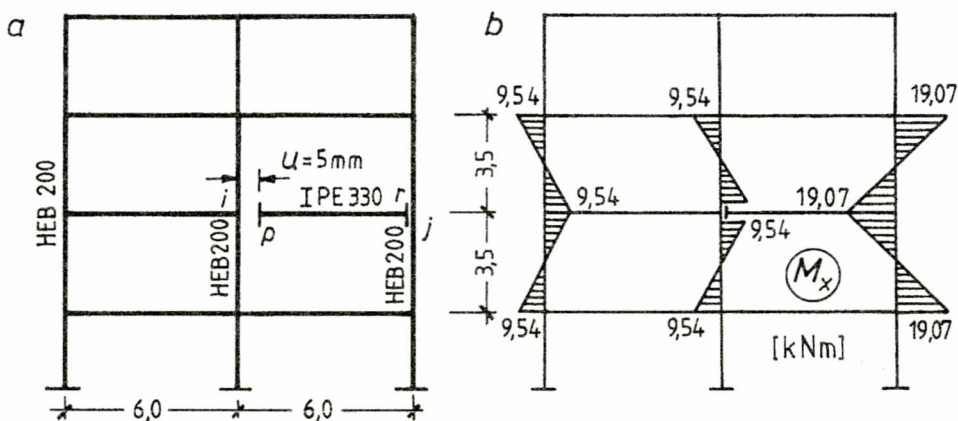
Oprócz siły osiowej N w wadliwym styku doczołowym $i-p$ oraz przecie pr w słupach górnych i dolnych analizowanego fragmentu powstają momenty zginające M_i oraz siły

poprzeczne V_i . W ryglach górnych i dolnych, równoległych do pręta pr z imperfekcją jego długości, powstaną montażowe siły osiowe.

Przykład 1

Wyznaczyć siłę osiową w ryglu N oraz momenty zginające w ramie o schemacie pokazanym na rys. 4.2a, wywołane wadliwym montażem konstrukcji przez dociągnięcie śrub w styku z imperfekcją u , przekraczającą wielkość dopuszczalną przez normę odbioru konstrukcji [65] $u_{dop} = \pm(1 \text{ mm} + L/10\,000) = 1,6 \text{ mm}$. Założono, iż słup środkowy ma strzałkę wstępnego wygięcia oraz w konstrukcji występują rygle o losowych długościach tak, że łączna odchyłka geometryczna styku doczołowego u wynosi 5 mm.

Charakterystyki geometryczne i sztywnościowe słupów z HEB 200 wynoszą:
 $J_{xS} = 5700 \text{ cm}^4$, $W_{xS} = 570 \text{ cm}^3$, $l_S = 3,50 \text{ m}$.



Rys. 4.2

Podatności K_i , K_j podpór schematu zastępczego analizowanej ramy wynoszą

$$K_i = 4 \cdot 12 EJ_{xS} l^{-3} = 4 \cdot 12 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 5700 \cdot 10^{-8} \cdot 3,5^{-3} = 13\,081 \text{ kN/m},$$

$$K_j = 2 \cdot 12 EJ_{xS} l^{-3} = 6\,541 \text{ kN/m}.$$

Siła osiowa w ryglu pr wynosi

$$N = u \left(\frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_j} \right)^{-1} = 0,005 \left(\frac{1}{130\,811} + \frac{1}{65\,413} \right)^{-1} = 21,80 \text{ kN}.$$

Przemieszczenia poziome u_i oraz u_j ramy po dokręceniu śrub w styku doczołowym wynoszą

$$u_i = N/K_i = 21,80/130,81 = 0,167 \text{ cm},$$

$$u_j = N/K_j = 21,80/65,41 = 0,333 \text{ cm}.$$

Moment zginający M_f w słupie prawym wynosi

$$M_f = 0,125 \text{ N} \cdot 2 l_s = 0,125 \cdot 21,80 \cdot 2 \cdot 3,50 = 19,07 \text{ kNm}.$$

Momenty zginające w ramie z analizowaną wadą styku pokazano na rys. 4.2b.

Sprężysta nośność giętna przekroju słupa ze stali St3 wynosi

$$M_R = W_{xs} f_d = 570 \cdot 10^{-6} \cdot 215 \cdot 10^3 = 122,55 \text{ kNm}.$$

Dokręcenie śrub w wadliwym styku doczołowym z imperfekcją długości rygla, przekraczającą wielkość dopuszczalną określoną w normie [65] i niezastosowanie przekładki o grubości 5 mm, powoduje powstanie w prawym słupie ramy momentu zginającego stanowiącego 15,6% jego nośności sprężystej na zginanie.

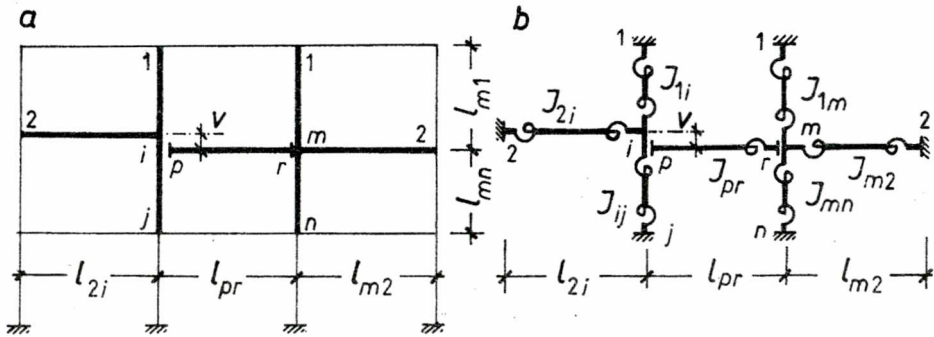
4.3. Oszacowanie wyężenia konstrukcji z wadą styku doczołowego v

Na rysunku 3.1 i 6.1c przedstawiono wadę styku doczołowego w ramie wielonawowej, polegającą na pionowym przemieszczeniu v otworów w przylegających do siebie pasie słupa i blasze czołowej rygla. Podobnie jak w przypadku wady kątowej α , likwidacja imperfekcji liniowej v , przez dokręcenie skośnie usytuowanych w otworach średnio dokładnych z luzem Δ śrub, prowadzi do wstępnego giętnego wyężenia wadliwego styku oraz prętów konstrukcji. Kierunek montażowego momentu zginającego węzła, wywołanego likwidacją imperfekcji liniowej v zależy od kierunku tego przemieszczenia. Dlatego też ten dodatkowy moment zginający M wywołany przemieszczeniem v może być zgodny z kierunkiem momentu zginającego od obciążeń zewnętrznych lub też stanowić giętne obciążenie węzła o znaku przeciwnym.

W pierwszej sytuacji wstępne obciążenie węzła momentem M prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości styku, a jego nośność opisuje zależność (4.27).

Śrubowe styki doczołowe konstruuje się adekwatnie do kierunku działających w węzłach momentów zginających od obciążeń zewnętrznych. Dlatego też w sytuacji, gdy wstępny moment zginający M w węźle jest przeciwny do kierunku momentu od obciążeń zewnętrznych, połączenie takie może mieć niedostateczną nośność i wykazywać cechy styku przegubowego lub podatnego [11]. Prowadzić to może do powstania zbieżnej szczeliny w takim styku i zmiany schematu statycznego ustroju w stosunku do przyjętego w założonym modelu obliczeniowym.

Należy zauważyć, iż odchyłka montażowa przechyłu rygła (patrz schematy na rys. 6.1 oraz 6.1f – odchyłki ψ) po dokręceniu śrub w stykach powoduje wystąpienie na końcach pręta momentów o przeciwnych znakach. Wpływ odchyłki v na montażowe wyężenie ustroju może być analizowany również jako odchyłki kątowe na końcach pręta (rys. 6.1f). W tym rozdziale wadę liniową v w styku przyporządkowano połączeniu końca p pręta pr z węzłem i konstrukcji.



Rys. 4.3

Rozpatrzono konstrukcję o schemacie pokazanym na rys. 4.3a, w węźle i której jest sprężystość połączonych j prętów oraz rygiel R (pręt pr) za pomocą śrubowego styku doczołowego z imperfekcją liniową v w węźle $i-p$. Przesunięcie v węzła p rygła R w celu połączenia go z węzłem i powoduje giętne wyężenie styku momentem zginającym. Jeśli przesunięcie v podczas likwidacji wady geometrycznej w styku $i-p$ słupa z ryglem jest przeciwne do kierunku działających obciążeń zewnętrznych, to powstający dodatkowy moment zginający w węźle $i-p$ będzie zgodny z kierunkiem momentu od obciążeń zewnętrznych i wynosi on

$$M_v = vdEJ_{pr}I_{pr}^{-2}, \quad (4.10)$$

gdzie J_{pr} – moment bezwładności przekroju pręta pr ,

l_{pr} – długość pręta pr ,

E – moduł Younga,

$d = 6$ – dla rygła zamocowanego sztywno w węźle p i r ,

$d = 3$ – dla rygła zamocowanego sztywno w węźle p i przegubowo w węźle r .

Zastępczy schemat obliczeniowy analizowanej ramy z imperfekcją przesunięcia liniowego styku doczołowego v pokazano na rys. 4.3b. W modelu obliczeniowym analizy tego typu wady połączenia przyjęto założenia dotyczące sztywności i odkształcalności prętów oraz styku jak w badaniach imperfekcji liniowej u .

Moment zginający M według wzoru (4.10) jest wstępnym obciążeniem technologicznym zarówno wadliwego doczołowego styku śrubowego $i-p$, jak i prętów w nim połączonym. Przywęzłowe momenty zginające prętów połączonych w styku $i-p$ wyznacza się ze wzorów

$$M_{ij} = \frac{k_{ij}}{K_{ij}} M_v, \quad (4.11)$$

$$M_{ji} = b M_v, \quad (4.12)$$

$$M_{pr} = M_v, \quad (4.13)$$

$$M_{rp} = f M_v, \quad (4.14)$$

gdzie K_{ij}, k_{ij} – jak we wzorach (4.31) i (4.32),

b – jak we wzorze (4.37),

$f = 6$ – dla rygla zamocowanego sztywno w węzłach p i r ,

$f = 0$ – dla rygla zamocowanego sztywno w węźle p i przegubowo w węźle r .

Oprócz momentu zginającego M według wzoru (4.10) w wadliwym styku $i-p$ oraz $r-m$ wystąpi dodatkowa siła poprzeczna, która wynosi

$$V_1 = V_r = V_p, \quad (4.15)$$

$$V_1 = g v E J_{pr} l^{-3}, \quad (4.16)$$

gdzie $g = 12$ – dla rygla zamocowanego sztywno w węzłach p i r ,

$g = 3$ – dla rygla zamocowanego sztywno w węźle p i przegubowo w węźle r .

Siłę V_1 , według wzoru (4.16), należy uwzględnić w analizach wytrzymałościowych zarówno doczołowego wadliwego styku śrubowego $i-p$, jak i wyężenia prętów połączonych w węźle i . Śruby w wadliwym styku doczołowym będą rozciągane (od momentu zginającego) i ścinane od sił poprzecznych. Zagadnienie interakcyjnej nośności śrub ścinanych i rozciąganych omówiono w rozdziale 5.

Jeśli połączenie węzła r rygla R z węzłem m ramy jest typu przegubowego, to nie wystąpią w nim dodatkowe momenty zginające, a jedynie siły poprzeczne, które wyznacza się ze wzoru (4.16).

Likwidacja wady geometrycznej v w styku doczołowym $i-p$ powoduje wystąpienie wstępnego momentu zginającego M w sztywnym styku doczołowym węzła r rygla R z węzłem m ramy.

Wstępny moment zginający M w styku $r-m$ wyznacza się ze wzoru (4.10), dla $d = 6$ i ma on zwrot przeciwny niż w styku $i-p$. Przywęzłowe momenty w prętach połączonych

w styku $r-m$ wyznacza się według wzorów (4.11)–(4.15) dla $i = m$ oraz $j = n$ (gdzie j oraz n liczba prętów po lewej i prawej stronie rygła pr – patrz rys. 4.3).

Przykład 2

Wyznaczyć momenty zginające w ramie o schemacie pokazanym na rys. 4.4a, wywołane likwidacją losowego przemieszczenia otworów w pasie słupa S w stosunku do otworów w blasze czołowej rygła ramy R , o wielkości $v = 10$ mm (przekraczającą dopuszczalną wielkość podaną w normie [65]), po dokręceniu śrub w wadliwym styku. Doczołowe połączenie śrubowe rygła R z IPE 360 ze słupem S z HEB 260 zaprojektowano jako sztywne.

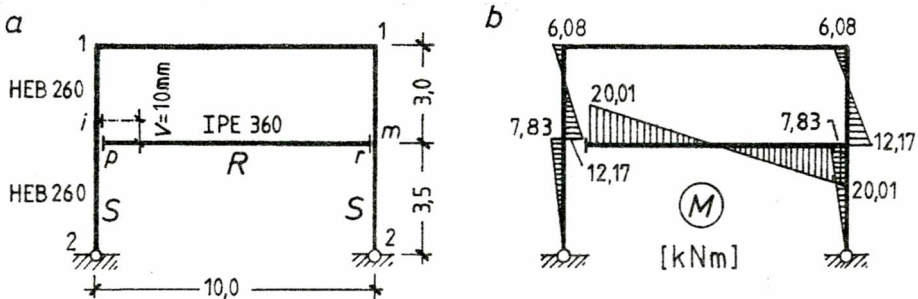
Charakterystyki geometryczne i sztywnościowe przekrojów prętów ramy wynoszą:

IPE 360

$$\begin{aligned} J_x &= 16\,270 \text{ cm}^4, \\ W_x &= 904 \text{ cm}^3, \\ l_{pr} &= 10,0 \text{ m}, \end{aligned}$$

HEB 260

$$\begin{aligned} J_x &= 14\,920 \text{ cm}^4, \\ W_x &= 1150 \text{ cm}^3, \\ l_{i1} &= 3,0 \text{ m}, \quad l_{i2} = 3,5 \text{ m}. \end{aligned}$$



Rys. 4.4

Moment zginający wywołany losowym przemieszczeniem otworów w styku doczołowym rygła ze słupem i dociągnięciem śrub w wadliwym złączu wynosi

$$M_v = 6 v d E J_{pr} l_{pr}^{-2} = 6 \cdot 0,01 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 16\,270 \cdot 10^{-8} \cdot 10,0^{-2} = 20,01 \text{ kNm}.$$

Charakterystyki sztywnościowe prętów oraz węzłów wynoszą

$$k_{i1} = 4 E J_{i1} / l_{i1} = 4 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 14\,920 \cdot 10^{-8} / 3,0 = 40\,781 \text{ kNm},$$

$$k_{i2} = 3 E J_{i2} / l_{i2} = 3 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 14\,920 \cdot 10^{-8} / 3,5 = 26\,216 \text{ kNm},$$

$$K_{ij} = k_{i1} + k_{i2} = 40\,781 + 26\,216 = 66\,997 \text{ kNm},$$

$$M_{i1} = M k_{ij} / K_{ij} = 20,01 \cdot 40\,781 / 66\,997 = 12,17 \text{ kNm},$$

$$M_{1i} = 0,5 M = 0,5 \cdot 12,17 = 6,08 \text{ kNm},$$

$$M_{i2} = M k_{i2} / K_{ij} = 20,01 \cdot 26\,216 / 66\,997 = 7,83 \text{ kNm},$$

$$M_{2i} = b M_{i2} = 0.$$

Rozkład momentów zginających w analizowanej ramie z wadą styku doczołowego, wywołany patologicznym montażem, przedstawiono na rys. 4.4b. Nośności sprężyste na zginanie rygla R oraz słupa S wynoszą

$$M_{R,R} = W_{xR} f_d = 904 \cdot 10^{-6} \cdot 215 \cdot 10^3 = 194,4 \text{ kNm},$$

$$M_{R,S} = W_{xS} f_d = 1150 \cdot 10^{-6} \cdot 205 \cdot 10^3 = 235,7 \text{ kNm}.$$

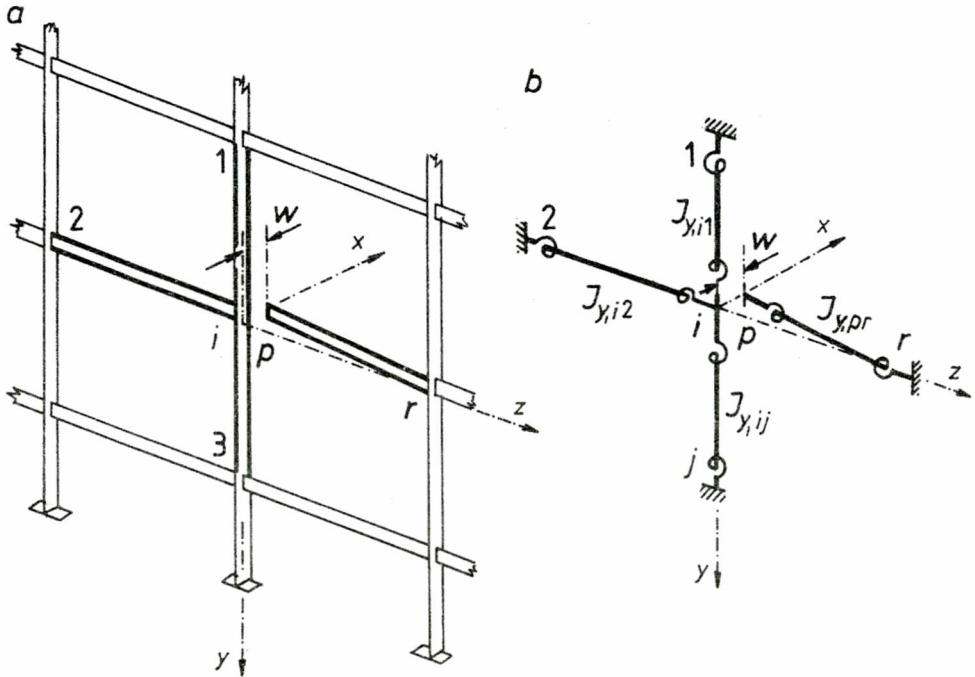
Moment zginający w ryglu, wywołany błędnym sposobem likwidacji losowego przemieszczenia otworów, w śrubowym styku doczołowym (przekraczającym dopuszczalną wielkość podaną w normie [65]), przez dokręcenie śrub w złączu stanowi 10,3% jego nośności sprężystej na zginanie. Moment zginający w słupie, wywołany niewłaściwą technologią likwidacji analizowanej wady w styku doczołowym, stanowi 5,2% jego nośności sprężystej na zginanie.

4.4. Oszacowanie wyężenia konstrukcji z wadą styku doczołowego w

Na rysunku 4.5a pokazano schemat ramy wielokomorowej z imperfekcją liniową w styku doczołowego, polegającą na przemieszczeniu poziomym prostopadłym do płaszczyzny ustroju węzła p rygla, w odniesieniu do węzła i konstrukcji. Taka wada geometryczna ustroju może być spowodowana zarówno niestarannym wykonaniem styku, jak i wstępnym wygięciem osi słupa ustroju.

W przypadku ram jednokondygnacyjnych, występująca w ustroju wada geometryczna w elementach wysyłkowo-montażowych może być pominięta, gdyż zazwyczaj istnieją możliwości regulacji geometrii systemu w posadowieniu na fundamentach. Dla ram wielokondygnacyjnych, scalanych na montażu z ciągłych słupów S_i oraz rygli R_i , imperfekcja liniowa komplikuje montaż, gdyż występuje przemieszczenie otworów w styku. Wówczas wymuszony montaż elementów z rozważaną wadą styku powoduje montażowe wyężenie zarówno styku, jak i prętów konstrukcji. Po *naprowadzeniu* otworów w elementach przylgowych, założeniu i dokręceniu śrub w styku, powstają w połączeniu oraz przyległych do złącza prętach, momenty zginające w płaszczyznach prostopadłych do płaszczyzny ramy.

Za model obliczeniowy analizy wpływu imperfekcji liniowej w analizowanego typu połączeń na wyężenie ustroju przyjęto schemat pokazany na rys. 4.5b. Składa się on ze sprężystie zamocowanych na swych końcach j prętów, połączonych w węzle i , oraz rygła pr .



Rys. 4.5

W przyjętym schemacie obliczeniowym założono, iż propagacja następstw niewłaściwej technologii likwidacji wady w styku $i-p$ ograniczy się tylko do prętów zbiegających się w tym złączy.

Likwidacja wady poziomego przemieszczenia w prostopadłego do płaszczyzny ramy styku $i-p$ wiąże się z przemieszczeniem w_p węzła p rygła oraz w_i węzła i ustroju

$$w = w_i + w_p. \quad (4.17)$$

Aby doprowadzić do możliwości założenia śrub w połączeniu, należy w wadliwym styku wprowadzić obciążenie P prostopadłe do płaszczyzny badanej ramy. Przemieszczenia w_i oraz w_p wynoszą

$$w_i = \frac{P}{K_{yi}}, \quad (4.18)$$

$$w_p = \frac{P}{k_{yp}}. \quad (4.19)$$

We wzorach (4.18) i (4.19) K_{yi} oraz k_{yp} są podatnościami węzła i (ramy) oraz węzła p (rygla) dla sztywności względem słabszej osi oporu przekrojów J_y i wyznacza się je ze wzorów

$$K_{yi} = \sum_j k_{y,ij} = \sum_j g_{ij} EJ_{y,ij} l_{ij}^{-3}, \quad (4.20)$$

$$k_{yp} = g_{pr} EJ_{y,pr} l_{ij}^{-3}, \quad (4.21)$$

w których użyto oznaczeń jak we wzorach (4.10) oraz (4.16).

Po przekształceniu zależności (4.17)–(4.19) otrzymano wzór określający siłę poprzeczną P , która wynosi

$$P = w \left(\frac{1}{K_{yi}} + \frac{1}{k_{yp}} \right)^{-1}. \quad (4.22)$$

Przemieszczenia węzła i ramy w_i oraz węzła p rygla w_p wynoszą

$$w_i = w \frac{K_{yi}}{K_{yi} + k_{yp}}, \quad (4.23)$$

$$w_p = w \frac{k_{yp}}{K_{yi} + k_{yp}}. \quad (4.24)$$

Moment zginający w wadliwym styku rygla wyznacza się ze wzoru

$$M_w = w_p d EJ_{y,p} l_{pr}^{-2}, \quad (4.25)$$

w którym zastosowano oznaczenia jak we wzorze (4.10). Należy zauważyć, iż w wadliwym styku powstaną również siły poprzeczne, a śruby w połączeniu będą rozciągane (od momentu zginającego) i ścinane od siły poprzecznej.

Momenty przęsłowe w węźle i ramy wyznacza się analizując siły wewnętrzne w ustroju wywołane przemieszczeniem w_i . Dla ciągłych słupów (prętów $1i$ oraz ij na rys. 4.5b) oraz jednakowych wysokości kondygnacji ramy i sztywnego zamocowania w węzłach 1 oraz j moment zginający w słupie można oszacować ze wzoru

$$M_{iS} = 6w_i E l^{-2} (J_{y,i1} + J_{y,ij}), \quad (4.26)$$

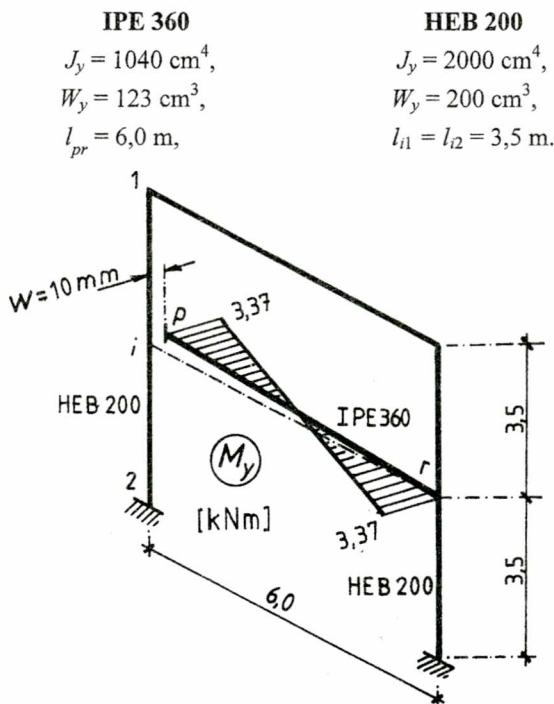
w którym l – wysokość kondygnacji (długość słupów),

$J_{y,i1}, J_{y,ij}$ – momenty bezwładności słupów względem słabszej osi oporu przekroju pręta.

Przywęzłowy moment zginający w ryglu (w przecię $i2$ na rys. 4.5b) należy przyjąć według wzoru (4.25).

Przykład 3

Wyznaczyć momenty zginające w ryglu ramy o schemacie pokazanym na rys. 4.6, wywołane niewłaściwą technologią (przez dokręcenie śrub w złączu) likwidacją losowego przemieszczenia otworów w pasie słupa S w stosunku do otworów w blasze czołowej rygla R , o wielkości $w = 10$ mm (przekraczającego wielkość dopuszczalną podaną w normie [65]). Połączenie rygla R z IPE 360 ze słupem S z HEB 260 zaprojektowano jako sztywne. Charakterystyki geometryczne i sztywnościowe przekrojów prętów ramy wynoszą



Rys. 4.6

Charakterystyki sztywnościowe prętów węzłów ramy wynoszą

$$k_{y,i1} = k_{y,i2} = 12 EJ_y l^{-3} = 12 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 2000 \cdot 10^{-8} \cdot 3,5^{-3} = 1147 \text{ kN/m},$$

$$K_{yi} = 2 K_{y,il} = 2 \cdot 1147 = 2294 \text{ kN/m},$$

$$k_{yp} = 12 EJ_y l^{-3} = 12 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 1040 \cdot 10^{-8} \cdot 6,0^{-3} = 118 \text{ kN/m}.$$

Przemieszczenia styku $i-p$ wynoszą

$$w_p = w \frac{K_{yi}}{K_{yi} + k_{yp}} = 0,01 \frac{2294}{2294 + 118} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

$$w_i = w - w_p = 10 - 9,5 = 0,5 \text{ mm}.$$

Moment zginający w ryglu ramy w wadliwym styku $i-p$ wynosi

$$M_w = 6 w_p EJ_y l^{-2} = 6 \cdot 0,0095 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 1040 \cdot 10^{-8} \cdot 6,0^{-2} = 3,37 \text{ kNm}.$$

Nośność sprężysta na zginanie rygla ramy wynosi

$$M_{R,R} = W_y f_d = 123 \cdot 10^{-6} \cdot 215 \cdot 10^3 = 26,40 \text{ kNm}.$$

W analizowanej ramie z imperfekcją przemieszczenia otworów w styku $w = 10 \text{ mm}$ (przekraczającą wielkość dopuszczalną podaną w normie [65]), niewłaściwy, wymuszony montaż połączenia spowoduje powstanie w ryglu oraz złączu momentu zginającego, stanowiącego 12,8% nośności sprężystej rygla na zginanie.

4.5. Oszacowanie wyężenia konstrukcji z wadą styku doczołowego α

Wady geometryczne połączenia pokazane na rys 3.4b polegają na wystąpieniu zbieżnych szczelin, to jest braku równoległości blach czołowych rygli lub blach czołowych rygli i pasów słupów. Występująca w śrubowym styku doczołowym imperfekcja kątowa α_i może mieć rozwartość α_2 – zgodną lub α_1 – przeciwną do wywołanej działającym od obciążeń zewnętrznym momentem zginającym.

Jeśli w ustroju występuje zbieżna szczelina o wielkości α_1 (brak przylegania w strefie ściskanej), to styk projektowany jako nominalnie sztywny będzie w początkowej fazie obciążania wykazywać cechy przegubu. Dopiero pod wpływem pewnej części obciążenia konstrukcji nastąpi obrót prętów w węźle, *zamknięcie* szczeliny i styk będzie zdolny przenosić momenty zginające. Imperfekcja kątowa α_1 powoduje zmianę schematu statycznego ustroju w początkowej fazie obciążenia. W przypadku konstrukcji statycznie wyznaczalnych powoduje to geometryczną zmienność ustroju, dla konstrukcji statycznie niewyznaczalnych zaś zmianę redystrybucji sił wewnętrznych, w stosunku do przyjętego schematu obliczeniowego. Z tych też powodów imperfekcja kątowa α_1 w konstrukcjach scalanych, z zastosowaniem

śrubowych styków doczołowych jest niedopuszczalna i połączenie takie należy bezwzględnie naprawić lub zdyskwalifikować wadliwy element montażowy.

Wadliwie wykonane połączenie z imperfekcją kątową α_2 będzie wykazywać cechy połączenia sztywnego, gdy blachy czołowe będą dociskały do siebie w strefie ściskanej złącza (w punkcie obrotu styku 0 – rys. 3.4b). Omawiany typ połączeń śrubowych projektuje się jako styki sprężane. Dokręcenie śrub w wadliwie wykonanym styku czołowym może doprowadzić do *likwidacji* zbieżnych szczelin w węźle. Jednak konsekwencją takiej sytuacji jest wprowadzenie wstępnego obciążenia węzłów momentami zginającymi i zmniejszeniem nośności zarówno połączeń, jak i ustroju. Dlatego też taki sposób montażu należy uznać za patologiczny i błędny. Likwidacja zbieżnych szczelin w stykach powoduje zmianę modelu wyteżenia połączenia śrubowego oraz wstępnego zginania prętów łączonych w wadliwym węźle. Z doświadczeń realizacji konstrukcji z tego typu imperfekcjami [12], [51] wynika, iż często próby wymuszania docięnięcia blach czołowych w takich stykach kończyły się zrywaniem śrub, zarówno w trakcie montażu, jak i eksploatacji obiektów. Potwierdza to niedopuszczalność takiego sposobu likwidacji wady kątowej rozważanego typu styków śrubowych. Poprawny sposób naprawy wadliwego styku polega na zastosowaniu zbieżnych podkładek między elementami przylgowymi połączenia.

Jak już wspomniano, gdy w połączeniu doczołowym występuje określony kąt rozwarcia styku (α_2 – rys. 3.4b), można wtedy pozostawić w węzłach szczeliny, gdyż nie zmienia to schematu statycznego ustroju. Może to wystąpić w przypadku statycznych obciążeń ustroju, gdy można zastosować połączenia niesprężane. Należy wówczas liczyć się ze zmniejszeniem sztywności styków oraz zwiększeniem zagrożenia korozyjnego węzłów, spowodowanego niewypełnieniem szczelin między blachami czołowymi złącza.

Niesprężane połączenia z imperfekcjami α_2 nie mogą jednak być zaakceptowane, jeśli w konstrukcji występują obciążenia zmienne co do znaku (obciążenia dynamiczne, udarowe, wielokrotnie zmienne). Wynika to między innymi z małej wytrzymałości zmęczeniowej śrub o wysokiej wytrzymałości poddanych zmiennym wyteżeniom rozciągającym. Dlatego też w ustrojach nośnych obciążonych dynamicznie [63] zaleca się stosowanie sprężonych połączeń doczołowych kategorii E lub D, a bezpieczeństwo eksploatacji takich styków jest uzależnione od warunku, aby obciążenie zewnętrzne nie spowodowało rozwarcia styku. Będzie to występowało w razie zaniku naprężeń docisku między blachami czołowymi najbardziej wyteżonej śruby w połączeniu.

W przypadku sprężania połączenia doczołowego z imperfekcją kątową α_i należy wyróżnić dwie fazy. Dokręcając śruby w wadliwym styku w pierwszej fazie sprężania likwiduje się szczeliny między blachami czołowymi i wprowadza się w węzeł wstępny moment zginający M . Moment ten stanowi wstępne obciążenie technologiczne i przekazuje się zarówno na wadliwy styk śrubowy, jak i na pręty zbiegające się w łączonym węźle. Ten stan wyteżenia styku należy uznać za fazę wyjściową do właściwego sprężania złącza.

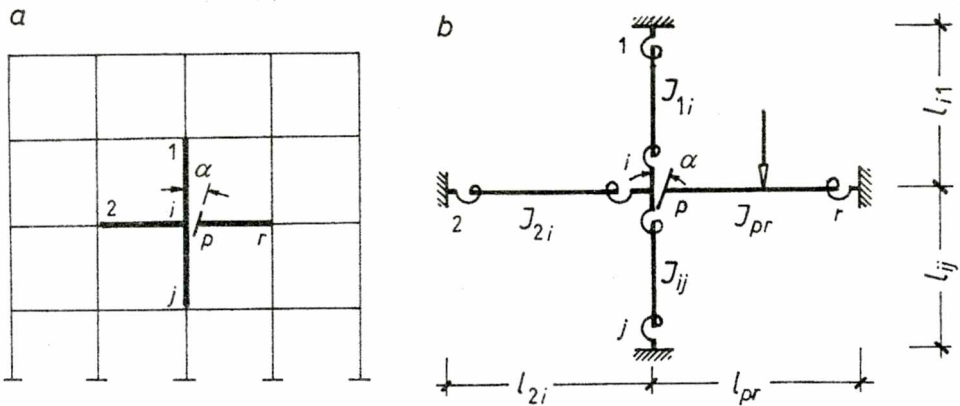
Nośność sprężonego styku $M_{R,\alpha}$ imperfekcją kątową połączenia α_i wynosi

$$M_{R,\alpha} = M_R - M, \quad (4.27)$$

gdzie M_R – nośność styku doczołowego według wzorów (89)– (91) w [63],

M – moment zginający potrzebny do zlikwidowania imperfekcji kątowej α .

W celu oszacowania montażowych sił wewnętrznych wywołanych odchyłkami kątowymi, przekraczającymi według [65] dopuszczalne, likwidowanymi przez dociąganie śrub, rozpatruje się ustrój o schemacie pokazanym na rys. 4.7a. W przyjętym schemacie w węźle i w sposób sprężysty jest połączonych j prętów oraz rygiel R (pręt pr) za pomocą śrubowego styku doczołowego z imperfekcją kątową $\alpha = \alpha_2$ (kąt obrotu zgodny z kierunkiem działającego momentu zginającego w połączeniu elementów; szczelina znajduje się w strefie rozciąganej złącza).



Rys. 4.7

W przyjętym modelu obliczeniowym oszacowania wyężenia ustroju z kątową wadą technologiczną (rys. 4.7b) założono, iż likwidacja wady geometrycznej konstrukcji ogranicza się jedynie do prętów połączonych w węźle $i-p$. Jest to założenie bezpieczne, gdyż wstępne obciążenie technologiczne, wywołane dokręceniem śrub w wadliwym styku, będzie się przekazywać również na pozostałe słupy i rygle analizowanego ustroju i w rzeczywistości powstaną mniejsze siły wewnętrzne w prętach.

Likwidacja przez dokręceniu śrub w styku imperfekcja kątowa połączenia powoduje obrót węzła i o kąt α_i oraz obrót węzła p rygla o kąt α_p

$$\alpha = \alpha_i + \alpha_p. \quad (4.28)$$

Aby doprowadzić do przylegania elementów czołowych w styku należy wprowadzić moment zginający M przez dokręcenie śrub w złączu. Kąty obrotów węzła i ramy α_i oraz węzła p rygla α_p wynoszą

$$\alpha_i = \frac{M}{K_{ij}}, \quad (4.29)$$

$$\alpha_p = \frac{M}{k_{pr}}, \quad (4.30)$$

gdzie

$$K_{ij} = \sum_j k_{ij} = \sum_j a_{ij} E J_{ij} l_{ij}^{-1}, \quad (4.31)$$

$$k_{pr} = a_{pr} E J_{pr} l_{pr}^{-1}, \quad (4.32)$$

w których

J_{ij}, J_{pr} – momenty bezwładności przekrojów prętów ij oraz pr ,

l_{ij}, l_{pr} – długości prętów ij oraz pr ,

E – moduł Younga,

$a_{ij} = a_{pr} = 3$ – dla prętów zamocowanych przegubowo w węzłach j lub r oraz sztywno w węzłach i lub p ,

$a_{ij} = a_{pr} = 4$ – dla prętów zamocowanych sztywno na obu końcach,

$\sum_j$ – sumowanie obejmuje pręty sztywno połączone w węzle i .

Po przekształceniu wzoru (4.28) oraz uwzględnieniu zależności (4.29) i (4.30) wyznaczono wartość wywołanego dokręceniem śrub momentu zginającego w styku, który wynosi

$$M_\alpha = \alpha \left(\frac{1}{K_{ij}} + \frac{1}{k_{pr}} \right)^{-1}, \quad (4.33)$$

kąty obrotu zaś węzła p rygla α_p oraz węzła i styku α_i opisują wzory

$$\alpha_p = \alpha \frac{k_{pr}}{K_{ij} + k_{pr}}, \quad (4.34)$$

$$\alpha_i = \alpha \frac{K_{ij}}{K_{ij} + k_{pr}}. \quad (4.35)$$

Moment zginający M_α według wzoru (4.33) stanowi obciążenie technologiczne zarówno śrubowego styku doczołowego, jak i przekroju pręta w węzle p .

Przywęzłowe momenty zginające prętów zbiegających się w węźle i wyznacza się ze wzorów

$$M_{ij} = \frac{k_{ij}}{K_{ij}} M_{\alpha} \quad (4.36)$$

$$M_{ji} = b M_{ij}, \quad (4.37)$$

gdzie $b = 0,5$ – dla pręta zamocowanego sztywno w węźle j ,

$b = 0$ – dla pręta zamocowanego przegubowo w węźle j .

Powstanie montażowych sił wewnętrznych M_{α} , M_{ij} , M_{ji} powoduje, że w elementach ustroju (prętach, węzłach) jeszcze przed przyłożeniem obciążeń zewnętrznych wystąpią wyężenia ustroju, które dodając się do wyężeń od obciążeń zewnętrznych konstrukcji mogą wyczerpać jego nośność (dla obciążeń mniejszych niż dla modelu bez imperfekcji kątowej α styków doczołowych). Ponadto należy zauważyć, iż występujące wówczas dodatkowe montażowe siły wewnętrzne wywołują nie tylko rozciąganie od zginania, ale i ścinanie śrub w styku od sił poprzecznych (patrz rozdział 5).

Przykład 4

Wyznaczyć momenty zginające w ramie o schemacie pokazanym na rys. 4.8a, wywołane likwidacją (przez dociągnięcie śrub w połączeniu zamiast zastosowania podkładek) szczeliny $\Delta = 1$ mm w osi pasa górnego styku doczołowego łączącego rygiel R z IPE 360 ze słupem S z HEB 260.

Charakterystyki geometryczne i sztywnościowe prętów ramy wynoszą

IPE 360	HEB 260
$J_x = 16\,270 \text{ cm}^4$,	$J_x = 14\,920 \text{ cm}^4$,
$W_x = 904 \text{ cm}^3$,	$W_x = 1150 \text{ cm}^3$,
$l_{pr} = 10,0 \text{ m}$,	$l_{i1} = 3,0 \text{ m}$,
	$l_{i2} = 3,5 \text{ m}$.

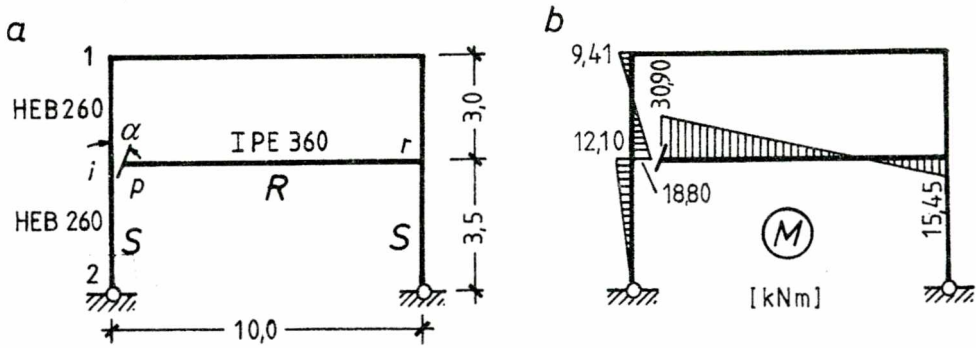
Wielkość imperfekcji kątowej α styku wynosi

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta}{h} \frac{\pi}{180} = \arctg \frac{1}{360} \frac{3,14}{180} = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$$

Charakterystyki sztywnościowe węzła i oraz styku p wynoszą

$$K_{ij} = 4 EJ_{i1}/l_{i1} + 3 EJ_{i2}/l_{i2} = (4/3,0 + 3/3,5) \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 14\,920 \cdot 10^{-8} = 66\,997 \text{ kNm},$$

$$k_{pr} = 4 EJ_{pr}/l_{pr} = 4 \cdot 205 \cdot 16\,270 \cdot 10^{-8} / 10,0 = 13\,341 \text{ kNm}.$$



Rys. 4.8

Momenty zginające, spowodowane likwidacją imperfekcji kątowej α , wynoszą

$$M_{\alpha} = \alpha \left(\frac{1}{K_{ij}} + \frac{1}{k_{pr}} \right)^{-1} = 2,778 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{66\,997} + \frac{1}{13\,341} \right)^{-1} = 30,90 \text{ kNm},$$

$$M_{pr} = 30,90 \text{ kNm},$$

$$M_{rp} = 0,5 M_{pr} = 0,5 \cdot 30,90 = 15,45 \text{ kNm},$$

$$k_{i1} = 4 EJ_{i1}/l_{i1} = 4 \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 14\,920 \cdot 10^{-8} / 3,0 = 40\,781 \text{ kNm},$$

$$k_{i2} = 3 EJ_{i2}/l_{i2} = 3 \cdot 205 \cdot 14\,920 \cdot 10^{-8} / 3,5 = 26\,216 \text{ kNm},$$

$$M_{i1} = \frac{k_{i1}}{K_{ij}} \cdot \frac{40\,781}{66\,997} \cdot 30,90 = 18,80 \text{ kNm},$$

$$M_{1i} = 0,5 M_{i1} = 0,5 \cdot 18,81 = 9,41 \text{ kNm},$$

$$M_{i2} = \frac{k_{i2}}{K_{ij}} \cdot \frac{26\,216}{66\,997} \cdot 30,90 = 12,10 \text{ kNm}.$$

Wykres montażowych momentów zginających w badanej ramie z imperfekcją kątową α , które powstaną w wyniku patologicznej metody scalania ustroju pokazano na rys. 4.8b.

Nośności sprężyste prętów na zginanie analizowanej ramy ze stali St3 wynoszą

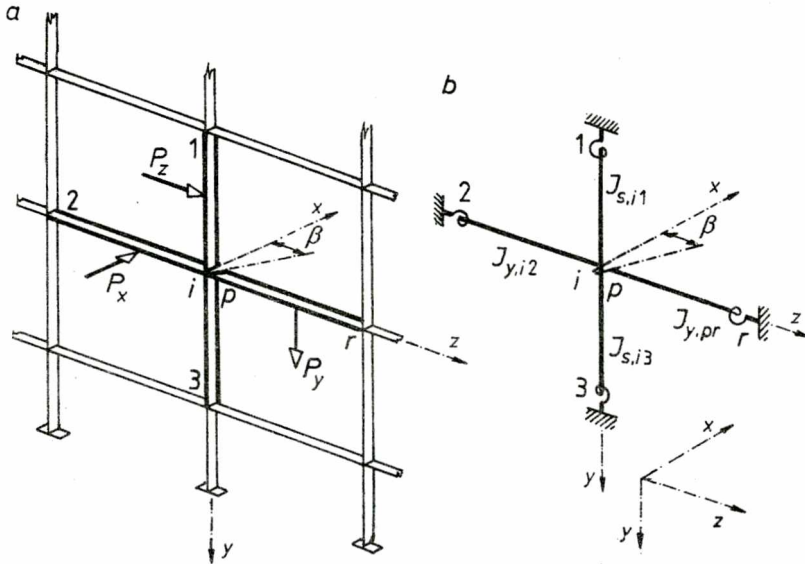
$$M_{R,pr} = W_x f_d = 904 \cdot 10^{-6} \cdot 215 \cdot 10^3 = 193,36 \text{ kNm},$$

$$M_{R,i1} = M_{R,i2} = W_x f_d = 1150 \cdot 10^{-6} \cdot 205 \cdot 10^3 = 235,75 \text{ kNm}.$$

Patologiczny montaż, polegający na dokręceniu śrub w wadliwym styku doczołowym (zamiast zastosowania podkładki klinowej między elementami przylgowymi złącza), powoduje powstanie montażowych sił wewnętrznych, które wynoszą: w ryglu 15,9% nośności sprężystej na zginanie ryglu, w słupie 8,0% nośności sprężystej na zginanie słupa.

4.6. Oszacowanie wyężenia konstrukcji z wadą styku doczołowego β

Na rysunku 4.9a przedstawiono schemat ramy wielokondygnacyjnej z imperfekcją kątową połączenia doczołowego β , w płaszczyźnie prostopadłej (xz) do płaszczyzny ramy (yz), w styku węzła p z węzłem i ramy.



Rys. 4.9

Zbieżna szczelina w styku $i-p$ sprawia, iż dla obciążeń (P_y , P_z), działających w płaszczyźnie ramy, połączenie to ma mniejszą nośność, gdyż nie spełnia założeń o idealnym przyleganiu stykających się elementów oraz symetrii względem osi y .

Obciążenie w płaszczyźnie ramy (P_y , P_z) z taką wadą geometryczną styku sprawia, iż w trakcie zamykania się szczeliny w strefie ściskanej następuje powiększenie się strefy docisku elementów przylgowych i niesymetryczne wyężenie śrub. Strefa docisku styku jest usytuowana niesymetrycznie względem osi y , a rozciągane śruby w obrębie mniejszej szczeliny złącza są bardziej wyężone niż śruby wokół większej szczeliny połączenia. Należy zaznaczyć, iż z uwagi na mimośrodowy sposób przekazywania obciążeń w styku następuje skręcanie węzła i ustroju oraz zginanie rygla pr względem osi y , co w konsekwencji prowadzi do braku płaskości ramy (w płaszczyźnie yz). Dlatego też należy w takim przypadku liczyć się z przemieszczeniami węzłów e_x ustroju w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy (rys. 4.9a) i mimośrodowego wyężenia słupów w płaszczyźnie xy . Przemieszczenia węzłów e_x oraz dodatkowe zginanie rygli może być ograniczone przez elementy usztywniające (belki

stropowe, stropy) połączone z konstrukcją i usytuowane w płaszczyźnie prostopadłej (xz) do ramy. Wówczas jednak następuje dodatkowe wyłączenie elementów usztywniających.

Analiza sztywności w płaszczyźnie xz ramy z imperfekcją kątową β (dla obciążeń prostopadłych do płaszczyzny ramy) wykazuje, iż styki takie, w zależności od kierunku działania obciążenia, będą miały zdolność przenoszenia momentu zginającego lub będą wykazywać cechy przegubu. Styki, w których kąt rozwarcia szczeliny β jest zgodny z kierunkiem działającego momentu zginającego od obciążeń zewnętrznych będą zdolne przenosić występujące w nich wyłączenia. Jeśli kąt rozwarcia szczeliny jest przeciwny do rozwarcia od działającego w styku momentu zginającego, to do wystąpienia stanu *zamknięcia* szczeliny w złączu połączenie będzie mieć cechy przegubu. Należy w tym miejscu zaznaczyć, iż tylko w sporadycznych sytuacjach projektowych wykorzystuje się dwukierunkową nośność styków doczołowych, a sztywność w płaszczyznach prostopadłych do płaszczyzny ramy zazwyczaj zapewniają odpowiednie ustroje nośne (stężenia, stropy, układy ramowe).

Analizowane zagadnienie wyłączenia konstrukcji z imperfekcją kątową β styku należy rozpatrzyć w sytuacji sprężenia śrub w złączu $i-p$ i likwidacji szczeliny między elementami przyłgowymi.

W przypadku sprężenia połączenia doczołowego z imperfekcją kątową β należy wyróżnić dwie fazy wyłączenia ustroju. Dokręcając śruby w wadliwym styku w pierwszej fazie sprężania likwiduje się szczeliny między elementami przyłgowymi i wprowadza się w węzle wstępny moment zginający M . Moment ten stanowi wstępne obciążenie technologiczne i przekazuje się na łączony rygiel (pręt pr) oraz styk $i-p$ (rys. 4.9). Następuje więc wstępne zginanie względem osi y rygla (pręta pr) oraz skręcanie w płaszczyźnie xz styku $i-p$, co skutkuje skręceniem słupów (prętów $i1$ oraz $i3$) oraz zginaniem względem osi y rygla $i2$. W razie braku więzi ograniczających przemieszczenia poziome węzłów w kierunku osi x , rama po dokręceniu śrub w wadliwym styku utraci swą płaskość, czego konsekwencją będzie mimośrodowe obciążenie słupów i zmniejszenie ich nośności. Ten stan wyłączenia styku stanowi fazę wyjściową do zasadniczego sprężenia połączenia doczołowego. Nośność sprężonego styku $M_{R,\beta}$ z imperfekcją kątową β wynosi

$$M_{R,\beta} = M_R (S_\beta), \quad (4.38)$$

gdzie M_R – nośność styku doczołowego według wzorów (89)–(91) w [63],

S_β – nośność śrub na rozciąganie pomniejszona o ich wyłączenie związane z likwidacją imperfekcji kątowej β .

Rozpatruje się ustrój o schemacie pokazanym na rys. 4.9b, w którym w węźle i są połączone dwa pręty pionowe $i1$ oraz $i3$ (słupy) oraz rygiel poziomy (pręt $i2$). Zakłada się, że pręty w węźle i są połączone w sposób sztywny, na drugim końcu zaś w sposób podatny. Z węzłem i konstrukcji jest połączony rygiel R (pręt pr), a w styku $i-p$ występuje imperfekcja

kątowa β . W przyjętym do oszacowania wpływu wady skośnie usytuowanych elementów przyłgowych na wyężenie ustroju modelu obliczeniowym o schemacie statycznym pokazanym na rys. 4.9b przyjęto, iż likwidacja wady kątowej β ogranicza się jedynie do prętów łączonych w styku $i-p$. Założenie takie jest bezpieczne, gdyż otrzymane wielkości stanowią będą górne oszacowania wyężenia konstrukcji z takimi wadami.

Likwidacja po dokręceniu śrub w styku imperfekcji kątowej β powoduje obrót węzła i o kąt β_i oraz obrót węzła p rygla o kąt β_p

$$\beta = \beta_i + \beta_p. \quad (4.39)$$

Przyleganie elementów stykających się w złączu uzyskuje się wprowadzając w styku moment zginający M przez dokręcenie śrub w złączu. Kąty obrotu β_i węzła i oraz β_p węzła p rygla wynoszą

$$\beta_i = \frac{M}{K_{iy}}, \quad (4.40)$$

$$\beta_p = \frac{M}{k_{py}}, \quad (4.41)$$

gdzie

$$K_{iy} = \sum_j k_{ij} + \sum_k k_{ik} = \sum_{ij} a_{ij} E J_{y,ij} I_{ij}^{-1} + \sum_{ik} g_{ik} G J_{s,ik} I_{ik}^{-2}, \quad (4.42)$$

$$k_{py} = a_{pr} E J_{y,pr} I_{pr}^{-1}, \quad (4.43)$$

w których $J_{y,ij}, J_{y,pr}$ – momenty bezwładności przekroju prętów względem osi y ,

$J_{s,ik}$ – moment bezwładności przy skręcaniu,

E – moduł Younga,

G – moduł odkształcenia postaciowego,

l_{ij}, l_{pr} – długości prętów zginanych względem osi y ,

l_{ik} – długości prętów skręcanych w węźle i ,

j – liczba rygli,

k – liczba słupów,

a – jak we wzorach (4.31) i (4.32),

g – jak we wzorze (4.16),

$\sum_{ij}$ – sumowanie obejmuje pręty zginane sztywno połączone w węźle i ,

$\sum_{ik}$ – sumowanie obejmuje pręty skręcane sztywno połączone w węźle i .

Po przekształceniu (4.39) oraz uwzględnieniu zależności (4.40) i (4.41) wyznaczono wartość wywołanego dokręceniem śrub momentu zginającego w styku, który wynosi

$$M_{\beta} = \beta \left(\frac{1}{K_{iy}} + \frac{1}{k_{py}} \right)^{-1}. \quad (4.44)$$

W analizie wyteżenia śrub w styku należy ponadto uwzględnić siłę poprzeczną w styku, która wywołuje ścinanie łączników.

Kąty obrotu węzła i ramy β_i oraz węzła p rygla β_p opisują wzory

$$\beta_i = \beta \frac{K_{iy}}{K_{iy} + k_{py}}, \quad (4.45)$$

$$\beta_p = \beta \frac{k_{py}}{K_{iy} + k_{py}}. \quad (4.46)$$

Moment zginający M_{β} według wzoru (4.44) stanowi montażowe obciążenie technologiczne, zarówno śrubowego styku doczołowego $i-p$, jak i rygla $p-r$ oraz prętów połączonych w węźle i .

Przywęzłowe momenty prętów połączonych w węźle i wyznacza się ze wzorów

$$M_{y,ij} = M_{\beta} \frac{k_{ij}}{K_{iy}}, \quad (4.47)$$

$$M_{s,ik} = M_{\beta} \frac{k_{ik}}{K_{iy}}, \quad (4.48)$$

$$M_{y,ji} = b M_{y,ij}, \quad (4.49)$$

$$M_{s,ki} = g M_{s,ik}. \quad (4.50)$$

Przykład 5

Wyznaczyć montażowe momenty zginające w ryglu górnym ramy o schemacie pokazanym na rys. 4.10, wywołane błędną technologią montażu (polegającą na likwidacji przez dokręcenie śrub w połączeniu) zbieżnej szczeliny w styku doczołowym w środku jego rozpiętości $\Delta = 1 \text{ mm}$ (o wielkości przekraczającej dopuszczalną $\Delta_d = b_f/300 = 0,57 \text{ mm}$ według [65]). Rygiel ramy zaprojektowano z IPE 360, o następujących charakterystykach geometrycznych: $J_y = 1040 \text{ cm}^4$, $W_y = 123 \text{ cm}^3$, $b_f = 170 \text{ mm}$, $l_{i1} = l_{pr} = 6,0 \text{ m}$.

4.7. Oszacowanie wyężenia konstrukcji z wadą styku doczołowego γ

Na rysunku 3.4f pokazano wadę kątową połączenia γ , polegającą na skręceniu blach czołowych w płaszczyźnie styku względem głównych osi bezwładności przekroju łączonych elementów. Konsekwencją tej wady złącza jest wzajemne przemieszczenie otworów w blachach czołowych (lub blachach czołowych i pasach słupów), które utrudnia założenie śrub. Założenie śrub w styku doczołowym z taką wadą kątową wymaga skręcenia łączonych elementów wysyłkowo-montażowych, co wiąże się z wstępnym montażowym wyężeniem, zarówno złącza, jak i konstrukcji.

Czołowy styk śrubowy z imperfekcją kątową γ , w którym zastosowano patologiczny sposób montażu, jest obciążony w płaszczyźnie styku momentem skręcającym M_s . Jeśli połączenie nie jest sprężane, to moment ten jest przenoszony przez ścinanie i docisk (do otworów blach czołowych) śrub w styku. Oprócz ścinania i docisku po zlikwidowaniu wady kątowej γ śruby będą rozciągane od obciążeń zewnętrznych. Interakcyjna nośność śrub jednocześnie rozciąganych i ścinanych S_{v-t} jest mniejsza od nośności śrub na rozciąganie S_R . Dlatego nośność śrubowego styku doczołowego z taką wadą będzie mniejsza niż złącza o modelu bez imperfekcji.

Sprężone styki doczołowe z imperfekcjami kątowymi γ będą miały również zmniejszoną nośność, gdyż śrub przenoszących wstępne obciążenie ścinające od skręcania nie można napinać normową [63] wielkością siły sprężającej S_0 .

Nośność sprężonego styku $M_{R,\gamma}$ z imperfekcją kątową γ wynosi

$$M_{R,\gamma} = M_R (S_{v-t}), \quad (4.51)$$

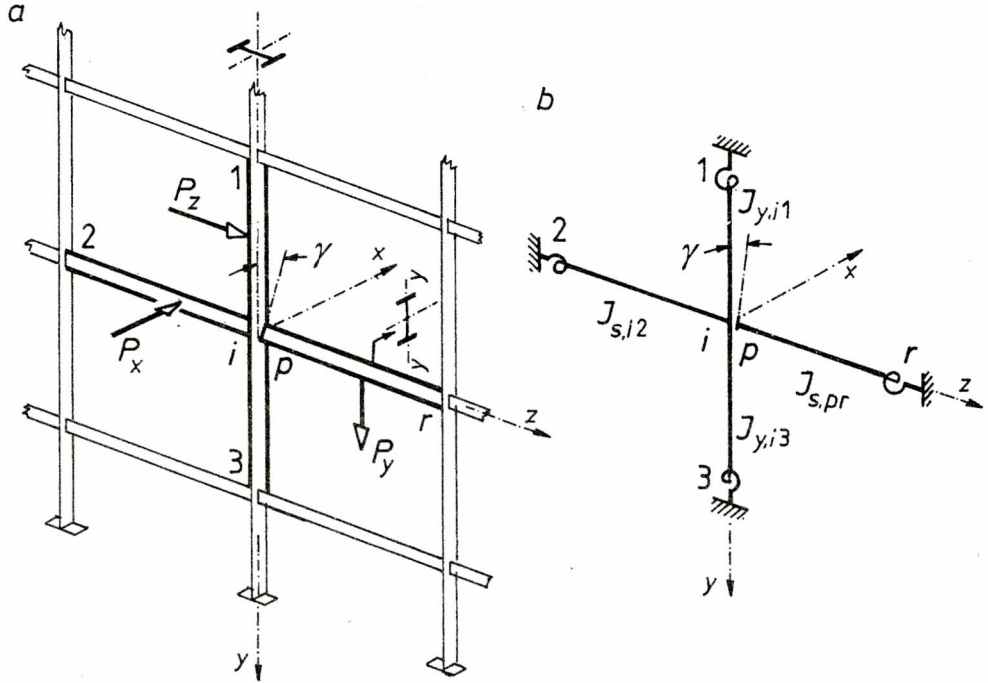
gdzie M_R – nośność styku doczołowego według wzorów (89)–(91) w [63],

S_{v-t} – interakcyjna nośność śrub na rozciąganie z uwzględnieniem ścinania łącznika.

Rozpatrzono ustrój o schemacie pokazanym na rys. 4.11, w którym w węźle i są połączone dwa pręty $i1$ oraz $i3$ (słupy) oraz rygiel poziomy – pręt $i2$. Zakłada się, że pręty w węźle i są połączone ze sobą w sposób sztywny, na drugim końcu zaś w sposób podatny. Z węzłem i ustroju jest połączony rygiel R (pręt pr), a w styku doczołowym $i-p$ występuje imperfekcja kątowa γ .

Podobnie jak w analizie imperfekcji kątowej β , w przyjętym modelu obliczeniowym (rys. 4.11b) oszacowania wpływu niewłaściwej technologii montażu ustroju, bez naprawy wady skręcania styku γ na wyężenie konstrukcji założono, że likwidacja wady kątowej γ ogranicza się do styku $i-p$. Przyjęty model obliczeniowy jest bezpieczny, gdyż uzyska się dla

niego górne oszacowanie wyężenia ustroju, wywołane patologicznym montażem konstrukcji z analizowaną wadą złącza (przekraczającą dopuszczalną przez normę [65]).



Rys. 4.11

Wymuszony montaż wadliwego styku przez skręcenie rygła pr i założenie śrub w złączu wywoła obrót w płaszczyźnie styku, zarówno węzła i o kąt γ_i oraz węzła p o kąt γ_p

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_p. \quad (4.52)$$

Założenie śrub w styku z imperfekcją kątową γ będzie możliwe po wprowadzeniu momentu M_s , a kąty obrotu γ_i – węzła i oraz γ_p – węzła p rygła wynoszą

$$\gamma_i = \frac{M_s}{K_{is}}, \quad (4.53)$$

$$\gamma_p = \frac{M_s}{k_{ps}}, \quad (4.54)$$

gdzie

$$K_{is} = \sum_j k_{ij} + \sum_k k_{ik} = \sum_{ij} g_{ik} G J_{s,ij} I_{ij}^{-1} + \sum_{ik} a_{ij} E J_{y,ik} I_{ik}^{-1}, \quad (4.55)$$

$$k_{ps} = g_{pr} E_{js,pr} l_{pr}^{-1}, \quad (4.56)$$

w których $J_{y,ik}$ – moment bezwładności prętów ik względem osi y ,
 $J_{s,ij}$, $J_{s,pr}$ – momenty bezwładności prętów przy skręcaniu,
 E – moduł Younga,
 G – moduł odkształcenia postaciowego,
 l_{ij} , l_{pr} – długości prętów skręcanych,
 l_{ik} – długości prętów zginanych względem osi y ,
 j – liczba rygli skręcanych połączonych w węźle i ,
 k – liczba słupów zginanych połączonych w węźle i ,
 a – jak we wzorach (4.31) i (4.32),
 g – jak we wzorze (4.16),
 $\sum_{ij}$ – sumowanie obejmuje pręty skręcane, sztywno połączone w węźle i ,
 $\sum_{ik}$ – sumowanie obejmuje pręty zginane, sztywno połączone w węźle i .

Po przekształceniu (4.52) oraz uwzględnieniu zależności (4.53) i (4.54) wyznaczono wartości momentu skręcającego w styku, który wynosi

$$M_\gamma = M_s = \gamma \left(\frac{1}{K_{is}} + \frac{1}{K_{ps}} \right)^{-1}. \quad (4.57)$$

Kąty skręcania węzła i rami γ_i oraz węzła p pręta γ_p opisują wzory

$$\gamma_i = \gamma \frac{K_{is}}{K_{is} + k_{ps}}, \quad (4.58)$$

$$\gamma_p = \gamma \frac{k_{ps}}{K_{is} + k_{ps}}. \quad (4.59)$$

Moment skręcający M_s według wzoru (4.57) stanowi obciążenie technologiczne zarówno śrubowego styku doczołowego $i-p$, jak i rygla $p-r$ oraz prętów połączonych w węźle i . Przywęzłowe momenty prętów połączonych w węźle i wyznacza się ze wzorów

$$M_{y,ik} = M_s \frac{k_{ik}}{K_{is}}, \quad (4.60)$$

$$M_{s,ij} = M_s \frac{k_{ij}}{K_{is}}, \quad (4.61)$$

$$M_{y,ki} = b_{ik} M_{y,ik}, \quad (4.62)$$

$$M_{s,ji} = g_{ik} M_{s,ij}. \quad (4.63)$$

Przykład 6

Wyznaczyć moment skręcający w śrubowym styku doczołowym górnego rygla ramy o schemacie pokazanym na rys. 4.10, wywołany wymuszonym, niewłaściwym montażem wzajemnie skręconych blach czołowych połączenia o kąt $\gamma = 0,032$ rad. Rygiel ramy zaprojektowano z IPE 360 o następujących charakterystykach geometrycznych i sztywnościowych: $t_f = 12,7$ mm, $J_s = 38,3$ cm⁴, $l_{pr} = l_{i1} = 6,0$ m.

Charakterystyki sztywnościowe prętów połączonych w styku $i-p$ wynoszą

$$k_{i1} = k_{ps} = GJ_s I^{-1} = 80 \cdot 10^6 \cdot 38,3 \cdot 10^{-8} \cdot 6,0^{-1} = 5,11 \text{ kNm}.$$

Moment skręcający w wadliwym styku wynosi

$$M_s = \gamma \left(\frac{1}{K_{is}} + \frac{1}{K_{ps}} \right)^{-1} = 0,032 \left(\frac{1}{5,11} + \frac{1}{5,11} \right)^{-1} = 0,082 \text{ kNm}.$$

Naprężenia ścinające od swobodnego skręcania w ryglu wynoszą

$$\tau = \frac{M_s t}{J_s} = \frac{0,082 \cdot 0,0127 \cdot 10^{-3}}{38,3 \cdot 10^{-8}} = 2,72 \text{ MPa} < 0,58 f_d = 0,58 \cdot 215 = 124,7 \text{ MPa}.$$

W analizowanym przykładzie konstrukcji z wadą kątową γ styku doczołowego, wywołane błędną technologią montażu, polegającą na skręcenia rygla, spowoduje montażowe wyężenie ścinające o wartości 2,2% jego nośności.

4.8. Analiza montażowego wyężenia o podatnych węzłach z wadami geometrycznymi styków doczołowych

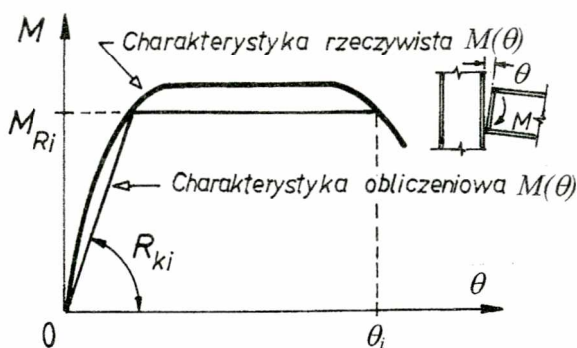
Przemieszczenia oraz siły wewnętrzne konstrukcji złożonej z prętów połączonych w węzłach zależą od sztywności tych prętów i węzłów, a więc są generowane przez ich ścieżki równowagi statycznej. W analizie statycznej połączenia elementów konstrukcji stalowych są najczęściej modelowane jako idealnie przegubowe lub w pełni utwierdzone, czyli doskonale sztywne. Od dawna było wiadomo, że te ekstremalne sytuacje w praktyce nie

spełniają w ścisły sposób wymagań określanych w odniesieniu do węzłów sztywnych lub przegubowych, przyjmowanych w modelach obliczeniowych szacowania nośności i sztywności konstrukcji. Ich właściwości przybliżają się jedynie w różnym stopniu do wymagań stawianych połączeniom pełnego zamocowania lub swobodnego obrotu łączonego elementu w węźle. Dlatego też przyjmowanie w modelu obliczeniowym wyznaczania montażowych sił wewnętrznych, wywołanych wadami styków ekstremalnych charakterystyk sztywnościowych połączeń prętów w węzłach, może prowadzić do istotnych błędów.

W podrozdziale tym zostaną zasygnalizowane podstawowe problemy i sformułowane do rozwiązania zagadnienia wpływu imperfekcji geometrycznych śrubowych styków doczołowych w przypadku próby uwzględnienia podatności węzłów i odkształcalności elementów przyłgowych.

Połączenia śrubowe, obciążone osiowo siłą podłużną N mogą ulegać przemieszczeniom u , w kierunku działającego obciążenia. Funkcje $N(u)$ tak obciążonych złączy stanowią ich charakterystyki sztywnościowe. Zależności między obciążeniem a przemieszczeniem połączeń na śrubowe łączniki są zazwyczaj nieliniowe [3], [4], [17], [21], [38]. Przyczyną tego jest niesprężysty charakter odkształceń łączników, a przede wszystkim elementów i części składowych styków śrubowych. Sprężone połączenia z grubymi blachami czołowymi w analizach statycznych w odniesieniu do charakterystyki $N(u)$ traktuje się zazwyczaj jako nieodkształcalne.

Śrubowe połączenia obciążone momentem zginającym, można scharakteryzować trzema parametrami: nośnością obliczeniową przy zginaniu M_{Ri} , sztywnością obrotu R_{ki} oraz obliczeniową zdolnością do obrotu θ_i . Parametry charakteryzujące zginany styk śrubowy pokazano na rys. 4.12.



Rys. 4.12

Z uwagi na nośność M_{Ri} oraz sztywność R_{ki} węzły dzieli się według [61] na nominalnie przegubowe, sztywne i podatne (*semi-rigid*).

Połączenia nominalnie przegubowe powinny być tak skonstruowane, aby nie przenosiły znacznych momentów zginających, które mogłyby niekorzystnie oddziaływać na elementy konstrukcji. W konstrukcjach rzeczywistych mamy zazwyczaj do czynienia z *przegubami technicznymi*, które są zdolne przenosić nieduże momenty zginające (nie uwzględniane jednak w analizach statycznych ustrojów nośnych). Nośność połączeń przegubowych według [61] powinna spełniać warunek $M_R < 0,25M_{pl}$ (M_{pl} – nośność plastyczna łączonego elementu).

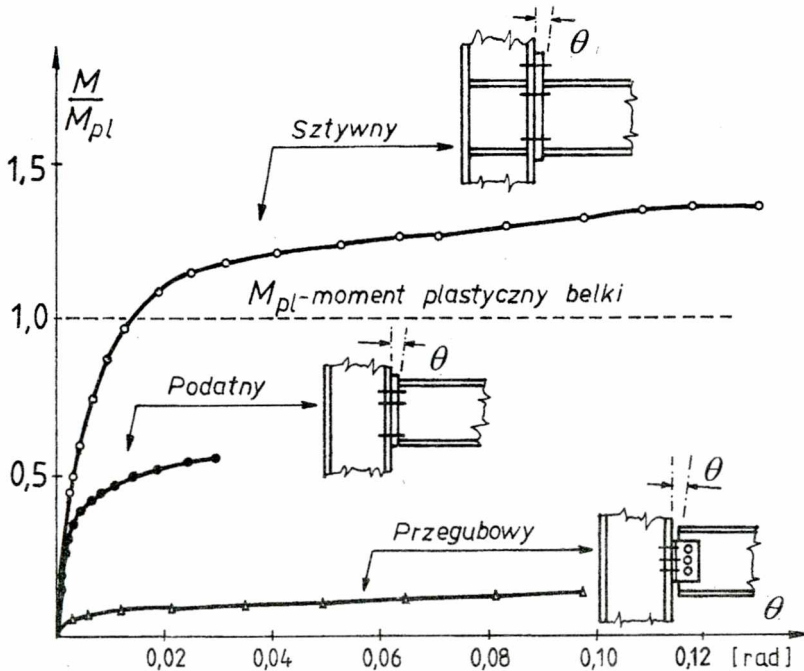
Połączenia sztywne powinny być tak zaprojektowane, aby ich odkształcenia nie miały istotnego wpływu na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji, ani jej globalne odkształcenia (odkształcenia węzłów nie mogą redukować nośności konstrukcji więcej niż o 5%).

Rzeczywiste węzły *sztywne* w wyniku ugięć i deformacji elementów składowych węzłów odkształcają się, jednak podatność ich nie wpływa w znaczący sposób na siły wewnętrzne w ustroju. Są to więc węzły o małej podatności wywierającej nieduży wpływ na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji. Nośność połączeń sztywnych według [61] powinna spełniać warunek $M_R > 1,2M_{pl}$ (M_{pl} – nośność plastyczna łączonego elementu).

Połączenia nie spełniające kryteriów nominalnie przegubowych i sztywnych kwalifikuje się jako podatne. Nośność na zginanie połączenia o częściowej nośności M_R według [61] nie powinna być mniejsza od obliczeniowych sił wewnętrznych, może być jednak mniejsza od nośności na zginanie łączonego elementu (belki). Zdolności do obrotu θ_i oraz sztywności węzłów R_{ki} takich połączeń powinna umożliwić powstanie wszystkich, uwzględnianych w analizie statycznej przegubów plastycznych. Są to więc połączenia odkształcalne, o sztywności i nośności większej niż *przeguby techniczne*, jednak mniejszej od połączeń przyjmowanych jako *sztywne*. Stosowanie węzłów podatnych (odkształcalnych), odbiegających od skrajnego przypadku połączeń sztywnych, wynikające z dążenia do uproszczeń technologicznych (eliminowanie żeber, usztywnień, zastępowanie węzłów spawanych stykami na śruby), prowadzi do obniżenia kosztów wykonania elementów w wytwórni i skrócenia czasu czynności montażowych. Takie rozwiązania konstrukcyjne węzłów znacznie komplikują zarówno analizę statyczną ustroju (gdyż ustroje te nie spełniają założeń klasycznej statyki budowli), jak i wytrzymałości oraz stateczności, ponieważ odbiegają od konwencjonalnych modeli teoretycznych.

Ścieżki równowagi statycznej połączeń podatnych nazywanych również półsztywnymi (w literaturze anglojęzycznej: *semi-rigid connection* lub *flexibly connection*) są zwykle nieliniowe. Nieliniowe są również ścieżki równowagi statycznej konstrukcji z takimi połączeniami elementów prętowych w węzłach.

Na rysunku 4.13 pokazano wyniki badań doświadczalnych doczołowych styków belki ze słupem, o różnych sztywnościach złączy [48]. Przedstawione na rysunku 4.13 przykłady połączeń należy traktować umownie, gdyż o podatności węzłów decyduje nie tylko typ styku, ale liczba śrub, uźebrowania, grubości elementów przyłgowych złącza.



Rys. 4.13

Znajomość ścieżek równowagi statycznej połączeń umożliwia uwzględnienie w przyjmowanych schematach obliczeniowych wyznaczania sił wewnętrznych precyzyjniejszych modeli, opisujących sztywności i przemieszczenia węzłów i styków. Jest to możliwe, w wąskim jeszcze zakresie, w naukowych studiach i prowadzi do dokładniejszego określenia wyężenia konstrukcji. Wprowadzenie do praktyki projektowania uwzględnienia wpływu podatności węzłów, wymaga opracowania dużych programów komputerowych (statyka, stateczność, obliczenia według teorii drugiego rzędu konstrukcji, z uwzględnieniem rezerwy plastycznej).

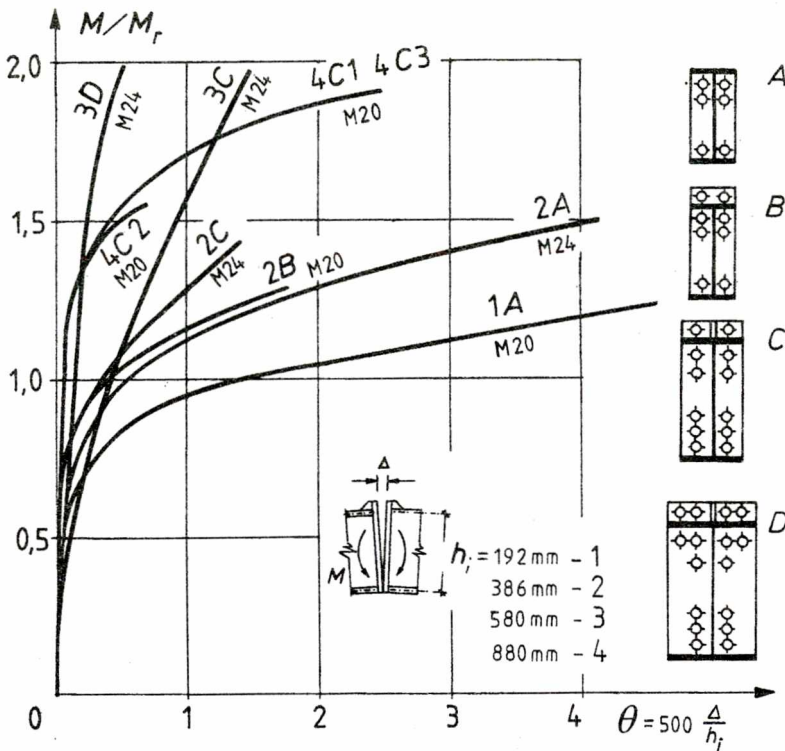
Zachowanie się węzłów podatnych jest badane doświadczalnie. Badania doświadczalne izolowanych węzłów ram umożliwiają: sporządzenie ścieżek równowagi statycznej w postaci krzywych $M(\theta)$, określenie nośności granicznej na zginanie M_{Ri} , sztywności R_{ki} i zdolności do obrotu θ_i połączeń oraz identyfikację zachowania się części składowych węzłów w granicznym stanie wyężenia (mechanizmów zniszczenia). Takie badania są jednak bardzo kosztowne. Dlatego też na podstawie przeprowadzonych doświadczeń do analiz teoretycznych są stosowane modele aproksymujące krzywe $M(\theta)$, prognozujące podatności węzłów. Identyfikacja właściwości połączeń podatnych oraz zachowania się konstrukcji z takimi węzłami jest ważnym i aktualnym tematem badań naukowych budowlanych konstrukcji stalowych.

Zagadnieniom tym jest poświęcona książka Jana Bródki i Aleksandra Kozłowskiego, *Sztwność i nośność węzłów podatnych* [21], w której obszernie omówiono wyniki światowych badań doświadczalnych nośności połączeń podatnych, a także metody prognozowania zachowania się i obliczania nośności granicznej takich złączy.

Połączenia śrubowe, zwłaszcza o węzłach podatnych, stanowią przedmiot aktualnie prowadzonych badań w wielu ośrodkach naukowych. Badania te umożliwiły wyjaśnienie wielorakich aspektów wyężenia połączeń i konstrukcji z takimi węzłami.

Na przykład Jan Bródka i Waldemar Cwalina w książce *Sztwność i nośność ram stężonych o węzłach podatnych* [17] omówili metody analiz statycznych, wytrzymałościowych oraz stateczności konstrukcji o węzłach nieprzesuwnych z podatnymi stykami. Prezentowane w pracy [17] zagadnienia zilustrowano przykładami obliczeniowymi.

Wiedza na temat połączeń podatnych jest już stosunkowo duża, chociaż nie obejmuje wszechstronnie wielu zagadnień, na przykład wpływu losowych imperfekcji geometrycznych na wyężenie odkształcalnych styków. Prace na temat podatnych połączeń doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi są nieliczne [1], [15], [25], [35], [36], [40] i omówiono je w rozdziale 2.

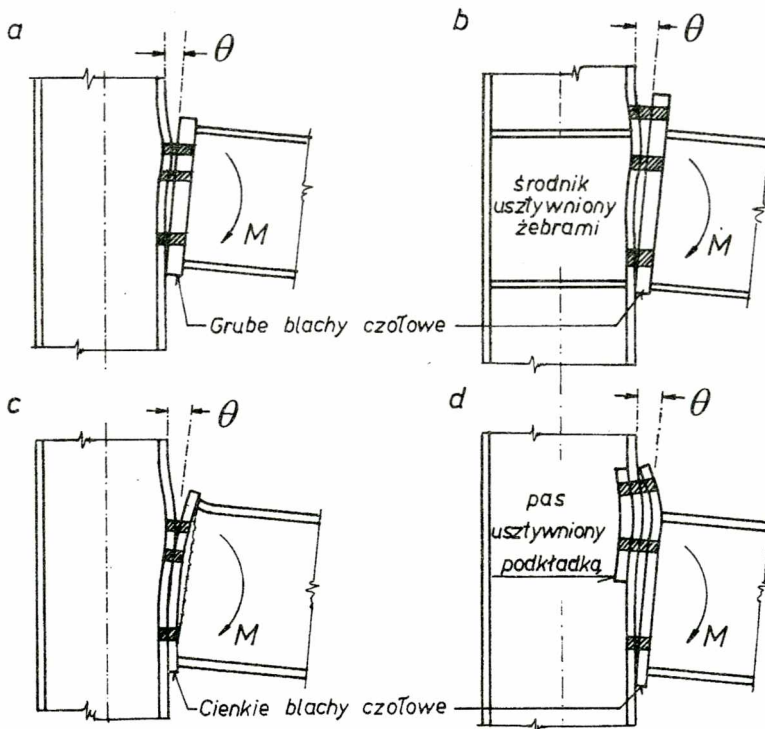


Rys. 4.14

Na rysunku 4.14 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych doczołowych zginanych połączeń sprężanych belek o przekroju dwuteowym [38], [39], prowadzonych w Centralnym Ośrodku Badawczo-Projektowym Konstrukcji Metalowych *Mostostal*.

Na osi pionowej (rys. 4.14) naniesiono stosunek momentu zginającego w połączeniu M do nośności mierzonej momentem rozwarcia styku M_r , na osi poziomej zaś podano kąt rozwarcia styku θ . Z analizy wykresów pokazanych na rys. 4.14 wynika, że charakterystyki badanych węzłów do nośności około $0,3 M_r$ opisują liniowe ścieżki równowagi statycznej i odkształcalność złączy jest bardzo mała. Nieliniowość ścieżek równowagi statycznej oraz zmniejszenie się sztywności badanych styków doczołowych występowała dla obciążeń większych niż $0,3 M_r$. Sztywność tych połączeń podczas zginania zależy głównie od nośności i rozmieszczenia śrub w strefie rozciąganej, grubości blach elementów przylgowych, uźebro- wań i od wysokości konstrukcyjnej styku.

Na rysunku 4.15a pokazano odkształcenia pasa słupa o nieuźebrowanym środkiku, połączonego z belką wyposażoną w grubą blachę czołową. Odkształcenia pasa słupa w takim rozwiązaniu konstrukcyjnym można ograniczyć, stosując żebra usztywniające środkik i pas słupa (rys. 4.15b). W razie zbliżonych sztywności pasa słupa oraz blachy czołowej belki elementy przylgowe styku ulegną podobnym odkształceniom (rys. 4.15c).



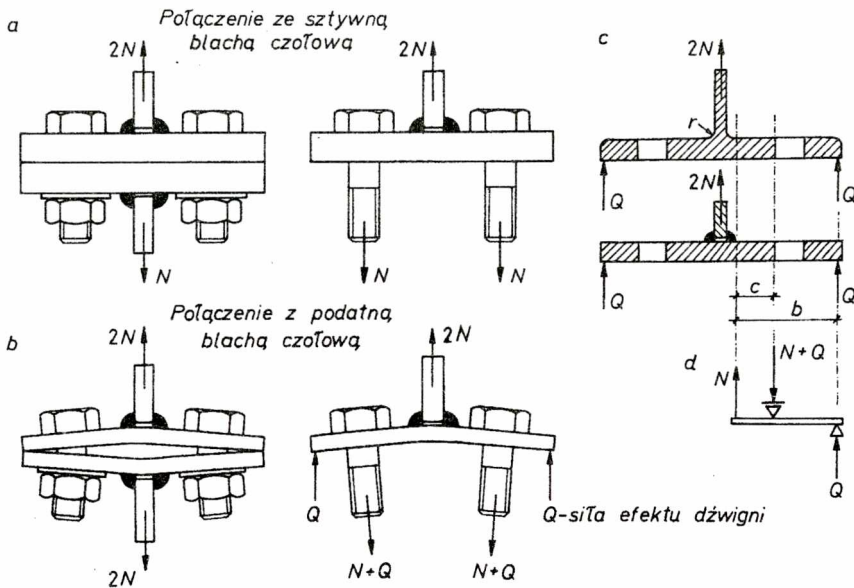
Rys. 4.15

Ograniczenie odkształceń analizowanego styku doczołowego uzyskuje się stosując podkładki (blachy nazywane w literaturze anglojęzycznej *back plate* – blachą tylną), które zwiększają nośność i sztywność złącza (rys. 4.15d).

Wprowadzone w rozdziałach 4.2–4.7 wzory na szacowanie sił wewnętrznych w ustroju, wywołane wymuszonym montażem wadliwych połączeń doczołowych, wyznaczono zakładając nieodkształcalność styków *i-p*. Założenie takie jest słuszne dla uźebrowanych styków o grubych blachach przylgowych połączeń doczołowych. W świetle analizy przedstawionych na rys. 4.14 ścieżek równowagi statycznej doczołowych połączeń dźwigarów dwuteowych, dla prognozowanych wielkości sił montażowych, powstałych po dokręceniu śrub w wadliwych stykach, odkształcalność połączeń może być dla wielu sytuacji projektowych pomijana.

Przy stosunkowo cienkich blachach czołowych w doczołowych złączach prostych, usztywnionych tylko wzdłuż jednego brzegu, następuje wzrost sił w śrubach spowodowany tzw. efektem dźwigni (powstają dodatkowe siły – Q). Przyrosty sił w śrubach są wówczas większe, aniżeli wynikałoby to z przyrostów obciążenia i są one generowane ugięciem blachy czołowej, a zatem ich wartość zależy od grubości blachy t , i odległości c oraz szerokości współdziałania blachy przypadającej na jedną śrubę b_s .

Schemat powstawania efektu dźwigni przedstawiono na rys. 4.16.



Rys. 4.16

W połączeniach z grubymi blachami czołowymi nie występuje efekt dźwigni ($Q = 0$), gdyż elementy przylgowe styku nie odkształcają się.

Na rysunku 4.17 pokazano zależność grubości blachy czołowej w badanym typie połączeń, a formą zniszczenia na podstawie wyników badań [26]. Na osi poziomej (rys. 4.17) podano stosunek grubości blachy t do grubości t_0 , wyznaczonej z warunku równoczesnego uplastycznienia blachy czołowej i śruby, na osi pionowej stosunek przyłożonego obciążenia N do siły w trzpieniu śruby $S = N + Q$. Grubość t_0 wynosi

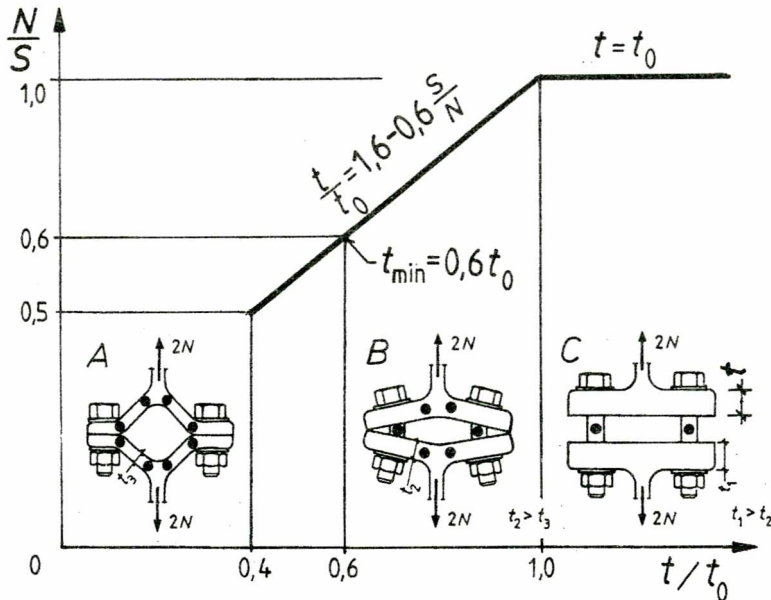
$$t_0 = 2 \sqrt{\frac{c S_{Rt}}{b_s f_d}}, \quad (4.64)$$

gdzie S_{Rt} – nośność obliczeniowa śruby osadzonej w blasze, przy czym jeśli nie jest ona całkowicie wykorzystana, to można według [63] zamiast S_{Rt} przyjmować S_t w śrubie najbardziej wyężonej,

f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali blachy czołowej,

c – odległość między brzegiem otworu a spoiną lub początkiem wyokrąglenia;
 $c \leq d$ (rys. 4.16c),

b_s – szerokość współdziałania blachy przypadająca na jedną śrubę, którą przyjmuje się z zachowaniem warunku $b_s \leq 2(c + d)$, gdzie d średnica śruby.



Rys. 4.17

Z analizy wykresu pokazanego na rys. 4.17 wynika, że dla blach czołowych o grubości $t > t_0$ odkształcenia ich są tak małe, że nie powodują generowania sił efektu dźwigni. Można więc przyjąć grubość t_0 według wzoru (4.64) jako wartość rozgraniczającą sztywne i odkształcalne elementy przylgowe połączeniach doczołowych.

Przyjęcie minimalnych grubości blach w stykach czołowych niesprężonych według wzoru (4.64) prowadzić może do niepożądanych, nadmiernych przemieszczeń w złączu. Dlatego norma [63] podaje, uzyskany na podstawie wyników badań doświadczalnych, wzór określający minimalną grubość blachy czołowej w złączach obciążonych statycznie w następującej postaci

$$t_{\min} = d \sqrt[3]{\frac{R_m}{1000}}, \quad (4.65)$$

gdzie R_m – wytrzymałość doraźna stali śrub,
 d – średnica śruby.

W połączeniach, w których występuje efekt zginania blach czołowych, wartość siły sprężania zmniejsza się wskutek działania obciążeń wielokrotnie zmiennych. Dlatego według [63] w połączeniach sprężanych obciążonych dynamicznie siłami wielokrotnie zmiennymi zaleca się przyjmować większe grubości blach, to jest:

$$t \geq 1,62t_{\min}, \text{ przy czym } t_{\min} \text{ według wzoru (4.64),} \quad (4.66)$$

$$t \geq 1,25t_{\min}, \text{ przy czym } t_{\min} \text{ według wzoru (4.65).} \quad (4.67)$$

Zwiększenie grubości blach czołowych w stykach doczołowych jest zalecane [3], [4], [11], [38] również w złączach niesprężanych.

Badania doświadczalne prowadzone przez Bouwmana [15] wykazały istotny wpływ losowego usytuowania powierzchni kontaktowych między elementami czołowymi złączy (imperfekcji braku płaskości płaszczyzn przylgowych styku) na siły w śrubach i nośność połączeń (patrz rys. 2.11 i rys. 5.7b). W razie kontaktu powierzchni przylgowych jedynie na brzegu sprężonego styku doczołowego występuje bezpośrednie przekazywanie obciążeń zewnętrznych na wstępnie napięte trzpienie śrub, powodując przedwczesne wyczerpanie nośności konstrukcji obciążonej dynamicznie.

Lacher [35], [36] badał wpływ imperfekcji geometrycznych powierzchni przylgowych blach styków doczołowych, wynikające na przykład z odkształceń spawalniczych, na siły efektu dźwigni w śrubach sprężających złącze doczołowe. W pracach swych wykazał, że losowe usytuowanie powierzchni kontaktowych między blachami czołowymi (patrz rys. 2.11)

powoduje nieosiowe wyężenie śrub w połączeniach doczołowych i zaproponował odpowiednie współczynniki powiększające siły efektu dźwigni.

W celu uwzględnienia w analizach montażowych wyężeń konstrukcji wywołanych dokręceniem śrub w stykach z imperfekcjami geometrycznymi, należy dysponować ścieżkami równowagi statycznej połączeń, to jest zależnościami $N(u)$, $M(\theta)$, $M_S(\gamma)$. Według rozpoznania autora, badania takie były raczej sporadyczne i brak jest wiedzy dotyczącej ścieżek równowagi statycznej śrubowych węzłów doczołowych z wadami połączeń. Można je uzyskać doświadczalnie lub metodami prognozowania analitycznego [21] stosując modele: aproksymacyjne, półempiryczne, mechaniczne, z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) lub sztucznych sieci neuronowych (SSN). Modele te obszernie omówiono w monografii naukowej dotyczącej połączeń podatnych [21].

Ocenę montażowego wyężenia konstrukcji o węzłach podatnych z wadami styków można otrzymać, modyfikując modele opracowane dla ustrojów o klasycznych (bądź sztywnych, bądź przegubowych) węzłach, przez uwzględnienie ich odkształcalności, na przykład według propozycji podanych w [22]. W zadaniach praktycznych dokonuje się wówczas najczęściej aproksymacji ścieżek równowagi statycznej węzłów. Zwykle krzywą eksperymentalną, opisującą ścieżkę równowagi statycznej węzłów, zastępuje się krzywą z kilku odcinków prostych, co umożliwia stosowanie procedur liniowego modelu w kolejnych krokach przybliżenia.

Chcąc wykorzystać zaproponowany sposób szacowania wyężeń montażowych ustroju wywołany likwidacją wad styków nieodkształcalnych (przez dociąganie śrub w połączeniu) podany w rozdziałach 4.2–4.7 oraz uwzględnić podatność złączy, należy zmodyfikować wzory określające wartości współczynników a , b , c , d , f oraz g we wzorach określających sprężystość zamocowania prętów w węzłach K_{ij} , k_{pr} . W tym celu można wykorzystać prace Jana Bródki i Jacka Kordjaka [20], którzy wyprowadzili wzory transformacyjne metody przemieszczeń prętów o różnych schematach podparcia, z uwzględnieniem podatności liniowej węzłów, a także uwzględnieniem sił podłużnych.

Podsumowując analizę montażowego wyężenia konstrukcji o podatnych węzłach, z wadami geometrycznymi styków śrubowych, należy stwierdzić, iż odkształcalność elementów czołowych złączy wywołuje mniejsze siły wewnętrzne w ustrojach w trakcie jego scalania niż w konstrukcji o połączeniach uznawanych za nieodkształcalne.

Badania prowadzone przez Bouwmana [15] i Lachera [35], [36] wykazały bardzo duży wpływ wad braku płaskości powierzchni przyłgowych styków doczołowych obciążonych dynamicznie. Podobnie jak patologiczny montaż, polegający na dociąganiu śrub w celu likwidacji imperfekcji u , v , w , α , β , γ , dokręcanie łączników w celu prostowania zdeformowanych, na przykład w wyniku odkształceń spawalniczych, blach czołowych jest niedopuszczalny, gdyż prowadzi do ich wstępnego wyężenia.

4.9. Synteza analiz oszacowań wyteżeń konstrukcji wywołanych imperfekcjami śrubowych styków doczołowych

Z analizy przedstawionych w punktach 4.2–4.7 mechanizmów powstawania wyteżenia konstrukcji z wadliwymi stykami doczołowymi wynika, iż stanowią one wstępne obciążenie technologiczne, zmniejszające nośność graniczną ustroju. Występowanie wad geometrycznych styków, rozumianych jako ich integralne imperfekcje (reprezentujące losową geometrię przekrojów poprzecznych prętów, mimośrodę osi elementów oraz niedoskonałości wykonania połączeń), powoduje po dociągnięciu śrub w połączeniach wprowadzeniem wstępnych wyteżeń zarówno prętów konstrukcji, jak i złączy śrubowych

Badania, analizy oraz przykłady obliczeń przedstawione w tym rozdziale wykazały jednoznacznie niedopuszczalność patologicznej metody montażu konstrukcji, polegającej na likwidacji szczelin, przesunięć, skręceń i braku płaskości elementów przyłgowych w stykach doczołowych przez dociąganie śrub. W razie stwierdzenia imperfekcji geometrycznych w śrubowych stykach doczołowych, o wielkości większej niż określa to norma [65], należy wady połączeń naprawić, a jeśli to nie jest możliwe – zdyskwalifikować wadliwy element montażowy. Właściwymi sposobami naprawy jest stosowanie podkładek płaskich i klinowych o odpowiednio dobranych grubościach, powiększenie otworów i zastosowanie podkładek pod łbami i nakrętkami łączników, a także regulacja posadowienia konstrukcji na fundamentach.

W trakcie wymuszonego, patologicznego montażu konstrukcji scalanych z elementów wysyłkowo-montażowych, łączonych na śrubowe styki doczołowe, w których występują integralne imperfekcje geometryczne złączy u , v , w , α , β , γ w prętach konstrukcji oraz w wadliwych stykach powstają momenty zginające M_x i M_y , momenty skręcające M_s , siły poprzeczne V_x , V_y oraz siły osiowe N . Ten dodatkowy (wstępny) przestrzenny stan wyteżenia konstrukcji zmniejsza nośność eksploatacyjną ustroju. Należy w tym miejscu dodać, iż dla konstrukcji projektowanych jako płaskie (z takimi sytuacjami mamy zazwyczaj do czynienia) przestrzenny stan wyteżenia ustroju, wywołany wadami styków, może stanowić istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa eksploatacji budowli. Równie ważnym zagadnieniem są wady geometryczne styków, zmieniające schematy statyczne połączeń prętów w węzłach ze sztywnych na *chwilowe przeguby*. Konsekwencją takich sytuacji jest zmiana schematów statycznych w stosunku do założeń projektowych, co może prowadzić do geometrycznej zmienności konstrukcji.

Propagacja wyteżeń (momentów zginających, sił poprzecznych, momentów skręcających oraz sił osiowych) w konstrukcji z wadliwymi stykami doczołowymi jest funkcją sztywności węzłów, sztywności i długości prętów ustroju. Z analizy przyjętych uproszczonych modeli obliczeniowych, w których przyjęto, iż następstwa występowania wad styków doczołowych *i-p* ograniczających do prętów połączonych w tym węźle wynika, że pręty *pr*

z imperfekcjami złączy przejmują większe wyężenia, gdy łączy się je do sztywnych węzłów i konstrukcji. Wartość dodatkowych wstępnych sił wewnętrznych, wywołanych wymuszonym montażem konstrukcji z imperfekcjami geometrycznymi styków, jest funkcją niedoskonałości początkowych $u, v, w, \alpha, \beta, \gamma$ oraz sztywności giętych EJ_x, EJ_y , skrętych GJ_s i długości prętów. Dlatego odnoszenie w normie [65] dopuszczalnych tolerancji wykonania styków doczołowych oraz montażu konstrukcji jedynie do wymiarów geometrycznych rozpiętości i wysokości elementu nie ma uzasadnienia w świetle dokonywanych analiz statyczno-wytrzymałościowych.

Możliwa do zaakceptowania wartość dopuszczalnych odchyłek geometrycznych styków doczołowych powinna być wyznaczana na podstawie analizy wytrzymałościowej losowego wstępnego wyężenia ustroju, wywołanego analizowaną imperfekcją.

Z analiz konstrukcji jedno- i wielokondygnacyjnych o różnych schematach statycznych wynika, iż wartość dopuszczalnych odchyłek wykonawczych styków, mimośrodków osi prętów i systemu geometrycznego ustroju powinna uwzględnić również technologię montażu oraz stopień statycznej niewyznaczalności konstrukcji.

Analiza skutków wymuszonego montażu konstrukcji, z integralnymi imperfekcjami geometrycznymi śrubowych styków doczołowych, z uwzględnieniem sztywności (podatności) węzłów, sztywności i długości prętów, statycznej niewyznaczalności ustroju oraz technologii scalania i montażu konstrukcji, umożliwia niekiedy (na przykład dla ustrojów statycznie niewyznaczalnych) dopuszczenie jako bezpiecznych większych niż proponuje norma [65] wartości tolerancji wykonania konstrukcji z rozważanym typem złączy. W takim przypadku dopuszczenie konstrukcji do eksploatacji musi poprzedzać jednak indywidualna analiza wpływu zinventoryzowanych wad na wyężenie i zachowanie się ustroju.

Z rozpoznawczych badań i analiz wynika, iż w wadliwych stykach podatnych można się spodziewać mniejszych skutków imperfekcji geometrycznych niż w ustrojach o węzłach uznawanych za nieodkształcalne. Istotną rolę w tej sprawie mogą spełniać badania doświadczalne, zwłaszcza węzłów podatnych.

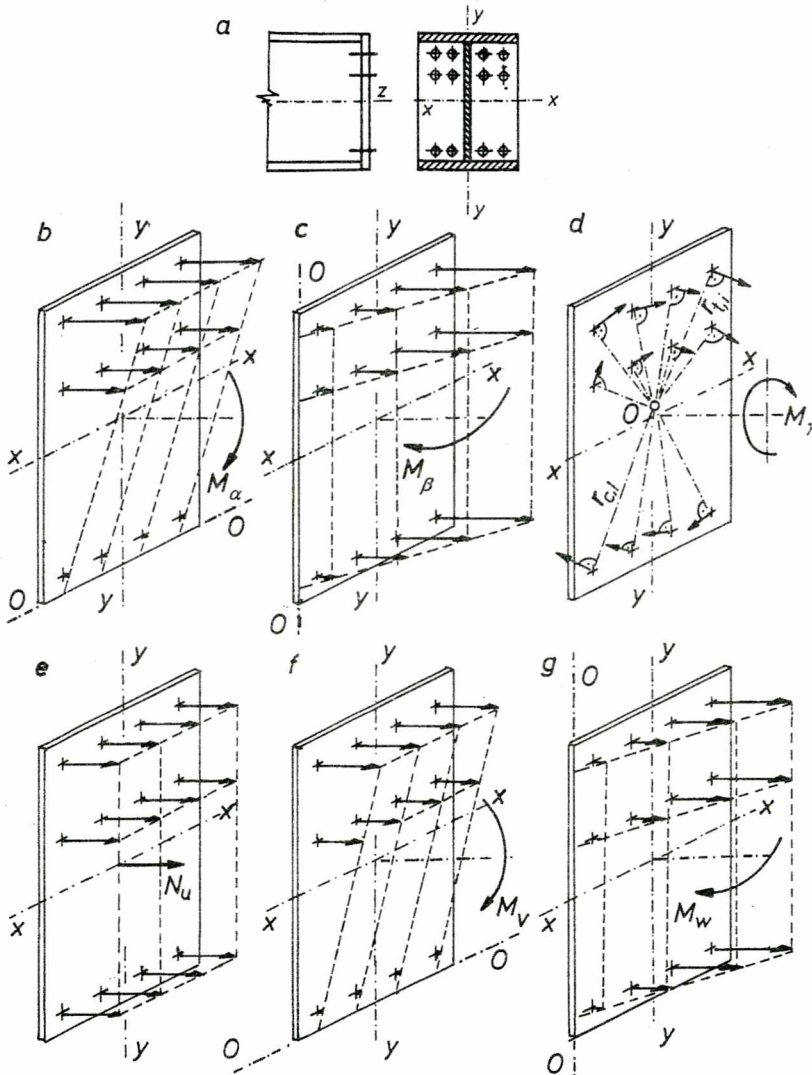
Zagadnienie następstw występowania losowych imperfekcji geometrycznych śrubowych styków doczołowych, w wyniku patologicznego montażu jest zagadnieniem o wiele bardziej złożonym niż przedstawione analizy rozseparowanych wad pojedynczych styków ustroju. W konstrukcjach rzeczywistych należy liczyć się z występowaniem wad stanowiących wypadkową imperfekcji kątowych, liniowych oraz braku płaskości powierzchni przylgowych i mogą one wystąpić w wielu stykach konstrukcji. Zagadnienie to jest wieloparametrowe i powinno ponadto uwzględniać kolejność montażu elementów wysyłkowo-montażowych oraz probabilistyczną analizę następstw losowo usytuowanych wad o losowych wartościach odchyłek geometrycznych.

5. OSZACOWANIE NOŚNOŚCI GRANICZNEJ ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH Z IMPERFEKCJAMI GEOMETRYCZNYMI

W modelu obliczeniowym śrubowych połączeń doczołowych [6], [11], [38], [42], bez wstępnych imperfekcji liniowych i kątowych, zakłada się idealne przyleganie stykających się powierzchni przylgowych (blach czołowych lub blachy czołowej rygla i pasa słupa). Sprężenie takich złączy sprawia, że do chwili rozwarcia styku nie występuje zmiana amplitudy wyteżeń śrub, gdyż siły w styku są równoważone przez wywołane dokręceniem łączników naprężenia dociskowe w elementach przylgowych. Połączenia takie są więc preferowane w sytuacjach projektowych występowania obciążeń zmiennych, aby zapobiec zmęczeniu stali w śrubach. Dlatego też, gdy w styku występują wady geometryczne, połączenie zaś nie jest sprężone, łączniki są wówczas narażone na bezpośrednie wyteżanie od obciążeń zewnętrznych, co nie może być zaakceptowane, na przykład dla konstrukcji obciążonych dynamicznie. Następstwem takiej sytuacji jest również zmiana charakterystyk sztywnościowych wadliwych styków (na przykład powstawanie *chwilowych przegubów* – dla imperfekcji kątowej α_1 – rys. 3.4; przesuwów – dla imperfekcji u). Dlatego też wady geometryczne styków α , β , u zazwyczaj usuwa się bądź przez naprawę wadliwego złącza (frezowanie blach czołowych i stosowanie wypełniających przekładek), bądź się je likwiduje przez dokręcenie śrub w wadliwym styku, jeśli nie są przekroczone normowe wielkości dopuszczalne. Druga grupa wad geometrycznych śrubowych styków doczołowych γ , v oraz w polega na wzajemnym przemieszczeniu otworów w elementach przylgowych połączeń. Wymuszony montaż styków z takimi imperfekcjami geometrycznymi wiąże się z wstępnym wyteżeniem, zarówno śrubowego styku doczołowego, jak i prętów ustroju.

Tak więc w każdym wypadku, wymuszony montaż konstrukcji z wadami styków γ , v , w , jak i dokręcenie śrub w styku z imperfekcjami złączy α , β , u wiąże się z wprowadzeniem wstępnego wyteżenia połączenia doczołowego.

W tym rozdziale będzie analizowane zagadnienie szacowania nośności granicznej śrubowych styków doczołowych, w których, w następstwie patologicznego montażu przez dokręcenie śrub w połączeniu z imperfekcjami przekraczającymi według [65] dopuszczalne, występują wyężenia montażowe. Celem tych analiz jest przedstawienie wytrzymałościowych skutków złego wykonawstwa i montażu konstrukcji o patologicznych odchyłkach i wykazanie niedopuszczalności akceptacji przez dozór techniczny takiej sytuacji.



Rys. 5.1

Na rysunku 5.1 pokazano schematy wstępnego wyłączenia łączników (w zakresie sprężystym), wywołanego wymuszonym montażem i likwidacją (drogą dociągania śrub) wad kątowych: α , β , γ (rys. 5.1b, c i d) oraz liniowych: u , v oraz w (rys. 5.1e, f i g) styku o konstrukcji złącza pokazanej na rys. 5.1a.

Wymuszony montaż i dokręcenie śrub w styku z imperfekcjami – kątową α i liniową v – wywołuje montażowe zginanie względem silniejszej osi oporu przekroju łączonego dźwigara, które wynosi

$$M_x = M_\alpha + M_v. \quad (5.1)$$

Likwidacja wad kątowej β i liniowej w , po dociągnięciu śrub w złączu, powoduje montażowe zginanie styku względem słabszej osi oporu łączonego elementu, które wynosi

$$M_y = M_\beta + M_w. \quad (5.2)$$

Dokręcenie łączników w styku z wadą długości u elementu wysyłkowo-montażowego wywołuje rozciąganie śrub siłą osiową

$$N = N_u. \quad (5.3)$$

Naprowadzenie otworów w elementach przylgowych styku z wadą kątową złącza γ wywołuje skręcanie w płaszczyźnie połączenia momentem

$$M_s = M_\gamma. \quad (5.4)$$

Występujące we wzorach (5.1)–(5.4) montażowe siły wewnętrzne można wyznaczyć według oszacowań podanych w rozdziale 4 (M_α – (4.33), M_v – (4.10), M_β – (4.44), M_w – (4.25), N_u – (4.7), M_γ – (4.57)). Dokładność tych oszacowań wyłączeń montażowych konstrukcji można zwiększyć, analizując schematy statyczne ustroju obciążone imperfekcjami geometrycznymi, z wykorzystaniem dostępnych programów komputerowych oraz uwzględniając odkształcenia elementów przylgowych styków doczołowych.

Tak więc w razie likwidacji imperfekcji α , β , γ , u , v oraz w , przez dokręcenie śrub występujących w połączeniu, styk będzie dwukierunkowo zginany momentami M_x , M_y , rozciągany siłą osiową N oraz ścinany od skręcania momentem M_s i obciążeniami poprzecznymi V_x , V_y (towarzyszącymi momentom zginającym M_x , M_y). Powoduje to rozciąganie trzpieni śrub od momentów zginających M_x i M_y oraz siły osiowej N , a także ich ścinaniem od sił poprzecznych V_x i V_y oraz momentu skręcającego M_s . Śrubowe połączenia doczołowe konstruuje się adekwatnie do występujących sił wewnętrznych w styku M_x , rozmieszczając na

przykład większą liczbę śrub w obrębie strefy rozciąganej złącza. Może się więc okazać, iż w razie występowania dodatkowych sił wewnętrznych M_y , pochodzących od likwidacji losowych imperfekcji w styku, złącze będzie miało niedostateczną nośność. Wstępne dodatkowe wyężenie rozciągające śrub od momentu zginającego M_x , M_y i siły osiowej N zmniejsza nośność złącza M_{Rx} na zginanie względem osi x .

W połączeniach doczołowych siłę poprzeczną w styku uwzględnia się obliczając zredukowaną nośność śrub na rozciąganie, uwzględniając tarcie między elementami przyłgowymi lub konstruując elementy (np. stołeczki), na które przekazuje się obciążenie poprzeczne. W połączeniach sprężanych kategorii F siła poprzeczna według [63] powinna być przeniesiona przez tarcie. Najczęściej w projektowaniu śrubowych doczołowych połączeń zginanych i ścinanych stosuje się zasadę, że siłę poprzeczną przenoszą wyłącznie śruby usytuowane w strefie ściskanej połączenia, lub też że siła ta przekazuje się poprzez docisk blachy czołowej belki do stołeczka montażowego, przyspawanego do pasa słupa.

Nośność połączeń elementów dwuteowych w złożonym stanie obciążenia (M , N , V) można według [63] sprawdzać zakładając, że moment zginający M i siła podłużna N są przenoszone wyłącznie przez pasy i spełniają warunek ich nośności dla wypadkowej siły podłużnej w pasie rozciąganym i śrub znajdujących się w jego bezpośrednim sąsiedztwie.

W połączeniach doczołowych, obciążonych prostopadłe (S_{ov}) i równoległe (S_{ot}) do osi łączników, zredukowane nośności śrub wyznacza się z następujących nierówności interakcyjnych:

– w połączeniach niesprężonych

$$\left(\frac{S_t}{S_{Rt}}\right)^2 + \left(\frac{S_v}{S_{Rv}}\right)^2 \leq 1, \quad (5.5)$$

– w połączeniach sprężanych

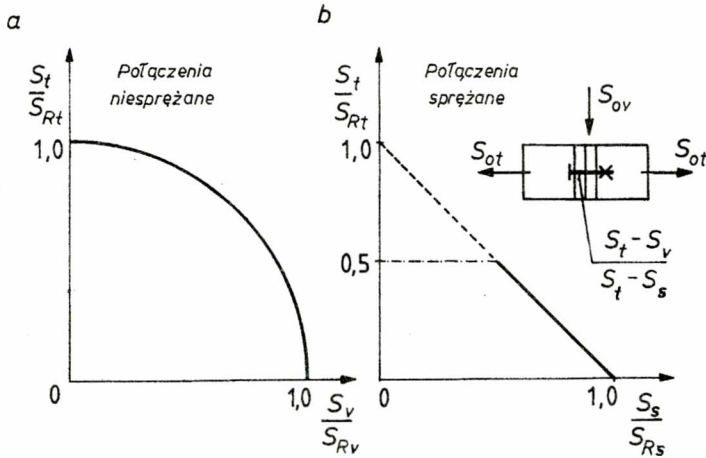
$$\frac{S_t}{S_{Rt}} + \frac{S_s}{S_{Rs}} \leq 1, \quad (5.6)$$

gdzie S_t – zredukowana nośność śruby na rozciąganie, z uwagi na występowanie obciążenia poprzecznego w styku,

S_v – zredukowana nośność śruby na ścinanie, z uwagi na występowanie obciążenia rozciągającego w styku,

S_s – zredukowana nośność śruby z warunku poślizgu styku, z uwagi na występowanie obciążenia rozciągającego w styku,

S_{Rt} , S_{Rv} , S_{Rs} – nośność śruby w styku obciążonym jednokierunkowo na rozciąganie, ścinanie oraz z warunku poślizgu według [63].



Rys. 5.2

Na rysunku 5.2 pokazano wykresy interakcyjnych nośności śrub w doczołowych stykach rozciąganych (S_{ot}) i ścinanych (S_{ov}), z łącznikami niesprężanymi $S_t - S_v$ (rys. 5.2a) i sprężanymi $S_t - S_s$ (rys. 5.2b).

Jeśli w połączeniu doczołowym brak jest stołeczków do przekazywania obciążeń poprzecznych (na przykład w stykach przesłowych rygli, a także dla styków obciążonych siłami wewnętrznymi M_y, V_y), to należy nośność styku na zginanie wyznaczać dla zredukowanych nośności śrub, jednocześnie ścinanych i rozciąganych.

Zredukowaną, ze względu na ścinanie, nośność śruby na rozciąganie S_t w styku doczołowym [11], w którym stosunek siły ścinającej S_{ov} do osi rozciąganej S_{ot} wynosi

$$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}, \quad (5.7)$$

wyznacza się z następujących wzorów

– w styku niesprężonym

$$S_t = \left(\frac{S_{Rt}^2 S_{Rv}^2}{X^2 S_{Rt}^2 + S_{Rv}^2} \right)^{0,5}, \quad (5.8)$$

– w styku sprężonym

$$S_t = S_{Rt} \left(\frac{X}{\alpha_s \mu m} + 1 \right)^{-1}, \quad (5.9)$$

gdzie α_s, μ, m – jak w tablicy 6 normy [63].

Zredukowaną ze względu na rozciąganie nośność śruby na ścinanie S_v , w styku doczołowym niesprężonym wyznacza się ze wzoru

$$S_v = X S_t. \quad (5.10)$$

Zredukowaną, ze względu na występującą w łączniku siłę rozciągającą, nośność śruby z warunku poślizgu (w stykach sprężonych) wyznacza się ze wzoru

$$S_s = X S_t. \quad (5.11)$$

Interakcyjne nośności $S_t - S_v$ ścinanych w jednej płaszczyźnie i rozciąganych śrub M12, M16, M20, M24 i M30 klasy 4.6, 5.6, 8.8, 10.9 i 12.9 w połączeniach niesprężonych podano w tablicach 3.6, zamieszczonych w [11].

Interakcyjne nośności $S_t - S_s$ śrub klasy 8.8, 10.9 i 12.9 w doczołowych połączeniach sprężonych, obciążonych prostopadle i równoległe do osi łączników M12, M16, M20, M24 i M30 podano w tablicach 3.7, zamieszczonych w [11]. Współrzędne interakcyjnych nośności śrub $S_t - S_s$ w doczołowych połączeniach podane w [11] (w tablicach 3.6 i 3.7) obliczono dla jednej płaszczyzny poślizgu ($m = 1$), otworów pasowanych lub średnio dokładnych oraz współczynników $\mu = 0,2 ; 0,3 ; 0,4$ i $0,5$.

W analizowanym przypadku wyłączenie styku wywołanego likwidacją imperfekcji kątowych α, β, γ oraz liniowych u, v , w obciążenie ścinające (rys. 5.3b) rozciąganych trzpieni śrub wynosi

$$\vec{S}_v = \vec{S}_s = \vec{S}_{Vx} + \vec{S}_{Vy} + \vec{S}_{Ms}, \quad (5.12)$$

gdzie S_{Vx} – siła w rozciąganej śrubie od obciążeń poprzecznych V_x ,

S_{Vy} – siła w rozciąganej śrubie od obciążeń poprzecznych V_y ,

S_{Ms} – siła poprzeczna w rozciąganej śrubie od momentu skręcającego M_s , która wynosi

$$S_{Ms} = \frac{r_{i, \max}}{\sum_i r_i^2} M_s, \quad (5.13)$$

w którym r_i – odległość i-tej śruby od środka obrotu połączenia,

$r_{i, \max}$ – odległość najbardziej oddalonej śruby rozciąganej od środka obrotu połączenia.

Składowe ścinające obciążenia śrub S_{Vx}, S_{Vy} można wyznaczyć zakładając, iż część sił ścinających V_x, V_y przenosi strefa ściskana złącza przez tarcie, różnicę natomiast obciążeń przenoszą śruby usytuowane w strefie rozciąganej połączenia.

Zredukowaną, ze względu na występowanie obciążeń ścinających łączniki (5.12), nośność styku na zginanie względem osi x wyznacza się ze wzoru

$$M_R = M(S_t), \quad (5.14)$$

w którym $M(S_t)$ jest nośnością styku na zginanie, wyznaczoną według wzorów (89)–(91) podanych w normie [63] dla zredukowanych nośności śrub

$$S_{Rt} = S_t, \quad (5.15)$$

gdzie S_t według wzorów (5.8) i (5.9).

Wzór (5.14) umożliwia wyznaczanie nośności styku na zginanie M_R względem osi silniejszego oporu przekroju, z uwzględnieniem ścinania V . W analizowanym, przedstawionym na rys. 5.1 schemacie wyłączenia styku, oprócz momentu M_x i siły poprzecznej V , występuje zginanie względem słabszej osi oporu przekroju M_y oraz rozciąganie od siły osiowej N . Norma [63], a także literatura przedmiotu [11], [38] nie podają propozycji obliczeń doczołowych styków śrubowych, obciążonych dwukierunkowym zginaniem oraz rozciąganiem.

Przyjmując normowe [63] modele wyłączenia oraz schematy rozdziału sił w łącznikach ω_i , w stanie granicznym nośności i użytkowania, interakcyjną nośność styku dwukierunkowo zginanego i rozciąganego względem osi silniejszego oporu przekroju x , proponuje się wyznaczać ze wzoru

$$M_{Rx} = M_R \left(1 - \frac{N}{N_{Rt}} - \frac{M_y}{M_{Ry}} \right), \quad (5.16)$$

gdzie M_R – nośność styku doczołowego na zginanie względem osi silniejszego oporu przekroju według wzoru (5.14),

N – siła osiowa w styku doczołowym od wyłączenia montażowego,

M_y – moment zginający względem osi słabszego oporu przekroju od wyłączenia montażowego,

N_{Rt} – nośność styku na rozciąganie według wzorów (86) i (87) w normie [63],

M_{Ry} – nośność styku na zginanie względem osi słabszego oporu przekroju według wzorów (89)–(91) w normie [63].

Na rysunku 5.3 pokazano rozkład sił w łącznikach styku doczołowego dwukierunkowo zginanego momentami M_x i M_y oraz rozciąganego siłą podłużną N (rys. 5.3a) i ścinanego siłami poprzecznymi V_x , V_y oraz skręcanego momentem M_s (rys. 5.3b) dla normowego [63] modelu obliczeniowego wyłączenia połączenia w stanie granicznym. Śruby w połączeniu pokazanym na rys. 5.3 są obciążone prostopadle i równoległe do ich osi.

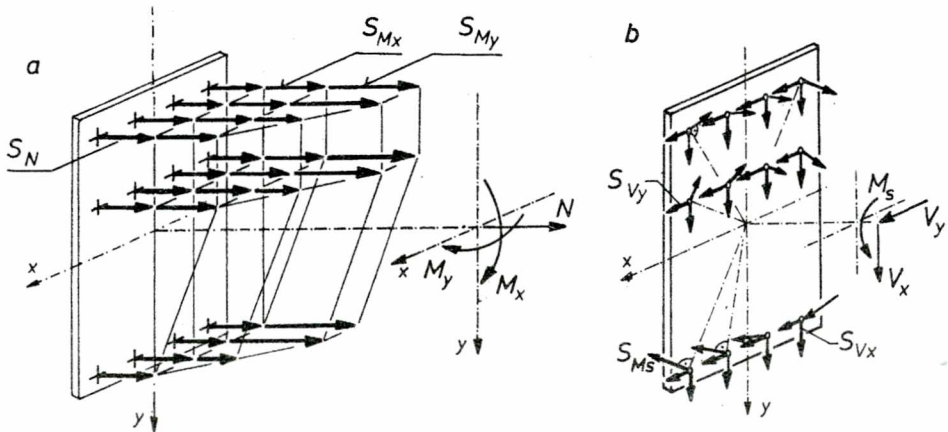
Nośność oraz zdolność użytkową połączeń doczołowych z imperfekcjami montażowymi w złożonym stanie wyłączenia proponuje się sprawdzać ze wzoru

$$M_{Rx} \geq M_q + M_x, \quad (5.17)$$

gdzie M_{Rx} – nośność styku według wzoru (5.16),

M_x – moment zginający względem osi silniejszego oporu przekroju od wyłączenia montażowego,

M_q – moment zginający względem osi silniejszego oporu przekroju wywołany obciążeniami zewnętrznymi ustroju.



Rys. 5.3

Przykład 7

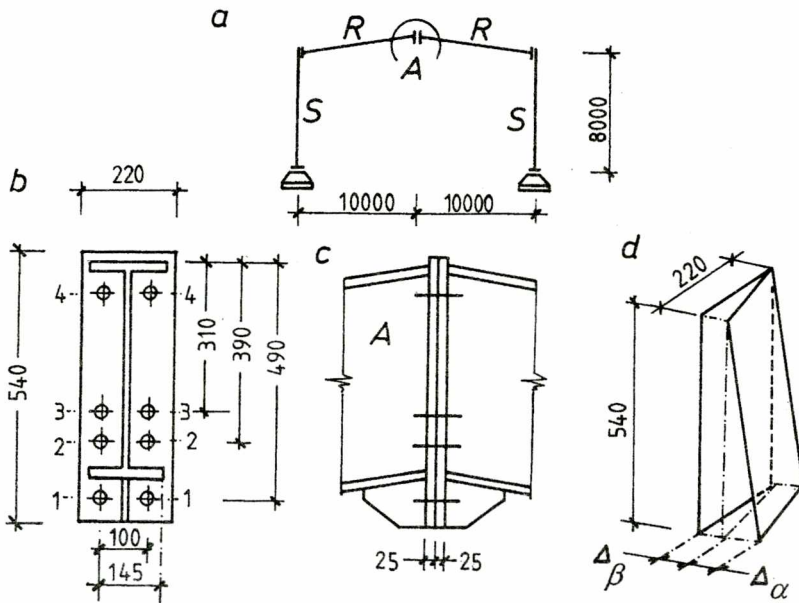
Sprawdzić nośność sztywnego doczołowego połączenia rygla z IPE 450 ramy o schemacie pokazanym na rys. 5.4a, w którym zastosowano niewłaściwy sposób likwidacji wady styku przez dokręcenie śrub. Śrubowy styk doczołowy znajduje się w środku rozpiętości rygla i zinventaryzowano w nim odchyłki geometryczne $\Delta_\alpha = 2$ mm i $\Delta_\beta = 2$ mm, pokazane na rys. 5.4d. W połączeniu kategorii D zastosowano śruby M24 klasy 10.9, a konstrukcję styku pokazano na rys. 5.4b i c. W styku obciążonym statycznie występuje moment zginający od obciążeń zewnętrznych $M_q = 400$ kNm.

Charakterystyki geometryczne rygla dwuteowego ze stali 18G2 o $f_d = 305$ MPa wynoszą: $J_x = 33740$ cm⁴, $J_y = 1680$ cm⁴, $W_x = 1500$ cm³.

Nośność śrub M24 klasy 10.9 na rozciągane wynosi $S_{Rt} = 239$ kN.

Współczynniki rozdziału obciążeń w styku doczołowym, ustalone według [63] oraz ramiona sił wewnętrznych wynoszą

$$\begin{aligned} \omega_{i1} &= 0,9, & y_1 &= 0,490 \text{ m}, \\ \omega_{i2} &= 1,0, & y_2 &= 0,390 \text{ m}, \\ \omega_{i3} &= 0,8, & y_3 &= 0,310 \text{ m}. \end{aligned}$$



Rys. 5.4

Moment obliczeniowy, jaki może przenieść styk bez imperfekcji geometrycznych względem osi silniejszego oporu przekroju, wynosi

$$M_R = S_{Rj} \sum_j m_i \omega_{ii} y_i S_{Rj} = 2 \cdot 239 (0,9 \cdot 0,49 + 1,0 \cdot 0,39 + 0,8 \cdot 0,31) = 515,76 \text{ kNm}.$$

Oszacowanie nośności styku idealnego (bez wstępnych imperfekcji geometrycznych złącza) na zginanie względem słabszej osi oporu wyznaczono przyjmując następujące współczynniki rozdziału obciążeń oraz ramię sił wewnętrznych:

$$\omega_{i1} = \omega_{i2} = \omega_{i4} = 1,0, \quad \omega_{i3} = 0,8, \quad y_i = 0,145 \text{ m}.$$

i wynosi ona

$$M_{Ry} = S_{Rj} \sum_i m_i \omega_{ii} y_i = 239 (3 \cdot 1,0 + 1 \cdot 0,8) \cdot 0,145 = 131,69 \text{ kNm}.$$

Kąty rozwarcia α i β wadliwego styku doczołowego wynoszą

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta_\alpha}{h} \frac{\pi}{180} = \arctg \frac{1}{540} \frac{\pi}{180} = 1,852 \cdot 10^{-3} \text{ rad},$$

$$\beta = \arctg \frac{\Delta_{\beta}}{b} \frac{\pi}{180} = \arctg \frac{1}{220} \frac{\pi}{180} = 4,545 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$$

Momenty zginające M_x i M_y wywołane dokręceniem śrub w wadliwym styku doczołowym wyznaczono uwzględniając, iż w styku łączy się pręty o identycznych sztywnościach i długościach

$$M_x = 4 \alpha EJ_x l^{-1} = 4 \cdot 1,852 \cdot 10^{-3} \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 33\,740 \cdot 10^{-8} \cdot 10,0^{-1} = 51,23 \text{ kNm},$$

$$M_y = 4 \beta EJ_y l^{-1} = 4 \cdot 4,545 \cdot 10^{-3} \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot 1680 \cdot 10^{-8} \cdot 10,0^{-1} = 5,41 \text{ kNm}$$

Zredukowana, z uwagi na wady połączenia, nośność styku na zginanie względem silniejszej osi oporu przekroju pręta wynosi

$$M_{Rx} = M_R \left(1 - \frac{M_y}{M_{Ry}} \right) = 515,76 \left(1 - \frac{5,41}{131,69} \right) = 494,57 \text{ kN}.$$

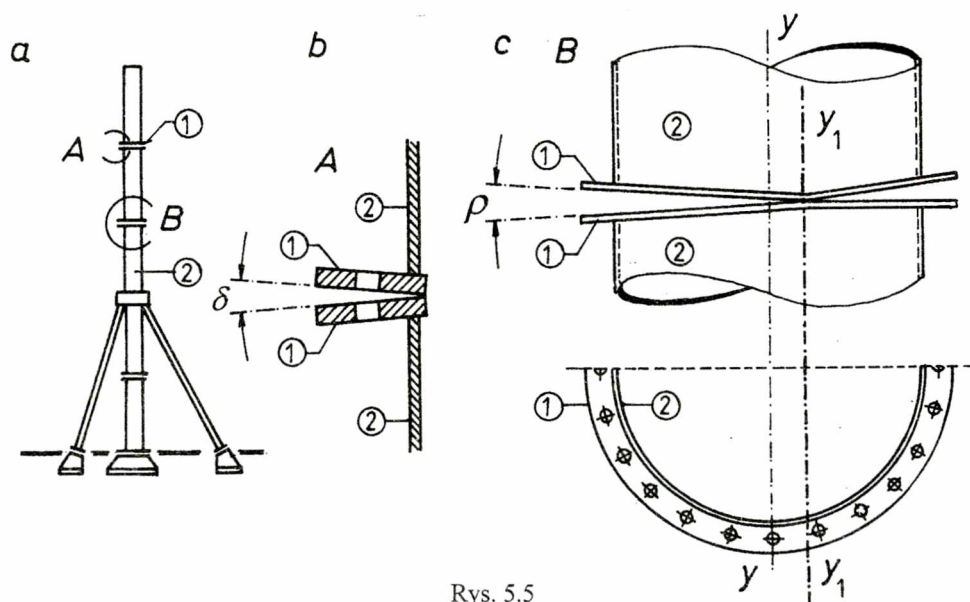
Nośność wadliwego styku sprawdzono ze wzoru

$$M_x + M_q = 51,23 + 400,00 = 451,23 \text{ kNm} < M_{Rx} = 494,57 \text{ kNm}.$$

W analizowanym przykładzie nośność wadliwego styku doczołowego, po dokręceniu śrub i likwidacji wad α i β w złączu jest wystarczająca do przeniesienia prognozowanych wyteżeń połączenia. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, iż brak właściwego sposobu naprawy wady styku doczołowego spowodował zmniejszenie nośności badanego połączenia o 16,0% w stosunku do złącza bez imperfekcji.

Istotną, często występującą wadą doczołowych styków śrubowych jest brak pełnego (na całej powierzchni) kontaktu stykających się elementów przylgowych. Doczołowy styk słupa dwuteowego z takimi wadami pokazano na rys. 3.2. Na rysunku 5.5 pokazano omawiany typ wad na przykładzie styku kołnierзовego komina stalowego [9], [12]. Kominy z takimi patologicznymi odchyłkami styków nie mogą być dopuszczone do eksploatacji. Te wady styków doczołowych charakteryzują się tym, iż dokręcenie śrub w takim połączeniu nie prowadzi do likwidacji szczelin w złączu, lecz jedynie do wstępnego przeciążenia łączników.

W przypadku wad polegających na braku pełnego przylegania stykających się elementów przylgowych złącza można wyróżnić dwie sytuacje: brak lokalnego przylegania w obrębie łącznika (rys. 3.2a oraz rys. 5.5b); brak ogólnego przylegania (rys. 3.2b oraz rys. 5.5c).



Rys. 5.5

Skutki występowania umownie wyróżnionych wad styków doczołowych na wyężenie ustroju i jego połączeń mogą być różne. W rzeczywistych stykach mamy do czynienia z wadami stanowiącymi kombinację obu wyróżnionych wad braku przylegania stykających się powierzchni, a przyjęty umowny podział tej imperfekcji wprowadzono w celu prześledzenia mechanizmu powstawania wyężenia i następstw tych wad na nośność styku.

W razie braku lokalnego przylegania blach czołowych (rys. 3.2a, rys. 5.5b) w śrubowym niesprężonym styku doczołowym, w zasadzie nie zmienia się ramię sił wewnętrznych w modelu obliczeniowym połączenia. Nośność na zginanie styku z taką imperfekcją nie jest jednak taka sama jak dla modelu idealnego, z powodu możliwości wystąpienia losowego efektu dźwigni i zwiększonego wyężenia śrub. Taka sytuacja wystąpi w razie kontaktu powierzchni przylgowych połączenia jedynie wzdłuż nieobciążonego brzegu blach czołowych, co spowoduje wystąpienie, pomimo grubych blach, efektu dźwigni.

Styki takie, obciążone momentami zmieniającymi znak (dla obciążeń przemiennych), projektuje się jako sprężane, aby zapobiec zmianie amplitud wyężenia śrub wprowadzając wstępny naciąg łączników. Według aktualnej normy [63] wstępne napięcie trzpieni (sprężenie) powinno wynosić

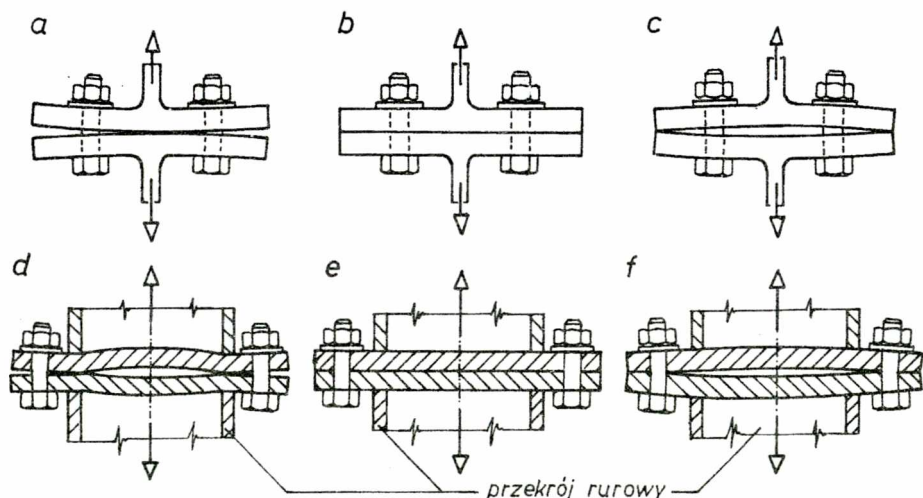
$$S_0 = 0,7 R_m A_s, \quad (5.18)$$

gdzie R_m – wytrzymałość na rozciąganie materiału śrub,

A_s – pole przekroju czynnego rdzenia śruby.

Na rysunku 5.6a, b, c pokazano trzy typy kształtów powierzchni kontaktowych doczołowego połączenia dwóch elementów o przekroju teowym.

Jeśli połączenie jest wykonane poprawnie i powierzchnie kontaktowe przylegają do siebie w sposób pokazany na rys. 5.6b, to wielkość sił w śrubach zależy od grubości blach czołowych (dla blach cienkich przyrosty sił w łącznikach są generowane ugięciami elementów czołowych tzw. efektem dźwigni). Jeśli blachy czołowe, w sprężonym styku doczołowym są dostatecznie grube (rys. 4.17), to przyrost wyżeń śrub występuje po pokonaniu sił sprężenia złącza (wstępnego napięcia łączników). Zagadnienie to szerzej omówiono w rozdziale 4.8.

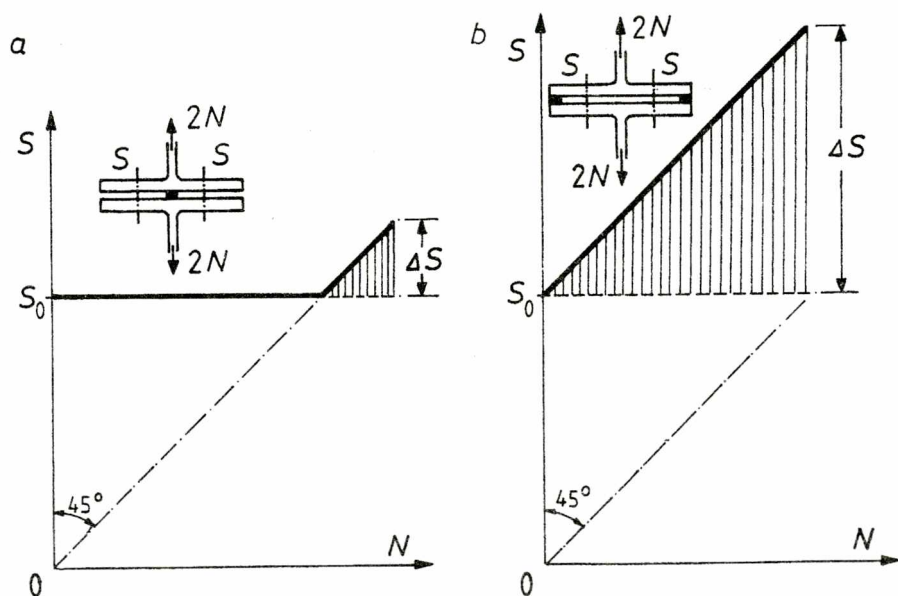


Rys. 5.6

Na rysunku 5.7a i b pokazano wykresy wyżeń śrub S w funkcji obciążenia styku N w rozciąganych połączeniach doczołowych z imperfekcjami powierzchni kontaktowych, przedstawionych na rys. 5.6a i c.

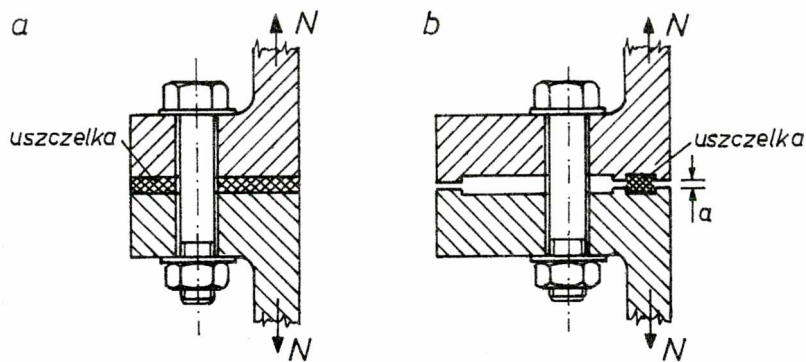
W razie kontaktu powierzchni przylgowych w osi analizowanego (rys. 5.6a) wstępnie sprężonego siłą S_0 złącza teowego, dodatkowe wyżenie śrub ΔS wystąpi po pokonaniu obciążeń sprężających styk, co pokazano na rys. 5.7a.

Jeśli kontakt powierzchni przylgowych połączenia wstępnie sprężonego siłą S_0 występuje na brzegu elementu czołowego (rys. 5.6c), to obciążenie zewnętrzne N przekazuje się bezpośrednio na wstępnie napięte śruby złącza. Taka wada geometryczna styku jest więc szczególnie niekorzystna, gdyż zmienia zakładany model obliczeniowy, w którym przyjmuje się, że wyżenie śrub następuje po pokonaniu sił wzajemnego docisku elementów przylgowych styku.



Rys. 5.7

Na rysunku 5.6d, e, f pokazano kształty blach czołowych styków elementów wysyłkowo-montażowych (o przekrojach rurowych), odpowiadające trzem analizowanym schematom wytyczenia elementów przyłgowych pokazanych na rys. 5.6a, b, c. Wadę geometryczną blachy czołowej pokazaną na rys. 5.6f należy uznać za niedopuszczalną, gdyż prowadzi ona do zmniejszenia nośności styku śrubowego.



Rys. 5.8

W celu wyeliminowania losowości usytuowania powierzchni kontaktu elementów przylgowych styków o konstrukcji pokazanej na rys. 5.8a, Bouwman [15] proponuje stosowanie rozwiązania takich styków jak na rys. 5.8b. Odpowiednie wyfrezowanie elementów czołowych i zastosowanie uszczelki w osi przykładanych obciążeń zewnętrznych (rys. 5.8b) realizuje schemat wyężenia styku przedstawiony na rys. 5.7a.

Obciążenie styków z wadami geometrycznymi złączy, polegającymi na kontakcie elementów czołowych jedynie na brzegu, jak to pokazano na rys. 5.6f, wywołuje sumowanie się sił w śrubach od obciążeń zewnętrznych z siłami od wstępnego sprężenia S_0 (5.18). Prowadzi to do wyczerpania nośności śrub w styku doczołowym dla obciążeń zdecydowanie mniejszych niż zakładano w projekcie. Awaryjne stany kominów, spowodowane takimi wadami styków kołnierзовych omówiono w pracach [9] i [12]. W opisanych tam przypadkach wymiana zerwanych śrub na łączniki o lepszych parametrach wytrzymałościowych nie była skuteczna, gdyż po około rocznej eksploatacji kominów śruby ulegały ponownemu zerwaniu.

W sytuacjach, gdy śruby nie są narażone na zmęczeniowe wyczerpanie ich nośności, wówczas jest korzystniej nie sprężać styków doczołowych z wadami braku lokalnego przylegania (rys. 5.6f).

Wada styku doczołowego, którą nazwano umownie brakiem ogólnego przylegania, sprowadza się do braku płaskości stykających się powierzchni przylgowych, a kontakt blach czołowych jest typu liniowego lub na części powierzchni przylgowych (rys. 3.2b i rys. 5.5 c). W zginanych stykach z takimi wadami (rys. 3.2b, rys. 5.5c) powstają wymuszone (nowe) osie obrotu łączonych elementów wysyłkowo-montażowych, inne niż zakładano w modelu obliczeniowym. Dlatego też nośność graniczna takich niesprężonych styków doczołowych jest mniejsza (gdyż zmniejszają się długości ramion sił wewnętrznych).

Sprężenie śrub w stykach z takimi wadami (o dostatecznej sztywności blach czołowych) nie wywołuje zakładanego w modelu obliczeniowym docięnięcia powierzchni przylgowych, a jedynie wyężenie trzpieni łączników. Tak wyężone śruby ulegają zerwaniu pod stosunkowo małym obciążeniami zewnętrznymi. Takie wady konstrukcyjne styków zidentyfikowano w badaniach stalowych kominów [9], [12]; dozór techniczny obiektów obserwował kołysanie się segmentów wysyłkowo-montażowych ustroju. Naprawa wadliwych styków kołnierзовych badanych kominów polegała na wypełnieniu szczelin w obrębie kołnierzy blachami o indywidualnie dobieranych grubościach.

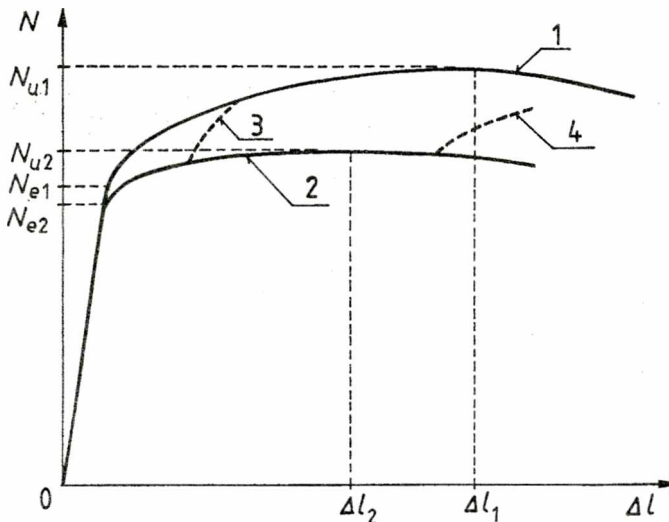
Zredukowaną nośność niesprężonych połączeń doczołowych, z imperfekcjami braku płaskości powierzchni przylegania stykających się elementów przylgowych złączy, można oszacować według wzorów (89)–(91) podanych w normie [63] dla ramion działania sił w śrubach y_i od rzeczywistych (na przykład pomierzonych) osi obrotu połączenia.

W połączeniach sprężanych naciąg trzpieni śrub uzyskuje się przez obrót nakrętek. Część momentu dokręcającego nakrętkę łącznika jest pochłaniana przez tarcie między

nakrętką a blachą. Pozostała część momentu sprężającego połączenie powoduje rozciąganie trzpienia śruby. W połączeniu sprężonym śruba jest rozciągana (czego reakcją jest docisk płaszczyzny styku między blachami) oraz skręcana (czego reakcją jest tarcie w płaszczyźnie styku blach i blachy z nakrętką lub łbem śruby).

Konsekwencją wad styków doczołowych i błędnego montażu jest możliwość wprowadzenia w trzpieniach śrub naciągów większych niż to wynika ze wzoru (5.18). Powstaje wówczas model wyężenia śrub, opisany w pracy Jana Bródki i Jerzego Goczka *Podstawy konstrukcji metalowych* [18], który dalej przedstawiono.

Na rysunku 5.9 przedstawiono krzywe ilustrujące zachowanie się śruby w różnych warunkach wprowadzania naciagu. Symbolem N_e oznaczono siłę w śrubie, ustaloną na zakończenie stanu sprężystego naprężenia, symbolem N_u natomiast jej nośność graniczną.



Rys. 5.9

Krzywa *odkształcenie-naprężenie* (1) odnosi się do naciagu śruby, uzyskanego bezpośrednio z jej osiowego rozciągania. Wielkość Δl_1 jest wydłużeniem po osiągnięciu siły N_{u1} . Krzywa (2) natomiast odnosi się do śruby, którą rozciąga się najpierw osiowo, do chwili ścisłego przylegania blach stykowych, a następnie rozciąga się przez obrót nakrętki, a więc przez przyłożenie momentu skręcającego. Wielkość Δl_2 jest wydłużeniem po osiągnięciu siły N_{e2} . Krzywe (3) i (4) odnoszą się do sytuacji, gdy zaprzestaje się dokręcania momentem (czyli zaprzestaje się dokręcania nakrętek), wprowadzając dalszy naciąg przez rozciąganie osiowe trzpienia o wielkości ΔN . W zależności od wielkości Δl do chwili zaprzestania obrotu nakrętki zachowanie się śruby przebiega według krzywej (3) lub (4).

Dopóki odkształcenia są małe, dopóty moment dokręcenia jest prawie całkowicie pochłaniany przez tarcie. Gdy odkształcenia rosną, wtedy część momentu dokręcenia

przekazuje się na trzpień, lecz nośność graniczna $N_{u2} \approx 0,8N_{u1}$, a odkształcenie z nią związane $\Delta l_2 \approx 0,7\Delta l_1$. Jeśli jednak zewnętrzne rozciąganie siłą ΔN jest przyłożone przed osiągnięciem N_{u2} , to obciążenie trzpienia dalej wzrasta aż do osiągnięcia N_{u1} . W przeciwnym razie, to znaczy wtedy, gdy $\Delta l_2 < \Delta l < \Delta l_1$, część momentu dokręcenia nie obciąża trzpienia, lecz zmniejsza się z powodu rozwarcia się styku blach, zniszczenie złącza zaś odbywa się według krzywej (4), po czym nie jest osiągana nominalna nośność śruby osiągana podczas rozciągania osiowego N_{u1} . Powstaje wówczas sytuacja, z której wynika, że nośność śrub jest gorsza, niż przyjęto w założeniach sprężenia łączników według wzoru (5.18). Taki model wyężenia śrub wystąpi w razie likwidacji wad styku doczołowego przez *dociąganie* łączników.

Podsumowując analizę wyężenia śrubowych styków doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi należy stwierdzić, iż wymuszony montaż konstrukcji z takimi wadliwymi połączeniami prowadzi do wywołania montażowych sił wewnętrznych w złączach. Schematy wyężen śrub w stykach doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi różnią się od modelu szacowania nośności połączeń [11], [38], [42], [63] przyjmowanego dla poprawnie wykonanego złącza. Zmniejszenie nośności styków, wywołane wadami geometrycznymi, zależy nie tylko od wielkości i rodzaju imperfekcji, ale i od sztywności elementów połączenia, sztywności i długości prętów ustroju.

Jednoznacznie negatywny wpływ imperfekcji geometrycznych o wielkościach większych niż dopuszcza norma [65] na nośność graniczną styków śrubowych potwierdza konieczność naprawy wadliwych połączeń i jest niedopuszczalny wymuszony montaż takich konstrukcji przez *dociąganie* śrub, zarówno w celu likwidacji wad liniowych u , v , w oraz kątowych α , β , γ , jak i braku płaskości powierzchni przylgowych (*prostowania* odkształconych blach czołowych).

Przedstawione analizy wyężenia śrubowych styków doczołowych z imperfekcjami prowadzono zakładając, iż są one wyposażone w sztywne elementy przylgowe (grube blachy czołowe belek, uźebrowane grube pasy słupów). Dlatego też określenie rzeczywistych wyężen montażowych badanych styków doczołowych jest możliwe na drodze eksperymentalnej lub przez stosowanie zaawansowanych programów do analiz komputerowych, które umożliwiają uwzględnienie podatności elementów przylgowych styków.

6. ANALIZA DOPUSZCZALNYCH TOLERANCJI WYKONANIA ŚRUBOWYCH STYKÓW DOCZOŁOWYCH

Wrażliwość konstrukcji scalanych z elementów wysyłkowo-montażowych z wadliwymi śrubowymi stykami doczołowymi na losowe imperfekcje geometryczne złączy sprawia, iż istnieje potrzeba określenia tolerancji wykonania oraz montażu ustrojów z takimi połączeniami. Statyczno-wytrzymałościowe następstwa występowania integralnych imperfekcji złączy doczołowych omówiono w poprzednich rozdziałach. Na podstawie wykonanych analiz można stwierdzić, iż pewne rodzaje imperfekcji o ograniczonej wielkości mogą być zaakceptowane jako nie zmniejszające w znaczący sposób nośności granicznej konstrukcji (gdy nie powodują istotnych zmian parametrów technicznych warunkujących bezpieczną eksploatację obiektu).

Do wad geometrycznych, które nie mogą występować w śrubowych stykach doczołowych należy brak płaskości elementów przylgowych połączeń (rys. 3.2 i 5.5). Dokręcenie śrub w takich stykach ze sztywnymi elementami czołowymi (uźebrowanymi lub o grubych blachach przylgowych) może nie powodować likwidacji szczelin w połączeniach, lecz wstępne wyężenie łączników; nie następuje wówczas zakładane w projekcie sprężenie złączy. Występujące w połączeniach bądź lokalne, bądź na większej powierzchni szczeliny między stykającymi się powierzchniami przylgowymi sprawiają, iż śruby w stykach mogą bezpośrednio przejmować zmienne wyężenia od obciążeń zewnętrznych, co może prowadzić do zmęczenia i wyczerpania ich nośności. Zdeformowane, na przykład w wyniku odkształceń spawalniczych, blachy czołowe należy frezować i stosować ewentualnie przekładki wypełniające. Niedopuszczalne jest dociąganie śrub w wadliwym złączu w celu *prostowania* odkształconych blach czołowych.

Badania płaskości powierzchni przylgowych śrubowych styków doczołowych należy uznać za podstawowe sprawdzenie poprawności wykonania badanego typu połączeń. Wielkość szczeliny na brzegu blachy czołowej złącza w odniesieniu do płaszczyzny nie powinna przekraczać 1 mm lokalnie i 0,5 mm na co najmniej 2/3 pola powierzchni styku [65]. Badania

takie można również prowadzić bezpośrednio po założeniu śrub w stykach (przed ich sprężeniem) i dokręceniu łączników siłą ramienia ludzkiego kluczem płaskim (bez przedłużenia) stosując szczelinomierz.

Drugim typem wad styków (przy ich określonej wielkości), które mogą być niekiedy (na przykład w konstrukcjach statycznie wyznaczalnych, gdy możliwa jest regulacja ustroju) zaakceptowane w ustroju są szczeliny u , przemieszczenia v i w , zbieżne szczeliny o kątach rozwarcia α i β oraz skręcenia belek czołowych γ . Te wady geometryczne styków doczołowych o ograniczonej wielkości, nie przekraczającej wartości określonej w normie [65], mogą być zlikwidowane w trakcie wymuszonego montażu, przez dokręcenie śrub w złączach, gdy są możliwe odkształcenia prętów ustroju. Wywołuje to jednak powstanie wstępnych montażowych wyteżeń zarówno styków doczołowych, jak i prętów ustroju. Jak już wspomniano we wnioskach z analiz i badań w poprzednich rozdziałach, w przypadku większych odchyłek geometrycznych styków, niż dopuszcza norma [65], należy bezwzględnie naprawiać wadliwe połączenie.

Jak wykazano w poprzednich rozdziałach, wpływ losowych imperfekcji geometrycznych styków doczołowych na siły wewnętrzne, wywołane wymuszonym scalaniem konstrukcji, zależy nie tylko od wielkości tych wad, ale i sztywności i długości prętów ustrojów oraz ich schematów statycznych. Dokładne oszacowanie ich wpływu na zmniejszenie nośności ustroju jest możliwe na podstawie analiz statyczno-wytrzymałościowych każdej badanej konstrukcji, według propozycji obliczeniowych omówionych w poprzednich rozdziałach. Podejście takie (analizy indywidualnych wad odnoszących się do konkretnej konstrukcji) nie jest dogodną metodą w praktyce inżynierskiej. W ocenie jakości wykonania elementów wysyłkowo-montażowych są preferowane proste metody i kryteria badania poprawności realizacji konstrukcji. Dlatego też podjęto próbę oceny skutków występowania wad geometrycznych w stykach doczołowych o patologicznych wielkościach oraz niewłaściwego montażu, a także określenia podstaw do cechowania tolerancji dokładności wykonawstwa rozważanego typu konstrukcji.

Próba określenia prostych kryteriów o charakterze ogólnym oceny jakości wykonania śrubowych połączeń doczołowych wiąże się z koniecznością analizy ekstremalnych sytuacji statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji z wadliwymi stykami doczołowymi oraz stosowanie założeń upraszczających analizowane modele obliczeniowe.

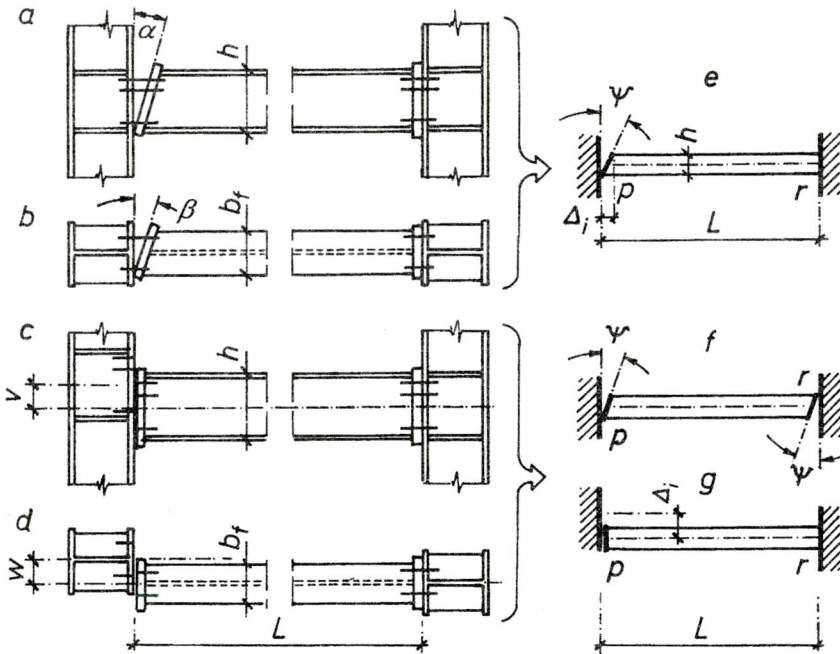
Według Eurokodu 3 [61] połączenia w konstrukcjach stalowych dzieli się na sztywne (w rzeczywistości o małej podatności) o nośności $M > 1,2 M_R$, przegubowe (*przeguby techniczne*) o nośności $M < 0,25 M_R$ oraz podatne, o nośności $M < M_R$, jednak większej od wartości sił wewnętrznych o styku (gdzie M_R – nośność belki łączonej w węźle).

W prowadzonych analizach konstrukcji rozpatruje się przede wszystkim połączenia sztywne i podatne, których nośność jest odnoszona do nośności łączonego w węźle (styku) pręta M_R . Dlatego w dalszych analizach założono, iż skutki likwidacji przez dokręcenie śrub

w styku losowych imperfekcji będą odnoszone do procentowego wyężenia łączonego elementu o nośności M_R .

Rozseparowane integralne wady geometryczne śrubowych styków doczołowych u , v , w , α , β , γ można sprowadzić do analizy 3 typów wad: długości u , obrotu ψ i skręcania γ połączenia pręta w węźle. Analiza wady obrotu połączenia pręta w węźle ψ (rys. 6.1e, f) umożliwia oszacowanie zarówno wady α i β (rys. 6.1a, b) oraz wad wzajemnych przemieszczeń otworów na śruby v i w (rys. 6.1c, d).

Jak wykazano w rozdziale 3, negatywne skutki likwidowanych wad geometrycznych w stykach doczołowych są największe dla połączeń, w których łączy się element prętowy do sztywnego węzła. Dlatego też w celu oszacowania górnych wielkości wyężenia spowodowanych wadą obrotu ψ analizuje się schemat zastępczy pokazany na rys. 6.1e, w którym węzeł p z imperfekcją ψ pręta pr o sztywności EJ (EJ_x – dla α , EJ_y – dla β) łączy się ze sztywną podporą. Przyjmuje się, iż powierzchnie przylgowe połączenia doczołowego są płaskie i dokręcanie śrub w styku jest jednocześnie oraz iż nie wystąpi wyczerpanie ich nośności.



Rys. 6.1

Momenty zginające w węzłach p i r pręta o długości L i o schemacie przedstawionym na rys. 6.1e wywołane obrotem ψ w węźle p wynoszą

$$M_p = 4\psi EJL^{-1}, \quad (6.1)$$

$$M_r = 0,5 M_p. \quad (6.2)$$

Sprężysta nośność na zginanie pręta o wysokości h , zbudowanego z materiału o wytrzymałości obliczeniowej stali f_d wynosi

$$M_R = 2 J f_d h^{-1}. \quad (6.3)$$

Udział momentu zginającego M_p , wywołanego likwidacją imperfekcji kątowej ψ w wyłączeniu elementu, odniesiony do sprężystej nośności pręta na zginanie wynosi

$$x_{\alpha,\beta} = \frac{M_p}{M_R} = 2\psi \frac{E}{f_d} \frac{h}{L}. \quad (6.4)$$

Stosunek E do f_d , w zależności od gatunku stali wynosi od około 1000 do 470, a do dalszych oszacowań wyłączeń konstrukcji przyjęto $E/f_d = 1000$. Kontrolując jakość wykonania styku korzystniej jest badać nie kąty α i β , lecz rozwarości szczelin Δ_α , Δ_β , w odniesieniu do parametrów geometrii profilu h i b_f . Dla rozwarości szczeliny $\Delta_{\alpha,\beta}$ (patrz rys. 6.4) wzór (6.4) przybiera postać

$$x_{\alpha,\beta} = 2000 \frac{h}{L} \arctg \frac{\Delta_{\alpha,\beta}}{h}, \quad (6.5)$$

gdzie h jest wysokością profilu, gdy analizuje się wadę kątową styku α i $h = b_f$ i gdy rozpatruje się wadę kątową złącza β .

W tablicy 6.1 podano wartości współczynnika wstępnego wyłączenia konstrukcji $x_{\alpha,\beta}$, wywołanego likwidacją wady kątowej α i β .

Momenty zginające w węzłach p i r pręta o długości L i schemacie przedstawionym na rys. 6.1g, wywołane przesunięciem podpory p o wartości $\Delta_{v,w}$ (Δ_v – dla wady v oraz Δ_w – dla wady w ; patrz rys. 6.4) wynoszą

$$M_p = M_r = 6 \Delta_{v,w} EJ L^{-2}, \quad (6.6)$$

gdzie $EJ = EJ_x$ – dla wady v oraz $EJ = EJ_y$ – dla wady w .

Przyjmując podobne założenia jak w przypadku analizy wady obrotu ψ , udział momentu zginającego M_p według (6.6), wywołanego likwidacją wady przesunięcia śrubowego styku doczołowego podpory p o wartości $\Delta_{v,w}$, w wyłączeniu łączonego pręta badanej konstrukcji wynosi

$$x_{v,w} = 3000 \frac{\Delta_{v,w}}{h} \left(\frac{h}{L} \right)^2, \quad (6.7a)$$

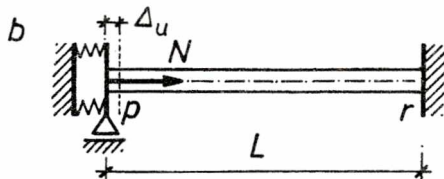
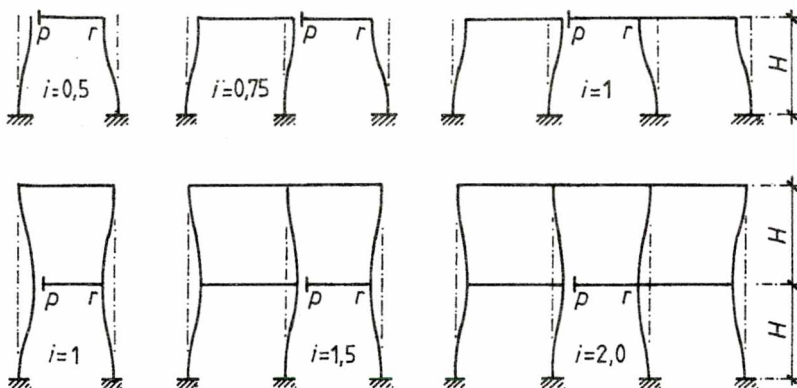
lub w równoważnym zapisie

$$x_{v,w} = 3000 \frac{\Delta_{v,w}}{L} \frac{h}{L}. \quad (6.7b)$$

Tablica 6.1. Wartości współczynników wstępnego wyężenia konstrukcji wywołanego wadliwym montażem styków doczołowych $x_{\alpha\beta}$ w funkcji h/L

		$x_{\alpha\beta}$					
$\frac{h}{L}$	$\frac{\Delta}{h}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{1000}$
0,01		0,200	0,098	0,067	0,050	0,040	0,020
0,02		0,400	0,197	0,133	0,100	0,080	0,040
0,03		0,600	0,296	0,200	0,150	0,120	0,060
0,04		0,800	0,394	0,266	0,200	0,160	0,080
0,05		1,000	0,493	0,333	0,250	0,199	0,100

a



Rys. 6.2

Analizując wadliwe połączenie pręta dwuteowego, należy we wzorach (6.7) przyjmować h równe wysokości profilu h dla imperfekcji v oraz $h = b_f$ rozpatrując wadę w .

W tablicach 6.2 i 6.3 podano wartości współczynnika wstępnego wyężenia konstrukcji $x_{v,w}$, wywołanego wymuszonym montażem prętów z wadami v i w w funkcji $\Delta_{v,w}/h$ oraz $\Delta_{v,w}/L$.

Tablica 6.2. Wartości współczynników wstępnego wyężenia konstrukcji wywołanego wadliwym montażem styków doczołowych $x_{v,w}$ w funkcji $\Delta_{v,w}/h$

		$x_{v,w}$					
$\Delta_{v,w}/h$	h/L	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{1000}$
0,01		0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000
0,02		0,012	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001
0,03		0,027	0,014	0,009	0,007	0,005	0,003
0,04		0,048	0,024	0,016	0,012	0,010	0,005
0,05		0,075	0,037	0,025	0,013	0,015	0,007

Tablica 6.3. Wartości współczynników wstępnego wyężenia konstrukcji wywołanego wadliwym montażem styków doczołowych $x_{v,w}$ w funkcji $\Delta_{v,w}/L$

		$x_{v,w}$					
$\Delta_{v,w}/L$	h/L	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{1000}$
0,01		0,30	0,10	0,075	0,06	0,06	0,04
0,02		0,60	0,20	0,150	0,12	0,12	0,08
0,03		0,90	0,30	0,225	0,18	0,18	0,12
0,04		1,20	0,40	0,300	0,24	0,24	0,16
0,05		1,50	0,50	0,525	0,30	0,80	0,24

Wpływ likwidacji wady długości elementu wysyłkowo-montażowego u na wyężenie konstrukcji oszacowano zakładając, iż pręt pr jest zamocowany w węźle r w sposób sztywny (niepodatny), w węźle p zaś z wadliwym stykiem w sposób podatny (rys. 6.2). Sprężystość podpory p pręta pr wyznaczono jako obciążenie wywołujące ugięcie słupów Δ_u (patrz rys. 6.2), które wynosi

$$N = 12\Delta_u i EJ_S H^{-3}, \quad (6.8)$$

gdzie i – współczynnik zależny od liczby słupów według oznaczeń na rys. 6.2,

J_S – moment bezwładności przekroju słupa,

H – wysokość słupa.

Siłę osiową N według (6.8) proponuje się odnosić do nośności pasa dwuteowego przekroju pręta pr , która wynosi

$$N_{Rp} = A_p f_d, \quad (6.9)$$

gdzie A_p – pole przekroju pasa dwuteowego pręta pr .

Stopień wyężenia pręta, wywołany likwidacją wady długości pręta pr , wynosi

$$x_u = 6 i \frac{\Delta_u}{H} \frac{E}{f_d} \frac{J_s}{A_p}. \quad (6.10)$$

Po przyjęciu, podobnie jak w analizie wad kątowych α i β styków doczołowych, wartości $E/f_d \approx 1000$ oraz momentu bezwładności rygla $J \approx 0,5 A_p h^2$, wzór (6.10) przybiera postać

$$x_u = 3000 i n \frac{\Delta_u}{h} \left(\frac{h}{H} \right)^2, \quad (6.11a)$$

lub w równoważnym zapisie

$$x_u = 3000 i n \frac{\Delta_u}{H} \left(\frac{h}{H} \right)^2, \quad (6.11b)$$

gdzie $n = J_S/J$ – stosunek sztywności słupa do sztywności belki.

We wzorach (6.11) h jest wysokością dwuteowego pręta pr .

W tablicach 6.4 i 6.5 podano wartości współczynników wstępnych wyężenia styków doczołowych x_u , wywołanych likwidacją wad długości elementów w funkcjach Δ_u/h oraz Δ_u/H i $n = 1$ oraz $i = 1$ (gdzie h – wysokość pręta dwuteowego pr , H – wysokość słupów ramy).

Współczynnik wyężenia słupów $x_{u,S}$, wywołany wadą długości rygla, można wyznaczyć analizując schemat pokazany na rys. 6.1g i modyfikując odpowiednio wzór (6.7). Dla słupa o wysokości profilu przekroju poprzecznego h_s , współczynnik wyężenia słupów wynosi

$$x_{u,S} = 3000 \frac{\Delta_u}{h_s} \left(\frac{h_s}{H} \right)^2. \quad (6.12)$$

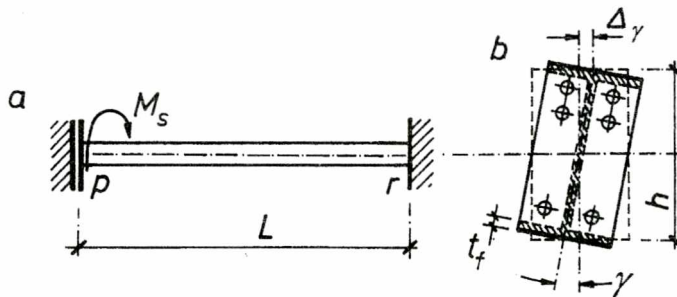
Tablica 6.4. Wartości współczynników wstępnego wyężenia konstrukcji wywołanego wadliwym montażem styków doczołowych x_u dla $n = 1$ oraz $i = 1$, w funkcji Δ_u/h

		x_u				
h/H	Δ_u/h	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{75}$	$\frac{1}{100}$
0,01		0,000	0,001	0,001	0,000	0,000
0,02		0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
0,03		0,008	0,003	0,002	0,001	0,000
0,04		0,019	0,010	0,005	0,003	0,002
0,05		0,038	0,015	0,008	0,005	0,004

Tablica 6.5. Wartości współczynników wstępnego wyężenia konstrukcji wywołanego wadliwym montażem styków doczołowych styku x_u dla $n = 1$ oraz $i = 1$, w funkcji Δ_u/H

		x_u						
Δ_u/H	h/H	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{750}$	$\frac{1}{1000}$
0,01		0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
0,02		0,012	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001
0,03		0,027	0,014	0,009	0,007	0,005	0,004	0,003
0,04		0,048	0,024	0,016	0,012	0,010	0,006	0,005
0,05		0,075	0,038	0,025	0,016	0,015	0,010	0,007

Oszacowanie wpływu likwidacji wady skęcenia płaszczyzn przyglowych styku γ na wyężenie ustroju wyznaczono przyjmując, iż pręt pr jest zamocowany w węźle r w sztywnej konstrukcji, obrót elementu natomiast w celu założenia śrub odbywa się w węźle p . Schemat analizowanego modelu obliczeniowego pokazano na rys. 6.3.



Rys. 6.3

Moment skręcający wywołany obrotem pręta w wadliwym styku o kąt γ wynosi

$$M_s = \gamma G J_s L^{-1}, \quad (6.13)$$

(oznaczenia jak we wzorze (4.56)).

Sprężystą nośność skręcania swobodnego pręta wyznaczono ze wzoru

$$M_{R,s} = 0,58 J_s f_d t_f^{-1}, \quad (6.14)$$

gdzie t_f – grubość pasa dwuteowej belki.

Udział momentu skręcającego M_s , wywołanego likwidacją skręcenia styku γ , w wyłączeniu pręta w odniesieniu do jego nośności sprężystej wynosi

$$x_\gamma = \frac{M_s}{M_{R,s}} = \gamma \frac{G}{f_d} \frac{t_f}{L}. \quad (6.15)$$

Skręcenie styku jest wygodniej mierzyć jako przemieszczenie liniowe Δ_γ odnoszące do odległości od środka obrotu $h/2$ (rys. 6.3). Przyjmując $G/f_d \approx 390$ wzór (6.15) przybiera postać

$$x_\gamma = 390 \frac{t_f}{L} \arctg \frac{2\Delta_\gamma}{h}, \quad (6.16)$$

gdzie h jest wysokością dwuteowej belki (pręta pr).

Tablica 6.6. Wartości współczynników wstępnego wyłączenia konstrukcji wywołanego wadliwym montażem styków doczołowych x_γ w funkcji Δ_γ/h

Δ_γ/h t_f/L	x_γ						
	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$	$\frac{1}{750}$	$\frac{1}{1000}$
0,0005	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
0,0007	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
0,0010	0,008	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,000
0,0015	0,012	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001
0,0020	0,015	0,008	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001
0,0025	0,020	0,010	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002
0,0030	0,025	0,012	0,008	0,006	0,005	0,003	0,002

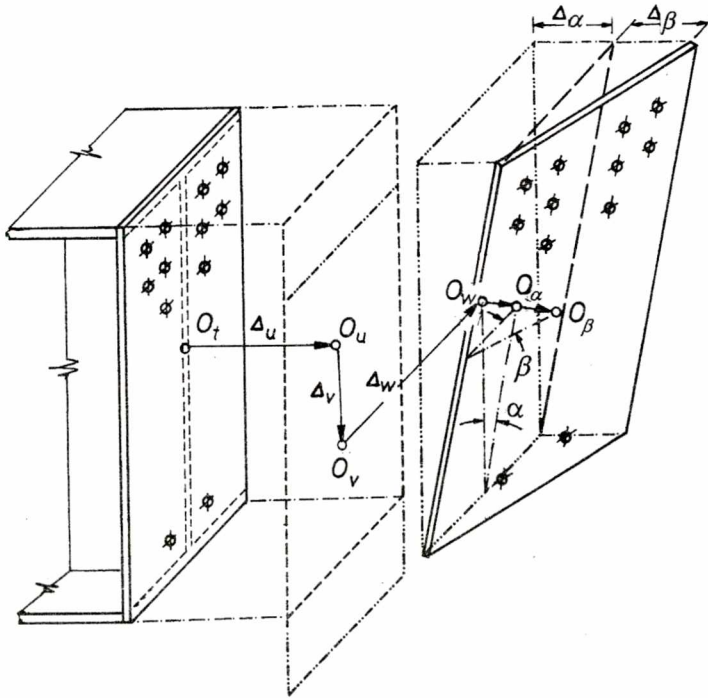
W tablicy 6.6 podano wartości współczynników wstępnego wyteżenia konstrukcji x_γ wywołanego likwidacją wady skreślenia styku γ .

Przedstawione oszacowania wyteżeń konstrukcji ze śrubowymi wadliwymi stykami doczołowymi wykonano stosując wiele uproszczeń i rygorystycznych założeń. Między innymi przyjęto, iż w styku nie występują odkształcenia elementów przylgowych złącza (założono grube blachy czołowe i uzebrowania stykających się elementów). W stykach z podatnymi węzłami doczołowymi można spodziewać się mniejszych wstępnych sił wewnętrznych wywołanych likwidacją imperfekcji geometrycznej, niż według zaproponowanych oszacowań. Drugą okolicznością, która wpływa na korzystniejszą redystrybucję sił wewnętrznych, niż w przyjętych modelach obliczeniowych (rys. 6.1e, g; 6.2b; 6.3), ograniczających przenoszenie dodatkowych wstępnych wyteżeń do prętów bezpośrednio łączonych w wadliwym styku, jest współdziałanie prętów przyległych do analizowanego węzła z imperfekcją styku. Dlatego też precyzyjniejsze oszacowanie omawianego zagadnienia jest możliwe po przyjęciu modeli obliczeniowych, odwzorowujących odkształcenie elementów styków (np. metodą elementów skończonych) oraz przestrzenne wyteżenie ustroju, a uzyskane wyniki teoretyczne powinny być zweryfikowane doświadczalnie. Uogólnienie wymagań co do jakości wykonania badanego typu połączeń jest trudne, z uwagi na dużą różnorodność stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych styków, zróżnicowanie sztywności i wymiarów połączeń oraz konstrukcji, a także zastosowany schemat statyczny i przyjęty system montażu ustroju.

Przedstawione wzory (6.5), (6.7), (6.11), (6.12) i (6.16), wyznaczone dla podobnych schematów i założeń w przyjętych modelach obliczeniowych, umożliwiają uzyskanie górnych oszacowań wyteżeń montażowych oraz wykonanie analiz porównawczych skutków występowania poszczególnych integralnych imperfekcji styków doczołowych w ustroju. Za miarę wstępnego wyteżenia konstrukcji wywołanego likwidacją wady geometrycznej w styku doczołowym przyjęto współczynnik stopnia wyteżenia x_i , to jest stosunek siły wewnętrznej wywołanej imperfekcją do nośności łączonego elementu. Współczynnik stopnia wstępnego wyteżenia x_i uzależniono od wielkości wady styku Δ_i , odnosząc ją do wysokości profilu.

Schemat przemieszczeń i obrotów wadliwego śrubowego styku doczołowego przedstawiono na rys. 6.4.

Z analizy wzoru (6.5) oraz tabl. 6.1 wynika, iż wady kątowe styków doczołowych α, β wywołują stosunkowo duże wstępne wyteżenia ustroju. Dla realnie stosowanych proporcji geometrycznych konstrukcji ($h/L = 0,02-0,04$) wyteżenie wstępne ustroju wywołane likwidacją wady zbieżnej szczeliny $\Delta_{\alpha,\beta}/h = 1/500$ jest rzędu 8–16% nośności sprężystej na zginanie łączonego elementu M_R . Takiego też wstępnego wyteżenia śrubowego, sztywnego styku doczołowego należy spodziewać się w przypadku łączenia rygla do sztywnej konstrukcji słupowo-ryglowej. Jeśli styk doczołowy z imperfekcją kątową α, β łączy pręty o podobnych sztywnościach i długościach (na przykład styk w środku rozpiętości rygla ramy), to wstępne wyteżenie ustroju można oszacować jako 50% wyznaczonego według (6.5).



Rys. 6.4

Wpływ przemieszczeń v i w w płaszczyźnie stykających się elementów przylgowych styków doczołowych na wyężenie konstrukcji według analizowanych oszacowań jest mniejszy niż dla likwidacji wad kątowych α , β . Na przykład dla $h/L = 0,02-0,04$ i przemieszczeń $\Delta_{v,w}/h = 1/100$ dodatkowe wstępne wyężenie ustroju spowodowane wymuszonym montażem pręta wynosi 1,2–4,8% nośności sprężystej na zginanie elementu.

W przyjętym do analiz modelu obliczeniowym (rys. 6.2) szacowania wyężenia konstrukcji, wywołanego likwidacją imperfekcji długości elementu wysyłkowo-montażowego u w śrubowym styku doczołowym założono, iż wystąpi wstępne dodatkowe rozciąganie śrub w połączeniu oraz zginanie słupów. Wstępne montażowe wyężenia łączników w wadliwych śrubowych stykach doczołowych, spowodowane likwidacją wad długości rygli zależą od liczby zginanych słupów w ustroju oraz od stosunku sztywności giętej słupów do sztywności rygli. Na przykład dla $i = n = 1$ wyężenie montażowe śrubowego styku doczołowego z wadą $\Delta_w/H = 1/300$ jest rzędu kilku procent nośności na rozciąganie pasów łączonego pręta dwuteowego (rygla), wyężenie gięte słupów zaś jest podobne jak w przypadku wymuszonego montażu styków z wadami v i w (patrz tabl. 6.3).

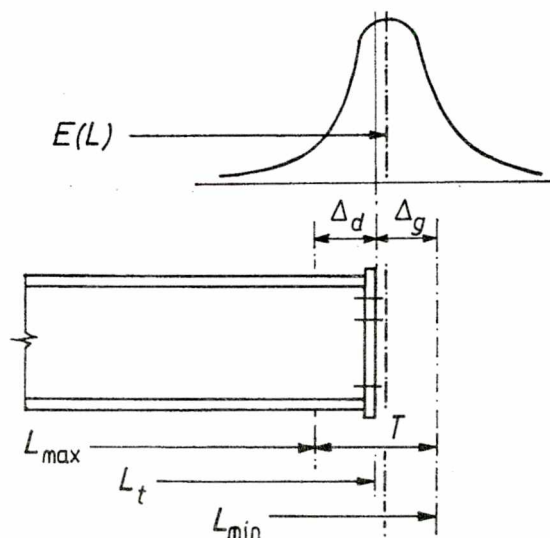
Następstwa niewłaściwej technologii likwidacji wady skreślenia styku γ (w płaszczyźnie blach przylgowych złącza doczołowego) zależą w dużym stopniu od sztywności

łączonego pręta na skręcanie GJ_s . W przyjętym uproszczonym modelu obliczeniowym dla prętów dwuteowych, wielkość dodatkowych sił wewnętrznych, spowodowanych wymuszonym montażem styku z imperfekcją γ , oszacowano na rząd 1% nośności pręta na skręcanie.

Zaproponowane wzory (6.5), (6.7), (6.11), (6.12), (6.16) szacowania montażowego wyężenia konstrukcji z wadliwymi stykami doczołowymi charakteryzuje prosta budowa i umożliwiają one wstępną ocenę wpływu imperfekcji styku na nośność eksploatacyjną konstrukcji. Zostały one wyprowadzone przy stosunkowo rygorystycznych założeniach (należy więc je traktować jako górne oszacowanie wstępnych wyężzeń ustroju), z uwzględnieniem sztywności prętów i proporcji geometrycznych konstrukcji. Należy je odnosić do konstrukcji statycznie niewyznaczalnych, wielokondygnacyjnych, budowanych z ciągłych słupów łączonych w sposób sztywny, z ryglami, bez możliwości regulacji geometrii systemu konstrukcyjnego. Liberalniejsze tolerancje wykonania połączeń doczołowych można dopuścić dla konstrukcji statycznie wyznaczalnych wielokondygnacyjnych oraz statycznie niewyznaczalnych jednokomorowych, gdy istnieją możliwości regulacji geometrii w stykach ustroju i połączeniach jej z fundamentem. Dlatego też zaproponowane formuły szacowania montażowego wyężenia ustroju, wywołanego imperfekcjami geometrycznymi śrubowych styków doczołowych należy traktować jako wielkości korygowane przez wnioski wynikające z poszerzonych analiz. Analizy takie powinny uwzględniać statyczną niewyznaczalność konstrukcji, możliwości regulacji połączeń prętów w węzłach, zastosowany system montażu ustroju, a przede wszystkim uwzględnienie podatności elementów składowych styków doczołowych. Zmniejszenia negatywnych skutków likwidacji imperfekcji geometrycznych styków, przez dokręcenie łączników w złączu, na montażowe wyężenie ustroju należy spodziewać się dla konstrukcji z podatnymi węzłami. Określenie rzeczywistej podatności styków jest możliwe przede wszystkim przez doświadczalną lub teoretyczną (przez symulację metodami numerycznym) identyfikację ścieżek równowagi statycznej węzłów, a także korzystając z publikowanych badań z tej dziedziny [19].

Wykonawca starając się nawet zrealizować elementy wysyłkowo-montażowe według wymiarów teoretycznych określonych na rysunkach popełnia błędy, w których wyniku scalane części ustroju mają kształty geometryczne różniące się od założonych przez projektanta. W odniesieniu do elementów wysyłkowo-montażowych, scalanych na doczołowe styki śrubowe, wskazanie dopuszczalnych różnic tych wymiarów (tolerancji wymiarowych) jest dodatkowym wymogiem wpływającym na dokładność wykonawstwa podzespołów montażowych. Określenie tolerancji wymiarowych, to jest granic, w których postulowana nominalna wielkość geometryczna styku powinna się zawierać, nakłada na wykonawcę obowiązek dotrzymania postulowanych parametrów. Równocześnie podanie tolerancji wymiarowych wykonania konstrukcji ze stykami doczołowymi uczula zarówno dozór techniczny w wytwórni, jak i inspektorów kontrolujących jakość realizacji obiektu na wagę imperfekcji geometrycznych połączeń.

Tolerancje wymiarów T obejmują odchyłki od wymiarów teoretycznych L_t , podanych na rysunkach roboczych. Odchyłki mogą być dodatnie (odchyłki w górę – Δ_g) lub ujemne (w dół – Δ_d). Należy zaznaczyć, że tolerancja jest zawsze wielkością dodatnią, gdyż stanowi różnicę wymiarów największego $L_{\max}$ i najmniejszego $L_{\min}$ elementu, co pokazano na rys. 6.5.

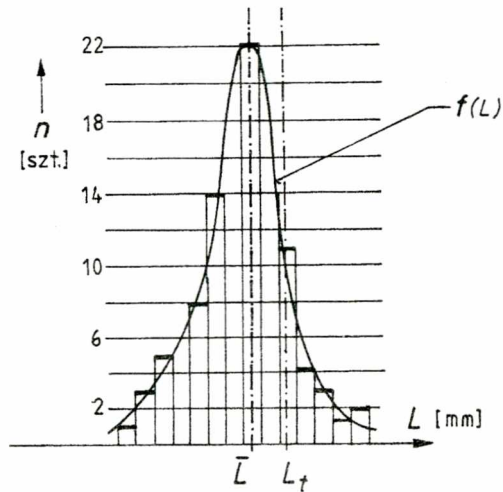


Rys. 6.5

Dotychczasowe doświadczenia z montażu elementów wysyłkowo-montażowych, scałanych z zastosowaniem śrubowych styków doczołowych, umożliwiły zaobserwowanie, że pomimo stosowania niekiedy bardzo ścisłej kontroli realizacji obiektów, w ich połączeniach montażowych występują wady geometryczne. Odchyłki geometryczne, występujące w stykach doczołowych konstrukcji, mają pewną zmienność, którą można określić za pomocą rozkładów znanych w statystyce matematycznej.

W celu określenia zależności między odchyłkami postulowanego wymiaru a liczbą wykonanych elementów wysyłkowo-montażowych należy wykonać badania ich geometrii. Otrzymane wyniki takich pomiarów, uporządkowane w szereg statystyczny, przedstawiono w postaci histogramu przedstawionego na rys. 6.6, to jest wykazu składającego się z prostokątów, których boki pionowe wyrażają liczbę elementów o jednakowych wymiarach.

Uzyskany doświadczalnie histogram badania parametru geometrycznego styku można aproksymować dowolną krzywą przyjmowaną w rachunku prawdopodobieństwa. Badania losowej geometrii elementów wysyłkowo-montażowych [27], [49], [50] wykazują, że odchyłki nie układają się całkowicie zgodnie z prawem Gaussa.



Rys. 6.6

Krzywe błędu podają prawdopodobieństwo uzyskania określonego parametru geometrycznego elementu wysyłkowo-montażowego, który jest zmienną losową (przypadkową). Zmienność ta jest wywołana błędami przypadkowymi i systematycznymi. Przyczyny powstania błędów przypadkowych są wielorakie i często są trudne do wyeliminowania w danym etapie realizacji budowli. Błędy trwałe są możliwe do usunięcia przez kontrolę w kolejnych etapach wykonawstwa konstrukcji.

Badany wymiar (na przykład długość) elementu wysyłkowo-montażowego jest zmienną losową x , zbiór wszystkich wartości natomiast, jakie może mieć długość tego elementu, nazywa się populacją generalną. Aby ustalić dokładnie parametry populacji generalnej trzeba by ją zbadać w całości, co niejednokrotnie jest niemożliwe. Można jednak oszacować te parametry na podstawie badania próbki reprezentacyjnej z populacji generalnej i określić ich estymatory. Zakładając, iż zmienną losową x można aproksymować rozkładem normalnym, to jej rozkład opisują dwa parametry wartości oczekiwanej $E(x)$ oraz odchylenie przeciętne $D(x)$. Jeśli z badania próbki reprezentacyjnej z populacji generalnej uzyskano n wartość x_i , to estymatory mierzonej cechy wynoszą

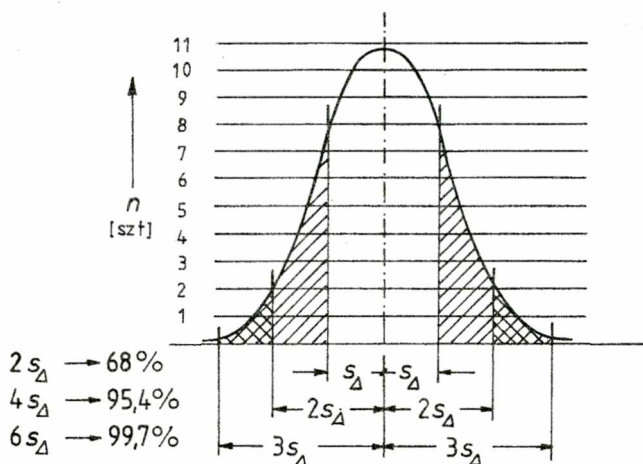
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6.17)$$

$$s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6.18)$$

Doświadczalna wartość $\bar{x}$ jest estymatorem $E(x)$, wielkość zaś s_x jest estymatorem $D(x)$. W analizach statystycznych używa się parametru wyrażającego zmienność badanej cechy, tzw. współczynnika zmienności

$$v = \frac{s_x}{\bar{x}}. \quad (6.19)$$

Uzyskane doświadczalnie parametry statystyczne $\bar{x}$, s_x wykorzystuje się do prognozowania wartości odchyłek w stykach obiektów realizowanych według podobnej technologii, w wytwórniach o zbliżonych oprzyrządowaniu technicznym i kwalifikacjach wykonawcy. Ponadto zinwentaryzowane i opracowane statystycznie odchyłki geometryczne styków doczołowych mogą służyć do oszacowania ich wpływu na wyężenie ustroju. Ustala się wtedy odchyłkę prawdopodobną Δ_0 na założonym poziomie istotności t . Na przykład jeśli $t = 3$, to przedział $6s_\Delta$ obejmuje 99,7% wszystkich oczekiwanych odchyłek wymiarowych reprezentujących całą wykonaną partię elementów wysyłkowo-montażowych. Zależność między odchyleniem standardowym a procentową liczbą wykonanych elementów pokazano na rys. 6.7.



Rys. 6.7

Prognozowane bezpieczeństwo ustroju z wadami geometrycznymi śrubowych styków doczołowych (na przykład montażowe siły wewnętrzne zmieniające nośność graniczną konstrukcji) można szacować dla kwantyli imperfekcji geometrycznych wyznaczonych ze wzoru

$$\Delta_0 = E(\Delta) \pm t D(\Delta), \quad (6.20)$$

gdzie t – założony poziom istotności (dla $t = 3$, prognozowane bezpieczeństwo $p = 0,998\ 65$).

7. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

Stosowane do scalania na montażu elementów wysyłkowo-montażowych śrubowe styki doczołowe charakteryzuje duża wrażliwość na wstępne imperfekcje geometryczne połączeń. Wstępne losowe imperfekcje geometryczne styków montażowych powstają zarówno w fazie formowania wyrobów hutniczych, wykonawstwa warsztatowego elementów wysyłkowo-montażowych, jak i transportu oraz montażu. Są to więc wady nie tylko wykonawstwa śrubowych połączeń, ale i losowe imperfekcje systemu geometrycznego konstrukcji (lokalne mimośrodowość osi prętów, odchyłki montażowe ustroju). W analizach rozważano je jako integralne wady styków elementów wysyłkowo-montażowych. Integralne wady geometryczne styków można opisać składowymi liniowymi u , v , w , kątowymi α , β , γ oraz krzywiznami powierzchni przylgowych styków ρ , δ .

Ze względu na powszechność występowania losowych wad geometrycznych śrubowych styków doczołowych dokonano oceny wymienionych integralnych imperfekcji geometrycznych na wstępne montażowe wyężenie konstrukcji oraz połączeń ustroju. Badania te wykazały, iż negatywne oddziaływanie losowych integralnych wad geometrycznych styków doczołowych może powodować:

- wystąpienie wstępnych montażowych sił wewnętrznych zarówno w prętach, jak i śrubowych stykach konstrukcji,
- zmianę założonego schematu statycznego konstrukcji,
- zmianę założonego modelu obliczeniowego wyężenia łączników w śrubowych stykach doczołowych,
- zmniejszenie nośności eksploatacyjnej ustroju.

Wartość negatywnego oddziaływania wad połączeń elementów wysyłkowo-montażowych zależy nie tylko od rodzaju i wielkości imperfekcji złącza, ale również od podatności węzłów, sztywności i długości prętów ustroju, schematu statycznego i przyjętej technologii montażu oraz możliwości regulacji geometrii systemu geometrycznego ustroju w stykach i na fundamentach.

Ograniczone wielkości wad liniowych u , v , w oraz kątowych α , β , γ dla statycznie wyznaczalnych ram jednokomorowych mogą być zaakceptowane pod warunkiem, iż nie spowoduje to wyłączenia elementów do nich dobudowywanych (na przykład ciągłych płatwi, rygli ściennych).

W świetle dokonanych badań największe znaczenie dla bezpieczeństwa i prawidłowej eksploatacji budowli z rozważanym typem połączeń mają wady katowe styków α , β , a przede wszystkim imperfekcje braku płaskości płaszczyzn przylegania stykających się powierzchni złączy. Mogą one powodować geometryczną zmienność ustroju, a w każdym razie zmniejszają nośność śrubowych styków doczołowych. Dlatego też podstawowym badaniem podczas odbioru śrubowych styków doczołowych powinno być sprawdzenie płaskości płaszczyzn przylgowych oraz poprawności katowego usytuowania blach czołowych.

Montażowe siły wewnętrzne w prętach i węzłach konstrukcji, wywołane integralnymi losowymi odchyłkami styków u , v , w , α , β , γ , można wyznaczyć stosując dostępne programy komputerowe lub skorzystać z oszacowań zaproponowanych w rozdziale 4. Niewłaściwą technologią montażu, w postaci likwidacji wad geometrycznych połączeń przez dokręcenie śrub w styku, można wywołać w prętach i węzłach ustroju wstępne montażowe wyężenie w postaci dwukierunkowego zginania momentami M_x , M_y , ścinania siłami poprzecznymi V_x , V_y oraz od momentu skręcającego M_s , a także rozciągania od sił osiowych N .

Ustroje ramowe, projektowane najczęściej jako płaskie, konstruuje się adekwatnie do prognozowanych sił wewnętrznych M_x , V_x oraz N . Dlatego też wystąpienie złożonego stanu wyężenia montażowego w prętach i węzłach ustroju nie tylko zmniejsza nośność eksploatacyjną konstrukcji, ale może również prowadzić do wyczerpania jej nośności. Uwaga ta dotyczy zwłaszcza śrubowych styków doczołowych zginanych momentem M_y względem słabszej osi oporu przekroju, gdyż zazwyczaj oblicza się je oraz konstruuje na zginanie względem silniejszej osi oporu przekroju poprzecznego. W modelu obliczeniowym wyężenia śrubowych styków doczołowych z losowymi imperfekcjami geometrycznymi należy, oprócz dwukierunkowego zginania, uwzględnić ścinanie od V_x , V_y i M_s , a także rozciąganie od sił osiowych N . Nośność graniczną śrubowych styków doczołowych, z losowymi imperfekcjami geometrycznymi, należy wyznaczać z uwzględnieniem interakcyjnej nośności jednocześnie ścinanych i rozciąganych łączników w połączeniu. Rozwiązanie tego zagadnienia podano w rozdziale 5., a nośność graniczną wadliwego śrubowego styku doczołowego proponuje się wyznaczać według wzoru (5.16).

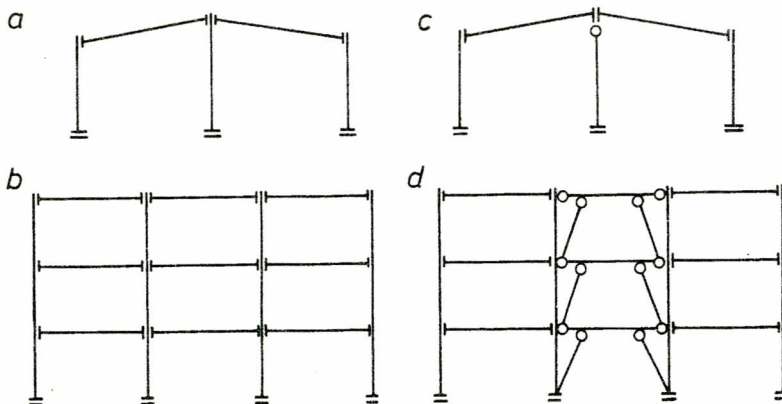
Dopuszczalne odchyłki styków doczołowych Δ_i (rys. 6.4) należy określać na podstawie analizy podatności węzłów, schematu statycznego i geometrycznego konstrukcji, sztywności i długości prętów, przyjętego systemu montażu ustroju, a przede wszystkim rodzaju imperfekcji. Implikacje wad geometrycznych styków na zachowanie się i wyężenie montażowe konstrukcji są wieloparametrowe i zależą od typu konstrukcji. Z tych też względów tolerancje wykonania śrubowych styków doczołowych mogą być określone indywidualnie dla danego

typu ustroju. Zaproponowane w rozdziale 6 wzory do szacowania montażowego wyężenia konstrukcji, wywołanego likwidacją wad geometrycznych złączy przez dokręcenie śrub w stykach doczołowych, należy traktować jako górne oszacowanie wstępnych dodatkowych sił wewnętrznych, gdyż wyprowadzono je po założeniu nieodkształcalności węzłów.

Zmniejszenia negatywnych skutków, wywołanych dokręcaniem śrub w wadliwych stykach doczołowych, na montażowe wyężenie ustroju należy spodziewać się dla połączeń o podatnych elementach (blachach czołowych belek, pasach słupów) złączy śrubowych. Określenie rzeczywistych następstw likwidacji wad połączeń wywołanych dociąganiem śrub w takich złączach należy więc analizować z zastosowaniem zaawansowanych programów komputerowych, umożliwiających uwzględnienie odkształcalności elementów styków oraz modelowania imperfekcji połączeń, wyniki zaś weryfikować doświadczalnie.

Oprócz wytrzymałościowego sprawdzenia konstrukcji scalanej na śrubowe styki doczołowe, z uwzględnieniem prognozowanych imperfekcjami (pomierzonych lub na podstawie dopuszczalnych gwarantowanych przez wykonawcę tolerancji wykonania) istnieją możliwości zmniejszenia skutków występowania wad geometrycznych złączy przez odpowiednie projektowanie i konstruowanie rozważanego typu połączeń.

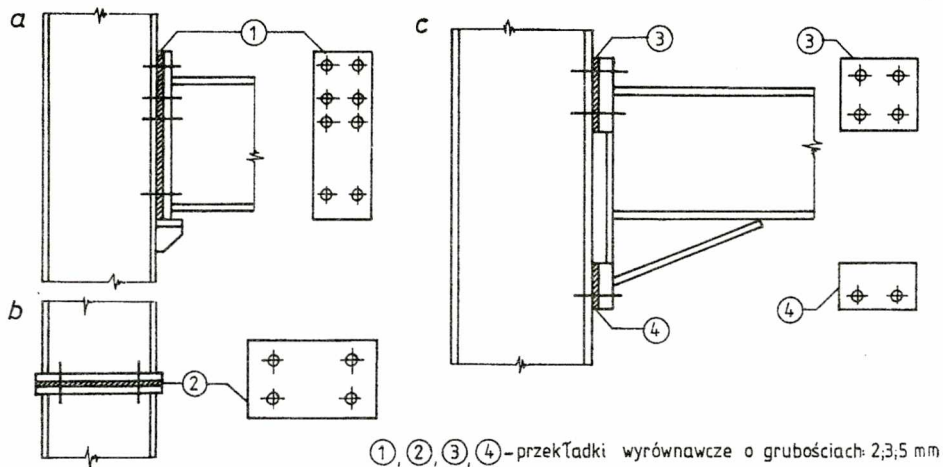
Zmniejszenie następstw analizowanych niedoskonałości konstrukcji powinno być brane pod uwagę już na etapie przyjęcia schematu statycznego ustroju. Zdecydowanie większych skutków negatywnych oddziaływań imperfekcji geometrycznych połączeń należy spodziewać się dla konstrukcji wielokondygnacyjnych i wielonawowych, o sztywnych połączeniach prętów w węzłach, bez możliwości regulacji geometrii systemu konstrukcyjnego. Porównując ramy pokazane na rys. 7.1 można stwierdzić, iż losowe odchyłki geometryczne ustrojów o schematach pokazanych na rys. 7.1c i d można łatwiej regulować na montażu niż konstrukcje o schematach przedstawionych na rys. 7.1a i b.



Rys. 7.1

Istotne znaczenie dla zmniejszenia komplikacji montażowych konstrukcji ze stykami doczołowymi ma również odpowiednie konstruowanie tych połączeń. Elementy wysyłkowo-montażowe, ze śrubowymi połączeniami doczołowymi, należy projektować z założeniem, iż w konstrukcji mogą wystąpić jedynie ujemne odchyłki ich długości. Usuwanie podczas montażu ujemnych odchyłek długości elementów wysyłkowo-montażowych odbywa się przez stosowanie przekładek wyrównujących, śrub o zwiększonych długościach oraz dłuższych wsporników stołeczków montażowych. W tym celu należy w stykach przewidzieć potrzebę założenia podczas montażu przekładek wyrównawczych o grubościach 2, 3 i 5 mm.

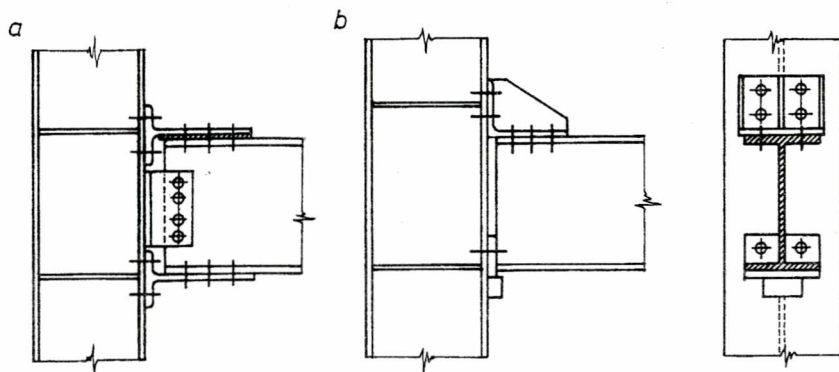
Przykłady styków doczołowych z przekładkami przedstawiono na rys. 7.2.



Rys. 7.2

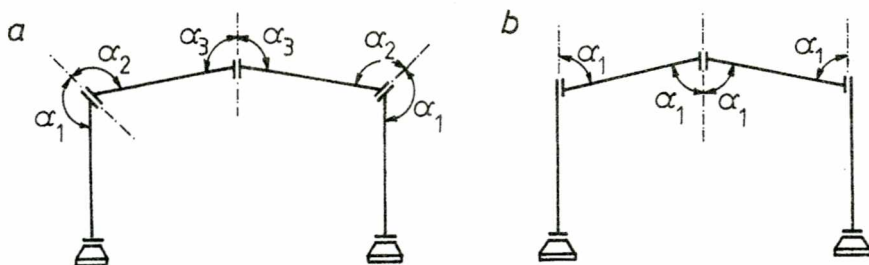
Na rysunku 7.2a pokazano doczołowy śrubowy styk belki ze słupem, na rys. 7.2b zaś doczołowe połączenie słupów. Kilkuczęściowe blachy czołowe styków pokazane na rys. 7.2c (grube blachy czołowe w obrębie pasów i cieńsze na odcinku środkowym dźwigarów) są szczególnie efektywne dla połączeń doczołowych wysokich belek (na przykład z trzecim pasem). Zastosowanie frezowanych zbieżnych przekładek o różnych grubościach w strefie pasów górnych i dolnych umożliwia niwelowanie skutków występowania odchyłek kątowych α i β . W węzłach takich należy się jednak liczyć z możliwością powstawania korozji między cieńszą blachą czołową belki a pasem słupa. Dlatego przestrzeń między elementami czołowymi należy wypełnić preparatami uniemożliwiającymi powstawanie ognisk korozyjnych.

Na rysunku 7.3 pokazano połączenia belek ze słupami, w których jest możliwa regulacja położenia elementów podczas montażu i niwelacja imperfekcji geometrycznych śrubowych styków doczołowych.



Rys. 7.3

Przystępując do podziału konstrukcji na elementy wysyłkowo-montażowe należy pamiętać, iż unifikacja (małe zróżnicowanie konstrukcyjne) styków ułatwia nie tylko wykonawstwo, ale stwarza warunki zmniejszenia liczby imperfekcji ustroju. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem liczby różnych operacji technologicznych (trasowania, cięcia, pasowania, spawania, wiercenia otworów), indywidualnych dla dużej liczby rodzajów styków, wzrasta liczba popełnionych błędów (porównaj konstrukcje pokazane na rys. 7.4). Dotrzymaniu postulowanej w projekcie dokładności wykonania styków doczołowych przyczynia się stosowanie wzorników (szablonów) oraz odpowiednio oprzyrządowanych stanowisk do scalania części składowych elementów wysyłkowo-montażowych.



Rys. 7.4

Zła prezentacja graficzna oraz błędy w sporządzaniu rysunków roboczych i warsztatowych elementów wysyłkowo-montażowych mogą również być przyczyną powsta-

wania odchyłek wykonawczych konstrukcji. Umiejętnie operowanie liniami wymiarowymi, sygnalizowanie wymiarów szczególnie istotnych dla poprawnego montażu, przyczynia się do tworzenia warunków poprawnego wykonania konstrukcji. Należy bezwzględnie przestrzegać zasad *gubienia* odchyłek wymiarowych i *dowiązywania* się do punktów i płaszczyzn zapewniających poprawne zespolenie części składowych elementów wysyłkowo-montażowych oraz łączenie ich między sobą w ustrój nośny na budowie. Zagadnienie to omówiono szerzej we wnioskach 10. i 11. w rozdziale 3.

W sporządzaniu rysunków jest istotne przestrzeganie również zasady podawania tylko wymiarów koniecznych (istotnych) do poprawnego wykonania elementów wysyłkowo-montażowych, a równocześnie niepowtarzania wymiarów. Każdy wymiar powinien być podany tylko raz w tym miejscu, w którym jest on najbardziej zrozumiały i potrzebny ze względu na żadaną dokładność wykonania styku doczołowego. Jest na przykład niedopuszczalne powtarzanie na rysunkach wymiarów określonych kątem i jednocześnie długościami. Sposób wymiarowania geometrycznego na rysunkach powinien być zbliżony do przewidywanych operacji technologicznych wykonania konstrukcji. Bezwzględnie należy przestrzegać podstawowej zasady sporządzania rysunków konstrukcji stalowych, to jest niezamykania wymiarów (łańcuchy wymiarowe powinny być otwarte, przy czym pomija się wymiar najmniej ważny). Umożliwia to oznaczanie na rysunkach tylko wymiarów szczególnie ważnych dla uzyskania żądanej dokładności wykonania styków montażowych konstrukcji.

Projektant, zdając sobie sprawę z jednoznacznie negatywnego oddziaływania wad geometrycznych połączeń doczołowych ustroju, powinien określić w warunkach technicznych wykonania konstrukcji, a także na rysunkach elementów wysyłkowo-montażowych zaostrożone wymagania dotyczące dokładności realizacji budowli.

Uznając fakt, iż wykonanie konstrukcji idealnej, to znaczy całkowicie zgodnej z dokumentacją, jest fizycznie niemożliwe, normy mechaniczne przewidują na przykład budowę układu tolerancji tylko do wymiaru 3150 mm w dwóch zakresach: do 500 mm i od 500 do 3150 mm. Ze względu na podobieństwo materiału oraz techniki wytwarzania stalowe konstrukcje budowlane można traktować jako konstrukcje maszynowe, wykonane w niższej klasie dokładności. Przejęcie tych zasad w odniesieniu do zapewnienia niezbędnej dokładności wykonania styków doczołowych elementów wysyłkowo-montażowych przyczyniłoby się do minimalnej imperfekcji złączy. Postulat ten wydaje się być w pełni uzasadniony w świetle przeprowadzonych badań i analiz w odniesieniu do konstrukcji z doczołowymi śrubowymi stykami sprężonymi.

Aktualna norma [65] w załączniku A, ze względu na cechy i wymagania wykonawcze, budowlane konstrukcje stalowe dzieli na trzy klasy:

- klasa 1 – wymagania podstawowe,
- klasa 2 – wymagania podwyższone,
- klasa 3 – wymagania specjalne.

Szczególne wymagania w odniesieniu do niezbędnej dokładności wykonania śrubowych styków doczołowych uzasadniają kwalifikowanie konstrukcji z takimi połączeniami do klasy 2.

W załączniku informacyjnym D do [65] podano informacje dotyczące kwalifikacji wykonawców dla poszczególnych klas konstrukcji stalowych. Zgodnie z [65] przyjmuje się, że wykonawca ma odpowiednie kwalifikacje i wyposażenie do wykonania robót, zgodnie z projektem i kontraktem oraz normą określającą wymagania, warunki wykonania i odbioru stalowych konstrukcji budowlanych [65]. Wykonawca konstrukcji klasy 2 powinien mieć uprawnienia zakładu I grupy według PN-M-69009 (PN-87/69009), zakładowy system zapewnienia jakości (jeśli nie są spełnione wymagania PN-ISO 9002), a także sprawdzać wyniki kontroli i badań wykonawczych oraz zgodności wykonanych elementów.

Egzekwowanie wymiarów tolerowanych dla klas dokładności wykonania budowlanych konstrukcji stalowych, zgodnie z odpowiednimi przepisami normowymi [65] na pewno wpłynęłoby na poprawę jakości wykonania śrubowych styków doczołowych. Konsekwencją przestrzegania klas dokładności wykonania konstrukcji jest również lokowanie realizacji obiektu w wytwórniach konstrukcji stalowych, zdolnych dotrzymać postulowanych w projekcie dokładności wykonania elementów wysyłkowo-montażowych.

Rozwiązania konstrukcyjne styków doczołowych stosowanych w projektach powinny uwzględniać technologię wytwarzania oraz możliwości techniczne wytwórni konstrukcji. Dlatego też jest wskazane konsultowanie i uzgadnianie przez projektanta proponowanych rozwiązań styków zarówno z technologiem w wytwórni konstrukcji, jak i specjalistami zajmującymi się montażem konstrukcji. Uświadomienie wykonawcy konstrukcji łączonej na doczołowe styki śrubowe wagi problemu imperfekcji na nośność i niezawodną eksploatację budowli powinno skutkować szczególnie starannym opracowaniem technologii wykonania analizowanego typu połączeń. Projekt technologii wykonania śrubowych styków doczołowych powinien uwzględniać podstawowy postulat dokładności wykonania złączy przez zaprojektowanie stanowisk do scalania części składowych styków, opracowanie odpowiedniej technologii spawania, określenie zastrzonych wymagań dotyczących kontroli poszczególnych operacji technologicznych oraz tolerancji wykonania elementów wysyłkowo-montażowych.

Świadomość następstw występowania wad geometrycznych śrubowych styków doczołowych nakłada również na inspektorów dokonujących odbioru konstrukcji z takimi połączeniami na szczególnie wnikliwą kontrolę zarówno śrubowych połączeń prętów w węzłach, jak i imperfekcji osi scalanych w ustrój nośny elementów i z całą konsekwencją przestrzeganie normowych [65] przepisów w tym względzie.

LITERATURA

- [1] Aktan H. M., Youssef-Agha W., Olowokere O. D., *Response of Low-Rise Steel Frames with Fabrication Errors*, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No 2, February 1991, s. 182–196.
- [2] Alpsten G.A., *Variation in Strength Cross-Sectional Dimensions of Structural Shapes*, Proceedings Stalbyggnad Nordiska Forsknings, Swedish Institute of Steel Construction, 1970.
- [3] Augustyn J., Śliwka W., Łaguna J., *Badania sprężonych połączeń doczołowych stalowych elementów rozciąganych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 7/1982, s.143–146.
- [4] Augustyn J., Łaguna J., Śliwka W., *Badania sprężonych połączeń doczołowych belek dwuteowych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 11–12/1982, s. 293–296.
- [5] Augustyn J., Łaguna J., *Propozycje klasyfikacji połączeń na podstawie stanów granicznych konstrukcji stalowych*, XXXII Konferencja KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1986, t. 3, s. 83–88.
- [6] Augustyn J., Bródka J., Łaguna J., *Projektowanie połączeń śrubowych doczołowych według PN-90/B-03200*, Inżynieria i Budownictwo Nr 6/1991, s. 259–261.
- [7] *Badania nośności wybranych typów połączeń sprężonych elementów konstrukcji z dwuteowników walcowanych*, Prace problemu węzłowego 07.2.P. 69.2.3, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Konstrukcji Metalowych *Mostostal*, 1983.
- [8] Biegus A., *Podstawy probabilistycznej analizy bezpieczeństwa konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [9] Biegus A., Rykaluk K., *Nietypowe przyczyny drgań kominów stalowych*, Konferencja Naukowo-Techniczna *Awarie budowlane*, 25–27 maja 1995, Szczecin – Międzyzdroje, s. 547–553.
- [10] Biegus A., *Nośność graniczna stalowych konstrukcji prętowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Wrocław 1997.
- [11] Biegus A., *Połączenia śrubowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Wrocław 1997.

- [12] Biegus A., *Orzeczenie techniczne oraz projekt zainstalowania anten telekomunikacyjnych na kominie $h = 45$ m w Zakładach Wrozamet we Wrocławiu*, Firma Zioberski, Wrocław 1997.
- [13] Błaszkwski S., Kączkowski Z., *Metoda Crossa*, PWN, Warszawa 1961.
- [14] Bogucki W., Żybertowicz M., *Tablice do projektowania konstrukcji metalowych*, Arkady, Warszawa 1996.
- [15] Bouwman L. P., *Bolted Connections Dynamically Loaded in Tension*, Journal of the Structural Division, ASCE ST9, September 1982, s. 2117–2129.
- [16] Bródka J., *Przebudowa i utrzymanie konstrukcji stalowych*, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Konstrukcji Metalowych Mostostal S.A. i Politechnika Łódzka, Warszawa – Łódź 1995.
- [17] Bródka J., Cwalina W., *Szywność i nośność ram stężonych o węzłach podatnych*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1998.
- [18] Bródka J., Goczek J., *Podstawy konstrukcji metalowych*, t. 1, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993.
- [19] Bródka J., Juchniewicz J., *Ocena bezpieczeństwa prętów z defektami*, Inżynieria i Budownictwo Nr 11/1994.
- [20] Bródka J., Kordjak J., *Obliczanie długości wyboczeniowych prętów ram sprężystych o węzłach podatnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Seria: Budownictwo, Nr 44/1994.
- [21] Bródka J., Kozłowski A., *Szywność i nośność węzłów podatnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Białystok – Rzeszów 1996.
- [22] Chen W. F., Lui E.M., *Stability Design of Steel Frames*, CRC Press, Boca Raton – Ann Arbor – Boston – London 1991.
- [23] Chen W. F., Toma S., *Advanced Analysis of Steel Frames. Theory, Software and Applications*, CRS Press, Boca Raton – Ann Arbor, London – Tokyo 1994.
- [24] *Connections in Steel Structures II, Behaviour, Strength and Design*, Ed by Bjorhövde R., Haaijer G., Colson A., Stark J. W. B., American Institute of Steel Construction, Chicago 1991.
- [25] Davison J. B., Kirby P. A., Nethercot D. A., *Effect of Lack of Fit on Connection Restraint*, Journal of Constructional Steel Research Vol. 8, 1987, s. 55–69.
- [26] Granström A., *The Strength of Bolted End-Plate Connections*, Stålbyggnadsinstitutet, Raport 15:13, February 1979.
- [27] Janicki S., *Tolerancje wymiarów i pasowania w budownictwie*, Arkady, Warszawa 1958.
- [28] Jankowiak W., *Wybrane konstrukcje stalowe*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1992.
- [29] Kishi N., Chen W. F., *Moment-Rotation Relations of Semirigid Connection with Angles*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 7, July 1990.

- [30] Knabe W., *Imperfekcje w połączeniach ciernych*, Sesja Naukowa z okazji 80-lecia profesora Władysława Boguckiego, Gdańsk 1990, Wydział Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej, s. 139–149.
- [31] *Komentarz do normy PN-90/B-03200*, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Konstrukcji Metalowych *Mostostal*, Warszawa 1992.
- [32] Kolczyńska-Gasik B., Razowski A., *Wpływ sił osiowych na dystrybucję sił wewnętrznych w ramie nie stężonej o podatnych połączeniach*, Inżynieria i Budownictwo Nr 6/1995, s. 333–335.
- [33] Kowal Z., *Wstęp do teorii konstrukcji metalowych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1977.
- [34] Kowal Z., Paczkowski W., *Siły wewnętrzne w przestrzennych strukturach zbudowanych z prętów o losowej długości*, Archiwum Inżynierii Lądowej, tom 27, Nr 2/1981, s. 249–260.
- [35] Lacher G., *Über den Einfluss der Abstützung auf exzentrisch schwingend beanspruchte vorgespannte Schrauben in Plattenverbindungen*, Der Stahlbau. 1984, H. 6, s. 165–173.
- [36] Lacher G., *Dauerschwingversuche an axialbeanspruchte Schrauben 10.9 in T. Verbindungen*, Der Stahlbau 1987, H. 7.
- [37] Liew J. Y. R., White D. W., Chen W. F., *Limit State Design of Semi-Rigid Frames Using Advanced Analysis, Part 1: Connection Modeling and Classification*, Journal of Construction Steel Research Vol. 26, 1993.
- [38] Łaguna J., Łypacewicz K., *Połączenia śrubowe i nitowe*, Arkady, Warszawa 1986.
- [39] Łaguna J., *Badania nośności wybranych typów połączeń sprężonych elementów konstrukcyjnych z dwuteowników walcowanych*, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Konstrukcji Metalowych *Mostostal*, praca 07.2/P69.2.3, Warszawa 1984.
- [40] Mann A. P., Morris L. J., *Lack of Fit in Steel Structures*, CIRIA Report no 87, London 1981.
- [41] Mendera Z., *Obliczanie połączeń ciernych na śruby sprężające metodą stanów granicznych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 10/1978, s. 378–383.
- [42] Mendera Z., *Nośność połączeń doczołowych sprężanych śrubami o wysokiej wytrzymałości*, Inżynieria i Budownictwo Nr 6/1982, s. 104–107.
- [43] Mendera Z., *Współczynniki częściowe a harmonizacja norm projektowania konstrukcji stalowych*, IX Międzynarodowa Konferencja Konstrukcje Metalowe, Kraków 1995, t. 2, s. 253–262.
- [44] Murzewski J., *Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych*, Arkady, Warszawa 1970.
- [45] Murzewski J., *Wytrzymałość śrub w połączeniach sprężonych i nie sprężonych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 6/1980.
- [46] Nethercot D. A., *Joint Action and the Design of Steel Frames*, The Structural Engineer, Vol. 63A, No 12, 1985.

- [47] Paczkowski W., Ustasiak M., *Technologiczne przyczyny pękania śrub wysokiej wytrzymałości w połączeniach doczołowych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 5/1997, s. 227–230.
- [48] *Semi-Rigid Connections in Steel Frames*, Ed. by Lorenz R. F., Kato B., Chen W. F., McGraw – Hill, New York 1992.
- [49] Sertler H., Vican J., Slavik J., *Compression Resistance of Steel Structure Members*, International Colloquium European Section *Stability of Steel Structures*, Budapest 1995, Preliminary Report, Vol. 1, s. 71–78.
- [50] Urbańska-Galewska E., *Wpływ rzeczywistych niedokładności geometrycznych na pracę konstrukcji ramowej*, praca doktorska, Politechnika Gdańska 1982.
- [51] Urbańska-Galewska E., *Analiza wpływu rzeczywistych niedokładności geometrycznych na pracę konstrukcji ramowej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej Nr 368, Budownictwo Lądowe XXXIX, s. 47–64, Gdańsk 1984.
- [52] Urbańska-Galewska E., *Wpływ niedokładności i wykonawstwa na pracę i bezpieczeństwo ram systemu Fermstal*, Konferencja Naukowa SKM KILiW PAN – SBRKTR – KKM PZITB – WBL ART *Połączenia w konstrukcjach metalowych oraz konstrukcje metalowe w budownictwie rolniczym*, Olsztyn, 20–22 października 1983 s. 127–132.
- [53] Wales M. W., Rossow E. C., *Coupled Moment – Axial Force Behaviour in Bolted Joints*, Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No 5, 1983, s. 1250–1266.
- [54] *Wytyczne projektowania, wykonania i montażu doczołowych połączeń elementów konstrukcji stalowych sprężonych śrubami o wysokiej wytrzymałości*, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Konstrukcji Metalowych *Mostostal*, Warszawa 1978.
- [55] *Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru połączeń ciernych*, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Konstrukcji Metalowych *Mostostal*, Warszawa 1979.
- [56] Ziółko J., *Utrzymanie i modernizacja konstrukcji stalowych*, Arkady, Warszawa 1991.
- [57] Ziółko J., Orlik G., *Montaż konstrukcji stalowych*, Arkady, Warszawa 1980.
- [58] Ziółko J., Włodarczyk W., Mendera Z., Włodarczyk S., *Stalowe konstrukcje specjalne*, Arkady, Warszawa 1995.

Normy

- [59] BS 5950 *Structural use of steelwork in building, Part 1*, 1990.
- [60] DIN 18800 TEIL 1–4 *Stahlbauten*.
- [61] Eurocode Nr 3 *Design of Steel Structures. Part 1. General Rules and Rules for Buildings*, 1993.
- [62] PN-90/B-01043. *Rysunek konstrukcyjny budowlany*.
- [63] PN-90/B-03200. *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [64] PN-93/B-03201. *Konstrukcje stalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie*.
- [65] PN-96/B-06200. *Konstrukcje stalowe budowlane. Wymagania i badania*.

- [66] PN-79/H-92202. *Blachy cienkie. Tolerancje wykonania.*
- [67] PN-79/H-92203. *Blachy grube i uniwersalne. Tolerancje wykonania.*
- [68] PN-79/H-93010. *Warunki techniczne wykonania kształtowników walcowanych.*
- [69] PN-91/H-93419. *Dwuteowniki. Tolerancje wykonania.*
- [70] PN-91/H-93451. *Ceowniki. Tolerancje wykonania.*
- [71] PN-84/H-93402. *Kątowniki. Tolerancje wykonania.*
- [72] PN-91/H-93406. *Teowniki wysokie. Tolerancje wykonania.*
- [73] PN-80/H-74219. *Rury stalowe bez szwu, przewodowe. Tolerancje wykonania.*
- [74] PN-78/M-82005. *Podkładki okrągłe zgrubne.*
- [75] PN-83/M-82039. *Podkładki okrągłe do połączeń sprężanych.*
- [76] PN-82/M-82054.03. *Śruby, wkręty i nakrętki. Własności mechaniczne śrub i wkrętów.*
- [77] PN-85/M-82101. *Śruby z łbem sześciokątnym.*
- [78] PN-85/M-82105. *Śruby z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości.*
- [79] PN-86/M-82144. *Nakrętki sześciokątne.*
- [80] PN-83/M-82171. *Nakrętki sześciokątne powiększone do połączeń sprężanych.*
- [81] PN-66/M-82341. *Śruby pasowane z łbem sześciokątnym i gwintem krótkim.*
- [83] PN-83/M-82343. *Śruby z łbem sześciokątnym powiększonym do połączeń sprężanych.*

Zalety wytrzymałościowe i technologiczne śrubowych styków doczołowych sprawiają, iż są one chętnie stosowane do scalania konstrukcji stalowych. W modelu obliczeniowym szacowania ich nośności zakłada się idealne przyleganie elementów czołowych, łączących części składowe konstrukcji. Jednocześnie w obiektach realizowanych występują wady geometryczne styków doczołowych, polegające na braku przylegania blach w złączach. Imperfekcje geometryczne doczołowych styków śrubowych powodują wstępne wyężenie montażowe konstrukcji, zmniejszenie nośności połączeń prętów w węzłach oraz mogą zmieniać schemat statyczny ustroju.

W pracy dokonano identyfikacji rodzajów i źródeł powstawania imperfekcji badanego typu połączeń montażowych. Zaproponowano sposób szacowania wstępnego technologicznego wyężenia konstrukcji, wywołanego wadami styków doczołowych. Opracowano model obliczeniowy szacowania nośności połączeń doczołowych z imperfekcjami, polegającymi na braku idealnego przylegania scalonych elementów. Dokonano analizy dopuszczalnych tolerancji wykonania śrubowych styków doczołowych, w aspekcie ich oddziaływania na nośność graniczną i bezpieczeństwo ustroju.

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w następujących księgarniach:

„Politechnika”

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

budynek A-1 PWr., tel. (0 71) 320 25 34;

„Tech”

plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław

budynek D-1 PWr., tel. (0 71) 320 32 52

Prowadzimy sprzedaż wysyłkową

ISBN 83-7085-331-5