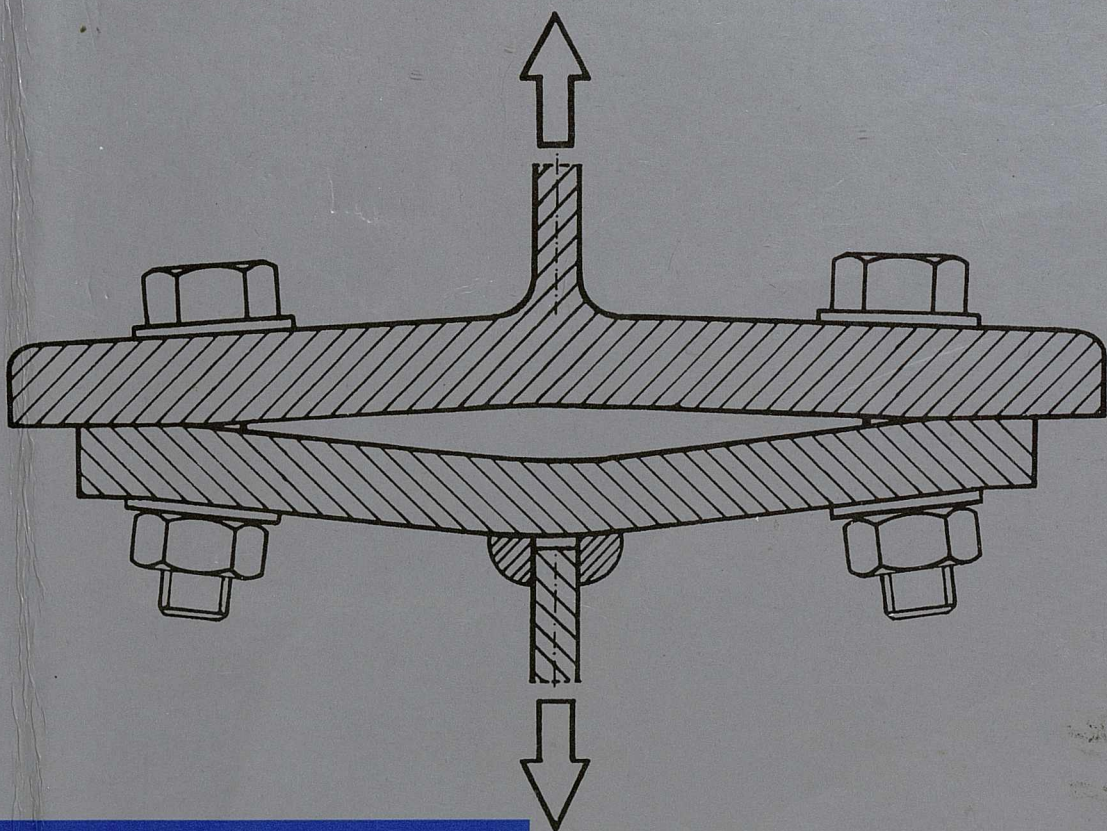


ANTONI BIEGUS

POŁĄCZENIA ŚRUBOWE



WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN



POŁĄCZENIA ŚRUBOWE

ANTONI BIEGUS

POŁĄCZENIA ŚRUBOWE



Wydawnictwo Naukowe PWN
Warszawa–Wrocław 1997

Recenzent
Jan Bródka

Projekt okładki i stron tytułowych
Maryna Wiśniewska

Opracowanie redakcyjne
Danuta Sowińska

Opracowanie techniczne
Janusz Sowiński

Korekta
Maria Sobiecka

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN, Sp. z o.o.
Warszawa 1997 r.

ISBN 83-01-12420-2

Biblioteka Główna i OIM
Politechniki Wrocławskiej



001003703



2954 884/38

WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN
Wydanie pierwsze. Ark. druk. 9,25
Skład i łamanie Andrzej Kuriata
Druk ukończono w listopadzie 1997 r.
Druk i oprawa WROCŁAWSKA DRUKARNIA NAUKOWA

AK 24/2/11

Spis treści

Przedmowa	7
1. Ogólna charakterystyka połączeń i rodzaje śrub	9
1.1. Wprowadzenie	9
1.2. Klasyfikacja połączeń	11
1.3. Asortyment i właściwości śrub	15
2. Nośność graniczna śrubowych połączeń zakładkowych	22
2.1. Wprowadzenie	22
2.2. Nośność graniczna śrubowych niesprężonych połączeń zakładkowych	22
2.3. Nośność graniczna śrubowych sprężonych połączeń zakładkowych	32
2.4. Obliczanie śrubowych połączeń zakładkowych	37
3. Nośność graniczna śrubowych połączeń doczołowych	47
3.1. Wprowadzenie	47
3.2. Nośność graniczna śrubowych rozciąganych niesprężonych połączeń doczołowych	48
3.3. Nośność graniczna śrubowych rozciąganych sprężonych połączeń doczołowych	54
3.4. Nośność graniczna śrubowych zginanych niesprężonych połączeń doczołowych	58
3.5. Nośność graniczna śrubowych zginanych sprężonych połączeń doczołowych	63
3.6. Obliczanie śrubowych połączeń doczołowych	65
4. Zalecenia dotyczące projektowania połączeń śrubowych	85
4.1. Wprowadzenie	85
4.2. Kryteria doboru połączeń śrubowych	85
4.3. Wymagania i zalecenia dotyczące śrub stosowanych w połączeniach budowlanych konstrukcji stalowych	88
4.4. Zasady rozmieszczania śrub w połączeniach śrubowych	90
4.5. Wybrane zagadnienia technologii wykonania połączeń śrubowych	94
5. Charakterystyki sztywnościowe połączeń śrubowych	100
6. Przykłady obliczeń połączeń śrubowych	121
Literatura	146

Przedmowa

Połączenia śrubowe stanowią jeden z podstawowych sposobów łączenia elementów składowych stalowych konstrukcji budowlanych. Technologia tego typu złączy sprawia, że są one preferowane do zespawania elementów wysyłkowo-montażowych na placu budowy (połączenia montażowe).

Książka zawiera informacje dotyczące projektowania metodą stanów granicznych połączeń na śruby, zgodnie z wymaganiami normy [60], która w swych zasadniczych rozstrzygnięciach jest oparta na Eurokodzie 3 [51]. Celem pracy jest przybliżenie podstaw teoretycznych oraz przesłanek merytorycznych przyjętych w normie [60] rozstrzygnięć dotyczących połączeń śrubowych. Dlatego też omawiając poszczególne zagadnienia położono duży nacisk na identyfikację modeli fizycznych i teoretycznych projektowania połączeń, gdyż rozumienie normowych modeli obliczeniowych umożliwia racjonalne projektowanie takich połączeń.

W ostatnich latach nastąpił istotny postęp wiedzy w dziedzinie połączeń śrubowych, a także stosowanie w budownictwie na szeroką skalę śrub ze stali o wysokiej wytrzymałości (śrub sprężających). Klasyczne modele wytrzymałościowe, w których śruby traktuje się jako trzpienie ścinane i dociskane nie w pełni odwzorowują wyężenie łączników we współcześnie stosowanych węzłach i stykach śrubowych stalowych konstrukcji budowlanych. Również sztywności stosowanych węzłów śrubowych odbiegają od schematów połączeń sztywnych bądź przegubowych i należy je modelować jako złącza podatne. Połączenia śrubowe, zwłaszcza o węzłach podatnych (*semi-rigid*), stanowią przedmiot badań wielu ośrodków naukowych. Badania te umożliwiły wyjaśnienie wielorakich aspektów wyężenia połączeń śrubowych, a wiedza dotycząca tej dziedziny nadal się poszerza.

Należy zaznaczyć, iż istotnym elementem w identyfikacji właściwości połączeń śrubowych o węzłach podatnych są badania eksperymentalne, a także symulacje teoretycznych modeli obliczeniowych, z zastosowaniem zaawansowanych programów numerycznych oraz komputerów.

Przyjęte w normie [60] i Eurokodzie 3 [51] ustalenia i nowe propozycje merytoryczne dotyczące obliczania połączeń śrubowych, takie jak wyężenie sprężanych połączeń ciernych i doczołowych na śruby o wysokiej wytrzymałości, *efekt dźwigni*, rozdział obciążeń w stykach zakładkowych i doczołowych są omówione w wielu trudno dostępnych publikacjach. Stosunkowo najszerszej tematykę połączeń śrubowych przedstawiono w monografii Jana Łaguny i Krzysztofa Łypacewicza [33]. Tematykę obliczania połączeń śrubowych,

zgodnie z [60], przedstawiono w komentarzu [27] do normy [60], cyklu artykułów [6] i [7], a także książkach [14] i [48]. Przykłady obliczeń połączeń śrubowych według [60], ze skąpym komentarzem, podano w pracach [6], [7], [13], [38] i [39].

Zarówno norma [60], jak i Eurokod 3 [51], ze względu na zwięzłość przyjętego zapisu, a także zmiany formalne (np. wprowadzenie klasyfikacji połączeń) oraz merytoryczne przy braku komentarza są trudne w odbiorze. Poszerzeniu wiedzy oraz jednoznacznej interpretacji postanowień normowych [51], [60] ma służyć niniejsza książka, która jest adresowana do studentów wydziałów budowlanych uczelni technicznych oraz projektantów konstrukcji stalowych.

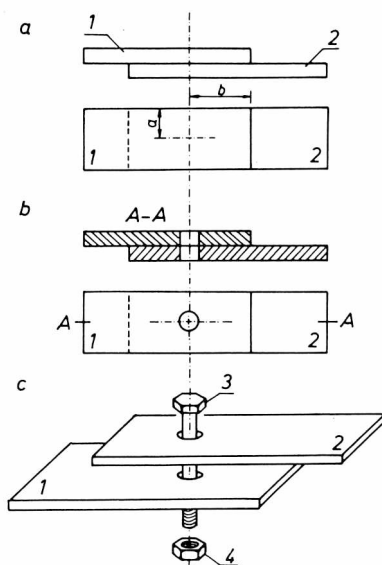
Autor dziękuje drowi inż. Janowi Gierczakowi za pomoc w opracowaniu tablic 3.6 i 3.7.

1. Ogólna charakterystyka połączeń i rodzaje śrub

1.1. Wprowadzenie

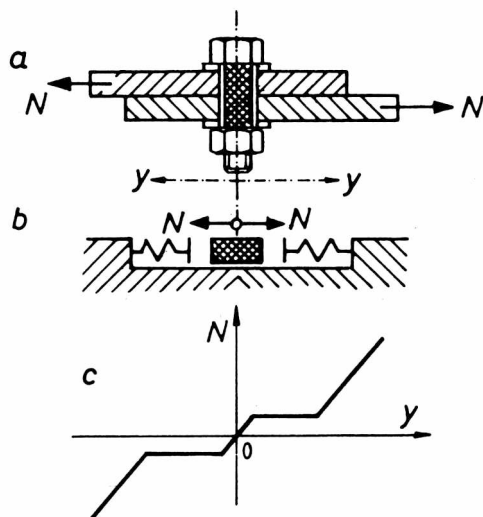
Połączenia śrubowe należą do najstarszych sposobów łączenia wyrobów z żeliwa i stali. Łączniki takie, przenosząc siły osiowe i tnące oraz momenty zginające w styku, ograniczają w różnym stopniu, wzajemne przemieszczenia łączonych części konstrukcji. Połączenie śrubowe elementów (blach 1 i 2 na rys. 1.1) uzyskuje się po dokonaniu następujących operacji technologicznych:

- trasowanie otworów (rys. 1.1a), tj. wyznaczenie punktów usytuowania śrub, na powierzchni elementów łączonych,
- wiercenie otworów (rys. 1.1b),
- umieszczanie w otworach łączonych elementów śrub (3) oraz dokręcenie ich nakrętek (4), z jednoczesną kontrolą ich naciągu (dokręcenia, sprężenia rys. 1.1c).



Rys. 1.1. Wykonanie połączenia śrubowego

W zależności od wielkości prześwitu między trzpieniem śruby a otworem oraz od stopnia dokręcenia (sprężenia) śruby (czego konsekwencją jest wzajemne sprężenie stykających się łączonych elementów), uzyskuje się połączenie o małej lub dużej zdolności do przemieszczeń. Przykład śrubowego połączenia z luzami montażowymi przedstawiono na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Śrubowe połączenie zakładkowe z luzami montażowymi: a — konstrukcja, b — schemat ideowy, c — ścieżka równowagi statycznej

Wieloletnie doświadczenia w eksploatacji tych połączeń wykazały, że stosowanie śrub w stalowych konstrukcjach budowlanych jest korzystne zarówno z uwagi na pewność styków śrubowych, jak i ze względu na łatwość ich wykonania. Połączenia śrubowe są stosowane przede wszystkim do wykonania styków elementów lub ich części podczas montażu na budowie. Montaż konstrukcji stalowych, w których zaprojektowano styki śrubowe, jest prosty, nie wymaga instalowania kosztownych urządzeń i może być realizowany przez robotników o stosunkowo niewysokich kwalifikacjach. Powszechne stosowanie śrubowych połączeń montażowych wynika z łatwości i szybkości zakładania śrub w trudnych sytuacjach (np. na dużej wysokości), małej pracochłonności tych czynności, a także uniezależnienia się od warunków atmosferycznych (np. niesprzyjającej pogody; w razie dużego chłodu nie można wykonywać spawanych połączeń montażowych). Nie bez znaczenia jest również krótki czas potrzebny do uzyskania pełnej nośności montażowych połączeń śrubowych, a więc skrócenie czasu zaangażowania sprzętu montażowego. Łączenie śrubami, ze względu na łatwość wykonania tych połączeń, stosuje się w różnych konstrukcjach, zwłaszcza do scalania konstrukcji rozbieralnych. Śruby stosuje się również do połączeń tymczasowych, na czas montażu konstrukcji do chwili zastąpienia ich spoinami. Ważną rolę w budownictwie spełniają śrubowe połączenia kotwiące, łączące ustroje nośne z fundamentami. Na podkreślenie zasługują aspekty technologiczno-montażowe omawianego typu połączeń, w odniesieniu do uzyskiwanych dokładności rozmieszczenia otworów w styku i wymiarów elementów. Trasowanie i wykonywanie otworów w wytwórniach konstrukcji stalowych są czynnościami prostymi, a kontrola jakości i dokładności wykonania styków montażowych jest łatwa. W odniesieniu do złożonych konstrukcji wykonuje się w wytwórni próbny montaż (scalanie kontrolne) konstrukcji stalowych. Sprawia to, iż podczas składania (scalania) konstrukcji w warunkach budowy nie występują komplikacje w trakcie montażu.

W ostatnim trzydziestoleciu zaczęto stosować na szerszą skalę śruby sprężające, których zadaniem jest silne dociśnięcie do siebie łączonych elementów, wskutek czego siły, np. w złączu zakładkowym, są przenoszone przez tarcie stykających się powierzchni tych elementów. Śruby sprężające dokręca się za pomocą specjalnego klucza (dynamometrycznego), który umożliwia kontrolę wstępnego naciągu łączników w połączeniu. Stosowanie w połączeniach śrub sprężających, wykonanych ze stali o wysokich wytrzymałościach, zmniejsza liczbę łączników w styku montażowym, czego konsekwencją jest mniejsza pracochłonność wykonawstwa warsztatowego i montażowego. Do niewątpliwych zalet tego typu połączeń należy zaliczyć: większą sztywność i odporność zmęczeniową złączy w stosunku do złączy z zastosowaniem nitów i śrub niesprężanych, brak tendencji do relaksacji i pełzania (nośność nie zmienia się wraz z upływem czasu), możliwość wymiarowania na przekrój brutto łączonych elementów osłabionych otworami oraz brak poślizgów w złączu.

Pewne podobieństwo do połączeń śrubowych, polegające na osadzaniu podczas montażu w uprzednio przygotowanych otworach trzpieni walcowych, wykazują połączenia nitowe i sworzniowe. Połączenia nitowe, ze względu na trudniejsze wykonawstwo i gorsze cechy wytrzymałościowe zostały praktycznie wyparte przez połączenia śrubowe. Połączenia sworzniowe stosuje się w przegubowych połączeniach elementów, gdy zależy nam na idealizacji przyjętego schematu statycznego ustroju nośnego.

W łączeniu cienkich blach, o grubościach $t < 3$ mm (np. blach fałdowych) proces wykonania połączeń odbywa się na budowie i używa się wówczas wstrzeliwanych gwoździ (nazywanych kołkami), wkrętów samogwintujących, nitów jednostronnych lub rzadziej śrub o małych średnicach.

Połączenia blach cienkich nie będą analizowane w niniejszej pracy. Informacje na temat połączeń blach cienkich są przedstawione w pracy [33].

Zarówno w normie [60], jak i w niniejszej książce podano informacje dotyczące obliczania śrubowych połączeń elementów o grubościach ścianek nie mniejszych niż 3 mm.

1.2. Klasyfikacja połączeń

W połączeniach elementów wysyłkowo-montażowych stalowych konstrukcji budowlanych, wykonanych z kształtowników i blach grubych ($t \geq 3$ mm) są stosowane (poza spoinami) śruby. W zależności od klasy dokładności wykonania wyróżnia się następujące śruby: zgrubne (zwane często zwykłymi lub surowymi), średnio dokładne oraz dokładne. Połączenia śrubowe wykonuje się jako zwykłe lub pasowane. Kłopotliwe wykonawstwo, polegające na rozwiercaniu otworów na montażu sprawia, iż śrubowe połączenia pasowane ze śrubami dokładnymi stosuje się rzadko (gdy należy ograniczyć przemieszczenia w styku). Śruby zgrubne stosuje się w połączeniach słabo wytężonych lub złączach elementów drugorzędnych, obciążonych najczęściej statycznie. Prze-

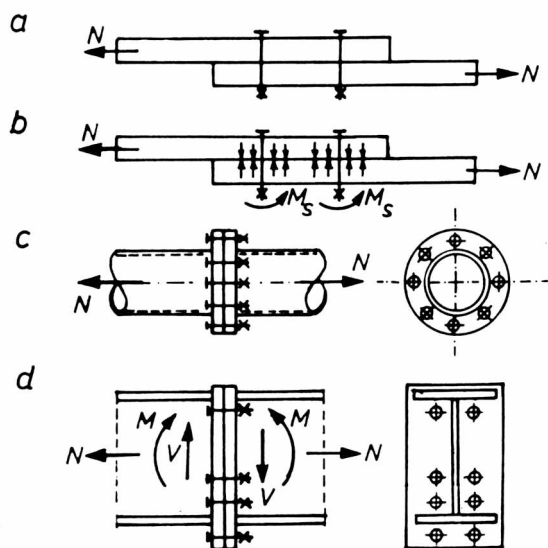
ważnie używa się połączeń stalowych konstrukcji budowlanych na śruby o średnio dokładnej jakości wykonania.

Z uwagi na sposób wzajemnego usytuowania łączonych elementów oraz wyłączenie łączników połączenia śrubowe można podzielić następująco:

- zakładkowe (nakładkowe), w których kierunek głównej składowej obciążenia złącza jest prostopadły do osi łączników (rys. 1.3a i b),
- doczołowe, w których kierunek głównej składowej obciążenia złącza jest równoległy do osi łączników (rys. 1.3c, d).

Na rysunku 1.3d przedstawiono połączenie doczołowe ścinane, zginane i rozciągane, w którym trzpienie śrub są wyłożone prostopadle i równoległe do osi łączników.

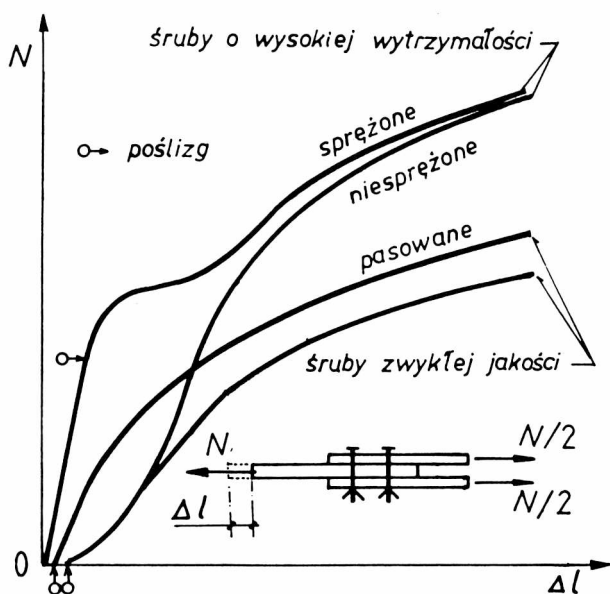
Złącza zakładkowe i doczołowe (rys. 1.3) mogą być niesprężone lub sprężone (rys. 3.1b).



Rys. 1.3. Schematy obciążeń połączeń śrubowych

Połączenia zakładkowe, w których kierunek głównej składowej wyłączenia jest prostopadły do osi łączników, przenoszą siły wewnętrzne przez ścinanie łączników i docisk do ścianek otworów, a w przypadku sprężenia złącza — przez tarcie powierzchni stykających się elementów. Największe zastosowanie mają tu śrubowe połączenia zwykłe (niesprężane), w których otwory do osadzania łączników są wykonywane o odpowiednio większej średnicy, uwzględniającej odchyłki wykonawcze. Luzy między trzpieniami śrub a otworami w elementach łączonych są zasadniczą przyczyną przemieszczeń w zakładkowych stykach montażowych na śruby zwykłe. Mniejszą odkształcalność niż połączenia zwykłe mają połączenia pasowane, które wymagają jednak rozwiercania otworów na montażu do średnicy trzpienia śrub pasowanych. W celu zwiększenia nośności i ograniczenia przemieszczeń stosuje się sprężanie

połączeń śrubowych przez kontrolowane dokręcenie nakrętek. W zakładkowych połączeniach śrubowych niesprężanych obciążenie między łączonymi elementami jest przekazywane przez trzpienie śrub, które są ścinane i dociskane. W śrubowych zakładkowych złączach sprężanych obciążenie jest przenoszone w styku przez siły tarcia między łączonymi elementami, uzyskane przez dokręcenie śrub w połączeniu. Najmniejszą odkształcalność połączeń zakładkowych uzyskuje się w połączeniach sprężonych, w których wykorzystuje się tarcie między odpowiednio przygotowanymi i sprężonymi śrubami powierzchniami elementów łączonych w styku. Ścieżki równowagi statycznej (zależności obciążenia — N , przemieszczenia — y) śrubowych połączeń zakładkowych pokazano na rys. 1.4 [14]. W zależności od technologii wykonania połączenia śrubowego (zwykle, pasowane, niesprężone, sprężone) występują poślizgi w złączach, a ścieżki równowagi statycznej są nieliniowe.



Rys. 1.4. Ścieżki równowagi statycznej zakładkowych połączeń śrubowych [14]

Połączenia doczołowe są stosowane w stykach i w węzłach ram pełnościennych, przenosząc momenty zginające i rozciągające siły podłużne. Kierunek głównej składowej obciążenia jest wtedy równoległy do osi łączników. Połączenia doczołowe niesprężone przenoszą siły wewnętrzne przez rozciąganie śrub. Sprężenie tych połączeń umożliwia przekazywanie obciążeń rozciągających wskutek zmniejszenia się naprężeń dociskowych (ściskających) w styku między blachami czołowymi. Połączenie doczołowe charakteryzuje mała odkształcalność oraz, podobnie jak w połączeniach ciernych, znaczna wytrzymałość.

Gdy w połączeniu doczołowym występuje moment zginający M , siła rozciągająca N_t i siła poprzeczna V mamy do czynienia z połączeniem ścinanym i rozciąganym (od momentu M i siły podłużnej N_t). W połączeniach zwykłych (niesprężonych) siły wewnętrzne w styku M , N_t i V powodują ścinanie, docisk

i rozciąganie trzpieni śrub. Sprężenie tych połączeń umożliwia przekazanie obciążeń rozciągających od M i N , wskutek zmniejszenia naprężeń dociskowych w styku blach czołowych, podczas gdy siła ścinająca V jest przenoszona przez tarcie między powierzchniami przylgowymi łączonych elementów.

Połączenia zakładkowe mogą być wykonane jako zwykłe, pasowane lub cierne (sprężone), przy czym zastosowane do nich śruby mogą być niesprężane lub sprężane (połączenia cierne tylko sprężane). Połączenia doczołowe są zwykle wykonywane na śruby o wysokiej wytrzymałości ze sprężeniem, rzadziej zaś bez sprężenia.

Z uwagi na sposób obciążenia złączy, technologię ich wykonania (dokładność, sprężenie), a także wymagania eksploatacyjne (odporność na rozwarcie styków) połączenia w normie [60] podzielono na 6 kategorii, które przedstawiono w tabl. 1.1. Szczegółową charakterystykę poszczególnych kategorii połączeń śrubowych podano w punktach 2.4. i 3.6. Kryteria doboru rodzaju złączy omówiono w rozdziale 4.

Tablica 1.1.

Klasyfikacja połączeń według [60]

Kategoria połączenia	A		B		C	D		E		F
Kierunek obciążenia	Prostopadły do osi łączników					Równoległy do osi łączników				
Rodzaj połączenia	zakładkowe					doczołowe				
	śrubowe ² – zwykłe, – pasowane, nitowe, sworzniowe		sprężane ¹ (cierne)			niesprężane ³ lub sprężane ¹		sprężane ¹		
Stany graniczne: I – nośności II – użytkowania	(I)		I	II	I	I		I	II	I
	ścięcie trzpienia lub docisk do ścianki otworu		poślizg styku			zerwanie śrub		rozwarcie styku		

¹ Do połączeń sprężanych należy stosować śruby o wysokiej wytrzymałości, tzn. śruby klasy 8.8, 10.9 lub 12.9. Te połączenia powinny być sprężane siłą $S_0 = 0,7 R_m A_s$ (gdzie R_m – wytrzymałość stali śruby, A_s – pole przekroju rdzenia śruby). W dokumentacji projektowej należy określić warunki techniczne wykonania i odbioru połączeń sprężanych. Należy zwłaszcza podać na rysunkach połączeń montażowych sposób realizacji wstępnego sprężania (np. wartości momentów dokręcających), a w odniesieniu do połączeń ciernych również sposób przygotowania powierzchni odpowiedni dożądanego współczynnika tarcia.

² Połączenia na śruby o wysokiej wytrzymałości można projektować jako sprężane siłą równą $0,5 S_0 = 0,35 R_m A_s$.

³ Do połączeń niesprężanych stosuje się śruby klas niższych niż 8.8.

Zachowanie się połączeń śrubowych (węzłów, styków) w stalowych ustrojach nośnych jest nieraz tak złożone, że w wielu przypadkach niemożliwe staje się obliczenie ich nośności i sztywności według ścisłych wzorów teoretycznych. Dlatego też w celu uzyskania zgodności z wynikami doświadczalnymi stosuje się modyfikację oszacowań teoretycznych nośności i sztywności złączy. Dotyczy to zwłaszcza tzw. połączeń podatnych (półsztywnych; *semi-rigid*).

Rodzaj zastosowanego połączenia i sposób rozmieszczenia w nim łączników zależy w dużej mierze od przekroju poprzecznego łączonego elementu, kształtu styku lub węzła, grubości łączonych części, sił wewnętrznych, które występują w połączeniu, a także od uwarunkowań konstrukcyjnych umożliwiających wkładanie śrub i kontrolę ich dokręcenia. Ważnym zagadnieniem w doborze typu połączenia jest analiza podatności styku śrubowego, w aspekcie modelu przyjętego w globalnej analizie statycznej (w schemacie statycznym wyznaczania sił wewnętrznych w ustroju). Stosowanie uproszczonych (np. bez żeber) połączeń podatnych (*semi-rigid*) prowadzi do zmniejszenia kosztów wykonania elementów w wytwórni i skrócenia czasu czynności montażowych. Takie rozwiązania konstrukcyjne węzłów znacznie komplikują zarówno analizę statyczną ustroju (gdyż konstrukcje te nie spełniają założeń klasycznej statyki budowli), jak i wytrzymałości i stateczności, ponieważ odbiegają od wyidealizowanych konwencjonalnych modeli teoretycznych połączeń sztywnych lub przegubowych. W celu oszacowania wyężenia takich konstrukcji należy posługiwać się nieliniową analizą statyczną i sprawdzaniem eksperymentalnym. Zagadnienia podatności połączeń śrubowych są przedmiotem rozdziału 5.

1.3. Asortyment i właściwości śrub

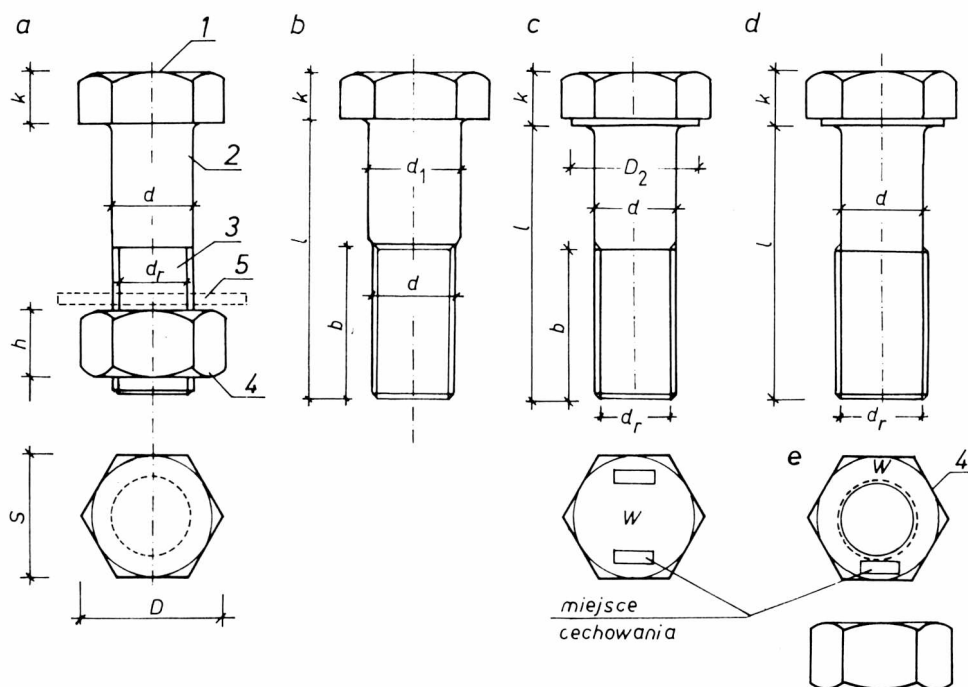
Połączenie śrubowe powstaje w styku dwóch lub kilku części przez umieszczenie w otworach łączonych elementów łączników śrubowych.

Na rysunku 1.5a przedstawiono śrubę z łbem sześciokątnym – (1), trzpieniem walcowym gładkim – (2), nagwintowanym – (3) na części jego długości lub na całej jego długości. Rdzeniem śruby jest część nagwintowana łącznika, która pozostaje po odliczeniu nacięć gwintu. Znormalizowane typy śrub o gwincie metrycznym oznaczamy symbolem M i liczbą odpowiadającą średnicy d gwintu śruby (w mm). W połączeniach śrubowych należy stosować między łączonym elementem a nakrętką (4) podkładkę (5), (rys. 1.5a). W połączeniach obciążanych dynamicznie należy stosować podkładki sprężyste (rys. 1.6c), zapobiegające odkręcaniu się nakrętek.

W Polsce w budownictwie używa się śrub o gwincie trójkątnym (naciętym mechanicznie lub wytłoczonym), przystosowanym do średnic metrycznych. Śruby te produkuje się w trzech klasach dokładności wykonania, oznaczonych symbolami: A – dokładne, B – średnio dokładne, C – zgrubne, różniące się sposobem obróbki i dokładnością wykonania powierzchni (chropowatości) i trzpienia.

Wymiary i oznaczenia śrub stosowanych w budownictwie podają normy PN-85/M-82101 [68] oraz PN-85/M-85105 [69].

Śruby zgrubne, oznaczone symbolem C, są obrobione jedynie na odcinku gwintowanym, dlatego też muszą one mieć odpowiedni luz w otworze. Luz ten w stalowych konstrukcjach budowlanych (zależny od średnicy śruby) wynosi od 1,0 do 3,0 mm i ma decydujące znaczenie dla rozkładu sił w łączonych elementach oraz odkształcalności połączeń. Śruby o takiej dokładności wyko-



Rys. 1.5. Śruby z łbem sześciokątnym

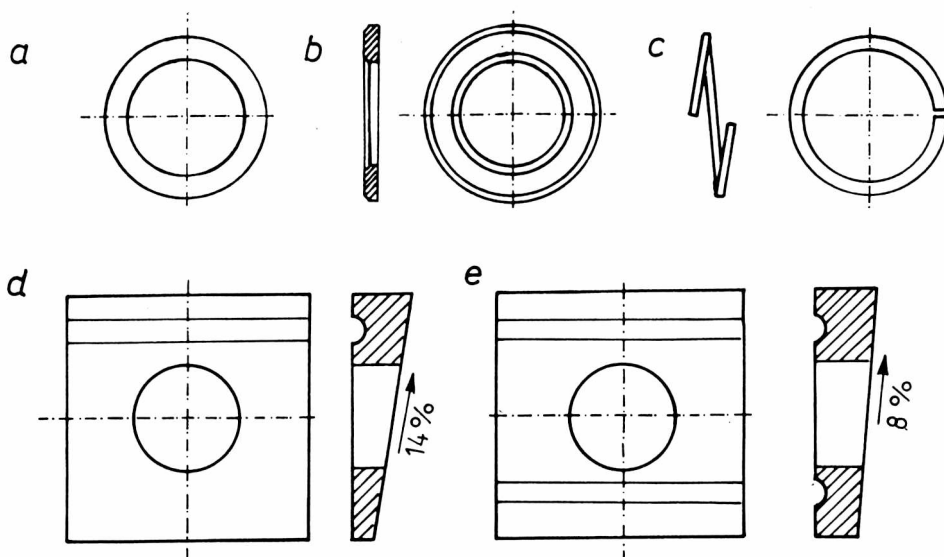
nia są przeznaczone do stosowania w połączeniach tymczasowych, do styków montażowych słabo wyłożonych obciążonych statycznie i do łączenia elementów o drugorzędym znaczeniu konstrukcyjnym.

Śruby o średnio dokładnej jakości wykonania, oznaczone symbolem B i o kształtach jak śruby o wykonaniu zgrubnym według norm [68] i [69] mają trzpienie dodatkowo toczone. Śruby o takiej jakości wykonania (klasy B) są zasadniczo najczęściej stosowanymi łącznikami. Są one przeznaczone do stosowania w połączeniach zakładkowych i doczołowych, niesprężanych i sprężanych w stykach elementów konstrukcji obciążonych statycznie i dynamicznie.

Śruby o dokładnej jakości wykonania, oznaczone symbolem A i o kształtach pokazanych na rys. 1.5b, z łbem sześciokątnym i z gwintem krótkim lub długim są wykonywane z pogrubionym trzpieniem. Śruby o takiej dokładności wykonania stosuje się w połączeniach pasowanych, z luzem między trzpieniem a ścianką otworu od 0,2 do 0,3 mm. Otwory do śrub pasowanych są wstępnie wiercone o średnicy mniejszej od nominalnej średnicy trzpienia. Łączone elementy są zazwyczaj próbnie scalone w warsztacie. Następnie wykonuje się rozwiercanie otworów do średnicy nominalnej. Połączenia ze śrubami pasowanymi są pracochłonne i kosztowne, dlatego projektuje się je wyjątkowo, gdy konieczne jest ograniczenie przemieszczeń w styku.

Śruby o średnio dokładnej jakości wykonania, oznaczone symbolem B, są również wykonywane ze stali o wysokiej wytrzymałości według PN-83/M-82343 [74] z łbem sześciokątnym powiększonym (patrz rys. 1.5c) lub według

PN-85/M-82101 [68] z łbem zwykłym. Śruby te są przeznaczone do stosowania przede wszystkim do połączeń ciernych, doczołowych, sprężanych, w elementach obciążonych statycznie lub dynamicznie, gdy żąda się ograniczenia przemieszczeń w stykach. Ze względu na przenoszenie znacznych sił rozciągających, śruby sprężające są wykonywane ze stali stopowych o wysokich wytrzymałościach. Łby i nakrętki śrub sprężających mają wymiary zwiększone w stosunku do śrub zwykłych. Śruby do sprężania pokazano na rys. 1.5c i d. W połączeniach sprężanych, w celu należytego przekazania nacisku na elementy łączone pod łbami śrub oraz ich nakrętkami stosuje się duże podkładki zgodnie z PN-83/M-82039 [66], przedstawione na rys. 1.6b. Podkładki te, wykonane ze stali o twardości nie mniejszej od twardości nakrętek, powinny być płaskie i sfrezowane od zewnątrz i od wewnątrz pod kątem 45° . Średnice otworów na śruby do sprężania mogą być od 1 do 3 mm większe od średnicy śrub.



Rys. 1.6. Podkładki pod śruby

Zgodnie z normą PN-85/M-82101 śruby i nakrętki stalowe ogólnego przeznaczenia podzielono na klasy nie tylko w zależności od jakości wykonania (A, B, C), ale też od właściwości mechanicznych stali, z których są wykonane. W zależności od wymaganej wytrzymałości na rozciąganie i od wymaganej granicy plastyczności w stalowych konstrukcjach budowlanych według [60] stosuje się 10 klas śrub. Klasy śrub oznaczają się symbolem składającym się z dwóch liczb przedzielonych kropką. Pierwsza liczba stanowi 0,01 minimalnej wymaganej wytrzymałości doraźnej na rozciąganie stali gotowych śrub (w [MPa]), druga natomiast 0,1-procentowego stosunku minimalnej granicy plastyczności do minimalnej wytrzymałości doraźnej wyprodukowanych śrub R_e/R_m . Symbol 4.6 oznacza na przykład śrubę o wytrzymałości stali na rozciąganie $R_m = 400$ MPa i stosunku R_e/R_m wynoszącym 0,6. Symbole oraz charakterystyki wytrzymałościowe śrub zestawiono w tabl. 1.2.

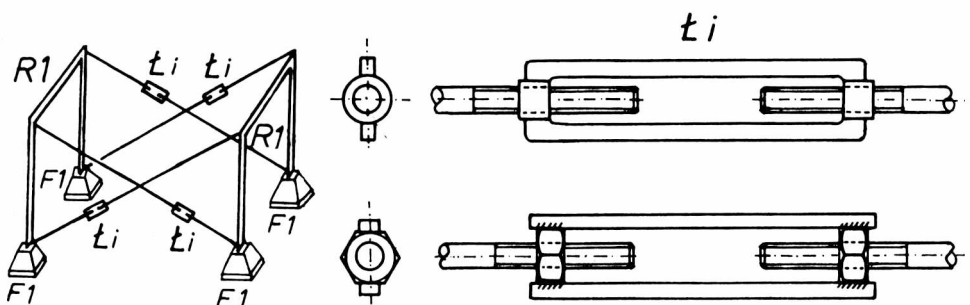
Norma niemiecka [50] zaleca stosowanie w budowlanych konstrukcjach stalowych mniejszego asortymentu klas śrub 4.6, 5.6, 8.8 i 10.9 oraz odpowiadających im nakrętek w klasach 4, 5, 8 i 10.

W połączeniach śrubowych między łączonym elementem a nakrętką stosuje się podkładki okrągłe (rys. 1.6a), o wykonaniu zgrubnym wg PN-78/M-82005 [65]. W połączeniach sprężanych — podkładki o wykonaniu dokładnym (rys. 1.6b) według PN-83/M-83039 [66] stosuje się pod łbami śrub i nakrętkami.

Dwuteowniki normalne i ceowniki mają półki (stopki) o zmiennej grubości. W śrubowych połączeniach półek dwuteowników normalnych i ceowników należy stosować czworokątne podkładki klinowe, produkowane według norm PN-79/M-82009 [75] oraz PN-79/M-82018 [76], o kształtach przedstawionych na rys. 1.6d i e.

Oprócz opisanych typów śrub z łbem i nakrętką sześciokątną w budownictwie używa się wielu śrub o specjalnym przeznaczeniu. Do najbardziej charakterystycznych należą śruby rzymskie i fundamentowe.

Śruby rzymskie (rys. 1.7) składają się z dwu nakrętek z gwintem lewo- i prawoskrętnym, połączonych ze sobą dwoma płaskownikami. Obrót takiego zespołu nakrętek powoduje przesuwanie się końców łączonych prętów do wnętrza śruby i jednoczesny naciąg łączonych elementów.

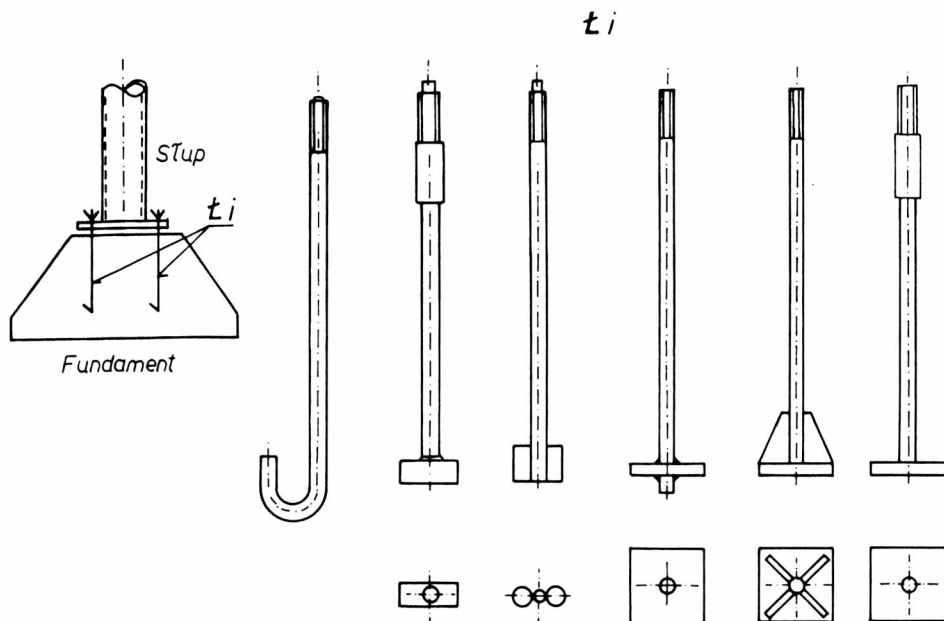


Rys. 1.7. Śruby rzymskie

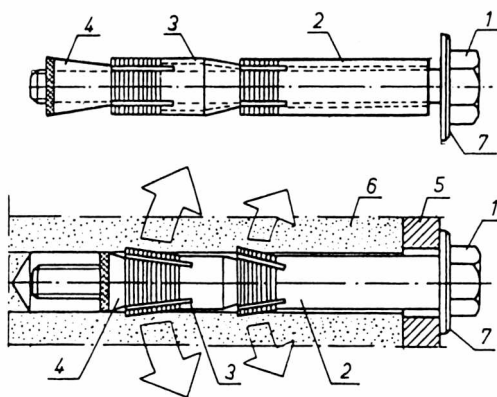
Śruby fundamentowe, których kilka przykładów pokazano na rys. 1.8 [61] wykonuje się ze stali okrągłej. Jeden koniec śruby jest nagwintowany, drugi zaś ukształtowany tak, aby uzyskać dobre zakotwienie w betonie lub belce kotwiącej osadzonej w fundamencie. Śruby te mają za zadanie prawidłowe ustawienie słupa na fundamencie, zapobieganie poziomym przesunięciom konstrukcji, a także przekazywanie obciążeń na fundament. Sposób obliczania śrubowych połączeń kotwiących słupy i kominy podaje norma [61].

W budownictwie mają również zastosowanie śrubowe łączniki rozprężające, o konstrukcji przedstawionej na rys. 1.9. W celu uzyskania połączenia elementu (5) z konstrukcją murową lub żelbetową (6) wierci się w niej otwór, w którym osadza się łącznik rozporowy. Pokazany na rysunku 1.9 łącznik składa się ze śruby (1), podkładki (7), segmentów rozporowych (2) i (3) oraz nakrętki (4). Zamocowanie łącznika w podłożu (betonowym, murowym)

uzyskuje się przez dokręcenie śruby i docisk rozprężanych segmentów (2) i (3) do ścianki otworu (w betonie lub murze). Nośność takich połączeń podają producenci łączników.



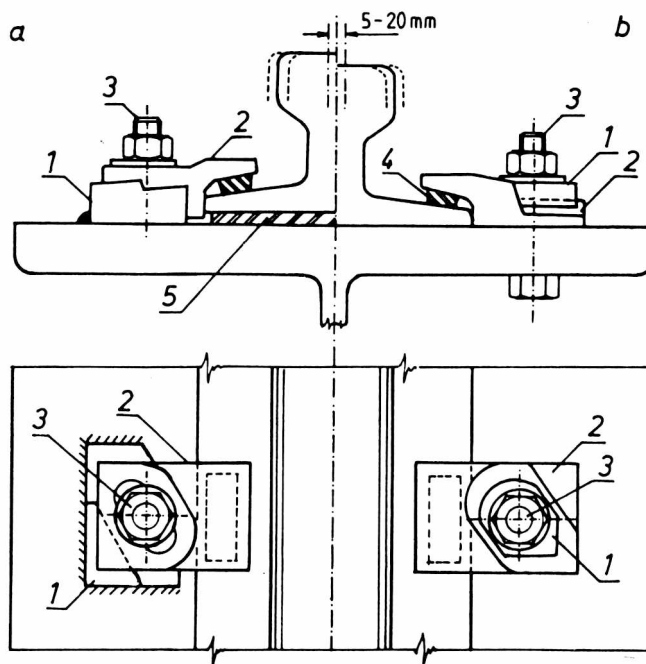
Rys. 1.8. Śruby fundamentowe według [61]



Rys. 1.9. Śrubowy łącznik rozporowy

Połączenia śrubowe odgrywają ważną rolę w sytuacjach projektowych, gdy zależy nam na złączach regulowanych. Przykładem takiego połączenia śrubowego jest mocowanie toru jezdnej (szyny) do belki podsuwnicowej.

Na rysunku 1.10 pokazano patentowe połączenie *Gantrail* szyny jezdnej, składające się ze specjalnie wyprofilowanych elementów (1) oraz łapek (2) przykręcanych śrubami sprężającymi (3). Skośnie usytuowane owalne otwory w łapkach umożliwiają regulację położenia poziomego szyny jezdnej. Szyna



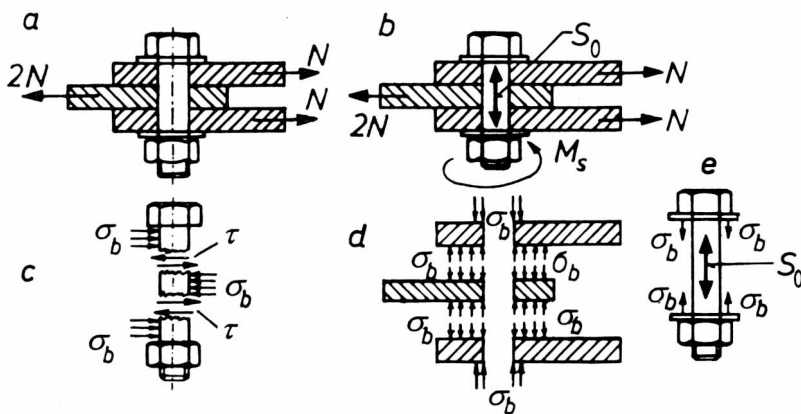
Rys. 1.10. Regulowane, śrubowe połączenie *Gantry* szyny jezdnej z belką podsuwnicową:
 a — mocowanie przez przyspawanie, b — mocowanie śrubowe

jezdna może być układana bezpośrednio (rys. 1.10b) na pasie górnym belki podsuwnicowej lub na elastycznej podkładce (5) (rys. 1.10a). Noski łąpek (2) są wyposażone w podkładki (4) z elastomeru. Momenty dokręcenia śrub oraz ekstremalne obciążenia poziome zależą od typu połączenia i określa je producent.

2. Nośność graniczna śrubowych połączeń zakładkowych

2.1. Wprowadzenie

Wymienione w tytule rozdziału rodzaje połączeń charakteryzują się tym, iż składowa obciążenia w styku śrubowym jest prostopadła do osi łączników. Zakładkowe połączenia śrubowe mogą być zarówno niesprężone (zwykłe), jak i sprężone (ze wstępnym naciągiem trzpieni śrub, powodującym wzajemny docisk powierzchni stykowych łączonych elementów). W zakładkowych połączeniach niesprężonych (zwykłych) siły wewnętrzne w styku śrubowym wywołują ścinanie i docisk trzpieni śrub, co pokazano na rys. 2.1a i c. W podobnym stanie wyłączenia znajdują się zakładkowe połączenia nitowe i sworzniowe. W sprężanych połączeniach zakładkowych, nazywanych również połączeniami ciernymi, w przekazywaniu obciążeń z jednego elementu łączonego na drugi korzysta się z tarcia między powierzchniami stykowymi złącza. W celu wywołania zjawiska tarcia pomiędzy częściami składowymi połączenia wprowadza się naciąg trzpienia śruby przez dokręcenie nakrętki. Śruba w takim połączeniu jest więc rozciągana (patrz rys. 2.1b i d).

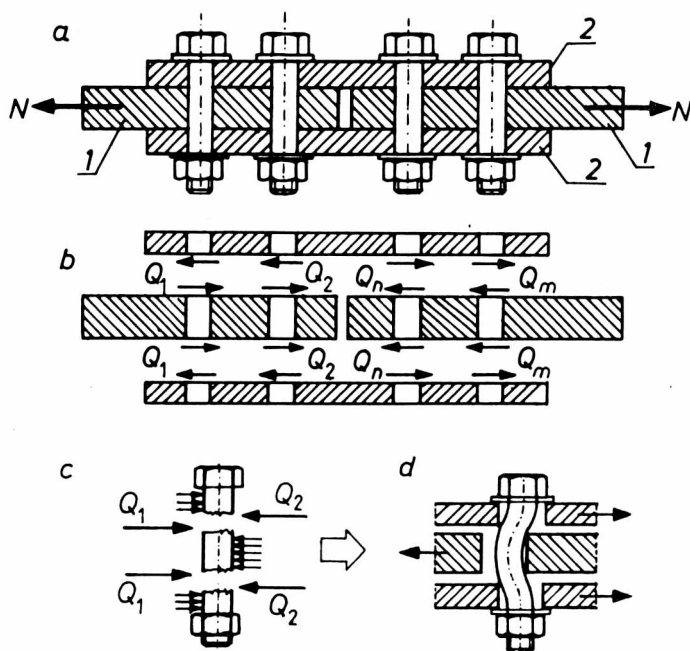


Rys. 2.1. Sposoby przenoszenia obciążeń w połączeniach zakładkowych

2.2. Nośność graniczna śrubowych niesprężonych połączeń zakładkowych

Rozpatruje się połączenie zakładkowe niesprężone przedstawione na rys. 2.2. W połączeniu blach (1) za pośrednictwem obu stronnych nakładek (2), siła z blachy (1) jest przekazywana przez łączniki na nakładki (2). Siła w blasze

(1) w miarę zbliżania się do osi symetrii połączenia maleje, w nakładkach (2) natomiast rośnie (rys. 2.2b). W takim połączeniu siła N z blachy (1) na nakładki (2) jest przenoszona przez ścinanie trzpieni śrub i ich docisk do ścianek otworów (rys. 2.2c).

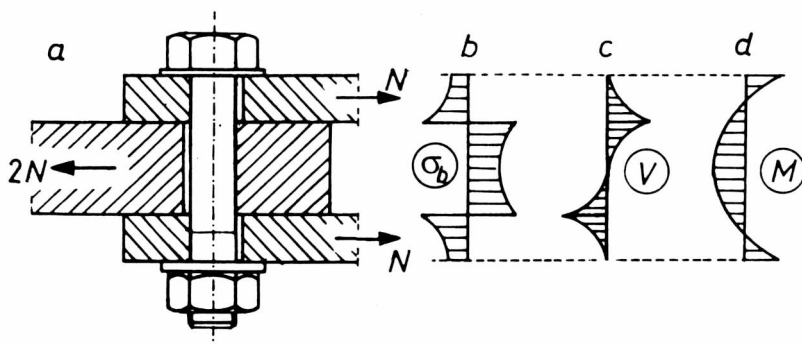


Rys. 2.2. Wytyżenie śrub w zakładkowym połączeniu niesprężonym

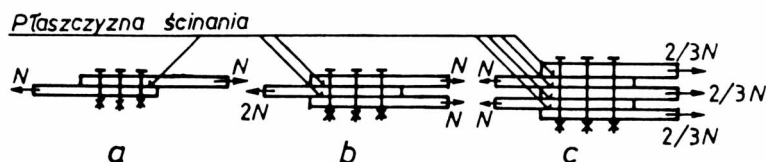
Stan wytyżeń śruby niesprężanej w połączeniu zakładkowym zakłócają luzy między otworami w elementach łączonych a trzpieniem łącznika. W zakładkowym połączeniu zwykłym śruby są na ogół osadzone w otworach większych od średnicy ich trzpieni od 1 do 3 mm, co powoduje powstanie poślizgu złącza w płaszczyznach przylgowych (stykowych). Dlatego też trzpień śruby jest nie tylko ścinany, ale i zginany, a ponadto występuje koncentracja naprężeń od docisku w płaszczyznach przylgowych (rys. 2.2d). Rozkład naprężeń od docisku wzdłuż osi trzpienia śruby jest nieliniowy. Przedstawiono to na rys. 2.3b. Na rysunku 2.3c i d pokazano wykres sił poprzecznych i momentów zginających w trzpieniu śruby ścinanym i zginanym, w wyniku występowania luzów w złączu zakładkowym o konstrukcji przedstawionej na rys. 2.3a.

Trzpień śruby w połączeniu zakładkowym zwykłym (niesprężanym) jest ścinany w jednej lub kilku płaszczyznach (rys. 2.4), zginany obciążeniem poprzecznym, a także rozciągany wskutek dokręcenia nakrętki. Przedstawiony model wytyżenia trzpienia jako pręta krótkiego nie znajduje zastosowania w oszacowaniu jego nośności.

W ocenie wytrzymałości trzpieni śrub niesprężanych dla uproszczenia rozpatruje się oddzielnie ścinanie oraz docisk, pomija się zaś zginanie i rozciąganie.



Rys. 2.3. Wykresy wyężenia trzpienia śruby w połączeniu zakładkowym niesprężonym



Rys. 2.4. Połączenia zakładkowe: a – jednocięte, b i c – wielocięte

Przekazywanie w połączeniu zakładkowym obciążeń rozciągających lub ściskających (rys. 2.5) następuje przez bezpośredni docisk trzpienia śruby do ścianki otworu. Jak już wspomniano, rozkład obciążeń przekazywanych na ścianki otworów łączonych elementów nie jest jednak równomierny. Naprężenia dociskowe rozkładają się według kosinusoidy na średnicy otworu (rys. 2.5c), na grubości ścianki łączonych elementów zaś rozkład naprężeń od docisku jest nieliniowy i zależy od rodzaju rozwiązania konstrukcyjnego (porównaj rys. 2.5a z rys. 2.5b). Do obliczeń przyjmuje się jednak uproszczony, równomierny rozkład tych naprężeń (rys. 2.5d), w przeliczeniu na rzut wyężonej poboczniczy trzpienia, to jest pole powierzchni docisku

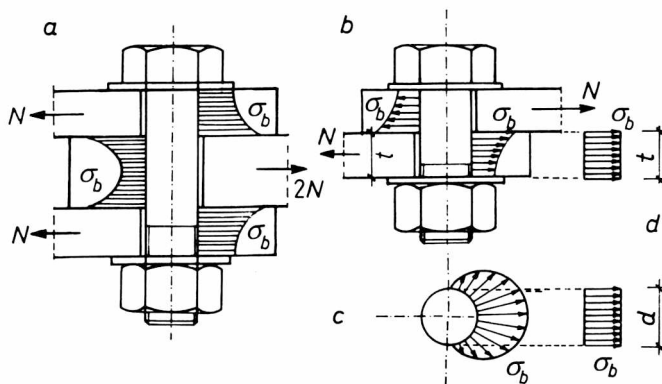
$$A_b = d \sum t_i, \quad (2.1)$$

gdzie: d – średnica trzpienia śruby,

$\sum t_i$ – sumaryczna grubość części (o grubościach t_i) podlegających dociskowi w tym samym kierunku.

Taki uproszczony model obliczeniowy wyężenia dociskowego trzpienia śruby do ścianki otworu jest bezpieczny, gdyż łączniki w stykach przyjmuje się z gatunków stali o właściwościach mechanicznych wyższych aniżeli łączonych elementów. Sprawia to, iż w granicznym stanie wyężenia, wskutek wzajemnych docisków trzpienia śruby do ścianki w otworze łączonego elementu nastąpi uplastycznienie ścianki otworu łączonej blachy.

Klasę właściwości mechanicznych śrub, to jest wytrzymałość doraźną R_m oraz granicę plastyczności R_e ich materiału należy dobierać według PN-82/M-82054.03 [67], odpowiednio do kategorii połączenia, przy czym wytrzymałość R_m śrub powinna być nie mniejsza niż granica plastyczności R_e stali łączonych części. Odpowiednie charakterystyki mechaniczne stali śrub podano w tabl. 1.2.



Rys. 2.5. Wytyżenie dociskowe trzpienia śruby do ścianki otworu

Jeśli części składowe połączenia mają jednakowe wytrzymałości obliczeniowe stali f_d , to w złączu zakładkowym nastąpi uplastycznienie cieńszych ścianek otworów przy jednakowych polach przekrojów poprzecznych elementów rozciąganych. W elementach rozciąganych wykonanych ze stali różnych gatunków nastąpi uplastycznienie ścianek otworu w elementach o mniejszej wytrzymałości na docisk.

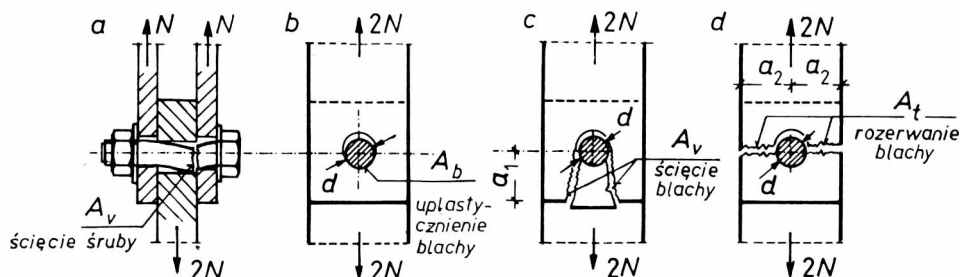
Nośność śruby S_b z warunku docisku trzpienia śruby do otworu w połączeniu zakładkowym wyznacza się ze wzoru

$$S_b = f_{db} A_b, \quad (2.2)$$

w którym: f_{db} — wytrzymałość obliczeniowa stali na docisk łączonego elementu,

A_b — pole powierzchni docisku według (2.1).

Analizując stan graniczny nośności niesprężonego połączenia zakładkowego (rys. 2.6) oprócz sprawdzenia wytrzymałości śruby na docisk (rys. 2.6b) i ścinanie (rys. 2.6a – zagadnienie omówione w dalszej części tego rozdziału) należy sprawdzić nośność na rozerwanie przekroju netto (rys. 2.6d) oraz ścięcie przekroju między otworami oraz między otworem a brzegiem blachy (rys. 2.6c). Zarówno w normie [60], jak i w Eurokodzie 3 [51] sprawdzenie docisku trzpienia do otworu (rys. 2.6b) w elemencie łączonym powiązano ze sprawdzeniem wytrzymałości blachy na ścięcie (rys. 2.6c) i rozerwa-



Rys. 2.6. Mechanizmy zniszczenia połączenia zakładkowego

nie między łącznikami przyjmując wartość umownej wytrzymałości f_{db} na docisk

$$f_{db} = \alpha f_d, \quad (2.3)$$

gdzie: f_d — wytrzymałość obliczeniowa stali łączonego elementu.

Współczynnik α we wzorze (2.3) zależy od wytrzymałości stali na docisk oraz rozstawu otworów na śruby i ich odległości od brzegu.

Zabezpieczenie przed ścięciem przekroju łączonej blachy między otworami lub między otworem a brzegiem elementu łączonego uzyskuje się przez dobór rozstawu łączników (rozdz. 4) odpowiedniego do siły, jaką śruba przekazuje przez docisk do ścianki otworu. Według zaleceń [60] nie nastąpi wyczerpanie nośności łączonej blachy, gdy spełnione będą następujące warunki:

$$\frac{a_1}{d} \geq \frac{f_{db}}{f_d}, \quad (2.4a)$$

lub

$$\frac{a}{d} - \frac{3}{4} \geq \frac{f_{db}}{f_d}, \quad (2.4b)$$

gdzie: a — rozstaw łączników w szeregu (odległość między osiami otworów) w kierunku działania obciążenia (rys. 4.5),

a_1 — odległość od brzegu blachy (ścianki) do osi otworu w kierunku działania obciążenia (rys. 4.5),

d — średnica trzpienia śruby.

W postanowieniach normy [60] oraz Eurokodu 3 [51] przyjęto wytrzymałość stali na docisk $f_{db} = 2,5f_d$. Wówczas współczynnik α po uwzględnieniu (2.4) wynosi:

$$\alpha = \min \left[\frac{a_1}{d}; \left(\frac{a}{d} - \frac{3}{4} \right); 2,5 \right]. \quad (2.5)$$

Współczynnik α w połączeniach zakładkowych można wyznaczać ze wzoru (2.5) dla śrub zwykłych (niesprężanych) oraz nitów. W zakładkowych połączeniach sprężonych według [60] (zagadnienie omówione w rozdz. 2.3), można przyjmować $\alpha \leq 3$.

Obliczeniową nośność graniczną S_{Rb} śruby, z warunku docisku trzpienia do ścianki otworu (uwzględniającą uplastycznienie się powierzchni kontaktu) wyznacza się według [60] ze wzoru:

$$S_{Rb} = \alpha d f_d \sum t_i, \quad (2.6)$$

gdzie: α — według wzoru (2.5); $\sum t_i$ — jak we wzorze (2.1); f_d — jak we wzorze (2.3).

Norma [60] zezwala na występowanie części gwintowanej trzpienia śruby w strefie docisku, gdy nośność na docisk niegwintowanej części trzpienia jest wystarczająca do przeniesienia sił wewnętrznych lub gdy są dopuszczalne zwiększone przemieszczenia części łączonych i jest wystarczająca nośność na docisk trzpienia gwintowanego o średnicy $0,7d$.

Podsumowując analizę nośności śrub na docisk należy zauważyć, iż w ujęciu obecnie obowiązujących norm [50], [51], [60] nośność obliczeniowa łącznika w tym stanie wyężenia nie zależy od właściwości mechanicznych śrub. Zależy natomiast od nośności na uplastycznienie ścianki elementu łączonego, rozstawu otworów na łączniki i średnicy trzpienia śruby.

Uzależnienie nośności S_{Rb} od rozmieszczenia śrub w połączeniu (od odległości a_1 i a) ukierunkowuje sposób postępowania w projektowaniu połączeń zakładkowych, ponieważ z warunku równej nośności łącznika na docisk i ścięcie można określić minimalną wartość współczynnika α oraz odpowiadające jej minimalne odległości a_1 i a .

Trzpień śruby w połączeniu zakładkowym zwykłym (niesprężonym), w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego, może być jednocięty (rys. 2.4a), dwucięty (rys. 2.4b) lub wielocięty (rys. 2.4c). Ścięcie trzpienia łącznika nastąpi wskutek utraty nośności przekroju ścinanego spowodowanego przekroczeniem w nim naprężeń granicznych. Nośność śruby S_v , z warunku ścięcia trzpienia zależy od właściwości mechanicznych materiału łącznika na ścinanie f_{dv} , liczby płaszczyzn ścinania m oraz powierzchni przekroju poprzecznego trzpienia śruby A_v w płaszczyźnie ścinania i wynosi

$$S_v = mA_v f_{dv}. \quad (2.7)$$

Wytrzymałość obliczeniową materiału śrub na ścinanie określa się z zależności

$$f_{dv} = \min\left(\frac{R_m}{\sqrt{3}\gamma_s}; \frac{0,8R_e}{\gamma_s}\right), \quad (2.8)$$

w której: R_m – wytrzymałość doraźna stali śrub (np. wg tabl. 1.2),
 R_e – granica plastyczności stali śrub (np. wg tabl. 1.2),
 γ_s – częściowy współczynnik bezpieczeństwa (współczynnik niejednorodności materiału; $\gamma_s = 1,25$).

Tabela 2.1.

**Nośność obliczeniowa śrub na ścinanie w jednej płaszczyźnie
na odcinku niegwintowanym według [60]**

Nośność obliczeniowa śrub na ścinanie S_{Rv} [kN]										
Oznaczenie śrub	Klasa śrub (nakrętek)									
	3.6 (4)	4.6 (4)	4.8 (4)	5.6 (4)	5.8 (5)	6.6 (5)	6.8 (8)	8.8 (8)	10.9 (10)	12.9 (12)
M10	11,7	14,1	14,8	17,7	18,4	21,2	21,2	28,3	36,7	43,1
M12	16,8	20,3	21,4	25,4	26,4	30,5	30,5	40,7	52,9	62,0
M16	29,9	36,2	38,0	45,2	47,0	54,3	54,3	72,4	94,1	110
M20	46,7	56,5	59,3	70,7	73,5	84,8	84,8	117	150	172
M24	67,2	81,4	85,4	102	106	122	122	169	212	248
M30	105	127	134	159	165	191	191	265	331	388

Ostatecznie w normie [60] przyjęto wytrzymałość obliczeniową materiału śruby na ścinanie wynoszącą

$$f_{dv} = 0,45 R_m. \quad (2.9)$$

Obliczeniową nośność graniczną śruby S_{Rv} z warunku ścięcia trzpienia wyznacza się według [60] ze wzoru

$$S_{Rv} = 0,45 m R_m A_v, \quad (2.10)$$

gdzie:

- m – liczba płaszczyzn ścinania,
- R_m – wytrzymałość doraźna stali śrub (tabl. 1.2),
- $A_v = 0,25\pi d^2$ – pole powierzchni przekroju niegwintowanej części trzpienia śruby; w przypadku ścinania części gwintowanej trzpienia śruby klasy 10.9 należy przyjmować $A_v = 0,8 A_s$, dla pozostałych klas śrub zaś $A_v = A_s$, gdzie A_s – pole przekroju czynnego rdzenia śruby według normy PN-82/M-82054.03 [67] (tabl. 2.3),
- d – średnica trzpienia śruby.

W tablicy 2.1 podano nośności na ścinanie śrub M10–M30 wszystkich klas przy jednej płaszczyźnie ścinania trzpienia ($m = 1$) na odcinku niegwintowanym ($A_v = A = 0,25 \pi d^2$).

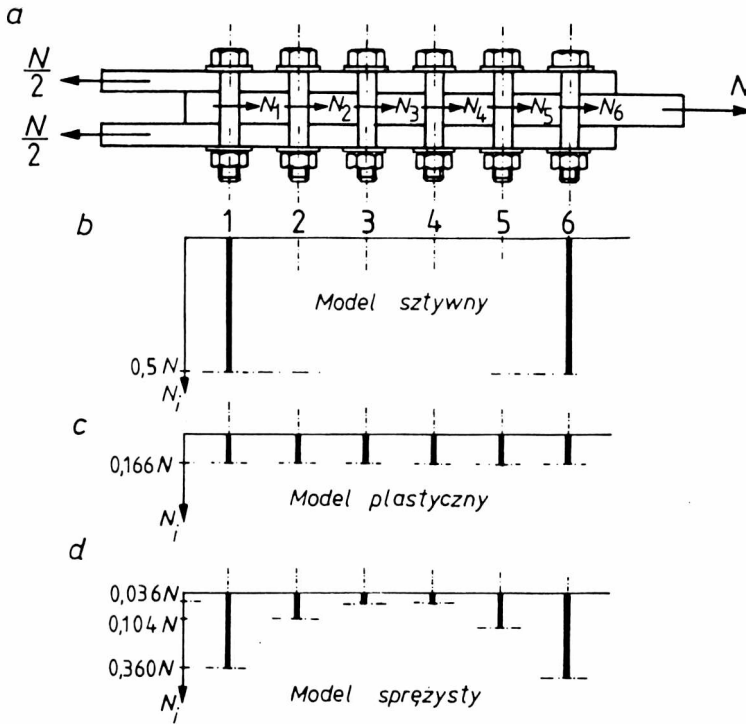
Śruby w połączeniu zakładkowym zwykłym (niesprężonym), w którym występuje wiele łączników nie są wyłożone jednakowo.

Przeanalizujemy trzy modele przekazywania obciążenia między łączonymi elementami w styku zakładkowym [14] o konstrukcji pokazanej na rys. 2.7a. Zakładając iż trzpień śrub są idealnie sztywne całe obciążenie z jednego elementu łączonego na drugi przekazuje się za pośrednictwem dwu śrub skrajnych (rys. 2.7b). Przyjmując plastyczny model materiału śrub wszystkie trzpień przenoszą jednakową część obciążenia w styku (rys. 2.7c).

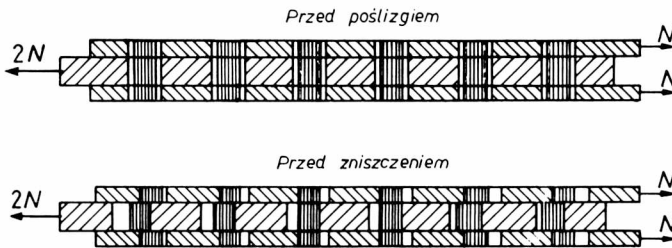
W razie założenia, iż połączenie jest wykonane z materiału sprężystego udział poszczególnych śrub w przenoszeniu obciążenia wykazuje podobieństwo do rozkładu według kosinusoidy hiperboloidalnej (rys. 2.7d). Rozkłady obciążeń na śruby według trzech omówionych modeli przedstawiono na rys. 2.7 [14].

W rzeczywistości w połączeniu zakładkowym istnieją przesławy między trzpieniami a ściankami otworów, które wskutek poślizgów są likwidowane nierównomiernie (niejednocześnie), powodując kolejno (lecz przypadkowo, z uwagi na losowość geometrii systemu) owalizację otworów i docisk trzpieni do ścianek otworów. Schemat przemieszczeń połączenia zakładkowego przed poślizgiem oraz w stanie poprzedzającym zniszczenie pokazano na rys. 2.8 [33].

Podczas wzrostu obciążenia działającego na złącze, siły przenoszone przez śruby stopniowo wyrównują się, lecz nie dochodzi do całkowitego zrównania ich wartości. W połączeniach zakładkowych *krótkich*, w których odległość skrajnych łączników w rzędzie równoległym do kierunku obciążenia $L \leq 15d$ (niezależnie od liczby śrub w rzędzie), można przyjąć, że nie występują istotne różnice wyłożenia łączników. W połączeniach *krótkich* można więc przyjmować, że obciążenie jest przenoszone jednakowo przez wszystkie śruby, które jednocześnie osiągają swoją nośność graniczną.



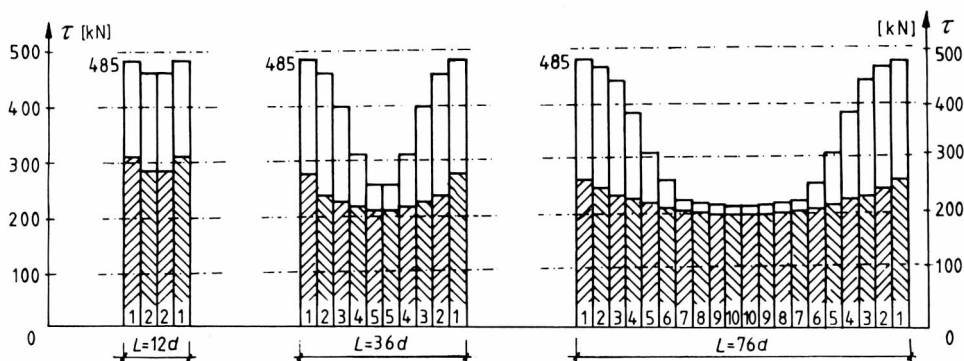
Rys. 2.7. Modele rozdziału obciążeń na śruby w połączeniu zakładkowym [14]



Rys. 2.8. Przemieszczenia elementów w połączeniu zakładkowym [33]

W połączeniach zakładkowych o większej długości różnice przenoszonych sił przez poszczególne śruby (rzędów skrajnych względem rzędów środkowych) są większe [21], [41]. Na rysunku 2.9 [21] pokazano rozkład naprężeń ścinających w trzpieniach śrub klasy 8.8 o $R_e = 245$ MPa, w połączeniach o długości $12d$, $36d$, $76d$. Dolny poziom naprężeń ścinających w śrubach (pola zakreskowane) odpowiada obciążeniu połączenia siłą $A_{br} \cdot R_e$ (gdzie A_{br} – pole powierzchni przekroju poprzecznego trzpieni śrub). Górny poziom naprężeń ścinających w śrubach skrajnych pokazuje stan pod granicznym obciążeniem ścinającym śruby skrajne. Z analizy wykresów przedstawionych na rys. 2.9 wynika, że wraz ze wzrostem długości połączenia zakładkowego rośnie zróżnicowanie wyężenia śrub skrajnych w stosunku do sił w śrubach usytuowanych w środku złącza. Połączenia dłuższe niż $65d$ nie powinny być projektowane ze względu na zbyt duże zróżnicowanie wyężenia łączników skrajnych w stosunku do obciążenia

średniego. Rozkład naprężeń w łącznikach styków zakładkowych na 4, 10 i 20 śrub pokazanych na rys. 2.9 zależy głównie od długości połączenia L i od stosunku A_{nt}/A_v (A_{nt} – pole przekroju poprzecznego netto łączonej blachy; A_v – pole przekroju poprzecznego śruby).



Rys. 2.9. Rozkład naprężeń w śrubach w połączeniu na 4, 10 i 20 łączników [21]

Średnią wytrzymałość łączników w połączeniach dłuższych niż $15d$ można wyznaczyć stosując następujący współczynnik redukcyjny

$$\eta = 1 - \frac{L - 15d}{200d}, \quad (2.11)$$

gdzie: $0,75 \leq \eta \leq 1,0$,

L – odległość między skrajnymi łącznikami w kierunku obciążenia.

Wykres współczynnika redukcyjnego nośności w zakładkowych połączeniach *długich* przedstawiono na rys. 2.10.

Według normy [60] dla połączeń zakładkowych *długich*, tj. gdy $15d < L \leq 65d$ jest konieczna redukcja nośności łączników, zgodnie ze wzorem (2.11), a nośność połączenia F_{Rj} wyznacza się ze wzoru

$$F \leq F_{Rj} = n\eta S_R, \quad (2.12)$$

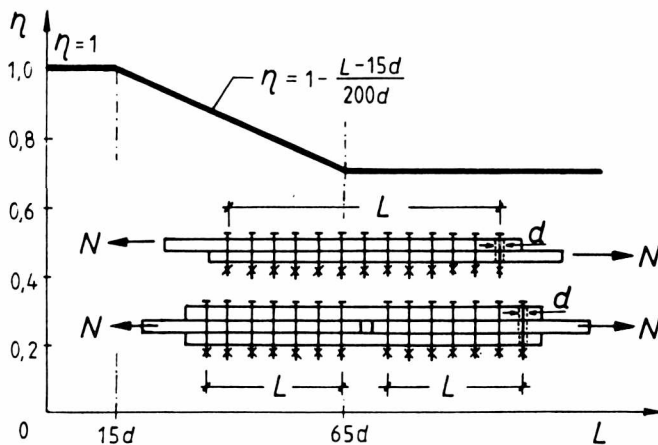
gdzie: S_R – miarodajna nośność obliczeniowa łącznika (minimum z wartości S_{Rv} , S_{Rb} , S_{Rs}),

n – liczba łączników przenoszących obciążenie F ,

η – według wzoru (2.11).

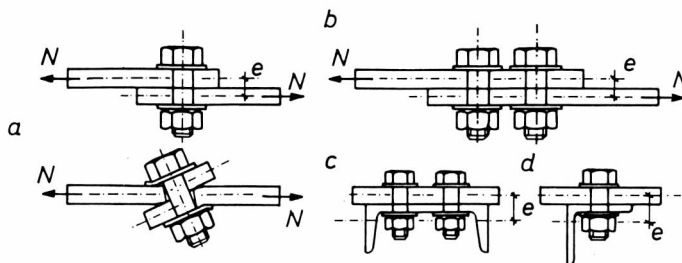
Omówionych zasad dotyczących redukcji nośności śrub w *długich* połączeniach zakładkowych nie należy jednak odnosić do połączeń obciążonych równomiernie rozłożonymi siłami stycznymi (rozwarstwiającymi, np. połączenie pasa ze środkiem w zginanej blachownicy o przekroju dwuteowym). Siła rozwarstwiająca w takim połączeniu narasta stopniowo i omawiany model obliczeniowy nie ma tu zastosowania.

W jednociętych połączeniach blach na zakład (rys. 2.11a i b) oraz w połączeniach kształtowników walcowanych za pośrednictwem nakładek lub blach węzłowych (rys. 2.11c i d), występuje obciążenie mimośrodowe w stosunku do płaszczyzny styku. Gdy połączenia te nie są usztywnione przed zgi-



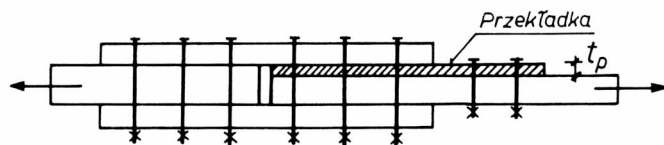
Rys. 2.10. Wykres współczynnika redukcyjnego nośności w połączeniach długich

naniem w kierunku prostopadłym do płaszczyzny styku blach, występują wtedy dodatkowe naprężenia w blachach i śrubach. Przez szereg śrub rozumie się łączniki usytuowane w linii prostopadłej do działającego obciążenia. W połączeniach *krótkich*, np. o jednym szeregu śrub (rys. 2.11a) wpływ mimośrodowego obciążenia jest szczególnie niekorzystny. Śruby w takich połączeniach są nie tylko ścinane i dociskane, ale również zginane i rozciągane. Nośność takich połączeń jest mniejsza niż w przypadku osiowych połączeń ze śrubami dwuciętymi. W dłuższych połączeniach (z większą liczbą łączników w kierunku działającego obciążenia) mimośrodowe konstrukcyjne w połączeniach jednociętych nie mają tak istotnego znaczenia.



Rys. 2.11. Przykłady mimośrodowych połączeń zakładkowych

Nośność na docisk śrub S_{Rb} w połączeniach na jeden szereg łączników, obciążonych prostopadłe do tego szeregu, należy według Eurokodu 3 [51] zredukować, przyjmując we wzorze (2.12) współczynnik $\eta_1 = 0,6$, ze względu na zginanie trzpienia i odginanie brzegów blach. Aby uniknąć zniszczenia wskutek przeciągania śruby przez blachę należy, według [51], stosować obustronnie: pod łbem i pod nakrętką podkładki. Norma niemiecka [50] nakazuje w takich razach zmniejszyć nośność śrub o 16,7% i zwiększyć odległość śrub: od brzoza elementu rozciąganego w kierunku obciążenia do $a_1 = 2,0d_L$ i w kierunku prostopadłym (od brzoza bocznego) $a_2 = 1,5d_L$ (gdzie d_L – średnica otworu na śrubę w łączonej blasze).



Rys. 2.12. Połączenie zakładkowe z przekładką

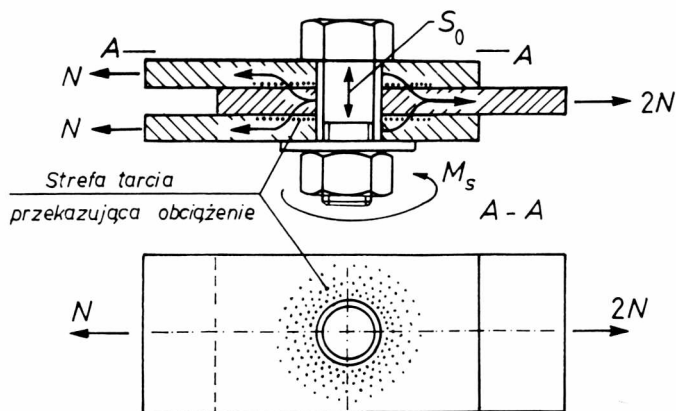
W Eurokodzie 3 [51] omówiono również zagadnienie projektowania złączy z przekładkami (elementami *wypełniającymi styk*) o konstrukcji pokazanej na rys. 2.12. Jeśli śruby w połączeniu typu dociskowego przechodzą przez przekładki o łącznej grubości $t_p > d/3$ (gdzie d – średnica trzpienia śruby), to nośność obliczeniową śruby S_{Rv} należy zredukować, mnożąc ją przez współczynnik redukcyjny η_2 , określony wzorem

$$\eta_2 = \frac{9d}{8d + 3t_p} \leq 1. \quad (2.13)$$

Ewentualne dodatkowe łączniki (rys. 2.12), wymagane w związku z zastosowaniem współczynnika redukcyjnego η_2 , mogą być w razie potrzeby umieszczone w strefie przedłużenia przekładek.

2.3. Nośność graniczna śrubowych sprężonych połączeń zakładkowych

W zakładkowych połączeniach sprężonych (ciernych) główna składowa obciążenia, prostopadła do osi śrub, jest przenoszona przez tarcie docięśniętych do siebie płaskich powierzchni łączonych elementów. W takim połączeniu (rys. 2.13), siła podłużna z jednej blachy na drugą jest więc przenoszona przez tarcie statyczne.



Rys. 2.13. Schemat wyważenia sprężonego połączenia zakładkowego [33]

Potrzebną siłę docisku (sprężenia) w połączeniu uzyskuje się przez odpowiednie, kontrolowane dokręcenie nakrętek śrub o wysokiej wytrzymałości

(śrub sprężających). Poślizg złącza jest więc powstrzymywany przez tarcie uzyskiwane dzięki naciągowi śruby o wysokiej wytrzymałości, wskutek którego w płaszczyznach styku blach, między blachami a łbem i nakrętką śrub jest wprowadzony docisk. W związku z tym śruba sprężająca jest wyłożona przede wszystkim przez osiowe rozciąganie, a wartość siły sprężającej S_0 w łączniku bezpośrednio wpływa na docisk łączonych elementów i wartość siły tarcia. W takim połączeniu unika się bezpośredniego kontaktu śrub ze ściankami otworów, gdyż występują luzy wskutek istnienia otworów o większych średnicach niż średnice trzpieni, a występujące tarcie w złączu uniemożliwia przemieszczanie się łączonych elementów.

Siły tarcia, które przekazują obciążenie z jednej blachy na drugą zależą nie tylko od sił dociskających (sprężających) łączone blachy do siebie, ale również od współczynnika tarcia μ między łączonymi elementami. Współczynnik tarcia μ zależy do rodzaju obróbki (przygotowania) powierzchni łączonych elementów. Wielkości współczynników tarcia według [60] zestawiono w tabl. 2.2.

Tablica 2.2.

Współczynniki tarcia μ według [60]

Rodzaj i sposób przygotowania powierzchni ¹		μ
Nie malowana ²	Powierzchnia bez specjalnego przygotowania, nie zaoliwiona	0,20
	Oczyszczenie ręczne szczotką drucianą, z usunięciem zendry i rdzy	0,30
	Opalenie płomieniem acetylenowo-tlenowym	0,40
	Śrutowanie lub piaskowanie	0,45
Malowana natryskowo (po śrutowaniu lub piaskowaniu)	Powłoka krzemianowo-cynkowa, alkaliczna o grubości od 60 do 80 μm	0,20
	Powłoka krzemianowo-cynkowa <i>Korsil</i> o grubości od 60 do 80 μm	0,45 ³
Metalizowana (po śrutowaniu lub piaskowaniu)	Cynkowanie ogniowe	0,10 (0,30) ⁴
	Natrysk cynku o grubości od 50 do 70 μm	0,25 (0,40) ⁴
	Natrysk aluminium o grubości $\geq 50 \mu\text{m}$	0,50
¹ W połączeniach, które wymagają specjalnych zabiegów wykonawczych, warunki techniczne ich wykonania i odbioru powinny być uzgodnione z wykonawcą. W uzasadnionych przypadkach zaleca się eksperymentalną weryfikację skuteczności metod wykonawczych na budowie. ² Wykonanie połączenia bezpośrednio po przygotowaniu powierzchni. ³ Malowane pędzlem $\mu = 0,40$. ⁴ Gdy obciążenie działa statycznie, można wtedy przyjmować wartości podane w nawiasach.		

W celu uzyskania dostatecznego tarcia między łączonymi elementami ich powierzchnie powinny być oczyszczone z tłuszczu, smaru, zgorzeliny walcowniczej, a także z rdzy i powłok malarskich, aby uzyskać powierzchnię czystego metalu. Stosuje się następujące sposoby przygotowania powierzchni elementów sprężanych:

- przez śrutowanie lub piaskowanie pod ciśnieniem,
- przez opalanie w temperaturze do 200°C i usuwanie zgorzeliny,
- przez malowanie powłokami krzemowo-cynkowymi,
- przez czyszczenie chemiczne (zmywanie rozpuszczalnikami).

Przez wprowadzenie naciągu śruby powoduje się jej rozciąganie i jednocześnie dociśnięcie stykających się powierzchni łączonych elementów. Naciąg śrub w złączu sprężanym uzyskuje się przez obrót nakrętki. Jest więc oczywiste, że takie połączenie ma dużą nośność tylko wtedy, gdy zastosuje się śruby o wysokiej wytrzymałości. W sprężanych połączeniach zakładkowych należy stosować śruby klasy 8.8, 10.9 lub 12.9, których parametry wytrzymałościowe według [60] podano w tabl. 1.2.

Wartość docisku, jaką może wywołać jedna śruba, wyznacza się z warunku nośności śruby na rozciąganie. Nośność obliczeniową śruby na rozciąganie (z uwagi na zerwanie trzpienia) według [60] wyznacza się ze wzoru

$$S_{Rt} = \min(0,65 R_m A_s; 0,85 R_e A_s), \quad (2.14)$$

gdzie: R_m – wytrzymałość na rozciąganie materiału śrub (tabl. 1.2),

R_e – granica plastyczności materiału śrub (tabl. 1.2),

A_s – pole przekroju czynnego rdzenia śruby (tabl. 2.3).

Nośność obliczeniową S_{Rt} śrub na rozciąganie podano w tabl. 2.3.

Tablica 2.3.

Nośność obliczeniowa śrub na rozciąganie według [60]

S_{Rt} [kN]											
Oznaczenie śrub	Pole rdzenia śruby A_s [mm ²]	Klasa śrub (nakrętek)									
		3.6 (4)	4.6 (4)	4.8 (4)	5.6 (4)	5.8 (5)	6.6 (5)	6.8 (8)	8.8 (8)	10.9 (10)	12.9 (12)
M10	58,0	9,4	11,8	15,9	14,8	19,6	17,7	22,7	30,2	39,2	46,1
M12	84,3	13,6	17,2	23,0	21,5	28,5	25,8	32,9	43,8	57,0	67,0
M16	157	25,3	32,0	42,8	40,0	53,0	48,1	61,1	81,3	106	125
M20	245	39,6	50,0	67,0	62,5	82,6	75,0	95,6	132	166	196
M24	353	57,0	72,1	96,2	90,0	120	108	138	190	239	280
M30	561	90,6	114	153	143	190	172	219	303	379	445

Wstępny naciąg śrub, dokonywany w celu sprężenia połączenia zakładkowego, uzyskuje się przez dokręcenie nakrętek śrub do określonej wartości momentu dokręcającego, zapewniającego wymaganą siłę sprężenia S_0 . Zarówno według normy [60], jak i Eurokodu 3 [51] wstępny naciąg śrub w sprężonym połączeniu wynosi

$$S_0 = 0,7 R_m A_s. \quad (2.15)$$

Przyjęcie współczynnika 0,7 we wzorze (2.15) wynika z tego, iż trzpień śruby jest nie tylko rozciągany, ale i skręcany w wyniku tarcia pomiędzy

gwintem śruby a nakrętką (zmniejszenie nośności o około 15%), a także z uwzględnienia losowego rozrzutu wielkości realizowanego sprężenia. Zagadnienie to szerzej omówiono w pracy [14].

W połączeniach sprężonych obliczeniowa śruby na rozciąganie S_{Rt} jest mniejsza od siły wstępnego sprężenia S_0 (2.15), gdyż wpływ na bezpieczeństwo śruby w połączeniu ma najniższa wartość siły sprężającej S_0 , po uwzględnieniu relaksacji naprężeń w złączu.

Stan graniczny zakładkowego połączenia ciernego objawia się poślizgiem, tj. wzajemnym przemieszczeniem łączonych elementów w złączu (pokonane zostaje tarcie między łączonymi częściami styku).

Nośność obliczeniową śruby w zakładkowym połączeniu ciernym, ze względu na poślizg styku sprężonego według [60] należy obliczać ze wzoru

$$S_{Rs} = \alpha_s \mu (S_{Rt} - S_t) m, \quad (2.16)$$

gdzie: α_s — współczynnik zależny od rodzaju otworów w połączeniu,

μ — współczynnik tarcia zależny do rodzaju i sposobu przygotowania powierzchni styku, którego wartość można przyjmować z tabl. 2.2 lub wyznaczyć doświadczalnie,

m — liczba płaszczyzn tarcia,

S_t — ewentualna siła rozciągająca śrubę w połączeniu, która spełnia warunek $S_t < 0,7S_0$ (S_0 — siła sprężająca wg (2.15)).

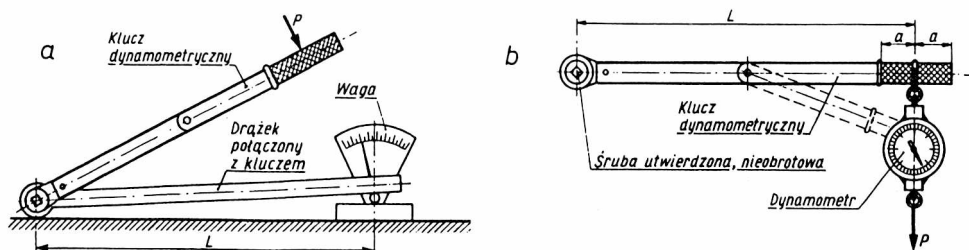
Stosowanie otworów okrągłych powiększonych lub owalnych w sprężonym połączeniu ciernym powoduje redukcję nośności obliczeniowej śrub S_{Rs} z uwagi na poślizg styku. We wzorze określającym nośność połączenia sprężonego (2.16) wpływ kształtu otworów na śruby uwzględnia współczynnik redukcyjny α_s , który wynosi

$\alpha_s = 0,70$ — otwory owalne długie, równoległe do kierunku obciążenia,

$\alpha_s = 0,85$ — otwory okrągłe powiększone lub owalne krótkie,

$\alpha_s = 1,00$ — otwory okrągłe do zakładania śrub pasowanych lub średnio-dokładnych.

Zabieg kontrolowanego dokręcania nakrętek śrub jest dokonywany kluczem dynamometrycznym, umożliwiającym pomiar momentu M_s dokręcenia (sprężenia). Przed przystąpieniem do montażu złączy sprężanych należy sprawdzić ustawioną na kluczu wartość momentu dokręcenia za pomocą specjalnego przyrządu lub w sposób uproszczony pokazany na rys. 2.14a (z użyciem wagi) lub na rys. 2.14b (z zastosowaniem dynamometru).



Rys. 2.14. Schematy uproszczonych metod sprawdzania kluczy dynamometrycznych [44]

W zależności od rodzaju stosowanego klucza dynamometrycznego osiągnięcie zamierzonego dokręcenia śruby jest sygnalizowane w różny sposób. Gdy jest stosowany klucz ręczny, następuje wówczas jego *złamanie się* w przegubie (rys. 2.14b), sygnalizacja wskutek trzasku metalicznego lub zachodzi konieczność odczytu wskaźnika zegarowego. W kluczu udarowym wyłączanie jest automatyczne. Jeśli jest stosowany klucz hydrauliczny lub pneumatyczny, to wartość momentu dokręcenia jest odczytywana na manometrze.

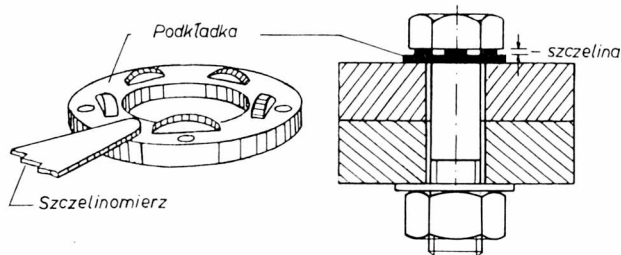
Sprężanie połączenia należy wykonywać w dwóch fazach. W pierwszej fazie – wprowadza się moment o wartości od 55% do 75% wartości obliczeniowej, w drugiej zaś napina się trzpienie śrub do pełnej projektowanej wartości. Technologię sprężania połączeń omówiono obszernie w wytycznych projektowania i odbioru połączeń ciernych [45], a także w rozdz. 4.

Potrzebny moment M_s do sprężenia śruby, o średnicy d , siłą sprężającą S_0 można oszacować ze wzoru

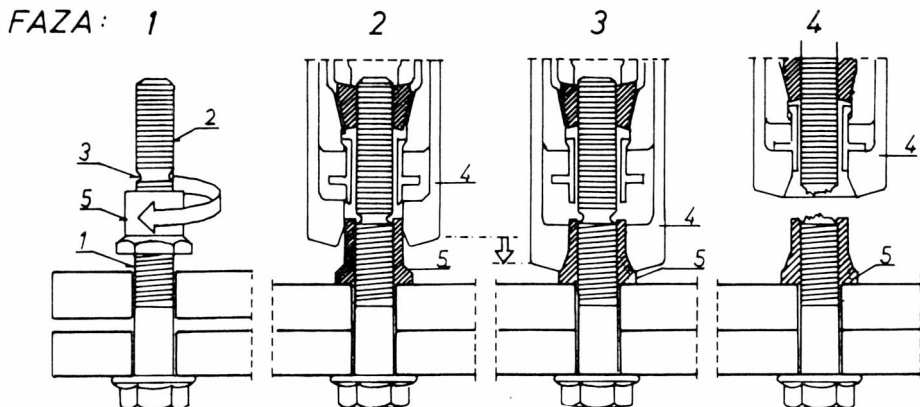
$$M_s = 0,18dS_0. \quad (2.17)$$

Współczynnik liczbowy 0,18 we wzorze (2.17) dotyczy śrub sprężających o gwincie metrycznym.

W Wielkiej Brytanii [33] są produkowane specjalne podkładki (rys. 2.15) do śrub sprężających, umożliwiające łatwą kontrolę naciągu łącznika. Podczas dokręcania nakrętki wystające zgrubienia podkładki wgniatają się w gładką powierzchnię pod łbem śruby. Potrzebną siłę sprężenia określa się przez pomiar szczelinomierzem wielkości szczeliny między łbem śruby a podkładką.



Rys. 2.15. Podkładka pod śruby sprężające umożliwiającą kontrolę sprężenia [33]



Rys. 2.16. Patentowa śruba sprężająca huck-fit [25]

Są również stosowane łączniki patentowe [25] umożliwiające szybkie i pewne wykonanie połączeń sprężających, o konstrukcji pokazanej na rys. 2.16. Trzpień takich śrub, nagwintowany na dwóch odcinkach (1) i (2) jest oddzielony przewężeniem (3), zrywa się w chwili osiągnięcia wymaganej siły sprężającej w śrubie podczas dokręcania nakrętki (5) lub zaciskania za pomocą specjalnego pistoletu (4), pneumatycznego lub hydraulicznego.

2.4. Obliczanie śrubowych połączeń zakładkowych

Norma [60] wyróżnia 6 kategorii połączeń śrubowych, przy czym kategorie A, B i C dotyczą połączeń zakładkowych (w których obciążenie działa prostopadle do osi śrub), kategorie D, E i F odnoszą się do połączeń doczołowych (w których obciążenie działa równolegle do osi łączników). Śrubowe połączenia zakładkowe należy projektować stosownie do jednej z trzech kategorii, których kryteria obliczeniowe zestawiono w tabl. 2.4.

Tablica 2.4.

Kryteria oceny stanów granicznych nośności i użytkowania
śrubowych połączeń zakładkowych według [60]

Kategoria połączenia	Warunki stanu granicznego	Uwagi
A	$S_{ob} < \min(S_{Rv}; S_{Rb}; 0,5S_{Rs})$	Można stosować wszystkie klasy śrub od 3.6 do 12.9. Sprężanie połączeń nie jest wymagane. Możliwe jest częściowe sprężanie złącza siłą $0,5 S_0$.
B	$S_{ob} < \min(S_{Rv}; S_{Rb})$ $S_{ch} < S_{Rs}$	Należy stosować śruby klasy 8.8, 10.9 i 12.9. Połączenie powinno być sprężone siłą S_0 . Jest wymagana odporność złącza na poślizg w stanie granicznym użytkowania.
C	$S_{ob} < S_{Rs}$	Należy stosować śruby i sprężanie jak w połączeniach kategorii B. Jest wymagana odporność złącza na poślizg w stanie granicznym nośności.
S_{ob}, S_{ch} – siła wypadkowa przypadająca na jedną śrubę w połączeniu, obliczona dla obciążeń obliczeniowych (ob) i charakterystycznych (ch), S_{Rv}, S_{Rb}, S_{Rs} – nośność obliczeniowa śrub na ścinanie (2.10), docisk (2.6) oraz z warunku poślizgu (2.16) złącza, S_0 – siła wstępnego sprężania według (2.15).		

Śrubowe połączenia zakładkowe kategorii A dotyczą złączy, których nośność jest uwarunkowana nośnością na docisk, nośnością na ścinanie łączników w połączeniach niesprężanych lub nośnością z warunku poślizgu dla styków sprężanych. W połączeniach tej kategorii można stosować śruby zwykle (ze stali niestopowej) lub śruby o wysokiej wytrzymałości (czyli można stosować śruby wszystkich klas od 3.6 do 12.9). Stosując śruby o wysokiej

wytrzymałości (klasy 8.8, 10.9 i 12.9) można projektować je jako sprężone siłą równą $0,5S_0$. W zakładkowych połączeniach śrubowych kategorii A sprawdza się (według [60] oraz [51]) stan graniczny nośności

$$S_{ob} < \min(S_{Rv}; S_{Rb}; 0,5S_{Rs}), \quad (2.18)$$

gdzie: S_{ob} – siła wypadkowa przypadająca na jedną śrubę w połączeniu, obliczona dla obciążeń obliczeniowych,

S_{Rv} – nośność obliczeniowa śruby na ścinanie według (2.10),

S_{Rb} – nośność obliczeniowa śruby na docisk według (2.6),

S_{Rs} – nośność obliczeniowa śruby z warunku poślizgu według (2.16).

Oprócz stanu granicznego nośności śrub (2.18) należy sprawdzić stan graniczny nośności (rozerwanie) łączonych części w przekroju netto, ze względu na osłabienie go otworami według wzorów

$$F \leq N_{Rt}, \quad (2.19)$$

w którym: F – siła rozciągająca działająca w połączeniu,

N_{Rt} – nośność na rozciąganie przekroju osłabionego otworami;

$$N_{Rt} = A_\psi f_d, \quad (2.20)$$

gdzie: A_ψ – sprowadzone pole przekroju netto według punktu 4.1.2 normy [60],

f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali.

Śrubowe połączenia zakładkowe kategorii B dotyczą złączy sprężonych (ciernych) odpornych na poślizg w stanie granicznym użytkowania. W połączeniach tej kategorii należy stosować śruby o wysokiej wytrzymałości i kontrolowanym dokręceniu. Sprężenie śrub w połączeniu kategorii B powinno wynosić S_0 obliczone według wzoru (2.15). Obciążenie charakterystyczne w ciernym połączeniu zakładkowym kategorii B, w stanie granicznym użytkowania nie może przekraczać nośności złącza na poślizg

$$S_{ch} < S_{Rs}, \quad (2.21)$$

gdzie: S_{ch} – siła wypadkowa przypadająca na jedną śrubę w połączeniu, obliczona dla obciążeń charakterystycznych (dla współczynników obciążeń $\gamma_{fi} = 1,0$),

S_{Rs} – nośność obliczeniowa śruby z warunku poślizgu według (2.16).

Ponadto złącze takie powinno spełniać warunki wytrzymałościowe stanu granicznego nośności śrub na ścinanie lub docisk

$$S_{ob} < \min(S_{Rv}; S_{Rb}), \quad (2.22)$$

a także należy sprawdzić stan graniczny nośności łączonych elementów osłabionych otworami na śruby według (2.19).

Śrubowe połączenia zakładkowe kategorii C dotyczą złączy sprężanych (ciernych) odpornych na poślizg w stanie granicznym nośności. W połączeniach tej kategorii należy stosować śruby o wysokiej wytrzymałości i kontrolowanym dokręceniu. Obciążenie obliczeniowe w zakładkowym połączeniu sprężonym

kategori C, w stanie granicznym nośności nie może przekraczać nośności złącza na poślizg

$$S_{ob} < S_{Rs}, \quad (2.23)$$

gdzie: S_{ob} – siła wypadkowa przypadająca na jedną śrubę w połączeniu, obliczona dla obciążeń obliczeniowych,

S_{Rs} – nośność obliczeniowa śruby z warunku poślizgu według (2.16).

Śrubowe sprężone połączenia kategorii C należy więc obliczać z warunku poślizgu styku, który tutaj jest stanem granicznym nośności. Ponadto należy sprawdzić nośność elementu ze względu na osłabienie otworami według (2.19) i (2.43).

Połączenia zakładkowe kategorii A, B i C można stosować dla złączy obciążonych statycznie i nieprzemienne. W przypadku obciążeń zmiennych co do znaku jest zalecane stosowanie połączeń sprężonych ciernych lub pasowanych, a w przypadku obciążeń dynamicznych (wielokrotnie zmiennych lub uderowych) – połączeń ciernych kategorii C oraz połączeń pasowanych lub sprężanych siłami $0,5S_0$ kategorii A. Złącza kategorii B oraz C stosuje się gdy należy ograniczyć przemieszczenia styków.

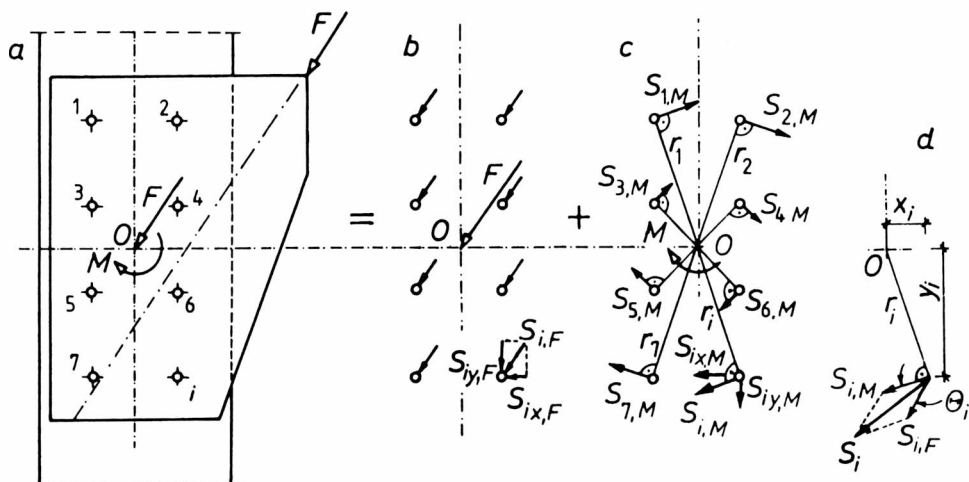
Śrubowe połączenia zakładkowe z uwagi na sposób wyężenia, możemy podzielić na złącza obciążone osiowo oraz mimośrodowo.

Przez złącza obciążone osiowo rozumie się styki śrubowe, w których wypadkowa sił wewnętrznych przechodzi przez środek ciężkości połączenia i nie występuje moment zginający w płaszczyźnie styku łączonych elementów. W mimośrodowym połączeniu zakładkowym, oprócz siły osiowej, występuje moment zginający w płaszczyźnie styku. W razie występowania momentu zginającego prostopadłego do płaszczyzny styku mamy do czynienia z połączeniem doczołowym (zagadnienie omówione w rozdziale 3).

W obliczeniach połączeń zakładkowych przyjmuje się, że obciążenie osiowe rozdziela się na poszczególne łączniki proporcjonalnie do ich nośności. Nośność osiowych połączeń zakładkowych, a także ich zdolność użytkową (dla $\gamma_{fi} = 1,0$; gdzie γ_{fi} – współczynnik obciążenia dla złączy kategorii B) należy sprawdzić ze wzoru (2.12).

Według normy [60], w odniesieniu do połączeń zakładkowych obciążonych giętnie w płaszczyźnie połączenia, moment zginający rozdziela się na poszczególne łączniki w postaci sił prostopadłych do ich ramion obrotu względem środka ciężkości łączonych elementów. Siły te są proporcjonalne do odległości łączników od środka obrotu, który można utożsamiać ze środkiem ciężkości grupy łączników przenoszących obciążenie momentem. Schemat wyężenia połączenia zakładkowego, obciążonego siłą osiową i momentem zginającym przedstawiono na rys. 2.17. Siły składowe $S_{i,M}$ w śrubach od momentu zginającego M , działającego w połączeniu (rys. 2.17c), wyznaczono zakładając, iż są one proporcjonalne do odległości r_i danego łącznika od środka obrotu wszystkich łączników. Zachodzi więc zależność

$$M = S_{1,M} r_1 + S_{2,M} r_2 + \dots + S_{n,M} r_n = \sum_{i=1}^n S_{i,M} r_i, \quad (2.24)$$



Rys. 2.17. Złącze zakładkowe obciążone momentem i siłą osiową

przy czym:

$$\frac{S_{1,M}}{S_{M,\max}} = \frac{r_1}{r_{\max}}, \quad \frac{S_{2,M}}{S_{M,\max}} = \frac{r_2}{r_{\max}}, \quad \text{itd.} \quad (2.25)$$

Największe oddziaływanie $S_{M,\max}$ będzie generowane w łączniku najbardziej oddalonym od środka obrotu O połączenia.

Po przekształceniu zależności (2.24) i (2.25) otrzymano wzór określający siłę w najbardziej obciążonej śrubie od działającego w połączeniu zakładkowym momentu zginającego M , która wynosi

$$S_{M,\max} = \frac{Mr_{\max}}{\sum_{i=1}^n r_i^2}, \quad (2.26)$$

gdzie: r_i – ramię działania siły $S_{i,M}$.

Przyjmując

$$r_i^2 = x_i^2 + y_i^2, \quad (2.27)$$

można wyznaczyć składowe sił $S_{i,M}$ (rys. 2.17 c), które wynoszą

$$S_{ix,M} = \frac{My_i}{\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2)}, \quad (2.28)$$

$$S_{iy,M} = \frac{Mx_i}{\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2)}, \quad (2.29)$$

gdzie: x_i, y_i – współrzędne łączników w połączeniu (rys. 2.17d).

Zakładając równomierny rozdział osiowej siły F na wszystkie łączniki, składowa S_{iF} , w analizowanym połączeniu (rys. 2.17b) wynosi

$$S_{i,F} = \frac{F}{n}, \quad (2.30)$$

gdzie: n – liczba łączników w połączeniu.

Stan graniczny połączenia zakładkowego obciążonego momentem zginającym M i siłą osiową F według normy [60] sprawdza się ze wzoru

$$S_i = \sqrt{(S_{i,M} + S_{i,F} \cos \theta_i)^2 + (S_{i,F} \sin \theta_i)^2} \leq S_R, \quad (2.31)$$

gdzie: S_i – siła wypadkowa (rys. 2.17d) przypadająca na i -ty łącznik, tj. suma wektora sił składowych według wzorów (2.26) i (2.30),

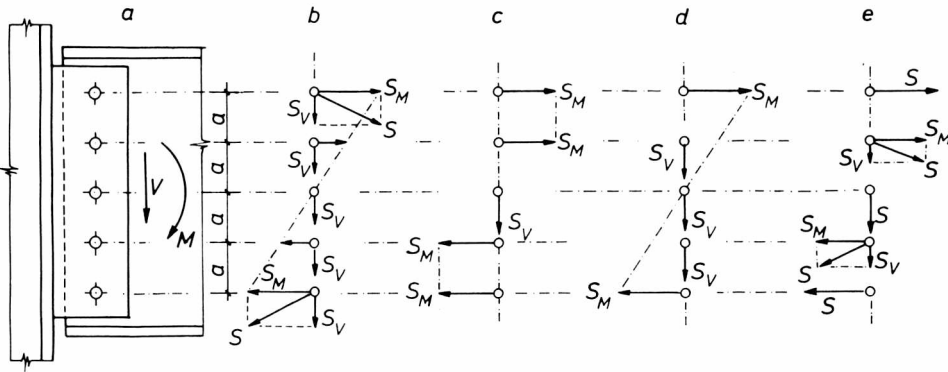
θ_i – kąt między wektorami sił składowych ($0 \leq \theta_i \leq 180^\circ$),

S_R – miarodajna nośność obliczeniowa łącznika ($\min(S_{Rv}, S_{Rb}, S_{Rs})$).

Rozkładając siły $S_{i,F}$ na składowe $S_{ix,F}$ oraz $S_{iy,F}$ i siły $S_{i,M}$ na składowe $S_{ix,M}$ oraz $S_{iy,M}$ (według (2.28) i (2.29)) – we współrzędnych prostokątnych, wypadkową obciążenia śruby S_i wyznacza się ze wzoru

$$S_i = \sqrt{(S_{ix,M} + S_{ix,F})^2 + (S_{iy,M} + S_{iy,F})^2} \leq S_R. \quad (2.32)$$

Omówiony sprężysty model rozkładu sił od działającego momentu zginającego M w połączeniu zakładkowym wg normy [60] jest w Eurokodzie 3 [51] wymagany dla połączeń ciernych kategorii C oraz w innych połączeniach, w których nośność obliczeniowa śruby na ścinanie S_{Rv} jest mniejsza niż nośność obliczeniowa na docisk S_{Rb} . W pozostałych przypadkach rozkład sił wewnętrznych może być przyjmowany według [51] jako sprężysty (jak w [60]) lub plastyczny. Przykładowe propozycje rozkładu sił na łączniki w połączeniu obciążonym giętnie i poprzecznie według [51] pokazano na rys. 2.18.



Rys. 2.18. Rozkład sił w łącznikach w zakładkowym śrubowym połączeniu belki ze słupem według [51]

Na rysunku 2.18a pokazano konstrukcję połączenia belki dwuteowej ze słupem (na 5 śrub), obciążonego momentem zginającym M i siłą poprzeczną V . Dla tak obciążonego połączenia można przyjąć sprężysty rozkład sił w łącz-

nikach, o schemacie pokazanym na rys. 2.18b, a siły w śrubach wyznaczyć ze wzorów

$$S_M = \frac{M \cdot 2a}{2(a^2 + 4a^2)} = \frac{M}{5a}, \quad (2.33)$$

$$S_V = \frac{V}{5}, \quad (2.34)$$

$$S = \sqrt{S_V^2 + S_M^2} < S_R, \quad (2.35)$$

gdzie: S_R – miarodajna nośność śruby.

Na rysunku 2.18c pokazano plastyczny rozkład sił w połączeniu, gdzie cztery śruby skrajne przejmują wyężenia od momentu zginającego M , śruba środkowa zaś przenosi obciążenie poprzeczne V . Dla takiego modelu obliczeniowego [51] i $S_{Rv} > S_{Rb}$, wyężenie łączników wynosi

$$S_M = \frac{M}{2(a + 2a)} = \frac{M}{6a} \leq S_{Rb}, \quad (2.36)$$

$$S_V = V \leq S_{Rb}. \quad (2.37)$$

Na rysunku 2.18d przedstawiono liniowy model rozdziału sił w analizowanym połączeniu zakładkowym, w którym przyjęto, iż moment zginający M równoważą dwie skrajne śruby, pozostałe zaś trzy przejmują siłę poprzeczną V . Siły w śrubach o nośnościach $S_{Rv} > S_{Rb}$ wynoszą wówczas

$$S_M = \frac{M}{2 \cdot 2a} = \frac{M}{4a} < S_{Rb}, \quad (2.38)$$

$$S_V = \frac{V}{3} < S_{Rb}. \quad (2.39)$$

W modelu obliczeniowym o schemacie rozdziału sił na łączniki przedstawionym na rys. 2.18e założono plastyczne wyężenie śrub skrajnych od momentu zginającego, śrub przedskrajnych od momentu zginającego i siły poprzecznej i śruby środkowej od siły poprzecznej. Zakładając, iż śruba środkowa przenosi części obciążenia poprzecznego o wartości S , na śruby przedskrajne przypada obciążenie poprzeczne

$$S_V = \frac{V - S}{2}. \quad (2.40)$$

Moment zginający M jest równoważony przez śruby skrajne i przedskrajne

$$M = 2 \cdot a \cdot S_M + 2 \cdot 2a \cdot S, \quad (2.41a)$$

$$S_M = \frac{M}{2a} - 2S, \quad (2.41b)$$

wyężenie śrub przedskrajnych o nośnościach $S_{Rv} > S_{Rb}$ wynosi

$$S = \sqrt{S_V^2 + S_M^2} \leq S_{Rb}. \quad (2.42)$$

Stan graniczny nośności śrubowego połączenia zakładkowego jest uwarunkowany nośnością łączników oraz rozerwaniem przekroju netto łączonych elementów w styku. Dlatego też zachodzi potrzeba sprawdzenia nośności elementu ze względu na jego osłabianie otworami (wzór (2.19)) według zasad podanych w [60].

Dla ciernych połączeń rozciąganych kategorii C można według [60] uwzględnić fakt, że część siły w takim złączu jest przenoszona przez tarcie. Przyjmuje się wówczas sprawdzając warunek (2.19) zamiast siły F , siłę zredukowaną

$$F_a = F \left(1 - \frac{n_b}{n} - 0,4 \frac{n_a}{n} \right), \quad (2.43)$$

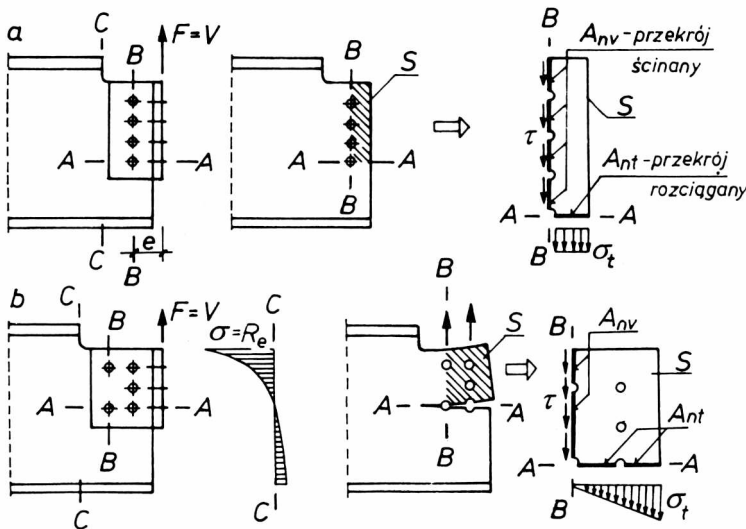
gdzie: n – liczba śrub przenoszących obciążenie F ,

n_a – liczba śrub w sprawdzanym przekroju,

n_b – liczba śrub umieszczonych przed sprawdzanym przekrojem w kierunku działania obciążenia.

Wzór (2.43) zakłada, że z elementu rozciąganego na nakładki już przed sprawdzanym przekrojem przenosi się przez tarcie 40% siły przypadającej na śruby znajdujące się w sprawdzanym przekroju.

W projektowaniu połączeń elementów rozciąganych, zginanych i ścinanych w złączach zakładkowych, osłabionych otworami na śruby należy sprawdzić wytrzymałość przekroju netto. Przykładem takiego styku jest połączenie środniczki belki z podciągim lub słupem pokazane na rys. 2.19. W osłabionym otworami



Rys. 2.19. Schemat wytrzymałości zakładowego połączenia belki ze słupem [21]

przekroju łączonego elementu, obciążonym mimośrodowo, występuje złożony stan naprężeń, wynikający z miejscowego oddziaływania łączników. Zniszczenie osłabionego otworami [21] fragmentu S środniczki rozpoczyna się od

rozerwania przekroju poziomego A—A (patrz rys. 2.19a i b) na krawędzi środka belki. Odkształcenia plastyczne, wywołane zginaniem i ścinaniem, występują w przekrojach B—B i C—C. Uplastycznienie strefy ścinanej środka powstaje również w połączeniach, w których górna półka dwuteownika nie była wycięta. Z badań doświadczalnych wynika, że w stanie granicznym następuje ścięcie przekroju B—B i rozerwanie przekroju A—A (wg oznaczeń z rys. 2.19). Zniszczeniu wskutek tzw. ścicia blokowego w strefie otworów w pobliżu końca belki, środka lub elementu wspornikowego można zapobiec przez odpowiedni rozstaw łączników. Ta forma zniszczenia obejmuje ścięciowe rozerwanie przekroju netto belki wzdłuż rozciąganego brzegu bloku oraz uplastycznienie przekroju wzdłuż ścinanego brzegu. Według normy [60] w połączeniach belek stropowych z podciągami, obciążonych siłą poprzeczną należy sprawdzić łączniki oraz przekrój środka osłabiony otworami na śruby (rys. 2.19). Powinien być spełniony następujący warunek nośności środka

$$F = V \leq F_{Rj} = f_d \left(0,6 A_{nv} + \frac{n_v}{n} A_{nt} \right), \quad (2.44)$$

gdzie: n — liczba śrub w połączeniu,
 n_v — liczba śrub w ścinanej części przekroju netto,
 A_{nv}, A_{nt} — pole ścinanej i rozciąganej części przekroju netto.

Ponadto należy sprawdzić nośność przekroju C—C na ścinanie ze zginaniem ($M_1 = V \cdot e$, gdzie e odległość między przekrojem C—C i środkiem ciężkości grupy łączników). Wzór (2.44) uwzględnia dwie formy zniszczenia zakładkowego połączenia belki obciążonej siłą poprzeczną na podporze: uplastycznienie przekroju rozciąganego i ścięcie przekroju ścinanego oraz uplastycznienie przekroju ścinanego i rozerwanie przekroju rozciąganego.

Obliczanie śrubowych połączeń zakładkowych w ujęciu [60] polega na wyznaczeniu ekstremalnych sił wewnętrznych S_{ob} lub S_{ch} przypadających na jeden łącznik i porównaniu ich z nośnością śruby S_{Ri} .

Nośności obliczeniowe S_{Rv} śrub ścinanych w jednej płaszczyźnie na odcinku niegwintowanym podano w tabl. 2.1.

Nośność obliczeniowa S_{Rb} śruby z warunku docisku do ścianki łączonego elementu zależy od rozstawu łączników a_i , wytrzymałości obliczeniowej stali łączonych elementów oraz średnicy śruby. Przyjęcie minimalnych, normowych [60] rozstawów śrub (patrz tabl. 4.2) w połączeniach zakładkowych nie jest zazwyczaj ekonomiczne, gdyż nie wykorzystuje się w pełni wytrzymałości stali łączonych elementów na docisk ($\alpha < 2,5$). W tablicy 2.5 [52] podano odległości między śrubami w połączeniach zakładkowych, umożliwiające przyjęcie we wzorze (2.6) określającym nośność obliczeniową śrub na docisk $\alpha = 2,5$ (pełne wykorzystanie nośności stali na docisk). Ponadto w tablicy 2.5, dla przyjętych rozstawów śrub w połączeniach zakładkowych, podano nośności obliczeniowe śrub na docisk $S_{Rb,1}$ do ścianki o grubości 10 mm, ze stali niestopowych, stopowych oraz trudno rdzewiejących. Korzystając z tablicy 2.5 nośności obliczeniowe śrub S_{Rb} na docisk do ścianki o grubości t (gdzie t w mm) wyznacza się ze wzoru

$$S_{Rb} = \frac{t}{10} S_{Rb,1}, \quad (2.45)$$

przy czym: wartości $S_{Rb,1}$ według tabl. 2.5.

Tablica 2.5.
Nośność obliczeniowa śrub na docisk $S_{Rb,1}$ do ścianki o grubości 10 mm dla przyjętego rozstawu śrub a_i zapewniającego $\alpha = 2,5$

Oznaczenie śrub			M12	M16	M20	M24	M27	M30
Średnice otworów na śruby d_o [mm]			13	18	22	26	30	33
Przyjęty rozstaw śrub a_i [mm]	a		40	55	70	80	90	100
	a_1		30	40	50	60	70	75
	a_2		25	30	40	50	55	60
Gatunek stali	t [mm]	f_d [MPa]	Nośność obliczeniowa śrub na docisk $S_{Rb,1}$ do ścianki o grubości $t = 10$ mm [kN]					
St0S	$t \leq 16$	175	52,5	70,0	87,5	105	118	131
	$16 < t \leq 40$	165	49,5	66,0	82,5	99,0	111	123
St3SX, St3SY, St3S, St3V, St3W	$t \leq 16$	215	64,5	86,0	107	129	145	161
	$16 < t \leq 40$	205	61,5	82,0	102	123	138	154
	$40 < t \leq 100$	195	58,5	78,0	97,5	117	132	146
St4VX, St4VY, St4V, St4W	$t \leq 16$	235	70,5	94,0	117	141	159	176
	$16 < t \leq 40$	225	67,5	90,0	112	135	152	169
18G2, 18G2A	$t \leq 16$	305	91,5	122	152	183	206	229
	$16 < t \leq 30$	295	88,5	118	147	177	199	221
	$30 < t \leq 50$	285	85,5	114	142	171	192	213
18G2AV	$t \leq 16$	370	111	148	185	222	249	277
	$16 < t \leq 30$	360	108	144	180	216	243	270
	$30 < t \leq 50$	350	105	140	175	210	236	262
10H, 10HA, 10HNAP, 10HAV, 12HIJA, 12PJA	walcowane na zimno	275	82,5	110	137	165	186	206
		290	87,0	116	145	174	195	217
	i na gorąco	310	93,0	124	155	186	209	232
Nośność obliczeniowa śrub na docisk do ścianki o grubości t [mm] wynosi $S_{Rb} = \frac{t}{10} S_{Rb,1}.$								

Nośności obliczeniowe śrub S_{Rs} z warunku poślizgu styku zakładkowego, dla jednej płaszczyzny tarcia ($m = 1$) i okrągłych średniokładnych otworów na łączniki podano w tabl. 2.6. W tablicy 2.6 nośności S_{Rs} śrub klasy 8.8, 10.9 i 12.9 podano dla współczynników tarcia $\mu = 0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,45$ i $0,50$. Ponadto w tablicy tej podano siłę wstępnego naciągu (sprężenia) śrub S_0 oraz moment sprężający śruby M_s , obliczony według (2.17).

Tablica 2.6.

Nośności obliczeniowe z warunku poślizgu S_{Rs} śrub klasy 8.8, 10.9 i 12.9 w zakładkowych połączeniach sprężanych

S_i	Współczynnik tarcia μ	Klasa śrub	Oznaczenie śrub				
			M12	M16	M20	M24	M30
S_{R_s} [kN]	0,10	8.8	4,4	8,1	13,2	19,0	30,3
		10.9	5,7	10,6	16,6	23,9	37,9
		12.9	6,7	12,5	19,6	28,0	44,5
	0,20	8.8	8,8	16,3	26,4	38,0	60,6
		10.9	11,4	21,2	33,2	47,8	75,8
		12.9	13,4	25,0	39,2	56,0	89,0
	0,30	8.8	13,1	24,4	39,6	57,0	90,9
		10.9	17,1	31,8	49,8	71,7	114
		12.9	20,1	37,5	58,8	84,0	133
	0,40	8.8	17,5	32,5	52,8	76,0	121
		10.9	22,8	42,4	66,4	95,6	151
		12.9	26,8	50,0	78,4	112	178
	0,45	8.8	19,7	36,6	59,4	85,5	136
		10.9	25,6	47,7	74,7	107	170
		12.9	30,1	56,5	88,2	126	200
	0,50	8.8	21,9	40,6	66,0	95,0	151
		10.9	28,5	53,0	83,0	119	189
		12.9	33,5	62,5	98,0	140	222
S_{R_t} [kN]		8.8	43,8	81,3	132	190	303
		10.9	57,0	106	166	239	379
		12.9	67,0	125	196	280	445
S_0 [kN]		8.8	47,1	87,5	142	204	326
		10.9	61,3	114	178	257	408
		12.9	72,1	134	211	301	479
M_s [kNm]		8.8	0,102	0,252	0,511	0,881	1,760
		10.9	0,132	0,328	0,640	1,110	2,203
		12.9	0,156	0,386	0,760	1,300	2,587
S_{R_s} obliczono dla $\alpha_s = 1,0$ i $m = 1$; M_s wg (2.17).							

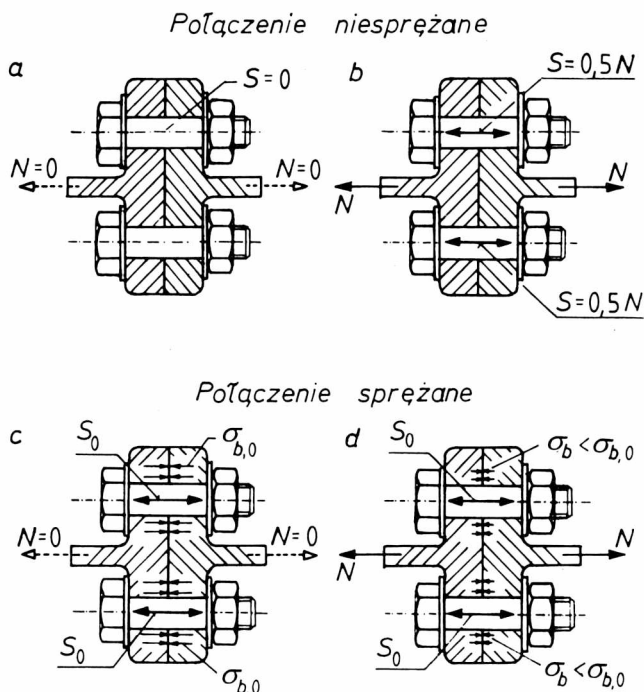
Nośności śrub na ścinanie S_{Rt} oraz z warunku poślizgu S_{Rs} dla większej ($m > 1$) liczby płaszczyzn ścinania lub poślizgu wyznacza się mnożąc wartości podane w tabl. 2.1 i 2.6 przez współczynnik m .

3. Nośność graniczna śrubowych połączeń doczołowych

3.1. Wprowadzenie

Cechą charakterystyczną śrubowych połączeń doczołowych jest wyposażenie styku łączonych elementów w blachy czołowe, prostopadłe do osi działającego obciążenia. W połączeniach doczołowych wypadkowa sił wewnętrznych w styku jest równoległa do osi łączników. W złączach takich korzysta się ze zdolności śrub do przenoszenia sił rozciągających. Śrubowe styki doczołowe mogą być niesprężane i sprężane (ze wstępnym naciąganiem śrub).

W doczołowych połączeniach niesprężanych trzpienie śrub są rozciągane po wystąpieniu obciążeń w złączy (rys. 3.1b). Przed wystąpieniem obciążenia w połączeniu trzpienie śrub nie są wyężone (patrz rys. 3.1a).



Rys. 3.1. Wyężenia śrubowych połączeń doczołowych: a, b, — niesprężanych, c, d — sprężanych; a, c — przed obciążeniem, b, d — po obciążeniu złączy

W śrubowych doczołowych połączeniach sprężanych dokonuje się wstępnego naciągu śrub w złączy, wskutek czego trzpień łącznika jest rozciągany przed wystąpieniem obciążeń w styku (rys. 3.1c). Przyłożenie obciążeń do

sprężonego styku doczołowego zmniejsza wyężenie dociskowe (rys. 3.1d) w przylegających do siebie elementach (blachach, półkach) połączenia, a siła rozciągająca w śrubie nie ulega zmianie w szerokim zakresie wyężeń styku. Połączenia doczołowe sprężone w porównaniu z połączeniami niesprężonymi charakteryzuje mały zakres zmian wyężenia śrub oraz większa sztywność złączy.

Połączenia doczołowe, z uwagi na sposób obciążenia oraz konstrukcję styku, dzieli się na proste i złożone.

Do połączeń prostych zalicza się styki, w których rozdział obciążenia na poszczególne śruby można przyjąć jako równomierny (w rzeczywistości jest w *miarę jednakowy*). Są to połączenia rozciągane osiowo, w których wszystkie śruby znajdują się w takich samych warunkach, określonych między innymi jednakowymi odlegościami śrub od brzegu elementu rozciąganego i od brzegu blachy czołowej oraz jednakowymi grubościami spoin między blachą i elementem w obszarze każdej ze śrub. Są to więc symetrycznie skonstruowane, osiowo obciążone styki śrubowe. Konstrukcję takich połączeń pokazano na rys. 3.6b.

Do połączeń złożonych zalicza się pozostałe połączenia, w których śruby są wyężone w różnym stopniu. Schematy takich połączeń pokazano na rys. 3.6a. Do takich połączeń zalicza się złącza rozciągane, skonstruowane niesymetrycznie oraz połączenia zginane (gdy moment zginający działa prostopadle do płaszczyzny styku łączonych elementów w złączy).

W doczołowych stykach śrubowych, w zależności od kategorii połączenia, można stosować śruby zarówno niższych klas niż 8.8, jak i śruby o wysokiej wytrzymałości, o jakości wykonania zgrubnego (C) i średnio dokładnego (B). Z uwagi na charakter wyężenia trzpieni śrub w połączeniach tego typu preferowane są śruby o wysokiej wytrzymałości.

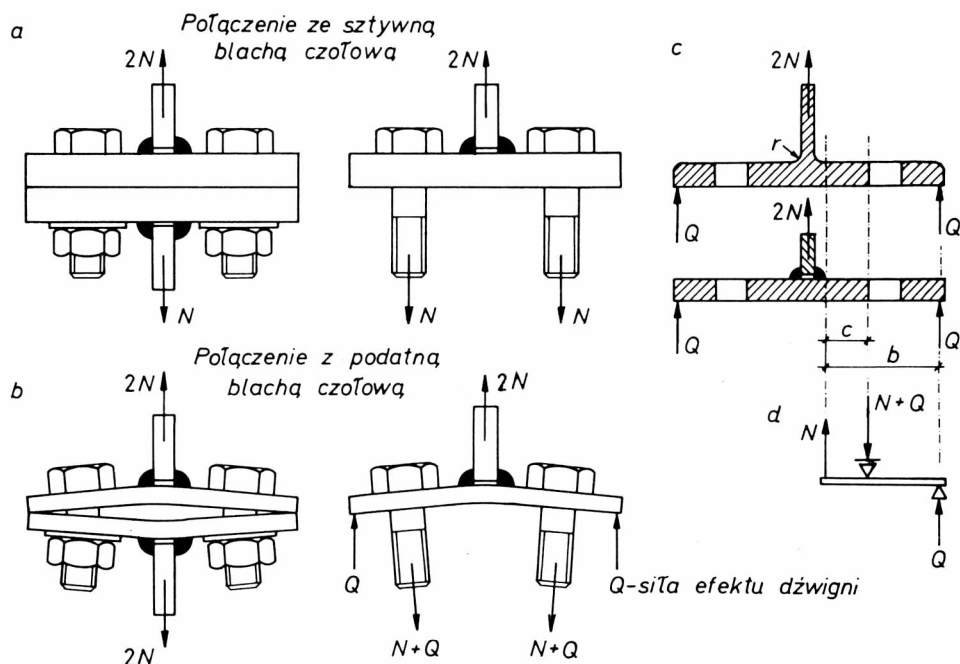
3.2. Nośność graniczna śrubowych rozciąganych niesprężonych połączeń doczołowych

W niesprężonych połączeniach prostych (rys. 3.2a), przy założeniu dostatecznej sztywności (grubości, uźebrowania) blach czołowych w styku, przyrosty sił w śrubach są proporcjonalne do przyłożonych obciążeń zewnętrznych, śruby zaś są jedynie rozciągane.

Nośność obliczeniowa śruby w takim połączeniu jest ograniczona nośnością łącznika na rozciąganie i wyznacza się ją ze wzoru (2.14). Stan graniczny nośności według [60] takiego połączenia sprowadza się do spełnienia warunku nieprzekroczenia przez siły wewnętrzne nośności śrub na rozciąganie.

Gdy blachy czołowe w doczołowych złączach prostych są stosunkowo cienkie, usztywnione tylko wzdłuż jednego brzegu, następuje wtedy wzrost sił w śrubach, spowodowany tzw. efektem dźwigni. Przyrosty sił w śrubach są wówczas większe aniżeli wynikałoby to z przyrostów obciążenia. Wyjaśnia to schemat doczołowego połączenia prostego, przedstawiony na rys. 3.2b. Efekt dźwigni w doczołowych połączeniach śrubowych wynika z występowania

w styku sił Q podważających blachę czołową w złączu. W wyniku występowania efektu dźwigni śruba o nominalnym obciążeniu N jest wyjęzona siłą $S = N + Q$. Siły Q w efekcie dźwigni są spowodowane ugięciem y blachy czołowej, a zatem ich wartość zależy od grubości blachy t , odległości c oraz h (porównaj rys. 3.2a z rys. 3.2b). Siły wywołane efektem dźwigni zależą od względnej sztywności i proporcji geometrycznych części składowych styku doczołowego i można je wyznaczyć z warunku równowagi statycznej (schemat statyczny przedstawiony na rys. 3.2d).



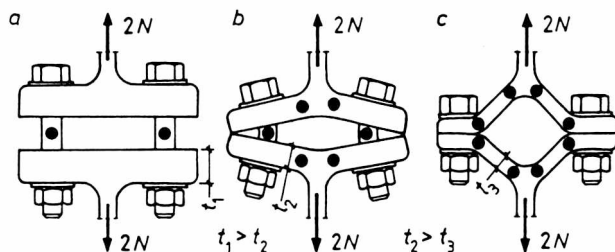
Rys. 3.2. Schemat powstawania efektu dźwigni w połączeniu doczołowym: a, b i c – konstrukcja oraz odkształcenia złącza, d – schemat statyczny wyjężenia złącza

Na rysunku 3.3. pokazano przemieszczenia oraz mechanizmy zniszczenia połączeń doczołowych o różnych proporcjach sztywności blach czołowych do wytrzymałości rozciąganych śrub (zaczepione punkty na rys. 3.3 oznaczają uplastycznienie elementów).

W połączeniu z grubymi blachami czołowymi (rys. 3.3a) następuje zerwanie śrub zanim wystąpi uplastycznienie zginanych blach czołowych. W takim przypadku efekt dźwigni nie występuje $Q = 0$.

Jeśli blachy czołowe (rys. 3.3c) analizowanego styku są bardzo cienkie, to następuje ich uplastycznienie. Ze względu na bardzo duże przemieszczenia styku oraz zginanie trzpieni śrub, połączenia takie nie powinny być projektowane.

Na rysunku 3.3b przedstawiono model wyczerpania nośności połączenia doczołowego, gdy uplastycznieniu ulegają trzpienie śrub oraz blachy czołowe. W takim modelu wyjężenia połączenia występuje efekt dźwigni.



Rys. 3.3. Mechanizmy wyczerpania nośności połączenia doczołowego

Można określić grubość blachy, która powoduje, że efekt dźwigni zanika, przyjmując jednocześnie uplastycznienie blachy czołowej i osiągnięcie w śrubach wytrzymałości na rozciąganie.

Podany w normie [60] wzór na grubość blachy czołowej w połączeniu niesprężonym został wyprowadzony dla modelu pokazanego na rys. 3.5 (uplastycznienie śrub oraz blachy czołowej na brzegu spoiny lub w wyokrąglonym narożu – w przekroju $\alpha-\alpha$), opisanego równaniem

$$cS_{Rt} = 0,25b_s t_0^2 f_d. \quad (3.1)$$

Po przekształceniu (3.1) grubość blachy czołowej t_0 wynosi

$$t_0 = 2 \sqrt{\frac{cS_{Rt}}{b_s f_d}}, \quad (3.2)$$

gdzie: S_{Rt} – nośność obliczeniowa na rozciąganie śruby osadzonej w blasze, przy czym jeśli nie jest ona całkowicie wykorzystana, to można według [60] zamiast S_{Rt} przyjmować wartość siły S_t w śrubie najbardziej wyczerpanej,

f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali blachy czołowej,

c – odległość między brzegiem otworu a spoiną lub początkiem wyokrąglenia; $c \leq d$, (rys. 3.2c oraz 3.5),

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

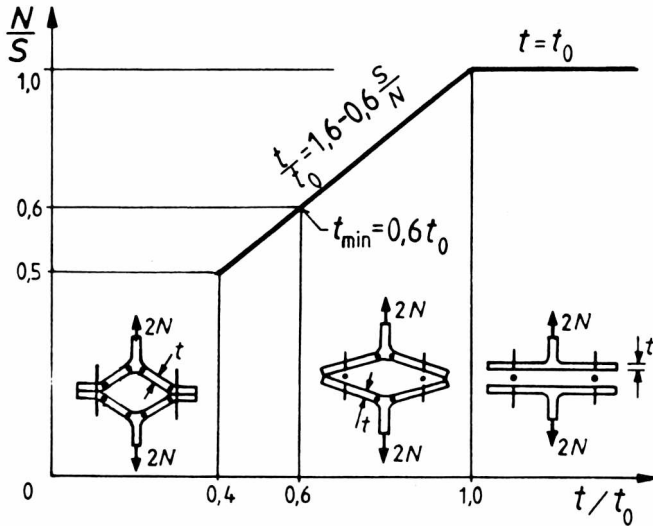
d – średnica śruby.

Na rysunku 3.4 przedstawiono zależność grubości blachy czołowej w badanym typie połączeń a formą zniszczenia na podstawie wyników badań [22]. Na osi poziomej (rys. 3.4) podano stosunek grubości blachy t do grubości t_0 według (3.2), wyznaczonej z warunku jednoczesnego uplastycznienia blachy czołowej i śruby, na osi pionowej zaś stosunek przyłożonego obciążenia rozciąganego N do siły w trzpieniu śruby, z uwzględnieniem efektu dźwigni $S = N + Q$.

Z analizy wykresu pokazanego na rys. 3.4 wynika, iż dla grubości blach $0,4 \leq t/t_0 < 1$ siła S w śrubie wywołana efektem dźwigni wynosi $2N < S < N$. Z uwagi na potrzebę ograniczenia przemieszczeń złączy, w normie [60] przyjęto najmniejszą grubość blachy czołowej w styku niesprężonym $t_{\min} = 0,6t_0$ i wynosi ona

$$t_{\min} = 1,2 \sqrt{\frac{cS_{Rt}}{b_s f_d}}. \quad (3.3)$$

We wzorze (3.3) przyjęto oznaczenia jak w (3.2).



Rys. 3.4. Wpływ grubości blach w połączeniu doczołowym na siły w śrubach

Aby efekt dźwigni był mały, należy w połączeniach doczołowych (np. w styku belek i słupów dwuteowych) rozmieszczać śruby w możliwie najmniejszych odległościach od pasów i środników (rys. 3.2). Przyjęcie minimalnych grubości blach w stykach czołowych niesprężonych według wzoru (3.3) prowadzić może do niepożądanych, nadmiernych przemieszczeń w złączu. Dlatego też dla sprężonych styków doczołowych (zagadnienie omówione w następnym punkcie) norma [60] podaje, uzyskany na podstawie wyników badań doświadczalnych, wzór określający minimalną grubość blachy czołowej w złączu obciążonym statycznie w następującej postaci

$$t_{\min} = d \sqrt[3]{\frac{R_m}{1000}}, \quad (3.4)$$

gdzie: R_m , d – jak we wzorze (2.10).

W połączeniach, w których występuje efekt zginania blach czołowych, wartość siły sprężania zmniejsza się na skutek działania obciążeń wielokrotnie zmiennych. Dlatego też według [60] w połączeniach sprężanych obciążonych dynamicznie siłami wielokrotnie zmiennymi zaleca się przyjmować większe grubości blach, tj.:

$$t \geq 1,62 t_{\min}, \text{ przy czym } t_{\min} \text{ wg wzoru (3.3)}, \quad (3.5)$$

$$t \geq 1,25 t_{\min}, \text{ przy czym } t_{\min} \text{ wg wzoru (3.4)}. \quad (3.6)$$

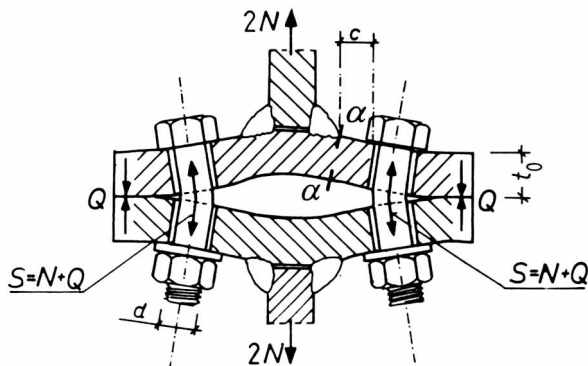
Zwiększenie grubości blach czołowych w stykach doczołowych jest zalecane również w złączach niesprężanych.

Jeżeli przyjęta grubość blachy nie spełnia warunków (3.5) i (3.6), to należy sprawdzać nośność zmęczeniową połączenia (jak w połączeniach niesprężanych) lub przyjmować jego nośność obliczeniową zredukowaną o 50%.

Wpływ efektu dźwigni występuje w połączeniach, w których blacha czołowa (lub jej segment) jest usztywniona wzdłuż tylko jednego brzegu. Efekt dźwigni w połączeniu doczołowym według normy [60] uwzględnia współczynnik efektu dźwigni β , który wyraża zwiększenie wyężenia śruby obciążonej nominalnie siłą N w wyniku działania sił *podważających* Q i wynosi on

$$\beta = \frac{N+Q}{N} = \frac{S}{N}. \quad (3.7)$$

Rzeczywiste wyężenie śruby wywołane efektem dźwigni wynosi $S > N$, śruba zaś jest nie tylko rozciągana, ale i zginana, co pokazano na rys. 3.5. Powoduje to redukcję nośności granicznej połączenia doczołowego.



Rys. 3.5. Schemat odkształcenia śrub i blach w połączeniu doczołowym

Współczynnik efektu dźwigni β podany w normie [60] na podstawie badań [22] wyznacza się ze wzoru

$$\beta = 2,67 - \frac{t}{t_{\min}} \geq 1, \quad (3.8)$$

gdzie: t – grubość blachy czołowej,

$t_{\min}$ – grubość minimalna wyznaczona wg wzoru (3.3).

W obliczeniach wpływ efektu dźwigni na redukcję nośności granicznej śrub uwzględnia się zawsze w odniesieniu do połączeń nie usztywnionych żebrami, w których blacha czołowa jest usztywniona wzdłuż tylko jednego brzegu.

Stan graniczny prostego połączenia niesprężonego objawia się zerwaniem śruby (stan graniczny nośności) lub rozwarciem styku, tj. powstaniem szczeliny między blachami czołowymi (stan graniczny użytkowania).

Nośność obliczeniowa rozciąganych siłą osiową N doczołowych połączeń niesprężonych według normy [60] sprawdza się ze wzoru

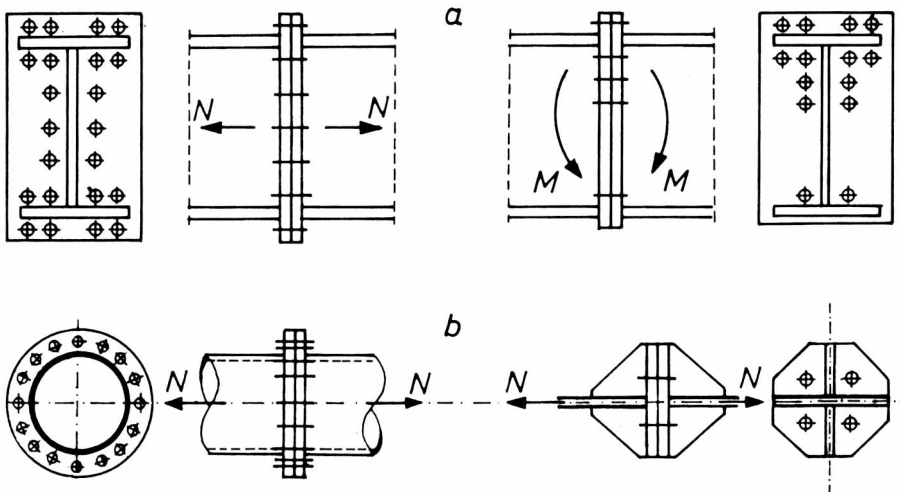
$$N \leq N_{Rj}, \quad (3.9)$$

przy czym wartość N_{Rj} dla połączeń prostych, w których rozdział sił na wszystkie śruby w złączu jest jednakowy ($\omega = 1$) oblicza się z zależności

$$N_{Rj} = \frac{1}{\beta} n S_R, \quad (3.10)$$

w której: n – liczba śrub w styku,
 β – współczynnik efektu dźwigni według wzoru (3.8),
 $S_R = S_{Rt}$ – gdy nośność połączenia jest określana z warunku zerwania śruby (S_{Rt} według (2.14)),
 $S_R = S_{Rr}$ – gdy nośność połączenia określa się z warunku rozwarcia styku doczołowego (S_{Rr} według (3.12) lub (3.13)).

Z uwagi na sposób rozdziału sił na poszczególne śruby w styku, połączenia doczołowe dzieli się na proste, w których warunki konstrukcyjne łączników oraz ich wytrzymałości są identyczne (rys. 3.6b) i złożone (rys. 3.6a).



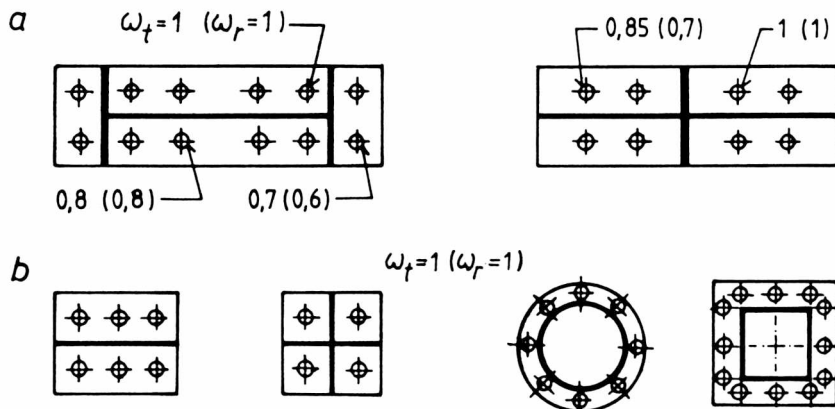
Rys. 3.6. Połączenia doczołowe: a – złożone, b – proste

W połączeniach doczołowych złożonych, o konstrukcji pokazanej na rys. 3.6a, rozdział sił na poszczególne śruby nie jest jednakowy, z uwagi na różne usytuowanie łączników względem osi działającego obciążenia, a co za tym idzie różną podatność blachy czołowej w miejscu przekazywania obciążenia. Sposób rozdziału obciążeń na poszczególne śruby w styku określają współczynniki rozdziału obciążenia ω_i . Wartości współczynników rozdziału obciążeń ω_i rozciąganych połączeń złożonych według [60] podano na rys. 3.7, przy czym ω_{ti} przyjmuje się podczas sprawdzania stanu granicznego nośności, ω_{ri} zaś sprawdzając stan graniczny użytkowania (rozwarcie styku; wartości podane w nawiasach).

Nośność obliczeniową, według normy [60], złożonych rozciąganych połączeń doczołowych wyznacza się ze wzoru

$$N_{Rj} = S_R \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (3.11)$$

w którym S_R jak we wzorze (3.10); ω_i według rys. 3.7 lub jeśli blacha czołowa jest usztywniona tylko wzdłuż jednego brzegu i występuje efekt dźwigni przyjmuje się $\omega_i \leq 1/\beta$.



Rys. 3.7. Współczynniki rozdziału wyteżeń śrub ω_i w połączeniach rozciąganych według [60]:
a — złożonych, b — prostych

Sprawdzając stan graniczny użytkowania, który objawia się rozwarciem styku, nośności śrub S_{Rr} wyznacza się według normy [60] ze wzorów:

— gdy styk jest obciążony statycznie

$$S_{Rr,s} = 0,85S_{Rt}, \quad (3.12)$$

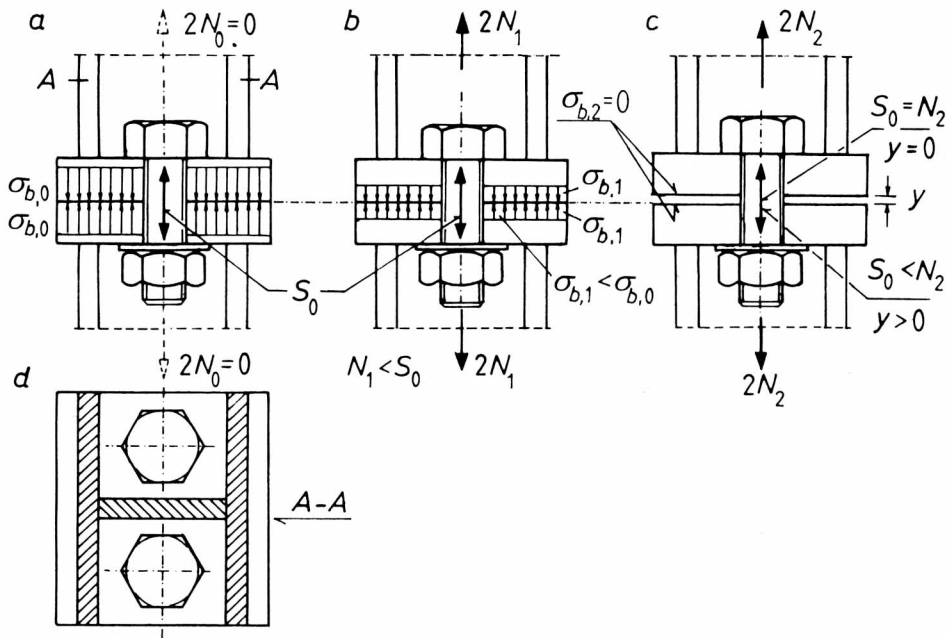
— gdy styk jest obciążony dynamicznie

$$S_{Rr,d} = 0,6S_{Rt}. \quad (3.13)$$

3.3. Nośność graniczna śrubowych rozciąganych sprężonych połączeń doczołowych

Rozpatruje się wyteżenie śrubowego połączenia doczołowego, o konstrukcji przedstawionej na rys. 3.8, w którym wprowadzono wstępny naciąg (sprężenie) trzpieni dwóch śrub, przez dokręcenie nakrętek łączników. Zakłada się, że idealnie przylegające do siebie blachy czołowe są sprężyste i odpowiednio grube, a wprowadzenie sprężenia śrub wywołuje w nich równomierne naprężenia dociskowe $\sigma_{b,0}$. W tym stanie, przed obciążeniem styku doczołowego ($2N_0 = 0$), w trzpieniach śrub sprężenie wywołało powstanie sił rozciągających S_0 , a naprężenia dociskowe $\sigma_{b,0}$ spowodowały sprężyste odkształcenie (zmniejszenie grubości) blach czołowych.

Obciążenie takiego styku doczołowego (rys. 3.8b) siłą N_1 mniejszą od wstępnego sprężenia S_0 powoduje zmniejszenie wzajemnego docisku blach czołowych $\sigma_{b,1} < \sigma_{b,0}$.



Rys. 3.8. Schemat wyłączenia doczołowego sprężonego połączenia rozciąganego

Należy zauważyć, że przyłożenie obciążenia $2N_1 < 2S_0$ w styku nie powoduje zmiany sił sprężających S_0 w trzpieniach śrub, gdyż obciążenie $2N_1$ jest równoważone przez siłę wzajemnego docisku blach, o wartości $(\sigma_{b,0} - \sigma_{b,1})A$, (gdzie A jest polem powierzchni docisku blach czołowych).

Największe obciążenie $2N_i$, które nie powoduje ani rozwarcia ($y = 0$) styku doczołowego (zaniku naprężeń dociskowych σ_b), ani zmian siły sprężającej S_0 w trzpieniu śruby wynosi $2N_i = \sigma_{b,0} A = 2S_0$.

Przyłożenie siły zewnętrznej $2N_2$, większej niż siła wzajemnego docisku blach czołowych, o wartości $\sigma_{b,0} A$ powoduje rozwarcie (powstanie szczeliny między blachami czołowymi w złączu) analizowanego styku doczołowego ($y \geq 0$). Następuje to dla obciążeń N_j większych niż siła wstępnego naciągu śrub S_0 .

Przykład analizowanego doczołowego styku pokazuje celowość wstępnego sprężania złączy. Wstępny naciąg trzpieni łączników powoduje zmniejszenie amplitudy naprężeń w śrubach, w porównaniu ze stykami niesprężonymi, gdyż zmiana sił w trzpieniach śrub następuje dla obciążeń większych od S_0 . W doczołowych stykach niesprężonych przyłożenie obciążeń N_i jest przenoszony w całości przez rozciąganie trzpieni śrub, w połączeniu sprężonym zaś w szerokim zakresie obciążeń $0 < N_i < nS_0$ nie następuje zmiana wyłączenia śrub (gdzie n – liczba śrub sprężających w złączu). Drugą istotną zaletą doczołowego styku sprężonego jest jego sztywność (mała odkształcalność), w porównaniu z niesprężonymi stykami zakładkowymi oraz doczołowymi.

W doczołowym śrubowym styku sprężonym można wyróżnić następujące stany graniczne:

- nośności, w którym naprężenia w śrubie osiągają wytrzymałość na rozciąganie,

– rozwarcia połączenia (stan graniczny użytkowania), w którym określa się najmniejsze obciążenie powodujące zanik naprężeń normalnych (dociskowych σ_b) w styku blach czołowych wokół śruby.

Stan graniczny nośności rozciąganych połączeń sprężanych sprawdza się według [60] ze wzoru (3.9). Nośność obliczeniową według [60] prostych rozciąganych doczołowych połączeń sprężonych, w których rozdział obciążeń jest jednakowy na wszystkie łączniki ($\omega_i = 1$) wyznacza się ze wzoru (3.10). Nośność obliczeniową według [60] złożonych rozciąganych doczołowych połączeń sprężonych, w których łączniki są niejednakowo wyteżone (współczynniki rozdziału obciążenia $\omega_i \leq 1$ – patrz rys. 3.7) wyznacza się ze wzoru (3.11).

Sprawdzając stan graniczny użytkowania rozciąganego, doczołowego styku sprężonego według [60], który objawia się rozwarciem styku, nośności śrub S_{Rr} wyznacza się ze wzorów (3.12) i (3.13).

Projektowanie doczołowych połączeń sprężonych ze względu na rozwarcie styku jest uzasadnione w przypadkach obciążeń dynamicznych, by zapobiec zmęczeniu stali w śrubach, oraz gdy jest wymagana duża sztywność połączeń.

Wstępny naciąg śrub S_0 (siłę sprężającą) w doczołowym połączeniu sprężonym, (taki sam jak w ciernym połączeniu zakładkowym) wyznacza się ze wzoru (2.15). Nośności obliczeniowe śrub w połączeniach sprężonych podano w tabl. 3.1.

Tablica 3.1.

Nośność obliczeniowa śrub klasy 8.8, 10.9 i 12.9 w doczołowych połączeniach sprężonych

Nośność obliczeniowa śrub S_{Ri} [kN]						
S_{Ri}	Klasa śrub	Oznaczenie śrub				
		M12	M16	M20	M24	M30
S_{Rt}	8.8	43,8	81,3	132	190	303
	10.9	57,0	106	166	239	379
	12.9	67,0	125	196	280	445
$S_{Rr,s}$	8.8	37,2	69,1	112	161	257
	10.9	48,4	90,1	141	203	322
	12.9	57,0	106	166	238	378
$S_{Rr,d}$	8.8	26,3	48,8	79,2	114	182
	10.9	34,2	63,6	99,6	143	227
	12.9	40,2	75,0	117	168	267
S_0	8.8	47,1	87,5	142	204	326
	10.9	61,3	114	178	257	408
	12.9	72,1	134	211	301	479
M_s [kNm]	8.8	0,102	0,252	0,511	0,881	1,760
	10.9	0,132	0,328	0,640	1,110	2,203
	12.9	0,156	0,386	0,760	1,300	2,587
S_{Rt} według [60], $S_{Rr,s}$ według (3.12), $S_{Rr,d}$ według (3.13), S_0 według (2.15) M_s według (2.17).						

Przedstawiony model wyteżenia doczołowego złącza śrubowego nie znajduje pełnego potwierdzenia w realizowanych wstępnie sprężonych stykach śrubo-

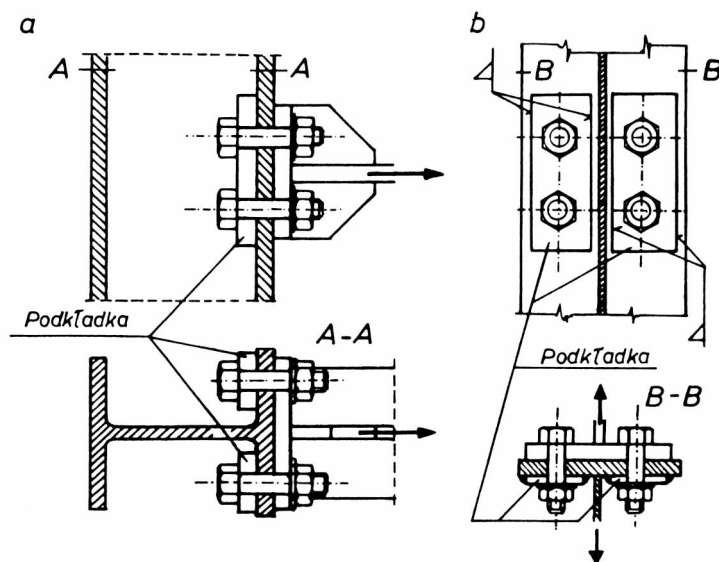
wych [3], [33]. Wynika to z podatności (odkształcalności) blach czołowych (w analizowanym modelu założono blachy grube), które powodują zginanie śrub, zwiększenie ich obciążenia (efekt dźwigni) oraz zginanie blach, zakłóceń na styku przekazywania obciążeń (założono idealne przyleganie blach), a także losowych odchyłek geometrycznych i technologicznych (naprężenia własne). Obszerne badania eksperymentalne w skali naturalnej doczołowych złączy sprężonych, prętów o przekrojach dwuteowych i krzyżowych z różną liczbą śrub w styku prowadzili J. Augustyn, J. Łaguna i Wł. Śliwka [3], [33]. Podali oni wiele praktycznych wniosków dotyczących konstruowania i obliczania takich połączeń.

Istotnym zagadnieniem w projektowaniu połączeń doczołowych sprężonych jest odpowiednia sztywność blach czołowych, która ma bezpośredni wpływ na zwiększenie wyężenia trzpieni śrub w wyniku tzw. efektu dźwigni. Zagadnienie powstawania mechanizmu efektu dźwigni, który powoduje nie tylko przyrosty siły osiowej w trzpieniu, ale i jego zginanie (patrz rys. 3.5) omówiono w poprzednim punkcie.

Zmniejszenie wpływu efektu dźwigni na dodatkowe wyężenie śrub uzyskuje się przez uźebrowanie blach czołowych, które nie zawsze jest uzasadnione ekonomicznie (ze względu na pracochłonność wykonania takich styków), a także nie zalecane w przypadku obciążeń dynamicznych złączy doczołowych. Dlatego też częściej stosuje się odpowiednio grube nieuźebrowane blachy czołowe.

Zalecaną w normie [60] minimalną grubość blachy w doczołowym śrubowym styku sprężonym wyznacza się ze wzoru (3.4) w odniesieniu do złączy obciążonych statycznie i z zależności (3.5) lub (3.6) dla styków obciążonych dynamicznie.

Zmniejszenie efektu dźwigni w nieuźebrowanych połączeniach doczołowych można uzyskać również stosując podkładki (prostokątne lub kwadratowe) pod śruby, o grubości $t = d$ (patrz rys. 3.9a) lub pogrubienie pasa przyspawaną blachą (patrz rys. 3.9b).

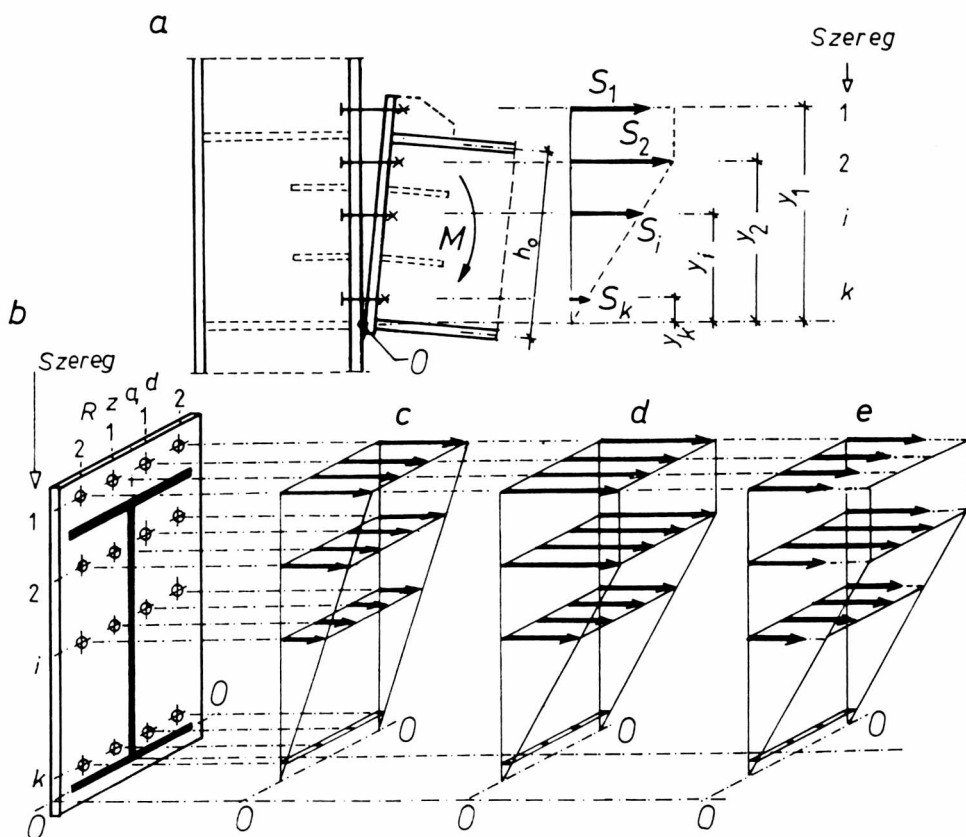


Rys. 3.9. Przykłady usztywnień podkładkami styków doczołowych

3.4. Nośność graniczna śrubowych zginanych niesprężonych połączeń doczołowych

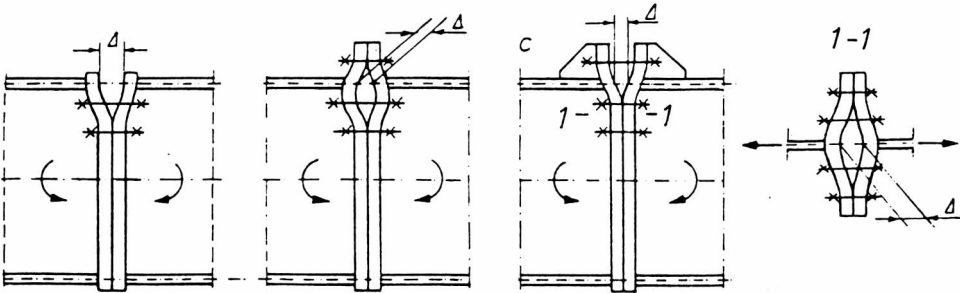
Rozpatruje się śrubowy, niesprężony styk doczołowy połączenia belki ze słupem, o konstrukcji pokazanej na rys. 3.10, zginany momentem M . Belkę wyposażono w blachę czołową (rys. 3.10b), w której usytuowano śruby w 4 rzędach i k szeregach. W styku tym, oś obrotu (oś obojętna złącza) belki względem słupa znajduje się w osi dolnego pasa ściskanego belki. Ze względu na charakter wyężenia śrub w analizowanym przypadku mamy do czynienia z połączeniem złożonym, gdyż siły w łącznikach nie są jednakowe (zwiększają się w miarę oddalania od osi obrotu belki względem słupa).

W zależności od proporcji geometrycznych: grubości blachy czołowej belki, grubości pasa słupa, usztywnienia styku żebrami, a także liczby śrub w szeregu wystąpi różny rozdział obciążeń na poszczególne śruby. Na rysunku 3.10c przedstawiono sprężysty, liniowy po wysokości rozkład sił w śrubach, zginanego sztywnego styku doczołowego. Na rysunku 3.10d pokazano sprężysto-plastyczny rozkład sił w analizowanym sztywnym (o grubych blachach czołowych) połączeniu belki ze słupem, na rys. 3.10e zaś — w złączu podatnym (o cienkich blachach czołowych).



Rys. 3.10. Schemat wyężenia doczołowego, niesprężonego styku zginanego

Rozdział obciążenia na poszczególne śruby w złożonych zginanych połączeniach doczołowych zależy od obciążenia i od podatności blach (czołowych, pasów słupów) w miejscach osadzenia śrub (rys. 3.11), co w obliczeniach według [60] uwzględniają współczynniki ω_i .



Rys. 3.11. Odształcenia zginanego styku doczołowego

Współczynniki rozdziału obciążenia ω_i służą do określenia udziału poszczególnych śrub w przenoszeniu obciążenia zewnętrznego. Współczynniki te można określić doświadczalnie jako stosunek siły rzeczywistej w śrubie do siły wynikającej ze schematu obliczeniowego w rozpatrywanym stanie granicznym. Normowe modele obliczeniowe zginanych połączeń doczołowych są skorygowanymi doświadczalnie modelami teoretycznymi. Ustalone doświadczalnie [34] współczynniki rozdziału obciążenia ω_i (współczynniki korekcyjne) można zdefiniować jako stosunek siły w łączniku w punkcie i , do największej siły w połączeniu.

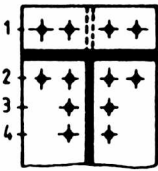
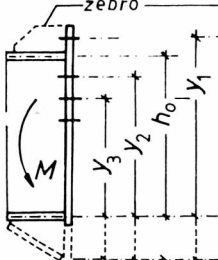
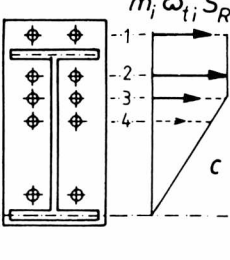
Współczynniki rozdziału obciążenia ω_i , dla niektórych doczołowych połączeń zginanych (uzyskane doświadczalnie [3], [34]) podane w normie [60] zamieszczono w tabl. 3.2.

W obliczeniach zginanych połączeń złożonych pomija się zawsze wpływ efektu dźwigni poza przypadkiem, gdy w połączeniu zginanym występuje tylko zewnętrzny szereg śrub (Nr 1 na rysunku w tabl. 3.2) i nie stosuje się dodatkowych żeber, to należy przyjmować $\omega = 1/\beta$ (β – współczynnik efektu dźwigni).

Podane w tablicy 3.2 normowe [60] współczynniki rozdziału obciążeń w styku doczołowym służą do uproszczonego obliczania połączeń w stanie granicznym nośności (ω_{ni}) i użytkowania (ω_{ri}). W tablicy 3.2 wartości ω_{ri} do sprawdzania stanu granicznego użytkowania podano w nawiasach. Z analizy tablicy 3.2 wynika, iż norma [60] podaje oddzielnie wartości współczynników do sprawdzania stanu granicznego nośności i sprawdzania stanu granicznego użytkowania, uzależniając je ponadto od rozwiązań konstrukcyjnych styków (uzębowań). Na rysunku w tablicy 3.2 linią przerywaną oznaczono sposób zwiększenia ramienia sił wewnętrznych y_i w styku przez dodanie trzeciego pasa. Sposób korzystania z tabl. 3.2 zaprezentowano w tabl. 3.3. W tablicy 3.3 pokazano schematy rozdziału sił wewnętrznych w doczołowych połączeniach zginanych przyjmowane do sprawdzania stanu granicznego nośności i użytkowania według [60]. Dla 3 charakterystycznych rozwiązań konstrukcyjnych takich połączeń (z blachą czołową o wymiarach przekroju belki, z blachą

Tablica 3.2.

Współczynniki rozdziału obciążeń w doczołowych stykach zginanych według [60]

Średnica śrub		M20, M24		M20		M24	
Liczba śrub m_i w i -tym szeregu	m_1	2	—	4	—	4	—
	m_2	2	2	4	4	4	4
	m_3	2	2	2	2	2	2
	m_4	—	2	—	2	—	2
Schemat rozmieszczenia śrub	Nr szeregu i	Współczynniki rozdziału obciążenia w połączeniach zginanych $\omega_{ri}(\omega_{ri})^1$					
	1	0,8 ^{2,4} (0,7)	—	0,7 ²	—	0,7	—
	2	1	1(0,9)	0,9	0,9	0,8	0,8
	3	0,8	0,8 (0,6)	0,8 (0,8)	0,8 (0,6)	0,8	0,8 (0,6)
	4 ³	—	0,6	—	0,6	—	0,6
¹ Jeśli nie podano wartości w nawiasach, to należy przyjmować:		$\omega_{ri} = \omega_{ti}$		$\omega_{ri} = \omega_{ti} - 0,1$			
² W przypadku usztywnienia blachy żebrą można przyjmować wartości większe o 0,1.							
³ Jeśli w połączeniu występuje zewnętrzny szereg śrub nr 1, a nie stosuje się dodatkowych żeber to śrub w szeregu nr 4 nie uwzględnia się przy zginaniu.							
⁴ Jeśli występuje tylko zewnętrzny szereg śrub, to w razie braku żeber należy przyjmować $\omega = 1/\beta$							
Stan graniczny użytkowania				Stan graniczny nośności			
							

czołową przedłużoną oraz blachą czołową przedłużoną usztywnioną żebrą) i śrubach rozmieszczonych w 2 rzędach oraz 3 i 4 szeregach w tablicy tej pokazano normowe [60] schematy obliczeniowe zginanych styków.

Nośność zginanych połączeń doczołowych zależy głównie od nośności śrub usytuowanych w szeregach położonych najbliżej pasa rozciąganego belki. W obliczeniach połączeń doczołowych według [60] uwzględnia się co najwyżej trzy szeregi śrub ($k \leq 3$, gdzie k — liczba szeregów) z jednoczesnym spełnieniem warunku $y_i \geq 0,6h_0$, gdzie y_i — ramię działania sił w śrubach (odległość osi śrub i -tego szeregu od osi pasa ściskanego), oraz h_0 — osiowy rozstaw pasów. Przyjęte oznaczenia geometryczne pokazano na rys. 3.10 oraz w tabl. 3.2.

Przyjęty normowy [60] rozdział sił wewnętrznych w łącznikach będzie realizowany w złączu doczołowym, gdy sztywności blach czołowych połą-

Tablica 3.3.

Rozkłady sił wewnętrznych w połączeniach zginanych według [60]

TYP	SCHEMAT POŁĄCZENIA	SCHEMATY ROZKŁADU SIŁ DLA STANU		
		ROZWARCIA		NOŚNOŚCI
		$h_0 \leq 400 \text{ mm}$	$h_0 > 400 \text{ mm}^1$	
A	 $y_i \geq 0,6 h_0$			
B	 $y_i \geq 0,6 h_0$			
C	 $y_i \geq 0,6 h_0$			

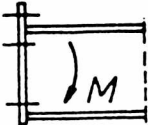
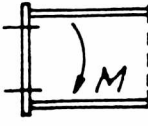
¹ Także dla smukłości środnika (h_w/t_w) większej niż $140\sqrt{215/f_d}$.

czenia są adekwatne do przyjętego modelu obliczeniowego. Zagadnienie doboru grubości blach czołowych w analizowanym typie złączy omówiono w rozdziale 3.2. W tablicy 3.4 [27] podano zalecane grubości blach czołowych oraz najmniejsze grubości pasów słupów w zginanych połączeniach doczołowych.

Stanem granicznym nośności zginanego połączenia doczołowego jest zerwanie najbardziej wyężonej śruby w połączeniu, a stanem granicznym użytkowania w połączeniach kategorii E – rozwarcie styku (zanik naprężeń docisku między blachami czołowymi) wokół najbardziej wyężonej śruby w styku.

Tablica 3.4.

Zalecane grubości blach czołowych belek oraz grubości pasów słupów w zginanych obciążonych statycznie stykach doczołowych na śruby klasy 10.9¹ [27]

Schemat blachy czołowej	Liczba śrub w szeregu k_m	Zalecana grubość blachy czołowej t	Najmniejsza grubość pasa słupa ² min t_f	
			z żebrami	bez żeber
	2	$1,0d$	$0,8d$	$1,1d$
	4	$1,25d^3$	$1,0d$	$1,4d$
	2	$1,5d$	$0,8d$	$1,0d$
	4	$1,7d$	$1,0d$	$1,3d$

¹ Gdy odległość śrub $c \leq 1,0d$ od usztywnionej krawędzi, dla śrub innych klas niż 10.9

$$t' = \sqrt[3]{\frac{R_m}{1000}}$$

² Gdy $t_f < \min t_f$ należy wówczas stosować dodatkowo podkładki pod śruby o grubości d .

³ Gdy blacha czołowa jest usztywniona żebrami, można wtedy przyjąć $t = d$.

Warunek równowagi sił w doczołowym styku zginanym momentem M ma następującą postać

$$M = \sum_i S_i y_i, \quad (3.14)$$

gdzie: S_i — siła w i -tej śrubie,

y_i — ramię działania siły i -tej śruby względem osi obrotu połączenia.

Uwzględniając liczbę szeregów k oraz rzędów śrub p (rys. 3.10) i współczynniki rozdziału sił ω_i w połączeniu według rysunku c w tabl. 3.2, wzór (3.14) przybiera następującą postać

$$M_{Rj} = S_{Rt} \sum_{i=p}^{p+k-1} m_i \omega_{ti} y_i. \quad (3.15)$$

Wzór (3.15) jest normową [60] obliczeniową nośnością graniczną zginanego połączenia doczołowego z warunku zerwania śrub. Do sprawdzenia stanu granicznego nośności należy stosować rozkład sił wewnętrznych (współczynniki ω_{ti}) według rysunku c w tabl. 3.2.

Normową obliczeniową nośność graniczną, ze względu na rozwarcie styku sprawdza się według [60] ze wzorów:

— dla połączeń z żebrami usztywniającym blachę czołową (trójkątny rozkład sił, licząc od pierwszego szeregu; rysunek a w tabl. 3.2)

$$M_{Rj} = S_{Rr} \sum_{i=p}^{p+k-1} m_i \omega_{ri} \frac{y_i^2}{y_{\max}}, \quad (3.16)$$

– dla połączeń bez żebra usztywniającego blachę czołową (trójkątny rozkład sił, licząc od drugiego szeregu; rysunek b w tabl. 3.2)

$$M_{Rj} = S_{Rr} \left(m_1 \omega_{r1} y_1 + \sum_{i=2}^k m_i \omega_{ri} \frac{y_i^2}{y_2} \right). \quad (3.17)$$

We wzorach (3.15)–(3.17) przyjęto następujące oznaczenia:

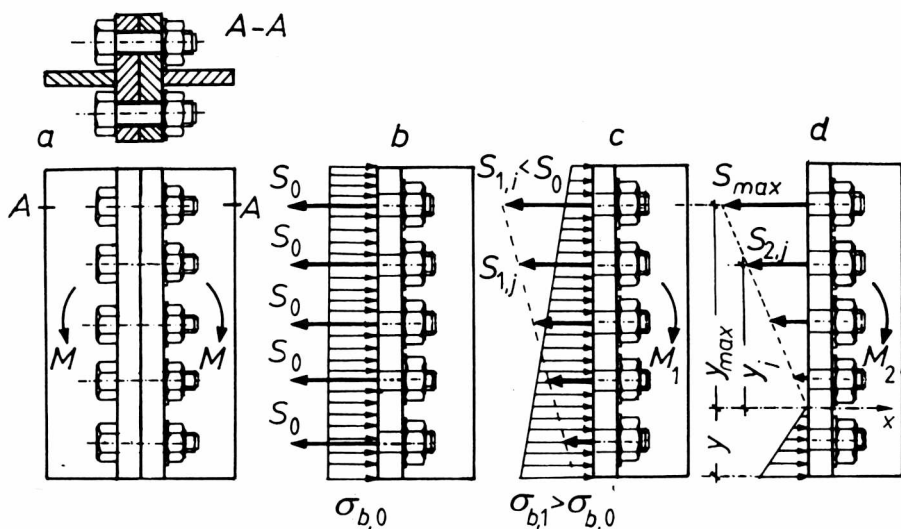
- $p = 1$ (gdy występuje zewnętrzny szereg śrub) lub 2,
- k – liczba szeregów śrub, przy czym do obliczeń przyjmuje się $k \leq 3$,
- S_{Rr} , S_{Rr} – nośność obliczeniowa śrub według (2.14), (3.12), (3.13),
- m_i – liczba śrub w i -tym szeregu,
- ω_{ri} , ω_{ri} – uśrednione dla i -tego szeregu współczynniki rozdziału obciążenia, które można przyjmować według tabl. 3.2,
- y_i – ramię działania sił w śrubach i -tego szeregu względem potencjalnej osi obrotu, przy czym w obliczeniach należy uwzględnić te śruby, dla których jest spełniony warunek $y_i \geq 0,6h_0$ (patrz rysunek w tabl. 3.2); w odniesieniu do elementów dwuteowych, o wysokości h większej niż 400 mm lub smukłości środnika (h_w/t_w) większej niż $140\sqrt{215/f_d}$ należy w stanie granicznym rozwarcia przyjmować $y_{\text{red}} = y_i - h/6$ (patrz tabl. 3.3).

3.5. Nośność graniczna śrubowych zginanych sprężonych połączeń doczołowych

Rozpatruje się śrubowy, sprężony styk doczołowy dwóch elementów o przekrojach teowych z dwoma rzędami śrub, w których wprowadzono wstępny naciąg (sprężenie) łączników, o konstrukcji pokazanej na rys. 3.12a.

Podobnie jak dla styku rozciąganego zakłada się, że blachy czołowe przylegają do siebie w sposób idealny i są odpowiednio sztywne (grube). Wprowadzenie sprężenia przez dokręcenie nakrętek śrub wywołuje w blachach czołowych równomierne naprężenia dociskowe $\sigma_{b,0}$ (rys. 3.12b). Tak więc, mimo iż połączenie jest nie obciążone w wyniku sprężenia powstaną w nim oddziaływania, które wzajemnie się równoważą. Pod obciążeniem momentem zginającym M_1 rozkład pierwotnych sił rozciągających S_i w śrubach i naprężeń ściskających $\sigma_{b,1}$ w blachach jest liniowy (rys. 3.12c) dopóty, dopóki moment zginający nie zrównoważy sił ściskających między blachami czołowymi. Przyjmując sprężysty model wyężenia śrub, gdy moment zginający wzrasta do M_2 , rozkład sił wewnętrznych będzie jak na rys. 3.12d [35].

Położenie osi obojętnej styku doczołowego można wyznaczyć z warunku równowagi między siłami rozciągającymi w śrubach a siłami ściskającymi między blachami czołowymi (należy wyznaczyć momenty statyczne pól prze-



Rys. 3.12. Schemat wyężenia doczołowego sprężonego styku zginanego

krojów poprzecznych śrub oraz powierzchni docisku blach). Wartość y na rysunku 3.12d zależy od szerokości docisku na szerokości stopki przekroju teowego. Można ją wyznaczyć zakładając wstępne położenie osi obojętnej i wykonać obliczenia sprawdzające warunki równowagi. Położenie osi obojętnej przyjmuje się w odległości od $1/6$ do $1/7h$ od brzegu ściskanego (gdzie h — wysokość połączenia) i wyznacza się ją na drodze kolejnych przybliżeń.

Przedstawiony model wyężenia doczołowego zginanego styku jest wyidealizowany, gdyż nie uwzględnia uwarunkowań konstrukcyjnych takich połączeń. Rzeczywisty rozkład sił w łącznikach, zwłaszcza skrajnych, w stykach z podatnymi blachami czołowymi odbiega od przyjętego modelu, ze względu na odkształcenia blach czołowych oraz nierównomierny rozdział sił w śrubach (ω_i) styku. Zagadnienia te były przedmiotem rozważań w poprzednich rozdziałach.

Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru doczołowych połączeń elementów konstrukcji stalowych, sprężonych śrubami o wysokiej wytrzymałości podano w pracy [44]. W pracach [4], [33] i [44] podano obszerne informacje dotyczące obliczania i konstruowania rozważanego typu połączeń dla przypadków nie ujętych w normie [60]. Są one wynikiem obszernych badań eksperymentalnych doczołowych styków belek dwuteowych (w skali naturalnej) z różną liczbą śrub w złączach, wykonanych przez J. Augustyna, J. Łagunę i Wł. Śliwkę [4], [33].

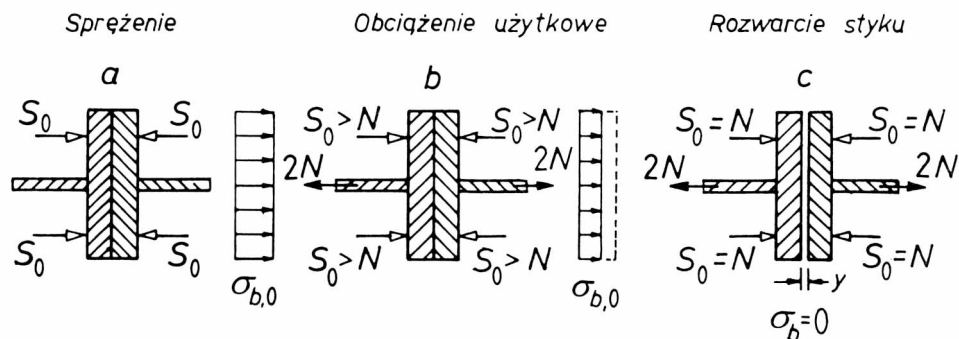
Warunkiem stosowania przedstawionego modelu obliczeniowego doczołowych styków sprężanych jest wstępny naciąg śrub wykonanych ze stali o wysokiej wytrzymałości. Sprężanie śrub w styku doczołowym podczas montażu do wielkości siły sprężającej S_0 według (2.15), jest szczególnie wskazane dla złączy obciążonych dynamicznie. Siły rozciągające w śrubach są równe siłom sprężającym, aż do chwili, kiedy obciążenie zewnętrzne nie przekroczy wartości sprężenia. Ze względu na małą wytrzymałość zmęczenio-

wą, śruby o wysokiej wytrzymałości nie powinny być wyćężane wówczas, gdy naprężenia rozciągające są zmienne. W związku z tym bezpieczeństwo eksploatacji sprężonych doczołowych połączeń (zarówno zginanych, jak i rozciąganych) jest uzależnione od spełnienia warunku, aby obciążenie zewnętrzne nie spowodowało rozwarcia styku. Będzie to występowało w razie zaniku naprężeń docisku między blachami czołowymi wokół najbardziej wyćężonej śruby w połączeniu.

Schemat wyćężenia oraz przemieszczenia (rozwarcia styku) doczołowego styku sprężonego przedstawiono na rys. 3.13.

Stanem granicznym nośności doczołowego styku sprężonego jest zerwanie najbardziej wyćężonej śruby, a stanem granicznym użytkowania (z omówionego warunku wytrzymałościowego) jest rozwarcie styku.

Obliczeniową normową [60] nośność graniczną zginanego doczołowego połączenia z warunku zerwania śruby i rozwarcia styku oblicza się ze wzorów (3.15)–(3.17). Parametry wytrzymałościowe wstępnego sprężenia S_0 oraz nośności na rozciąganie S_{Rt} , $S_{Rr,s}$, $S_{Rr,d}$ śrub klasy 8.8, 10.9 i 12.9 podano w tabl. 3.1.



Rys. 3.13. Schemat wyćężenia sprężonego styku doczołowego

3.6. Obliczanie śrubowych połączeń doczołowych

Śrubowe połączenia doczołowe według normy [60] oblicza się według jednej z trzech kategorii: D, E lub F, których charakterystyki przedstawiono w tabl. 3.5.

Śrubowe połączenia doczołowe kategorii D dotyczą złączy na śruby zwykłe lub o wysokiej wytrzymałości. Połączenia takie mogą być niesprężane i wówczas zaleca się stosować śruby klas niższych niż 8.8 lub sprężane siłą S_0 według wzoru (2.15) z zastosowaniem śrub klasy 8.8, 10.9 i 12.9. W obliczeniach połączeń kategorii D (sprężanych lub niesprężanych) rozpatruje się stan graniczny nośności z warunku zerwania trzpienia śruby

$$N_{ob} \leq N_{Rt}, \quad (3.18)$$

$$M_{ob} \leq M_{Rt}, \quad (3.19)$$

gdzie: N_{ob} , M_{ob} – siła podłużna i moment zginający w styku doczołowym, obliczone dla obciążeń obliczeniowych,
 N_{Rt} , M_{Rt} – nośność obliczeniowa styku na rozciąganie według (3.10) i (3.11) lub zginanie według (3.15), wyznaczona z warunku zerwania trzpienia śruby.

Tablica 3.5.

Kryteria oceny stanu granicznego nośności i użytkowania śrubowych połączeń doczołowych według [60]

Kategoria połączenia	Warunki stanu granicznego	Uwagi
D	$N_{ob} \leq N_{Rt}$ $M_{ob} \leq M_{Rt}$	Można stosować wszystkie klasy śrub od 3.6 do 12.9. Sprężanie połączeń nie jest wymagane. W sprężaniu styku naciąg śrub klas 8.8; 10.9; 12.9 wynosi S_0 .
E	$N_{ob} \leq N_{Rt}$ $M_{ob} \leq M_{Rt}$ $N_{ch} \leq N_{Rr}$ $M_{ch} \leq M_{Rr}$	Należy stosować śruby klasy 8.8, 10.9 i 12.9. Połączenie należy sprężyć siłą S_0 . Jest wymagana odporność złącza na: zerwanie trzpienia śruby w stanie granicznym nośności oraz na rozwarcie styku w stanie granicznym użytkowania.
F	$N_{ob} \leq N_{Rr}$ $M_{ob} \leq M_{Rr}$	Należy stosować śruby klasy 8.8, 10.9 i 12.9. Połączenie należy sprężyć siłą S_0 . Jest wymagana odporność na rozwarcie styku w stanie granicznym nośności.
N_{ob} , N_{ch} , M_{ob} , M_{ch} – siły wewnętrzne N i M w styku doczołowym od obciążeń obliczeniowych (ob) i charakterystycznych (ch), N_{Rt} , M_{Rt} – nośność obliczeniowa styku na rozciąganie i zginanie z warunku zerwania trzpienia śruby, N_{Rr} , M_{Rr} – nośność obliczeniowa styku na rozciąganie i zginanie w warunku rozwarcia styku, S_0 – siła wstępnego sprężania połączenia doczołowego według (2.15).		

W połączeniach doczołowych kategorii E stosuje się śruby o wysokiej wytrzymałości klasy 8.8, 10.9 i 12.9 i złącza takie są wstępnie sprężone (przed obciążeniem) siłą S_0 . W połączeniach tej kategorii nie dopuszcza się do odkształceń styków lub zmian amplitudy naprężeń w śrubie od wstępnego naciągu (sprężenia) w stanie granicznym użytkowania. W obliczeniach połączeń kategorii E rozpatruje się stan graniczny nośności z warunku zerwania trzpienia śruby według (3.18) i (3.19) oraz stan graniczny użytkowania, którym jest rozwarcie styku (zanik naprężeń dociskowych między blachami czołowymi wokół najbardziej wyętej śruby) według wzoru

$$N_{ch} \leq N_{Rr}, \quad (3.20)$$

$$M_{ch} \leq M_{Rr}, \quad (3.21)$$

gdzie: N_{ch} , M_{ch} – siła podłużna i moment zginający w styku doczołowym, obliczone dla obciążeń charakterystycznych,
 N_{Rr} , M_{Rr} – nośność obliczeniowa styku na rozciąganie według (3.10) lub (3.11) i zginanie według (3.16) lub (3.17), wyznaczona z warunku rozwarcia styku dla S_{Rr} według (3.12) i (3.13).

W połączeniach kategorii F, podobnie jak w połączeniach kategorii E, stosuje się śruby wysokiej wytrzymałości oraz ich wstępne sprężenie siłą S_0 według (2.15). Stosuje się je głównie wówczas gdy występują obciążenia dynamiczne. W stykach tak obciążonych, ze względu na ograniczoną wytrzymałość zmęczeniową śrub o wysokiej wytrzymałości, łączniki te nie powinny być wyęteżane zmiennymi naprężeniami rozciągającymi. Zmiany amplitudy wyęteżeń łączników występują w razie zaniku naprężeń docisku między blachami czołowymi wokół najbardziej obciążonej śruby i rozwarcia styku. Dlatego też w połączeniach kategorii F rozpatruje się stan graniczny nośności z warunku rozwarcia styku

$$N_{ob} \leq N_{Rr}, \quad (3.22)$$

$$M_{ob} \leq M_{Rr}, \quad (3.23)$$

gdzie: N_{ob} , M_{ob} — siła podłużna i moment zginający w styku doczołowym, obliczone dla obciążeń obliczeniowych,

N_{Rr} , M_{Rr} — jak w (3.20) i (3.21).

Momentowi zginającemu M w styku doczołowym zazwyczaj towarzyszy siła poprzeczna S_v , której nie uwzględniano w dotychczasowych analizach wyęteżenia zginanych styków doczołowych (zarówno niesprężanych, jak i sprężanych).

Projektując doczołowe połączenia zginane należy uwzględniać w obliczeniach działającą siłę poprzeczną S_v .

W połączeniach doczołowych siłę poprzeczną w styku uwzględnia się obliczając zredukowaną nośność śrub na rozciąganie, uwzględniając tarcie między blachami czołowymi lub konstruując elementy (np. stołeczki), na które przekazuje się obciążenie poprzeczne.

W połączeniach sprężanych kategorii F siła poprzeczna S_v powinna być według [60] przeniesiona przez tarcie (wzór (2.16) uwzględnia wpływ siły rozciągającej w śrubie na nośność styku z warunku poślizgu).

Najczęściej w projektowaniu doczołowych połączeń zginanych i ścinanych stosuje się zasadę, że siłę poprzeczną przenoszą wyłącznie śruby usytuowane w strefie ściskanej połączenia, lub też że siła ta jest przekazywana poprzez docisk blachy czołowej belki do stołeczka montażowego przyspawanego do pasa słupa.

Nośność doczołowych połączeń elementów dwuteowych w złożonym stanie obciążenia (M , N , V) można według [60] sprawdzać w sposób uproszczony, przy założeniu, że moment zginający M i siła podłużna N są przenoszone wyłącznie przez pasy spełniając warunek (3.9) dla wypadkowej siły podłużnej w pasie rozciągany i śrub znajdujących się w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Jeśli w połączeniu jest tylko jeden pas rozciągany, to można przyjmować współczynniki ω_i jak dla połączeń wyłącznie zginanych według tabl. 3.2.

W stykach doczołowych, obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{or}) do osi łączników wyznacza się zredukowane nośności śrub z następujących nierówności interakcyjnych:

- w połączeniach niesprężanych [60]

$$\left(\frac{S_t}{S_{Rt}}\right)^2 + \left(\frac{S_v}{S_{Rv}}\right)^2 \leq 1, \quad (3.24)$$

- w połączeniach sprężanych [23], [52]

$$\frac{S_t}{S_{Rt}} + \frac{S_s}{S_{Rs}} \leq 1, \quad (3.25)$$

gdzie:

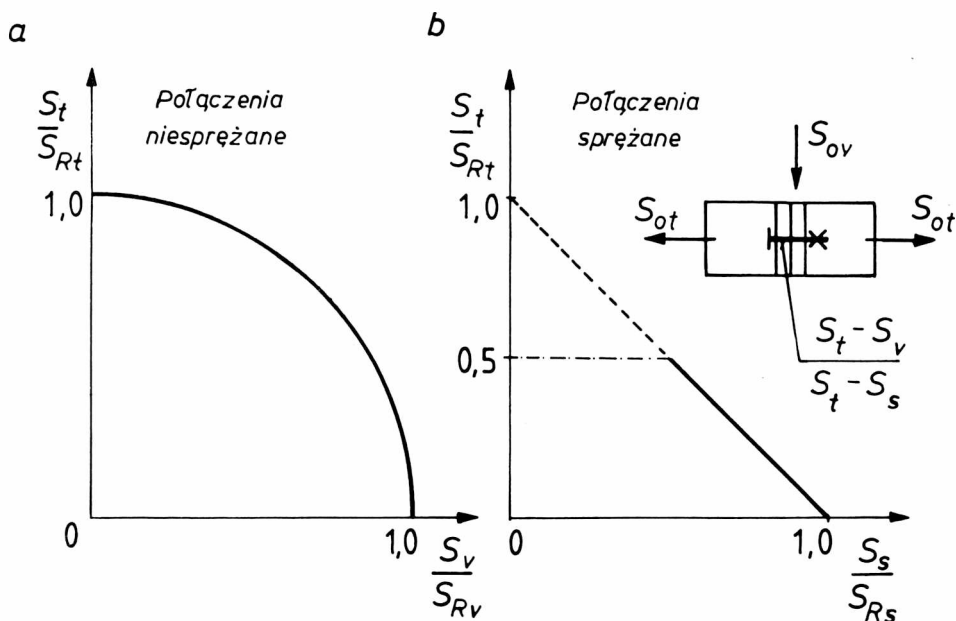
S_t – zredukowana, z uwagi na obciążenie poprzeczne, nośność śruby na rozciąganie,

S_v – zredukowana, z uwagi na obciążenie rozciągające, nośność śruby na ścinanie,

S_s – zredukowana, z uwagi na obciążenia rozciągające, nośność śruby z warunku poślizgu styku,

S_{Rt} , S_{Rv} , S_{Rs} – nośność śruby na rozciąganie według (2.14), ścinanie według (2.10) oraz z warunku poślizgu (2.16).

Na rysunku 3.14 przedstawiono wykresy interakcyjnych nośności śrub, w doczołowych stykach rozciąganych (S_{ot}) i obciążonych poprzecznie (S_{ov}), z łącznikami niesprężanymi $S_t - S_v$ (rys. 3.14a) i sprężanymi $S_t - S_s$ (rys. 3.14b).



Rys. 3.14. Interakcyjne nośności śrub obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{oi}) w połączeniach: a – niesprężanych $S_t - S_v$, b – sprężanych $S_t - S_s$

Obliczenie śrubowych połączeń doczołowych według [60] polega na wyznaczeniu sił podłużnych N_{oi} , poprzecznych V_{oi} oraz momentów zginających M_{oi} w styku i porównaniu ich z nośnościami styku N_{Ri} , V_{Ri} oraz M_{Ri} , które są funkcjami interakcyjnych nośności śrub. Interakcyjne nośności śrub obciążonych prostopadle i równolegle do osi łączników w stykach niesprężanych

i sprężanych podano w tablicach 3.6 i 3.7. Wyznaczono je według następującej procedury obliczeniowej. Zredukowaną, ze względu na ścinanie nośność śruby na rozciąganie S_t w styku doczołowym, w którym stosunek siły poprzecznej S_{ov} do siły rozciągającej S_{ot} wynosi

$$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}, \quad (3.26)$$

wyznaczono z następujących wzorów:

– w styku niesprężonym

$$S_t = \left[\frac{S_{Rt}^2 S_{Rv}^2}{X^2 S_{Rt}^2 + S_{Rv}^2} \right]^{0,5}, \quad (3.27)$$

– w styku sprężonym

$$S_t = S_{Rt} \left(\frac{X}{\alpha_s \mu m} + 1 \right)^{-1}, \quad (3.28)$$

gdzie: α_s, μ, m – jak w (2.16).

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

$$S_v = X S_t. \quad (3.29)$$

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

$$S_s = X S_t. \quad (3.30)$$

Interakcyjne nośności $S_t - S_v$ ścinanych w jednej płaszczyźnie i rozciąganych śrub klasy 4.6, 5.6, 8.8, 10.9 i 12.9 w połączeniach niesprężanych podano w tabl. 3.6a–e.

Interakcyjne nośności $S_t - S_s$ śrub klasy 8.8, 10.9 i 12.9 w doczołowych połączeniach sprężonych (*cierno-doczołowych*), obciążonych prostopadle i równoległe do osi łączników podano w tabl. 3.7. Współrzędne interakcyjnych nośności śrub $S_t - S_s$ w doczołowych połączeniach podane w tabl. 3.7 obliczono dla jednej płaszczyzny poślizgu ($m = 1$), otworów okrągłych lub średniokładnych oraz współczynników tarcia $\mu = 0,2, 0,3, 0,4, 0,5$.

Tablica 3.6a

Interakcyjne nośności śrub M12 ścinanych (S_{Ov}) w jednej płaszczyźnie
oraz rozciąganych (S_{Ot}) w połączeniach niesprężanych [kN]

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M12									
	4 . 6		5 . 6		8 . 8		10 . 9		12 . 9	
	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v
0.00	17.20	0.00	21.50	0.00	43.80	0.00	57.00	0.00	67.00	0.00
0.10	17.14	1.71	21.42	2.14	43.55	4.35	56.67	5.67	66.61	6.66
0.20	16.96	3.39	21.20	4.24	42.82	8.56	55.72	11.14	65.49	13.10
0.30	16.67	5.00	20.84	6.25	41.68	12.50	54.24	16.27	63.73	19.12
0.40	16.29	6.52	20.36	8.15	40.23	16.09	52.35	20.94	61.50	24.60
0.50	15.84	7.92	19.80	9.90	38.57	19.29	50.18	25.09	58.95	29.47
0.60	15.33	9.20	19.17	11.50	36.80	22.08	47.87	28.72	56.22	33.73
0.70	14.79	10.36	18.50	12.95	34.98	24.49	45.51	31.85	53.43	37.40
0.80	14.24	11.39	17.80	14.24	33.19	26.55	43.17	34.54	50.69	40.55
0.90	13.68	12.31	17.10	15.39	31.46	28.32	40.92	36.83	48.03	43.23
1.00	13.12	13.12	16.41	16.41	29.81	29.81	38.77	38.77	45.51	45.51
1.11	12.53	13.91	15.67	17.39	28.12	31.21	36.56	40.58	42.90	47.62
1.25	11.81	14.76	14.77	18.46	26.13	32.66	33.98	42.47	39.86	49.83
1.43	10.95	15.66	13.69	19.58	23.87	34.13	31.03	44.37	36.40	52.05
1.67	9.93	16.58	12.42	20.74	21.30	35.57	27.69	46.24	32.47	54.23
2.00	8.74	17.48	10.93	21.87	18.46	36.91	23.99	47.99	28.13	56.27
2.50	7.34	18.36	9.19	22.96	15.26	38.15	19.84	49.59	23.26	58.14
3.33	5.75	19.13	7.19	23.94	11.77	39.20	15.30	50.96	17.94	59.74
5.00	3.95	19.76	4.94	24.72	8.00	40.01	10.40	52.01	12.19	60.96
10.00	2.02	20.16	2.52	25.22	4.05	40.53	5.27	52.67	6.17	61.74
	0.00	20.30	0.00	25.40	0.00	40.70	0.00	52.90	0.00	62.00

Tablica 3.6b

Interakcyjne nośności śrub M16 ścinanych (S_{ov}) w jednej płaszczyźnie
oraz rozciąganych (S_{ot}) w połączeniach niesprężanych [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M16									
	4.6		5.6		8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v
0.00	32.00	0.00	40.00	0.00	81.30	0.00	106.00	0.00	125.00	0.00
0.10	31.88	3.19	39.84	3.98	80.79	8.08	105.33	10.53	124.20	12.42
0.20	31.51	6.30	39.39	7.88	79.32	15.86	103.41	20.68	121.89	24.38
0.30	30.93	9.28	38.66	11.60	77.05	23.11	100.42	30.13	118.31	35.49
0.40	30.17	12.07	37.71	15.08	74.16	29.66	96.64	38.66	113.80	45.52
0.50	29.27	14.63	36.58	18.29	70.89	35.45	92.36	46.18	108.68	54.34
0.60	28.27	16.96	35.33	21.20	67.42	40.45	87.82	52.69	103.28	61.97
0.70	27.21	19.05	34.00	23.80	63.92	44.74	83.24	58.27	97.83	68.48
0.80	26.13	20.90	32.65	26.12	60.48	48.38	78.74	62.99	92.49	73.99
0.90	25.04	22.54	31.29	28.16	57.18	51.46	74.44	66.99	87.39	78.65
1.00	23.98	23.98	29.95	29.95	54.07	54.07	70.37	70.37	82.58	82.58
1.11	22.84	25.35	28.54	31.67	50.88	56.47	66.21	73.49	77.66	86.20
1.25	21.47	26.84	26.82	33.53	47.17	58.97	61.38	76.72	71.96	89.95
1.43	19.85	28.39	24.80	35.46	42.98	61.46	55.91	79.95	65.51	93.68
1.67	17.95	29.97	22.42	37.44	38.25	63.88	49.75	83.09	58.27	97.32
2.00	15.75	31.51	19.68	39.35	33.07	66.14	43.00	86.01	50.34	100.68
2.50	13.19	32.98	16.48	41.19	27.28	68.20	35.47	88.68	41.50	103.76
3.33	10.29	34.28	12.85	42.80	21.00	69.94	27.30	90.92	31.94	106.35
5.00	7.06	35.31	8.82	44.09	14.26	71.28	18.53	92.65	21.67	108.33
10.00	3.60	35.97	4.49	44.91	7.21	72.11	9.37	93.73	10.96	109.58
	0.00	36.20	0.00	45.20	0.00	72.40	0.00	94.10	0.00	110.00

Tablica 3.6c

Interakcyjne nośności śrub M20 ścinanych (S_{Ov}) w jednej płaszczyźnie
oraz rozciąganych (S_{Ot}) w połączeniach niesprężanych [kN]

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M20									
	4.6		5.6		8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v
0.00	50.00	0.00	62.50	0.00	132.00	0.00	166.00	0.00	196.00	0.00
0.10	49.81	4.98	62.26	6.23	131.17	13.12	164.99	16.50	194.74	19.47
0.20	49.23	9.85	61.55	12.31	128.76	25.75	162.08	32.42	191.10	38.22
0.30	48.33	14.50	60.41	18.12	125.03	37.51	157.54	47.26	185.46	55.64
0.40	47.13	18.85	58.92	23.57	120.32	48.13	151.79	60.72	178.35	71.34
0.50	45.72	22.86	57.16	28.58	114.97	57.48	145.25	72.62	170.30	85.15
0.60	44.16	26.50	55.21	33.13	109.31	65.59	138.29	82.97	161.80	97.08
0.70	42.51	29.75	53.15	37.20	103.59	72.51	131.23	91.86	153.22	107.26
0.80	40.81	32.65	51.03	40.82	97.99	78.39	124.29	99.43	144.85	115.88
0.90	39.11	35.20	48.91	44.02	92.62	83.36	117.61	105.85	136.83	123.15
1.00	37.44	37.44	46.83	46.83	87.56	87.56	111.29	111.29	129.28	129.28
1.11	35.67	39.59	44.61	49.52	82.37	91.43	104.80	116.33	121.56	134.93
1.25	33.53	41.91	41.94	52.42	76.35	95.44	97.25	121.56	112.62	140.77
1.43	31.00	44.33	38.78	55.45	69.54	99.45	88.67	126.81	102.52	146.60
1.67	28.02	46.79	35.05	58.54	61.88	103.35	79.00	131.93	91.17	152.26
2.00	24.60	49.19	30.77	61.54	53.48	106.97	68.35	136.70	78.75	157.51
2.50	20.59	51.48	25.77	64.41	44.11	110.27	56.43	141.07	64.92	162.29
3.33	16.07	53.50	20.10	66.94	33.95	113.06	43.47	144.76	49.95	166.32
5.00	11.02	55.11	13.79	68.96	23.04	115.20	29.52	147.61	33.88	169.41
10.00	5.61	56.14	7.03	70.25	11.65	116.54	14.94	149.39	17.13	171.34
	0.00	56.50	0.00	70.70	0.00	117.00	0.00	150.00	0.00	172.00

Tablica 3.6d

Interakcyjne nośności śrub M24 ścinanych (S_{ov}) w jednej płaszczyźnie
oraz rozciąganych (S_{ot}) w połączeniach niesprężanych [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M24									
	4.6		5.6		8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v
0.00	72.10	0.00	90.00	0.00	190.00	0.00	239.00	0.00	280.00	0.00
0.10	71.82	7.18	89.65	8.97	188.81	18.88	237.50	23.75	278.23	27.82
0.20	70.99	14.20	88.63	17.73	185.37	37.07	233.15	46.63	273.12	54.62
0.30	69.68	20.90	87.00	26.10	180.04	54.01	226.40	67.92	265.20	79.56
0.40	67.96	27.18	84.87	33.95	173.28	69.31	217.87	87.15	255.18	102.07
0.50	65.92	32.96	82.34	41.17	165.63	82.81	208.20	104.10	243.83	121.92
0.60	63.67	38.20	79.54	47.72	157.51	94.51	197.96	118.78	231.82	139.09
0.70	61.28	42.89	76.57	53.60	149.31	104.52	187.62	131.33	219.68	153.77
0.80	58.83	47.06	73.53	58.82	141.27	113.01	177.48	141.98	207.79	166.23
0.90	56.38	50.74	70.48	63.43	133.56	120.20	167.77	150.99	196.40	176.76
1.00	53.97	53.97	67.49	67.49	126.28	126.28	158.60	158.60	185.65	185.65
1.11	51.41	57.07	64.30	71.37	118.81	131.88	149.20	165.61	174.64	193.85
1.25	48.33	60.41	60.45	75.57	110.16	137.70	138.31	172.89	161.88	202.35
1.43	44.68	63.89	55.90	79.94	100.35	143.50	125.98	180.16	147.44	210.83
1.67	40.38	67.44	50.54	84.40	89.32	149.16	112.11	187.23	131.19	219.09
2.00	35.44	70.89	44.37	88.74	77.21	154.42	96.90	193.79	113.38	226.76
2.50	29.67	74.19	37.16	92.90	63.69	159.22	79.92	199.80	93.51	233.76
3.33	23.15	77.09	29.00	96.56	49.03	163.28	61.52	204.86	71.97	239.67
5.00	15.88	79.40	19.90	99.48	33.28	166.39	41.75	208.74	48.84	244.20
10.00	8.09	80.89	10.14	101.35	16.83	168.34	21.12	211.17	24.70	247.03
	0.00	81.40	0.00	102.00	0.00	169.00	0.00	150.00	0.00	248.00

Tablica 3.6e

Interakcyjne nośności śrub M30 ścinanych (S_{ov}) w jednej płaszczyźnie
oraz rozciąganych (S_{ot}) w połączeniach niesprężanych [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M30									
	4 . 6		5 . 6		8 . 8		10 . 9		12 . 9	
	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v	S_t	S_v
0.00	114.00	0.00	143.00	0.00	303.00	0.00	379.00	0.00	445.00	0.00
0.10	113.54	11.35	142.43	14.24	301.04	30.10	376.54	37.65	442.10	44.21
0.20	112.21	22.44	140.74	28.15	295.38	59.08	369.44	73.89	433.74	86.75
0.30	110.08	33.02	138.06	41.42	286.61	85.98	358.44	107.53	420.79	126.24
0.40	107.29	42.92	134.56	53.82	275.55	110.22	344.58	137.83	404.47	161.79
0.50	104.00	52.00	130.42	65.21	263.05	131.52	328.91	164.46	386.03	193.02
0.60	100.37	60.22	125.85	75.51	249.86	149.91	312.38	187.43	366.59	219.95
0.70	96.53	67.57	121.02	84.71	236.56	165.59	295.73	207.01	347.01	242.90
0.80	92.60	74.08	116.08	92.86	223.57	178.86	279.47	223.58	327.89	262.31
0.90	88.68	79.81	111.15	100.04	211.16	190.05	263.94	237.54	309.64	278.67
1.00	84.84	84.84	106.32	106.32	199.47	199.47	249.31	249.31	292.45	292.45
1.11	80.76	89.64	101.20	112.33	187.52	208.15	234.35	260.13	274.89	305.12
1.25	75.85	94.81	95.04	118.80	173.70	217.13	217.07	271.33	254.58	318.23
1.43	70.06	100.19	87.78	125.52	158.09	226.07	197.54	282.48	231.66	331.28
1.67	63.26	105.65	79.25	132.35	140.57	234.76	175.64	293.31	205.95	343.94
2.00	55.47	110.95	69.48	138.97	121.40	242.80	151.67	303.34	177.84	355.67
2.50	46.40	116.00	58.11	145.28	100.05	250.14	124.99	312.48	146.54	366.36
3.33	36.17	120.44	45.29	150.81	76.97	256.31	96.15	320.17	112.72	375.35
5.00	24.79	123.96	31.04	155.21	52.21	261.04	65.21	326.06	76.45	382.23
10.00	12.62	126.22	15.80	158.03	26.40	263.99	32.97	329.74	38.65	386.53
	0.00	127.00	0.00	159.00	0.00	265.00	0.00	331.00	0.00	388.00

Tablica 3.7a

Interakcyjne nośności śrub M12 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M12; $\mu = 0,2$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	17.52	5.26	22.80	6.84	26.80	8.04
0.40	14.60	5.84	19.00	7.60	22.33	8.93
0.50	12.51	6.26	16.29	8.14	19.14	9.57
0.60	10.95	6.57	14.25	8.55	16.75	10.05
0.70	9.73	6.81	12.67	8.87	14.89	10.42
0.80	8.76	7.01	11.40	9.12	13.40	10.72
0.90	7.96	7.17	10.36	9.33	12.18	10.96
1.00	7.30	7.30	9.50	9.50	11.17	11.17
1.11	6.69	7.42	8.70	9.66	10.23	11.35
1.25	6.04	7.55	7.86	9.83	9.24	11.55
1.43	5.37	7.69	6.99	10.00	8.22	11.76
2.00	3.98	7.96	5.18	10.36	6.09	12.18
2.50	3.24	8.11	4.22	10.56	4.96	12.41
3.30	2.50	8.26	3.26	10.75	3.83	12.63
5.00	1.68	8.42	2.19	10.96	2.58	12.88
10.00	0.86	8.59	1.12	11.18	1.31	13.14
	0.00	8.76	0.00	11.40	0.00	13.40

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M12; $\mu = 0,3$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	21.90	6.57	28.50	8.55	33.50	10.05
0.40	18.77	7.51	24.43	9.77	28.71	11.49
0.50	16.43	8.21	21.38	10.69	25.13	12.56
0.60	14.60	8.76	19.00	11.40	22.33	13.40
0.70	13.14	9.20	17.10	11.97	20.10	14.07
0.80	11.95	9.56	15.55	12.44	18.27	14.62
0.90	10.95	9.86	14.25	12.83	16.75	15.08
1.00	10.11	10.11	13.15	13.15	15.46	15.46
1.11	9.32	10.34	12.13	13.46	14.26	15.82
1.25	8.48	10.60	11.03	13.79	12.97	16.21
1.43	7.60	10.86	9.88	14.13	11.62	16.61
2.00	5.71	11.43	7.43	14.87	8.74	17.48
2.50	4.69	11.73	6.11	15.27	7.18	17.95
3.30	3.65	12.05	4.75	15.68	5.58	18.43
5.00	2.48	12.40	3.23	16.13	3.79	18.96
10.00	1.28	12.76	1.66	16.60	1.95	19.51
	0.00	13.14	0.00	17.10	0.00	20.10

Tablica 3.7b

Interakcyjne nośności śrub M12 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M12 ; $\mu = 0,4$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	25.03	7.51	32.57	9.77	38.29	11.49
0.40	21.90	8.76	28.50	11.40	33.50	13.40
0.50	19.47	9.73	25.33	12.67	29.78	14.89
0.60	17.52	10.51	22.80	13.68	26.80	16.08
0.70	15.93	11.15	20.73	14.51	24.36	17.05
0.80	14.60	11.68	19.00	15.20	22.33	17.87
0.90	13.48	12.13	17.54	15.78	20.62	18.55
1.00	12.51	12.51	16.29	16.29	19.14	19.14
1.11	11.60	12.88	15.10	16.76	17.75	19.70
1.25	10.62	13.27	13.82	17.27	16.24	20.30
1.43	9.57	13.69	12.46	17.82	14.64	20.94
2.00	7.30	14.60	9.50	19.00	11.17	22.33
2.50	6.04	15.10	7.86	19.66	9.24	23.10
3.30	4.74	15.63	6.16	20.34	7.24	23.90
5.00	3.24	16.22	4.22	21.11	4.96	24.81
10.00	1.68	16.85	2.19	21.92	2.58	25.77
	0.00	17.52	0.00	22.80	0.00	26.80

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M12 ; $\mu = 0,5$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	27.38	8.21	35.63	10.69	41.88	12.56
0.40	24.33	9.73	31.67	12.67	37.22	14.89
0.50	21.90	10.95	28.50	14.25	33.50	16.75
0.60	19.91	11.95	25.91	15.55	30.45	18.27
0.70	18.25	12.78	23.75	16.63	27.92	19.54
0.80	16.85	13.48	21.92	17.54	25.77	20.62
0.90	15.64	14.08	20.36	18.32	23.93	21.54
1.00	14.60	14.60	19.00	19.00	22.33	22.33
1.11	13.60	15.10	17.70	19.65	20.81	23.10
1.25	12.51	15.64	16.29	20.36	19.14	23.93
1.43	11.35	16.23	14.77	21.12	17.36	24.82
2.00	8.76	17.52	11.40	22.80	13.40	26.80
2.50	7.30	18.25	9.50	23.75	11.17	27.92
3.30	5.76	19.02	7.50	24.75	8.82	29.09
5.00	3.98	19.91	5.18	25.91	6.09	30.45
10.00	2.09	20.86	2.71	27.14	3.19	31.90
	0.00	21.90	0.00	28.50	0.00	33.50

Tablica 3.7c

Interakcyjne nośności śrub M16 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{Ov}) i równolegle (S_{Ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M16; $\mu = 0,2$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	46.46	13.94	60.57	18.17	71.43	21.43
0.40	40.65	16.26	53.00	21.20	62.50	25.00
0.50	36.13	18.07	47.11	23.56	55.56	27.78
0.60	32.52	19.51	42.40	25.44	50.00	30.00
0.70	29.56	20.69	38.55	26.98	45.45	31.82
0.80	27.10	21.68	35.33	28.27	41.67	33.33
0.90	25.02	22.51	32.62	29.35	38.46	34.62
1.00	23.23	23.23	30.29	30.29	35.71	35.71
1.11	21.54	23.91	28.08	31.17	33.11	36.75
1.25	19.71	24.64	25.70	32.12	30.30	37.88
1.43	17.77	25.41	23.17	33.13	27.32	39.07
2.00	13.55	27.10	17.67	35.33	20.83	41.67
2.50	11.21	28.03	14.62	36.55	17.24	43.10
3.30	8.79	29.00	11.46	37.82	13.51	44.59
5.00	6.02	30.11	7.85	39.26	9.26	46.30
10.00	3.13	31.27	4.08	40.77	4.81	48.08
	0.00	32.52	0.00	42.40	0.00	50.00

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M16; $\mu = 0,3$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	50.81	15.24	66.25	19.88	78.13	23.44
0.40	45.17	18.07	58.89	23.56	69.44	27.78
0.50	40.65	20.33	53.00	26.50	62.50	31.25
0.60	36.95	22.17	48.18	28.91	56.82	34.09
0.70	33.88	23.71	44.17	30.92	52.08	36.46
0.80	31.27	25.02	40.77	32.62	48.08	38.46
0.90	29.04	26.13	37.86	34.07	44.64	40.18
1.00	27.10	27.10	35.33	35.33	41.67	41.67
1.11	25.25	28.03	32.92	36.54	38.82	43.09
1.25	23.23	29.04	30.29	37.86	35.71	44.64
1.43	21.06	30.12	27.46	39.27	32.38	46.31
2.00	16.26	32.52	21.20	42.40	25.00	50.00
2.50	13.55	33.88	17.67	44.17	20.83	52.08
3.30	10.70	35.30	13.95	46.03	16.45	54.28
5.00	7.39	36.95	9.64	48.18	11.36	56.82
10.00	3.87	38.71	5.05	50.48	5.95	59.52
	0.00	40.65	0.01	53.00	0.01	62.50

Tablica 3.7d

Interakcyjne nośności śrub M16 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M16; $\mu = 0,4$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	32.52	9.76	42.40	12.72	50.00	15.00
0.40	27.10	10.84	35.33	14.13	41.67	16.67
0.50	23.23	11.61	30.29	15.14	35.71	17.86
0.60	20.33	12.20	26.50	15.90	31.25	18.75
0.70	18.07	12.65	23.56	16.49	27.78	19.44
0.80	16.26	13.01	21.20	16.96	25.00	20.00
0.90	14.78	13.30	19.27	17.35	22.73	20.45
1.00	13.55	13.55	17.67	17.67	20.83	20.83
1.11	12.41	13.78	16.18	17.96	19.08	21.18
1.25	11.21	14.02	14.62	18.28	17.24	21.55
1.43	9.98	14.26	13.01	18.60	15.34	21.93
2.00	7.39	14.78	9.64	19.27	11.36	22.73
2.50	6.02	15.06	7.85	19.63	9.26	23.15
3.30	4.65	15.33	6.06	19.99	7.14	23.57
5.00	3.13	15.63	4.08	20.38	4.81	24.04
10.00	1.59	15.94	2.08	20.78	2.45	24.51
	0.00	16.26	0.00	21.20	0.00	25.00

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M16; $\mu = 0,5$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	40.65	12.20	53.00	15.90	62.50	18.75
0.40	34.84	13.94	45.43	18.17	53.57	21.43
0.50	30.49	15.24	39.75	19.88	46.88	23.44
0.60	27.10	16.26	35.33	21.20	41.67	25.00
0.70	24.39	17.07	31.80	22.26	37.50	26.25
0.80	22.17	17.74	28.91	23.13	34.09	27.27
0.90	20.33	18.29	26.50	23.85	31.25	28.13
1.00	18.76	18.76	24.46	24.46	28.85	28.85
1.11	17.30	19.20	22.55	25.03	26.60	29.52
1.25	15.74	19.67	20.52	25.65	24.19	30.24
1.43	14.10	20.16	18.38	26.29	21.68	31.00
2.00	10.60	21.21	13.83	27.65	16.30	32.61
2.50	8.71	21.78	11.36	28.39	13.39	33.48
3.30	6.78	22.36	8.83	29.15	10.42	34.38
5.00	4.60	23.01	6.00	30.00	7.08	35.38
10.00	2.37	23.68	3.09	30.87	3.64	36.41
	0.00	24.39	0.00	31.80	0.00	37.50

Tablica 3.7e

Interakcyjne nośności śrub M20 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{Ov}) i równolegle (S_{Ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M20; $\mu = 0,2$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	52.80	15.84	66.40	19.92	78.40	23.52
0.40	44.00	17.60	55.33	22.13	65.33	26.13
0.50	37.71	18.86	47.43	23.71	56.00	28.00
0.60	33.00	19.80	41.50	24.90	49.00	29.40
0.70	29.33	20.53	36.89	25.82	43.56	30.49
0.80	26.40	21.12	33.20	26.56	39.20	31.36
0.90	24.00	21.60	30.18	27.16	35.64	32.07
1.00	22.00	22.00	27.67	27.67	32.67	32.67
1.11	20.15	22.37	25.34	28.13	29.92	33.22
1.25	18.21	22.76	22.90	28.62	27.03	33.79
1.43	16.20	23.16	20.37	29.13	24.05	34.39
2.00	12.00	24.00	15.09	30.18	17.82	35.64
2.50	9.78	24.44	12.30	30.74	14.52	36.30
3.30	7.54	24.89	9.49	31.30	11.20	36.96
5.00	5.08	25.38	6.38	31.92	7.54	37.69
10.00	2.59	25.88	3.25	32.55	3.84	38.43
	0.00	26.40	0.00	33.20	0.00	39.20

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M20; $\mu = 0,3$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	66.00	19.80	83.00	24.90	98.00	29.40
0.40	56.57	22.63	71.14	28.46	84.00	33.60
0.50	49.50	24.75	62.25	31.13	73.50	36.75
0.60	44.00	26.40	55.33	33.20	65.33	39.20
0.70	39.60	27.72	49.80	34.86	58.80	41.16
0.80	36.00	28.80	45.27	36.22	53.45	42.76
0.90	33.00	29.70	41.50	37.35	49.00	44.10
1.00	30.46	30.46	38.31	38.31	45.23	45.23
1.11	28.09	31.17	35.32	39.20	41.70	46.29
1.25	25.55	31.94	32.13	40.16	37.94	47.42
1.43	22.89	32.73	28.79	41.16	33.99	48.60
2.00	17.22	34.43	21.65	43.30	25.57	51.13
2.50	14.14	35.36	17.79	44.46	21.00	52.50
3.30	11.00	36.30	13.83	45.65	16.33	53.90
5.00	7.47	37.36	9.40	46.98	11.09	55.47
10.00	3.84	38.45	4.83	48.35	5.71	57.09
	0.00	39.60	0.00	49.80	0.01	58.80

Tablica 3.7f

Interakcyjne nośności śrub M20 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M20; $\mu = 0,4$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	75.43	22.63	94.86	28.46	112.00	33.60
0.40	66.00	26.40	83.00	33.20	98.00	39.20
0.50	58.67	29.33	73.78	36.89	87.11	43.56
0.60	52.80	31.68	66.40	39.84	78.40	47.04
0.70	48.00	33.60	60.36	42.25	71.27	49.89
0.80	44.00	35.20	55.33	44.27	65.33	52.27
0.90	40.62	36.55	51.08	45.97	60.31	54.28
1.00	37.71	37.71	47.43	47.43	56.00	56.00
1.11	34.97	38.81	43.97	48.81	51.92	57.63
1.25	32.00	40.00	40.24	50.30	47.52	59.39
1.43	28.85	41.26	36.28	51.89	42.84	61.26
2.00	22.00	44.00	27.67	55.33	32.67	65.33
2.50	18.21	45.52	22.90	57.24	27.03	67.59
3.30	14.27	47.09	17.95	59.22	21.19	69.92
5.00	9.78	48.89	12.30	61.48	14.52	72.59
10.00	5.08	50.77	6.38	63.85	7.54	75.38
	0.0	52.80	0.01	66.40	0.01	78.40

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M20; $\mu = 0,5$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	82.50	24.75	103.75	31.13	122.50	36.75
0.40	73.33	29.33	92.22	36.89	108.89	43.56
0.50	66.00	33.00	83.00	41.50	98.00	49.00
0.60	60.00	36.00	75.45	45.27	89.09	53.45
0.70	55.00	38.50	69.17	48.42	81.67	57.17
0.80	50.77	40.62	63.85	51.08	75.38	60.31
0.90	47.14	42.43	59.29	53.36	70.00	63.00
1.00	44.00	44.00	55.33	55.33	65.33	65.33
1.11	40.99	45.50	51.55	57.22	60.87	67.57
1.25	37.71	47.14	47.43	59.29	56.00	70.00
1.43	34.20	48.90	43.01	61.50	50.78	72.61
2.00	26.40	52.80	33.20	66.40	39.20	78.40
2.50	22.00	55.00	27.67	69.17	32.67	81.67
3.30	17.37	57.32	21.84	72.08	25.79	85.11
5.00	12.00	60.00	15.09	75.45	17.82	89.09
10.00	6.29	62.86	7.90	79.05	9.33	93.33
	0.0	66.00	0.01	83.00	0.01	98.00

Tablica 3.7g

Interakcyjne nośności śrub M24 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{Ov}) i równolegle (S_{Ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M24, $\mu = 0,2$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	76.00	22.80	95.60	28.68	112.00	33.60
0.40	63.33	25.33	79.67	31.87	93.33	37.33
0.50	54.29	27.14	68.29	34.14	80.00	40.00
0.60	47.50	28.50	59.75	35.85	70.00	42.00
0.70	42.22	29.56	53.11	37.18	62.22	43.56
0.80	38.00	30.40	47.80	38.24	56.00	44.80
0.90	34.55	31.09	43.45	39.11	50.91	45.82
1.00	31.67	31.67	39.83	39.83	46.67	46.67
1.11	29.01	32.20	36.49	40.50	42.75	47.45
1.25	26.21	32.76	32.97	41.21	38.62	48.28
1.43	23.31	33.34	29.33	41.93	34.36	49.13
2.00	17.27	34.55	21.73	43.45	25.45	50.91
2.50	14.07	35.19	17.70	44.26	20.74	51.85
3.30	10.86	35.83	13.66	45.07	16.00	52.80
5.00	7.31	36.54	9.19	45.96	10.77	53.85
10.00	3.73	37.25	4.69	46.86	5.49	54.90
	0.00	38.00	0.00	47.80	0.0	56.00

$X = \frac{S_{Ov}}{S_{Ot}}$	Klasy śrub M24, $\mu = 0,3$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	95.00	28.50	119.50	35.85	140.00	42.00
0.40	81.43	32.57	102.43	40.97	120.00	48.00
0.50	71.25	35.63	89.63	44.81	105.00	52.50
0.60	63.33	38.00	79.67	47.80	93.33	56.00
0.70	57.00	39.90	71.70	50.19	84.00	58.80
0.80	51.82	41.45	65.18	52.15	76.36	61.09
0.90	47.50	42.75	59.75	53.78	70.00	63.00
1.00	43.85	43.85	55.15	55.15	64.62	64.62
1.11	40.43	44.87	50.85	56.44	59.57	66.13
1.25	36.77	45.97	46.26	57.82	54.19	67.74
1.43	32.95	47.12	41.45	59.27	48.55	69.43
2.00	24.78	49.57	31.17	62.35	36.52	73.04
2.50	20.36	50.89	25.61	64.02	30.00	75.00
3.30	15.83	52.25	19.92	65.73	23.33	77.00
5.00	10.75	53.77	13.53	67.64	15.85	79.25
10.00	5.53	55.34	6.96	69.61	8.16	81.55
	0.0	57.00	0.01	71.70	0.0	84.00

Tablica 3.7h

Interakcyjne nośności śrub M24 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M24; $\mu = 0,4$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	108.57	32.57	136.57	40.97	160.00	48.00
0.40	95.00	38.00	119.50	47.80	140.00	56.00
0.50	84.44	42.22	106.22	53.11	124.44	62.22
0.60	76.00	45.60	95.60	57.36	112.00	67.20
0.70	69.09	48.36	86.91	60.84	101.82	71.27
0.80	63.33	50.67	79.67	63.73	93.33	74.67
0.90	58.46	52.62	73.54	66.18	86.15	77.54
1.00	54.29	54.29	68.29	68.29	80.00	80.00
1.11	50.33	55.87	63.31	70.28	74.17	82.33
1.25	46.06	57.58	57.94	72.42	67.88	84.85
1.43	41.53	59.39	52.24	74.70	61.20	87.52
2.00	31.67	63.33	39.83	79.67	46.67	93.33
2.50	26.21	65.52	32.97	82.41	38.62	96.55
3.30	20.54	67.78	25.84	85.26	30.27	99.89
5.00	14.07	70.37	17.70	88.52	20.74	103.70
10.00	7.31	73.08	9.19	91.92	10.77	107.69
	0.01	76.00	0.01	95.60	0.01	112.00

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M24; $\mu = 0,5$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	118.75	35.63	149.38	44.81	175.00	52.50
0.40	105.56	42.22	132.78	53.11	155.56	62.22
0.50	95.00	47.50	119.50	59.75	140.00	70.00
0.60	86.36	51.82	108.64	65.18	127.27	76.36
0.70	79.17	55.42	99.58	69.71	116.67	81.67
0.80	73.08	58.46	91.92	73.54	107.69	86.15
0.90	67.86	61.07	85.36	76.82	100.00	90.00
1.00	63.33	63.33	79.67	79.67	93.33	93.33
1.11	59.01	65.50	74.22	82.39	86.96	96.52
1.25	54.29	67.86	68.29	85.36	80.00	100.00
1.43	49.22	70.39	61.92	88.54	72.54	103.73
2.00	38.00	76.00	47.80	95.60	56.00	112.00
2.50	31.67	79.17	39.83	99.58	46.67	116.67
3.30	25.00	82.50	31.45	103.78	36.84	121.58
5.00	17.27	86.36	21.73	108.64	25.45	127.27
10.00	9.05	90.48	11.38	113.81	13.33	133.33
	0.0	95.00	0.01	119.49	0.0	139.99

Tablica 3.7i

Interakcyjne nośności śrub M30 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadle (S_{ov}) i równolegle (S_{ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M30; $\mu = 0,2$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	121.20	36.36	151.60	45.48	178.00	53.40
0.40	101.00	40.40	126.33	50.53	148.33	59.33
0.50	86.57	43.29	108.29	54.14	127.14	63.57
0.60	75.75	45.45	94.75	56.85	111.25	66.75
0.70	67.33	47.13	84.22	58.96	98.89	69.22
0.80	60.60	48.48	75.80	60.64	89.00	71.20
0.90	55.09	49.58	68.91	62.02	80.91	72.82
1.00	50.50	50.50	63.17	63.17	74.17	74.17
1.11	46.26	51.35	57.86	64.23	67.94	75.41
1.25	41.79	52.24	52.28	65.34	61.38	76.72
1.43	37.18	53.16	46.50	66.50	54.60	78.08
2.00	27.55	55.09	34.45	68.91	40.45	80.91
2.50	22.44	56.11	28.07	70.19	32.96	82.41
3.30	17.31	57.14	21.66	71.47	25.43	83.91
5.00	11.65	58.27	14.58	72.88	17.12	85.58
10.00	5.94	59.41	7.43	74.31	8.73	87.25
	0.0	60.60	0.01	75.80	0.01	89.00

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M30; $\mu = 0,3$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	151.50	45.45	189.50	56.85	222.50	66.75
0.40	129.86	51.94	162.43	64.97	190.71	76.29
0.50	113.63	56.81	142.13	71.06	166.88	83.44
0.60	101.00	60.60	126.33	75.80	148.33	89.00
0.70	90.90	63.63	113.70	79.59	133.50	93.45
0.80	82.64	66.11	103.36	82.69	121.36	97.09
0.90	75.75	68.18	94.75	85.28	111.25	100.13
1.00	69.92	69.92	87.46	87.46	102.69	102.69
1.11	64.47	71.56	80.64	89.51	94.68	105.10
1.25	58.65	73.31	73.35	91.69	86.13	107.66
1.43	52.54	75.14	65.72	93.98	77.17	110.35
2.00	39.52	79.04	49.43	98.87	58.04	116.09
2.50	32.46	81.16	40.61	101.52	47.68	119.20
3.30	25.25	83.33	31.58	104.23	37.08	122.38
5.00	17.15	85.75	21.45	107.26	25.19	125.94
10.00	8.83	88.25	11.04	110.39	12.96	129.61
	0.0	90.90	0.01	113.70	0.01	133.50

Tablica 3.7j

Interakcyjne nośności śrub M30 w doczołowych połączeniach sprężanych obciążonych prostopadłe (S_{ov}) i równoległe (S_{ot}) do osi łączników [kN]

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M30; $\mu = 0,4$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	173.14	51.94	216.57	64.97	254.29	76.29
0.40	151.50	60.60	189.50	75.80	222.50	89.00
0.50	134.67	67.33	168.44	84.22	197.78	98.89
0.60	121.20	72.72	151.60	90.96	178.00	106.80
0.70	110.18	77.13	137.82	96.47	161.82	113.27
0.80	101.00	80.80	126.33	101.07	148.33	118.67
0.90	93.23	83.91	116.62	104.95	136.92	123.23
1.00	86.57	86.57	108.29	108.29	127.14	127.14
1.11	80.26	89.09	100.40	111.44	117.88	130.85
1.25	73.45	91.82	91.88	114.85	107.88	134.85
1.43	66.23	94.71	82.84	118.46	97.27	139.09
2.00	50.50	101.00	63.17	126.33	74.17	148.33
2.50	41.79	104.48	52.28	130.69	61.38	153.45
3.30	32.76	108.10	40.97	135.21	48.11	158.76
5.00	22.44	112.22	28.07	140.37	32.96	164.81
10.00	11.65	116.54	14.58	145.77	17.12	171.15
	0.0	121.20	0.02	151.59	0.02	177.99

$X = \frac{S_{ov}}{S_{ot}}$	Klasy śrub M30; $\mu = 0,5$					
	8.8		10.9		12.9	
	S_t	S_s	S_t	S_s	S_t	S_s
0.30	189.38	56.81	236.88	71.06	278.13	83.44
0.40	168.33	67.33	210.56	84.22	247.22	98.89
0.50	151.50	75.75	189.50	94.75	222.50	111.25
0.60	137.73	82.64	172.27	103.36	202.27	121.36
0.70	126.25	88.38	157.92	110.54	185.42	129.79
0.80	116.54	93.23	145.77	116.62	171.15	136.92
0.90	108.21	97.39	135.36	121.82	158.93	143.04
1.00	101.00	101.00	126.33	126.33	148.33	148.33
1.11	94.10	104.45	117.70	130.65	138.20	153.40
1.25	86.57	108.21	108.29	135.36	127.14	158.93
1.43	78.50	112.25	98.19	140.41	115.28	164.86
2.00	60.60	121.20	75.80	151.60	89.00	178.00
2.50	50.50	126.25	63.17	157.92	74.17	185.42
3.30	39.87	131.57	49.87	164.57	58.55	193.22
5.00	27.55	137.73	34.45	172.27	40.45	202.27
10.00	14.43	144.29	18.05	180.48	21.19	211.90
	0.0	151.49	0.02	189.49	0.02	222.49

4. Zalecenia dotyczące projektowania połączeń śrubowych

4.1. Wprowadzenie

W rozdziale tym omówiono zagadnienia doboru rodzaju złączy, konstruowania połączeń, a także wybrane aspekty technologiczne wykonawstwa warsztatowego i realizacji styków śrubowych.

Jednym z podstawowych kryteriów bezpiecznego projektowania jest zapewnienie konstrukcji, w tym połączeń, odpowiedniej nośności i sztywności oraz eliminowanie nagłych form zniszczenia. Wymagania te nie zawsze są przestrzegane w projektowaniu połączeń, z powodu braku znajomości zachowania się węzłów oraz styków pod obciążeniem, a także kryteriów oceny i zasad doboru połączeń stosowanych w budowlanych konstrukcjach stalowych. Wiedza z tej dziedziny stała się jednak niezbędna po wprowadzeniu współcześnie obowiązujących norm [51], [60] projektowania i obliczania konstrukcji stalowych.

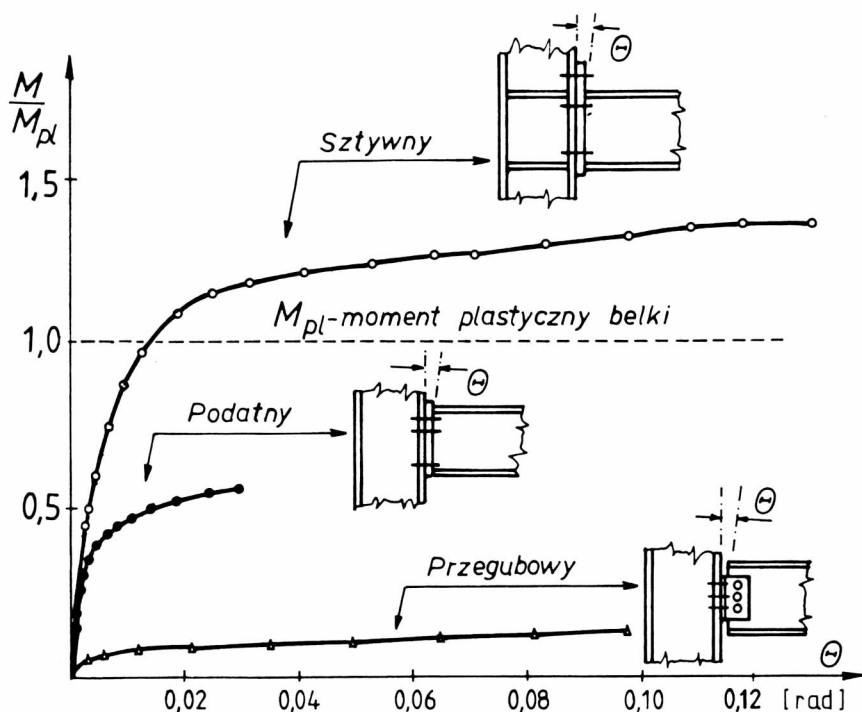
Projektowanie złączy (węzłów i styków śrubowych) polega na doborze kategorii połączenia i rozwiązania konstrukcyjnego, adekwatnego do występujących sił wewnętrznych i przyjętego schematu statycznego. W przyjętym do wyznaczania sił wewnętrznych schemacie statycznym należy zidentyfikować sztywność, nośności i zdolności do obrotu węzłów, do czego jest niezbędna znajomość ścieżek równowagi statycznej połączeń (ŚRS, tj. zależność: siła osiowa N – przemieszczenie y ; moment zginający M – kąt obrotu θ). Zakres uzyskanej już wiedzy dotyczący ŚRS połączeń oraz uwzględnienia zmiennych charakterystyk: $N(y)$, $M(\theta)$ w analizach statycznych jest bardzo duży, chociaż nie dotyczy wszechstronnie wielu zagadnień. Uwzględnienie podatności połączeń w obliczeniach stwarza nadal wiele trudności z powodu braku rutynowych procedur obliczeniowych. Norma [60] nie podaje praktycznych zaleceń w tym zakresie. Pewne wskazówki na temat uwzględnienia podatności węzłów w projektowaniu konstrukcji stalowych podano w Eurokodzie 3 [51]. W książce Jana Bródki i Aleksandra Kozłowskiego [15], a także pracach [5], [16] [17], [19], [31], [33], [34], [40], [42], [43] podano obszerniejsze informacje na ten temat.

4.2. Kryteria doboru połączeń śrubowych

Dobór rodzaju połączenia śrubowego oraz przyjęcie jednej z sześciu kategorii złączy według zaleceń [60] wiąże się ściśle z założonym w analizie statyczno-wytrzymałościowej modelem (schematem) węzła lub styku w aspekcie oczekiwań odnośnie do jego zachowania się pod obciążeniem. Chodzi o to, aby przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne połączenia odpowiadało założonej w globalnej analizie statycznej (w schemacie wyznaczania sił wewnętrznych)

sztwności węzłów i styków (podatność na obrót i przemieszczenia). W odniesieniu do węzłów uznawanych za sztywne lub przegubowe można korzystać z klasycznych metod mechaniki budowli, dla węzłów półsztywnych natomiast należy uwzględnić w obliczeniach statycznych podatności węzłów. Wykorzystuje się wtedy charakterystykę $N(y)$, $M(\theta)$, która jest podstawową cechą węzła, stosowaną w analizie sztywności, stateczności i nośności konstrukcji. Rzeczywiste zachowanie się węzłów jest badane doświadczalnie na próbnych elementach [15]. Bezpośrednie zastosowanie wyników badań do globalnych analiz statycznych wymagałoby posiadania pełnej kolekcji tych wyników dla każdego zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego węzła, co przy dużej różnorodności typów i wymiarów połączeń jest praktycznie niemożliwe. Spowodowało to rozwój metod prognozowania zależności $N(y)$ i $M(\theta)$. Wiedza na temat zachowania się węzłów i styków śrubowych pod obciążeniem jest już bardzo duża i nadal jest tworzona, między innymi z powodu różnorodności możliwych rozwiązań konstrukcyjnych i potrzeby eksperymentalnej weryfikacji przyjmowanych sztywności złączy. Zidentyfikowane są ścieżki równowagi statycznej najczęściej stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych połączeń [15].

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 studiach naukowych i prowadzi do dokładniejszego określenia wyężenia konstrukcji.



Rys. 4.1. Ścieżki równowagi statycznej doczołowych styków śrubowych o różnych sztywnościach [40]

Stosowane w praktyce rozwiązania konstrukcyjne połączeń nie spełniają w sposób ścisły wymagań określonych w odniesieniu do węzłów sztywnych (w rzeczywistości są podatne) i przegubowych (w rzeczywistości przeguby techniczne wykazują pewien stopień zamocowania pręta w węźle). Na rysunku 4.1 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych doczołowych styków belki ze słupem o różnych sztywnościach [40]. Połączenia i węzły w aspekcie ich sztywności można podzielić na sztywne, przegubowe i podatne (*semi-rigid*). Zagadnienie analizy podatności węzłów oraz doboru złączy w aspekcie sztywności będzie przedmiotem analiz w rozdziale 5.

Podsumowując należy stwierdzić, iż równie istotną fazą projektowania jak wyznaczanie sił wewnętrznych i wymiarowanie prętów jest faza konstruowania połączeń, której zadaniem jest adekwatne odwzorowanie przyjętych modeli obliczeniowych. Identyfikacja konstrukcyjna przyjętych modeli obliczeniowych stanowi podsumowanie twórczego procesu projektowania. Przyjęcie nieadekwatnego w stosunku do wykonanych obliczeń rozwiązania konstrukcyjnego połączenia może spowodować inny niż zakładano rozkład sił wewnętrznych, a przyjęte przekroje i sztywności prętów, węzłów oraz połączeń mogą być niewystarczające do przeniesienia sił wewnętrznych. Istotne wskazówki dotyczące projektowania połączeń można uzyskać analizując wyniki badań doświadczalnych. Omówienie światowych badań eksperymentalnych w skali naturalnej węzłów podano w pracy [15].

Połączenia w budowlanych konstrukcjach stalowych należy projektować tak, aby w węźle (styku) nie następowało przedwczesne zniszczenie połączenia. Według [60] oraz [51] przez zniszczenie przedwczesne rozumie się formy wyczerpania nośności polegające na ścięciu lub rozerwaniu łącznika, rozerwaniu lub ścięciu przekroju osłabionego otworami na śruby, przed uplastycznieniem się przekroju brutto łączonych elementów.

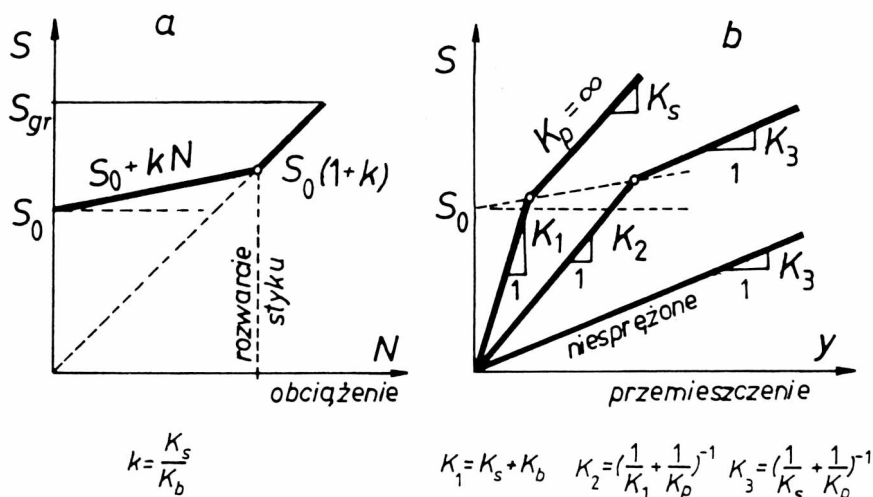
Uzyskanie wymaganych cech styków śrubowych jest możliwe, między innymi, przez wybór rodzaju łączników odpowiedniej kategorii połączenia A, B, C, D, E lub F (patrz tablice 1.1, 2.4 i 3.5) oraz odpowiednie szacowanie nośności i ukształtowanie złączy, a przede wszystkim skorzystanie z wyników opublikowanych badań doświadczalnych i teoretycznych metod prognozowania podatności połączeń.

Podział połączeń na sześć kategorii w normie [60] ułatwia precyzowanie wymagań bezpieczeństwa, odpowiednio do rodzaju obciążeń i wymagań użytkowych, w zależności od obliczeniowego stanu granicznego. Tablicę 1.1 podziału połączeń śrubowych na kategorie według [60] należy rozumieć jako wytyczne doboru złączy w podejmowaniu decyzji projektowych. W zależności od obciążenia lub ograniczenia, wynikającego z rozpatrywanego stanu granicznego użytkowania, dobiera się rodzaj połączenia (zakładkowe, doczołowe), jego konstrukcję (żebra, grubości blach) oraz stosowane w nich łączniki (zgrubne, średnio dokładne, pasowane, niesprężane, sprężane). W tablicach 1.1, 2.4 i 3.5 wymieniono kryteria służące do prowadzenia sprawdzeń w stanie granicznym nośności i użytkowania.

Najczęściej stosuje się połączenia zakładkowe kategorii A i doczołowe kategorii D. Gdy należy ograniczyć przemieszczenia, ze względu na stan

graniczny użytkowania, właściwymi są wówczas połączenia zakładkowe kategorii B lub doczołowe kategorii E. Jeżeli w konstrukcji występują obciążenia zmienne co do znaku (obciążenia dynamiczne, uderowe, wielokrotnie zmienne), to odpowiednie będą połączenia pasowane kategorii A, a przede wszystkim połączenia sprężone zakładkowe kategorii C lub doczołowe kategorii F. Stosowanie połączeń kategorii C i F jest wskazane również wtedy, gdy poślizg lub rozwarcie styku uniemożliwia jej dalsze użytkowanie. Według [27] połączenia kategorii B i E mogą być stosowane przy obciążeniach dynamicznych, gdy nie występuje niebezpieczeństwo przekroczenia wartości charakterystycznej amplitudy obciążenia, co mogłoby wywołać pełzanie, zanik sprężania i odkręcania się nakrętek lub zmęczenie stali w śrubach.

Cechą charakterystyczną śrubowych sprężonych połączeń doczołowych jest mały zakres zmian wyężenia śrub oraz większa sztywność styków w porównaniu z połączeniami niesprężonymi, co przykładowo przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Porównanie sztywności niesprężonych i sprężonych zginanych styków doczołowych o konstrukcji pokazanej na rys. 3.6a [27]

Porównanie sztywności doczołowych styków sprężonych i niesprężonych, o konstrukcji pokazanej na rys. 3.6a, uzyskano analizując zależności między siłą w śrubie S a jej obciążeniem N (rys. 4.2a) oraz siłą w śrubie S i przemieszczeniem y (rozwarciem styku; rys. 4.2b). Na rysunku 4.2 [27] oznaczono przez K_s – sztywności śrub podczas rozciągania, K_b – sztywności bryły docisku podczas rozprężania oraz K_p – sztywność blachy czołowej przy zginaniu.

4.3. Wymagania i zalecenia dotyczące śrub stosowanych w połączeniach budowlanych konstrukcji stalowych

Wytrzymałość śrub na rozciąganie R_m , nie powinna być mniejsza niż granica plastyczności R_e stali części łączonych. Warunek ten spełniają stale gatunku St0S i St3S – dla wszystkich klas śrub, w odniesieniu do stali 18G2 –

dla śrub wszystkich klas oprócz 3.6, w przypadku stali stopowej 18G2AV – dla śrub klasy 5.6 i wyższych. Wymóg ten stanowi konsekwencję przyjętego modelu obliczania śrub na docisk.

Do połączeń śrubowych zwykłych norma [60] zaleca stosować następujące śruby: klasy 4.8 dla średnic $d \leq 20$ mm i klasy 5.6 dla średnic $d > 20$ mm. Stosowanie śrub według [60] klas 3.6, 4.6, 5.6 i 6.6 (a więc o stosunku $R_e/R_m = 0,6$) i średnicach $d \leq 20$ mm jest niewskazane. Norma PN-82/M-82054.03 [67] podaje, że śruby tych klas są dostarczane tylko po uzgodnieniu z producentem.

W zakładkowych śrubowych połączeniach pasowanych należy stosować śruby o dokładnej jakości wykonania według [72], [73] (oznaczone symbolem A – patrz rozdział 1).

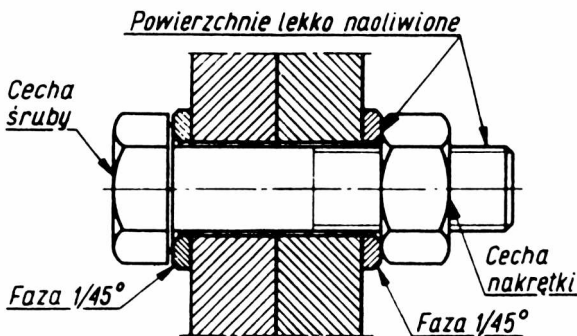
W zakładkowych połączeniach zwykłych oraz połączeniach doczołowych niesprężanych należy stosować śruby o średnio dokładnej jakości wykonania według [68] i [69] (oznaczone symbolem B).

W zakładkowych połączeniach zwykłych, w stykach elementów słabo wyteżonych o drugorzędym znaczeniu dla bezpieczeństwa konstrukcji, można stosować śruby o zgrubnej jakości wykonania (oznaczone symbolem C).

W połączeniach śrubowych należy stosować nakrętki według [70] adekwatne do przyjętej klasy śrub, tj. o klasie właściwości mechanicznych i dokładności wykonania zgodnej z klasą śrub. Podano je w tabl. 1.3.

W połączeniach zakładkowych i doczołowych sprężonych stosuje się:

- śruby z łbem zwykłym według [68] lub powiększonym według [74], klas nie niższych niż 8.8, w wykonaniu B;
- nakrętki zwykłe według [70] lub powiększone według [71], o klasie właściwości mechanicznych zgodnej z klasą śrub (patrz tabl. 1.3), w wykonaniu B;
- podkładki okrągłe do połączeń sprężanych według [66], o twardości 315–370 HV, w wykonaniu dokładnym (podkładki te mają zukosowane krawędzie).



Rys. 4.3. Prawidłowo złożone połączenie ze śrubą sprężającą [44]

W połączeniu sprężanym należy stosować 2 podkładki pod łbem śruby i pod nakrętką. Prawidłowo złożone śrubowe połączenie sprężone pokazano na rys. 4.3.

Średnicę śruby w połączeniu przyjmuje się w zależności od grubości cieńszej z łączonych części w połączeniu. Zazwyczaj przyjmuje się średnicę trzpienia d śruby w przedziale

$$1,5t_{\min} \leq d \leq 2,5t_{\min}, \quad (4.1)$$

gdzie: $t_{\min}$ – najmniejsza grubość ścianki łączonych elementów.

Sumaryczna grubość łączonych części w złączu nie powinna przekraczać $5d$ w połączeniach niesprężanych oraz $8d$ w połączeniach sprężanych.

Długość śruby ustala się jako sumę grubości łączonych części, dodając ponadto długość części gwintowanej, która służy do założenia nakrętki. W zakładkowych połączeniach zwykłych (niesprężanych), gdy trzpień śruby jest ścinany i dociskany do ścianki otworu, należy przewidzieć odpowiednią liczbę podkładek w złączu, w celu wyeliminowania wyteżenia gwintowanej części trzpienia w złączu. Liczbę podkładek okrągłych w połączeniu powinno się ograniczać przez dobór właściwej długości śrub. Sumę grubości podkładek dodaje się do sumy grubości łączonych części, przy czym gwint powinien kończyć się na podkładce. Potrzebną długość śrub ustala się więc w zależności od długości *skleszczenia* łączonych elementów, korzystając z norm [68], [69], [74] oraz tablic do projektowania konstrukcji stalowych, gdzie podano asortyment długości produkowanych łączników.

W połączeniach, które mają spełniać rolę konstrukcyjną (z wyjątkiem np. śrub montażowych, pełniących rolę stabilizującą przed wykonaniem konstrukcyjnych połączeń spawanych), należy stosować co najmniej dwie śruby, nie mniejsze niż M16 (w połączeniach konstrukcji z kształtowników giętych nie mniejsze niż M12).

W połączeniach konstrukcji poddanych działaniu obciążeń zmiennych nakrętki śrub powinny być zabezpieczone przed odkręcaniem. Zabezpieczenie takie uzyskuje się przez zastosowanie podkładek sprężystych pod nakrętkami, podwójnych nakrętek, sprężania śrub lub przez zbiecie gwintu śruby ponad nakrętką.

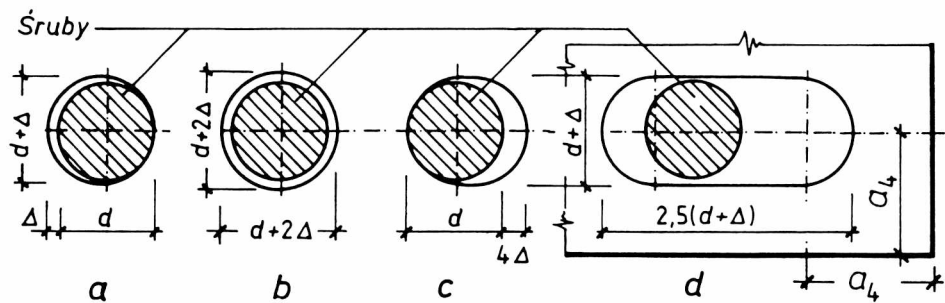
4.4. Zasady rozmieszczania śrub w połączeniach śrubowych

W projektowaniu połączeń śrubowych istotne znaczenie ma racjonalne rozmieszczenie łączników w aspekcie możliwości technologii wykonania złącza, wpływu na nośność graniczną łącznika w stanie uplastycznienia ścianki (nośność na docisk), ścięcia lub rozerwania łączonego elementu, utraty stateczności przez części łączone, a także odpowiedniej szczelności ze względów antykorozyjnych.

W połączeniach śrubowych zazwyczaj stosuje się otwory okrągłe, większe od średnicy śruby d o wielkość Δ (gdzie Δ – luz montażowy). Średnica otworów okrągłych wynosi $d_o = d + \Delta$.

Otwory okrągłe powiększone o średnicach $d_o = d + 2\Delta$ oraz otwory owalne krótkie $(d + \Delta) \times (d + 4\Delta)$ i długie $(d + \Delta) \times 2,5(d + \Delta)$ są wykonywane w celu

ułatwienia montażu i regulacji konstrukcji w trakcie jej scalania. Kształty otworów na śruby pokazano na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Otwory na śruby według [60]; a – okrągłe, b – okrągłe powiększone, c – owalne krótkie, d – owalne długie

W normie [60] wymiary otworów na śruby (wielkość luzu) uzależniono od średnicy śruby. Wymiary otworów w złączach śrubowych według [60] podano w tabl. 4.1.

Tablica 4.1.

Wymiary otworów w złączach śrubowych według [60]

Średnica śruby [mm]	$8 \leq d \leq 14$	$16 \leq d \leq 24$	$27 \leq d \leq 45$
Rodzaj otworu	Maksymalne średnice otworów d_o [mm]		
	$\Delta = 1 \text{ mm}$	$\Delta = 2 \text{ mm}$	$\Delta = 3 \text{ mm}$
Okrągły ¹ (klasa średnio dokładna)	$d + \Delta$		
Okrągły powiększony	$d + 2\Delta$		
Owalny krótki	$(d + \Delta) \times (d + 4\Delta)$		
Owalny długi	$(d + \Delta) \times 2,5(d + \Delta)$		
¹ Dla otworów pasowanych przyjmuje się: $\Delta \leq 0,2 \text{ mm}$, gdy $d \leq 22 \text{ mm}$, $\Delta \leq 0,3 \text{ mm}$, gdy $d > 22 \text{ mm}$.			

Wymiary otworów przejściowych na śruby wpływają bezpośrednio na wielkość wzajemnych przemieszczeń łączonych elementów. Najczęściej w połączeniach zwykłych, ciernych oraz doczołowych stosuje się otwory okrągłe zwykle o średnicach d_o większych od 1 do 3 mm od średnic d śrub. Stosując otwory okrągłe powiększone należy liczyć się nie tylko ze zwiększonymi przemieszczeniami w zakładkowych połączeniach, ale również ze zmniejszeniem nośności złączy. Otwory owalne (krótkie lub długie) powinny być usytuowane osią podłużną prostopadle do kierunku obciążenia. W połączeniach z powiększonymi lub owalnymi otworami powinny być stosowane podkładki nie tylko pod nakrętkami, ale również pod łbami śrub.

Odległości łączników w śrubowych połączeniach zakładkowych między łącznikami oraz od brzegu łączonych elementów zostały przyjęte w normie [60] jako minimalne, zależne od średnicy śruby i jako maksymalne, zależne od

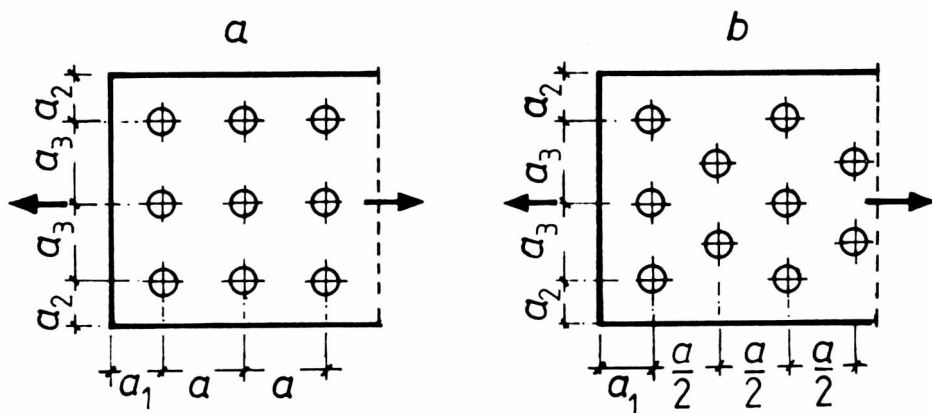
grubości łączonych elementów. Graniczne odległości rozmieszczenia śrub w połączeniach zakładkowych według normy [60] podano w tabl. 4.2. Tablicę 4.2 należy rozpatrywać łącznie z rys. 4.5.

Tablica 4.2.

Graniczne odległości i rozmieszczenia śrub w połączeniach zakładkowych według [60]

Odległość, rozstaw	Oznaczenia według rys. 4.5	Graniczne odległości w połączeniach zakładkowych ¹	
		min	max
Odległość od czoła blachy (ścianki) w kierunku obciążenia	a_1 ²	$1,5d$	min $\begin{cases} 12t \\ 150 \text{ mm} \\ (4t + 40 \text{ mm})^3 \end{cases}$
Odległość od bocznego brzegu blachy ($a_2 \perp a_1$)	a_2		
Rozstaw szeregów	a_3	$2,5d$	min (14t, 200 mm)
Rozstaw łączników w szeregu	a ²		$2a_{3\max} - a_3$ ⁴

¹ d – średnica łącznika, t – grubość blachy (ścianki).
² Odległość a_1 oraz a należy dobrać z uwzględnieniem nośności łącznika, ze względu na docisk S_{Rb} według wzoru (2.6).
³ Dotyczy konstrukcji nie osłoniętych.
⁴ W elementach rozciąganych można przyjmować w szeregach wewnętrznych $2a_{\max}$ lub we wszystkich szeregach $1,5a_{\max}$.



Rys. 4.5. Rozstaw śrub w połączeniu zakładkowym według [60]

Odległości minimalne rozstawów łączników a_i wynikają z warunków wytrzymałościowych na docisk, rozerwanie i ściecie blach łączonych elementów, a także możliwości dokręcania nakrętek śrub.

Rozmieszczając śruby w połączeniu należy zachowywać odstępy zbliżone do minimalnych, podanych w tabl. 4.2. Jeśli odstępy śrub są duże, to powierzchnie łączonych elementów nie przylegają do siebie, co sprzyja wnikaaniu wilgoci i korozji powierzchni przyłgowych w złączy (z tego wynika ograniczenie odległości łączników od krawędzi a_1 i a_2 dla konstrukcji nieosłoniętych do $4t + 40$ mm). Ograniczenie maksymalnych odległości między

łącznikami w połączeniach jest również związane z możliwością utraty stateczności przez ściskane części łączone (stąd uzależnienie od grubości części łączonych).

W połączeniach zakładkowych łączniki należy rozmieszczać w układzie prostokątnym (rys. 4.5a) lub przemiennym (rys. 4.5b).

Norma [60] nie precyzuje usytuowania otworów powiększonych oraz owalnych (krótkich i długich) od brzegu otworu. Norma niemiecka [50] oraz Eurokod 3 [51] rozstawy śrub w połączeniach zakładkowych: a , a_1 , a_2 uzależniają od średnicy otworu na śrubę $d_o = d + \Delta$. W odniesieniu do otworów owalnych, według Eurokodu 3 [51], odległość a_4 od osi otworu owalnego do najbliższego brzegu czołowego lub bocznego (patrz rys. 4.4d) nie powinna być mniejsza niż $1,5d_o$.

Według normy [60] śruby w połączeniach doczołowych należy rozmieszczać spełniając następujące warunki:

— odległość od swobodnej krawędzi blachy w kierunku prostopadłym do płaszczyzny obciążenia

$$1,5d \leq a_2 \leq 6t, \quad (4.2)$$

— odległość między śrubami

$$2,5d \leq a \leq 15t, \quad (4.3)$$

gdzie: t — grubość blachy czołowej.

Dla tych złączy przyjmuje się $a_1 \approx a_2$ [14].

Śruby w połączeniach powinny być w miarę możliwości rozmieszczane symetrycznie w stosunku do osi działania obciążenia.

Projektując połączenia doczołowe należy rozmieszczać śruby odpowiednio do wielkości i rozkładu sił wewnętrznych w styku. W połączeniach doczołowych prętów rozciąganych należy śruby rozmieszczać symetrycznie w stosunku do środka ciężkości przekroju łączonych elementów. W doczołowych połączeniach zginanych śruby rozmieszcza się wokół pasa rozciąganego.

Ze względu na dążenie do ograniczenia odkształceń blach czołowych, śruby w stykach doczołowych umieszcza się możliwie blisko usztywnionych krawędzi. Odległość c krawędzi otworu śruby od brzegu spoiny lub wyokrąglenia pasa przy średniku powinna wynosić

$$c \leq d. \quad (4.4)$$

Szerokość współdziałania blachy czołowej przypadającą na jedną śrubę przyjmuje się z zachowaniem warunku

$$b_s \leq 2(c + d). \quad (4.5)$$

Należy zaznaczyć, że zbyt małe odległości między śrubami w styku doczołowym b_s mogą osłabić nośność zginanego przekroju blachy czołowej.

Usztywnienie blachy czołowej żebrami wpływa na zmniejszenie odkształceń styków doczołowych. Nie należy jednak stosować uźebrowanych styków doczołowych w złączach obciążonych dynamicznie. Zmniejszenie podatności blachy czołowej można wówczas uzyskać przez zastosowanie grubszych blach, a także podkładek prostokątnych lub kwadratowych pod śrubami (rys. 3.9).

Zalecane są [33] następujące wymiary żeber usztywniających blachy czołowe: szerokość $b_z \geq c + 2d$, długość $l_z = 2b_z$ oraz grubość nie mniejsza od grubości środnika belki (gdzie: c jak we wzorze (4.4)).

4.5. Wybrane zagadnienia technologii wykonania połączeń śrubowych

W realizacji śrubowych połączeń można wyróżnić fazę wykonawstwa warsztatowego w wytwórni konstrukcji stalowych oraz fazę scalania montażowego na budowie. W wytwórniach konstrukcji stalowych (warsztatach) wykonuje się następujące czynności dotyczące bezpośrednio połączeń śrubowych: przecinanie blach i kształtowników wchodzących w skład styku, trasowanie na nich osi usytuowania śrub oraz wiercenie otworów. W razie złożonych konstrukcji i trudnych warunków montażu w wytwórniach konstrukcji stalowych wykonuje się również próbne scalanie ustroju (próbny montaż).

Trasowanie polega na nanoszeniu oznaczeń rozmieszczenia otworów śrub na elementach łączonych. Gdy spodziewamy się odkształceń technologicznych (spawalniczych) łączonych elementów, trasowanie otworów wykonuje się wówczas po zespawaniu elementów składowych w podzespoły montażowe. Realizując konstrukcje powtarzalne korzystne jest stosowanie wzorników do trasowania.

Otworki na śruby w elementach drugorzędnych mogą być wykonywane na dziurkarkach (wycinane). W takim wypadku podczas przebijania otworu następuje deformowanie brzegów materiału na ich obwodzie. Z tych też względów najczęściej otworki wierce się za pomocą wiertarek dla średnic śrub $d < 55$ mm i wytaczarek dla średnic śrub $d > 55$ mm [2]. Jeśli są wymagane otworki wiercone, to można stosować wycinanie i rozwiercanie otworów. Przebijanie otworów bez ich późniejszego rozwiercania nie powinno występować w konstrukcjach obciążonych dynamicznie oraz w połączeniach znajdujących się w sąsiedztwie przegubów plastycznych. Otwory przeznaczone do założenia śrub pasowanych są zawsze najpierw wykonywane o mniejszej średnicy, a następnie rozwiercane do właściwego wymiaru. W celu ograniczenia skutków losowego usytuowania otworów w łączonych elementach na komplikacje w trakcie montażu wskazane jest wiercenie otworów z zastosowaniem szablonów oraz metodą jednoczesnego wycinania otworów lub wiercenia wielowrzecionowego.

W połączeniach doczołowych wymagana jest dokładność kąta nachylenia oraz płaskości styku blach czołowych [62], dlatego też konieczne jest zapewnienie odpowiednio dokładnej płaszczyzny cięcia łączonych kształtowników, stosowanie właściwej technologii spawania, jak również frezowania powierzchni przylgowych styków doczołowych. Niewłaściwa technologia wykonania złączy powoduje powstawanie imperfekcji geometrycznych styków (rys. 4.7).

Blachy czołowe w stykach doczołowych powinny być wykonane ze stali uspokojonej St3S lub 18G2A i sprawdzone czy nie mają rozwarstwień.

Nominalne wymiary otworów na śruby (okrągłe, okrągłe powiększone, owalne krótkie i długie) podano w tabl. 4.1. Stosowanie otworów okrągłych powiększonych oraz owalnych umożliwia *gubienie* odchyłek geometrycznych w połączeniach w trakcie scalania konstrukcji na montażu. Konsekwencją zastosowania takich otworów w połączeniach zakładkowych jest zwiększenie przemieszczeń i zmniejszenie nośności styku. W przypadku śrub fundamentowych można wykonać w blachach otwory powiększone, pod warunkiem, że stosuje się podkładki o odpowiednich wymiarach i grubości. Otwory w podkładkach nie powinny być jednak większe niż otwory okrągłe (rys. 4.4a).

W zakładkowych połączeniach ciernych powierzchnie przylegania części składowych złącza powinny być przed montażem odpowiednio przygotowane, w celu zapewnienia przewidywanej w dokumentacji technicznej wartości współczynnika tarcia. Stykające się powierzchnie połączenia należy bardzo starannie oczyścić, odtłuścić, a ponadto mechanicznie wyrównać występujące na nich nierówności, usunąć zgorzeliny walcownicze, zanieczyszczenia mechaniczne, rdzę, a także powłoki malarskie.

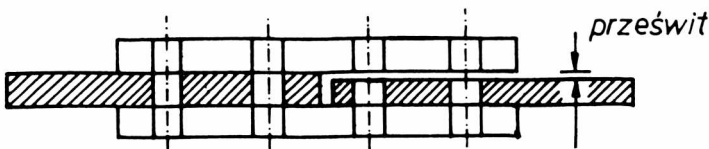
Uzyskanie określonego współczynnika tarcia umożliwiają sposoby czyszczenia powierzchni łączonych części podane w [45], a także w tabl. 2.2. W zależności od przyjętej technologii przygotowania powierzchni uzyskuje się [2] następujące współczynniki tarcia μ :

- 0,2–0,3 — po oczyszczeniu chemicznym środkami do odtłuszczania lub wyjątkowo po oczyszczeniu szczotkami drucianymi; po metalizacji natryskowej cynkiem o grubości powłoki co najmniej 50 μm ; po malowaniu farbą z proszkiem cynku,
- 0,4–0,45 — po opaleniu płomieniem (temperatura powierzchni materiału nie może przekraczać 200°C) i czyszczeniu szczotką drucianą; po śrutowaniu cierniwnem z ciętego drutu,
- 0,45–0,5 — po piaskowaniu piaskiem krzemowym, o grubości ziaren 0,7–1,2 mm; po malowaniu powłoką krzemowo-cynkową; po metalizacji krzemowo-cynkowej lub aluminiowej,
- 0,55 — po śrutowaniu śrutem żeliwnym.

Gdy części połączenia zakładkowego nie są składane bezpośrednio po oczyszczeniu, należy je zabezpieczyć przed korozją. W tym celu najlepiej jest stosować metalizację natryskową.

Istotnym zagadnieniem w realizacji połączeń śrubowych jest pasowanie powierzchni stykowych, zwłaszcza w połączeniach sprężanych. Jeśli w dokumentacji technicznej nie podano inaczej to według [51] prześwit między powierzchniami stykowymi w złączu (patrz rys. 4.6) nie powinien przekraczać:

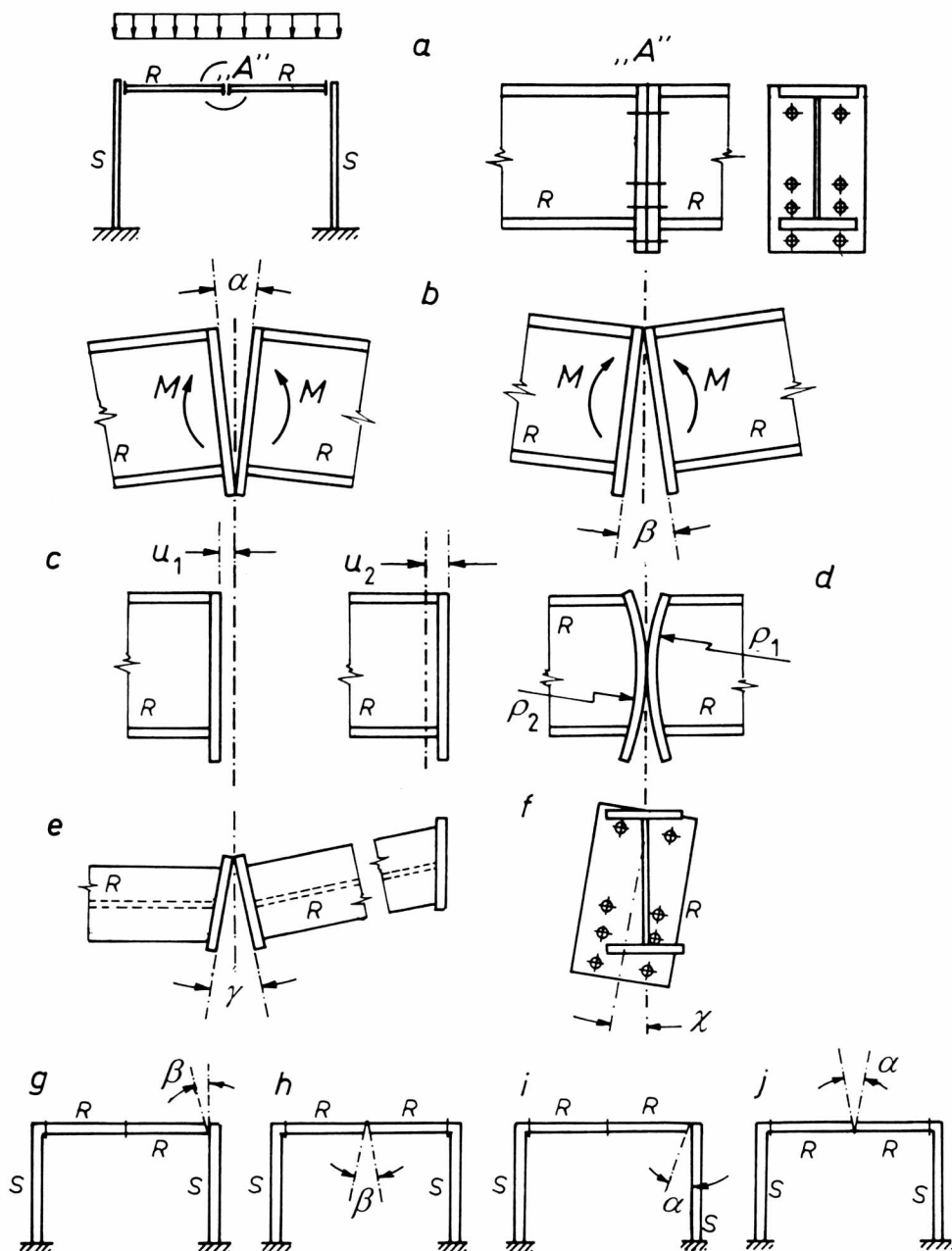
- 2 mm — w połączeniach niesprężanych
- 1 mm — w połączeniach sprężanych.



Rys. 4.6. Kontrola pasowania powierzchni stykowych w połączeniach

W połączeniach sprężanych, po założeniu śrub montażowych (wypełnia się nimi 25% otworów w styku) dodatkowo bada się szczelność styku szczelinomierzem o grubości 0,2 mm, który nie powinien wchodzić pomiędzy łączonymi blachami na głębokość większą niż 10 mm.

Niedokładności powstające podczas wytwarzania styków doczołowych (wady konstrukcyjne) są przyczyną zmniejszania nośności granicznej złączy,



Rys. 4.7. Imperfekcje geometryczne styków doczołowych [47]

powstawania montażowych sił wewnętrznych w ustroju, a także zmian prognozowanego zachowania się węzłów co może prowadzić do geometrycznej zmienności konstrukcji.

Na rysunku 4.7 [47] przedstawiono charakterystyczne imperfekcje geometryczne styku doczołowego w ramie portalowej. Analizując defekt polegający na rozchyleniu blach czołowych (rys. 4.7b), w styku w środku rozpiętości rygla lub w połączeniu rygla ze słupem, należy stwierdzić, że pod określonym obciążeniem (rys. 4.7a) rozchylenie w jednym kierunku (np. o kąt β — w środku rygla) i nieprzyleganie blach na całej powierzchni styku jest częściowo dopuszczalne, gdyż nie zmienia to schematu statycznego. Ta sama wartość rozchylenia blach czołowych (rys. 4.7b — dla kąta α w środku rygla), lecz skierowana w przeciwnym kierunku powoduje zmianę schematu statycznego, a nawet może doprowadzić do przekształcenia się konstrukcji w mechanizm kinematycznie zmienny. Dla analizowanej ramy portalowej wady nieprzylegania blach czołowych w konstrukcji pokazanej na rys. 4.7g i h mogą być częściowo dopuszczone, w odniesieniu zaś do konstrukcji przedstawionych na rys. 4.7i oraz j ta imperfekcja geometryczna sprawia, iż węzły projektowane jako sztywne zachowywać się będą jak przegubowe, co nie może być zaakceptowane. Podobne skutki wywołuje wada braku płaskości blach czołowych pokazana na rys. 4.7d. Imperfekcje geometryczne, polegające na zmianie długości elementu montażowego (rys. 4.7c), mogą powodować dodatkowe wyężenie śrub oraz elementów konstrukcji ramy. Na rysunku 4.7e i f przedstawiono wady geometryczne styku doczołowego polegające na braku prostopadłości płaszczyzny blachy stykowej do podłużnej osi elementu oraz na skręceniu jej w płaszczyźnie blachy czołowej. Następstwem tych wad geometrycznych styków jest nierównomierne wyężenie śrub w połączeniu i zmniejszenie nośności złącza.

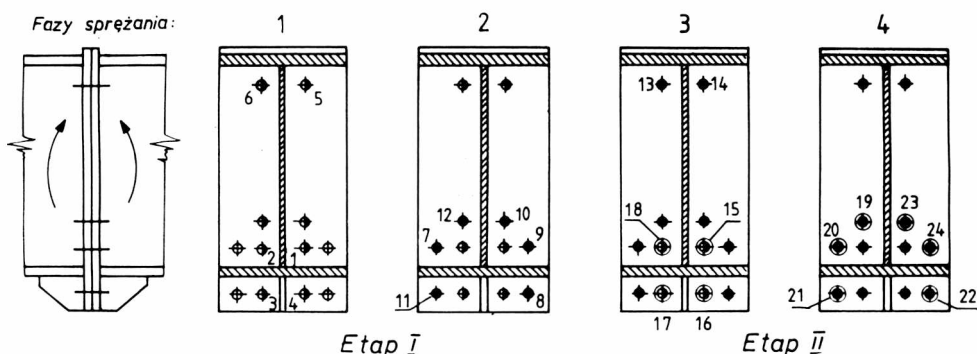
Śruby w połączeniach niesprężanych należy dokręcać w stopniu wystarczającym do zapewnienia właściwego docisku łączonych części. W połączeniach niesprężanych nie jest wymagane kontrolowanie dokręcania śrub. Jednak zaleca się takie ich dokręcanie, które odpowiada sile ramienia ludzkiego wywieranej kluczem płaskim lub pierwszego uderzenia klucza udarowego. Śruba po dokręceniu nie powinna przesuwac się ani wyraźnie drgać przy ostukiwaniu młotkiem.

Śruby w połączeniach sprężanych należy dokręcać zgodnie z dokumentacją techniczną. W dokumentacji technicznej należy podać moment dokręcający łączniki w połączeniu oraz ewentualną kolejność dokręcania śrub.

Przebieg sprężania połączeń powinien następować po uprzednim sprawdzeniu stanu śrub, nakrętek i podkładek, oczyszczeniu ich w kąpieli odtłuszczającej i wysuszeniu. Gwinty śrub i nakrętek powleka się smarem grafitowym.

Po założeniu śrub pomocniczych (montażowych) i sprawdzeniu szczelności styku szczelinomierzem w połączeniach sprężanych zakłada się śruby właściwe, które dokręca się kluczem płaskim. Następnie przystępuje się do sprężania połączenia. W tym celu stosuje się dynamometryczne klucze ręczne, udarowe, hydrauliczne lub pneumatyczne. W połączeniach o wielu śrubach sprężanie

rozpoczyna się od środka grupy śrub z jednej strony styku i postępuje symetrycznie odśrodkowo ku śrubom położonym na brzegu. Taka kolejność dokręcania śrub ma na celu zapobieganie spadkom sił sprężających w śrubach wcześniej dokręcanych. Połączenia (zakładkowe i doczołowe) należy sprężać w dwóch etapach. W pierwszej fazie sprężania styku wprowadza się sprężanie w przedziale od 55% do 75% wartości projektowanego naciągu, w drugim zaś do pełnej wartości przewidzianej w projekcie. Przykład kolejności sprężania doczołowego styku zginanego przedstawiono na rys. 4.8 [44].



Rys. 4.8. Przykład kolejności dokręcania śrub sprężających w zginanym styku doczołowym [44]

Istotnym zagadnieniem w realizacji połączeń sprężanych jest kontrola wprowadzonego naciągu śrub. Protokoły kontroli i odbioru technicznego zakładkowych i doczołowych połączeń sprężanych są dokumentami warunkującymi przekazanie obiektu do użytku. Stosuje się dwie metody kontroli sprężania połączeń: sprawdza się moment dokręcenia śrub kluczem dynamometrycznym lub wielkość kontrolowanego kąta obrotu (metoda mniej dokładna).

Do sprężania śrub metodą momentu obrotowego są stosowane klucze dynamometryczne ręczne, pneumatyczne lub pneumatyczno-hydrauliczne. Najbardziej rozpowszechnione w kraju są klucze ręczne, w których wymagany moment dokręcenia nastawiany jest pokrętłem umieszczonym w rękojeści klucza. Osiągnięcie żądanego momentu dokręcenia śruby jest sygnalizowane w zależności od rodzaju klucza dynamometrycznego, załamaniem się w przegubie, sygnałem świetlnym lub dźwiękowym. Do sprężania metodą impulsową są stosowane wkrętaki udarowe, w których po ustawieniu na żądaną wielkość sprężania wyłączenie jest automatyczne. W kluczach hydraulicznych i pneumatycznych wartość momentu dokręcenia jest odczytywana na manometrze.

Kontrola sprężania za pomocą sprawdzenia kąta obrotu nakrętki jest mniej dokładna niż kontrola z zastosowaniem kluczy dynamometrycznych i odbywa się [14] w następujących etapach:

- wstępne dokręcenie kluczem dynamometrycznym wszystkich śrub momentem dokręcenia o wartości 45% momentu wyznaczonego według (2.17), a następnie dokręcenie nakrętek o kąt 60° ,

- wstępne dokręcenie kluczem dynamometrycznym wszystkich śrub momentem dokręcenia o wartości 10% momentu wyznaczonego według (2.17), a następnie dokręcenie nakrętek o kąt 180° – 270° ,

- wstępne dokręcenie wszystkich śrub zwykłym kluczem, wykorzystując do tego siłę ramienia człowieka (około 0,4 kNm), a następnie dokręcenie nakrętek o kąt 90° – 180° .

Powierzchnie cierne w stykach zakładkowych należy kontrolować bezpośrednio przed scalaniem połączeń.

Klucze dynamometryczne stosowane do dokręcania śrub powinny mieć dokładność nie mniejszą niż $\pm 5\%$. Prawidłowość działania kluczy dynamometrycznych ręcznych należy kontrolować (rys. 2.14) codziennie przed rozpoczęciem pracy. Klucze dynamometryczne i hydrauliczne powinny być kontrolowane po każdej zmianie momentu.

Kontrola po sprężeniu kluczem dynamometrycznym powinna obejmować co najmniej 10% śrub przy liczbie śrub mniejszej niż 20 i dwa połączenia. W miejscu, w którym nakrętka śruby obróci się przy kontroli więcej niż o 15° należy sprawdzić całą grupę śrub. Jeśli jakaś śruba zostanie zakwestionowana, wówczas cała grupa śrub powinna być wymieniona.

Obszerne informacje dotyczące realizacji i odbioru połączeń sprężanych ciernych i doczołowych podano, w opracowanych przez COBPKM *Mostostal* wytycznych [44] i [45] oraz normie [62].

5. Charakterystyki sztywnościowe połączeń śrubowych

W projektowaniu stalowych konstrukcji budowlanych wymagane jest zapewnienie odpowiedniej nośności i sztywności ustroju oraz wyeliminowanie przedwczesnych form zniszczenia. Do uzyskania tych cech konstrukcja powinna mieć odpowiednią zdolność do przemieszczeń i obrotów węzłów. Nieprzestrzeganie tych wymagań prowadzi do innej niż przyjęto w modelu teoretycznym wyznaczania sił wewnętrznych, redystrybucji wyżeń elementów konstrukcji i nie osiąga ona zakładanej nośności.

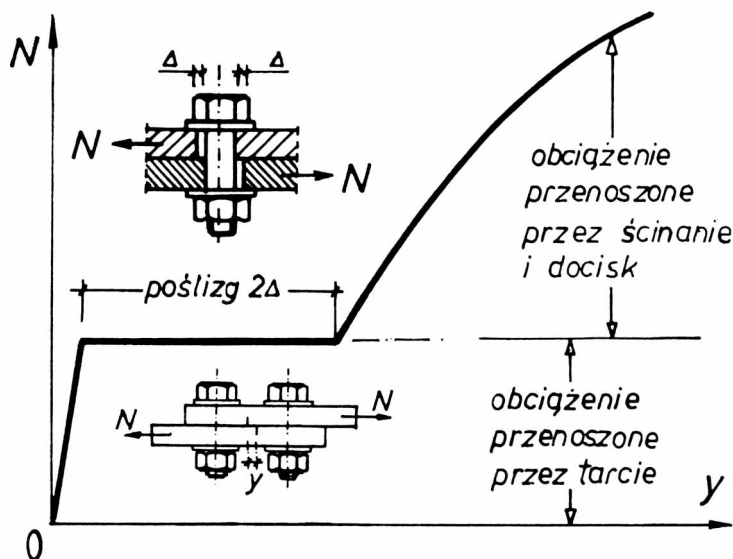
Przemieszczenia oraz siły wewnętrzne konstrukcji, złożonej z prętów połączonych w węzłach, zależą od sztywności tych prętów i węzłów, a więc są generowane przez ich ścieżki równowagi statycznej. W analizie statycznej połączenia elementów konstrukcji stalowych są modelowane najczęściej jako idealnie przegubowe lub w pełni utwierdzone, czyli doskonale sztywne. Od dawna było wiadome, że te ekstremalne sytuacje w rzeczywistych konstrukcjach stalowych nie występują. Połączenia stosowane w praktyce nie spełniają w ścisły sposób wymagań określonych w odniesieniu do węzłów sztywnych lub przegubowych, przyjmowanych w modelach obliczeniowych szacowania nośności granicznej i sztywności konstrukcji. Ich właściwości przybliżają się jedynie, w różnym stopniu, do wymagań stawianych połączeniom pełnego zamocowania lub swobodnego obrotu łączonego elementu w węźle. Przyjmowanie w takich wypadkach w modelu obliczeniowym wyznaczania sił wewnętrznych charakterystyk ekstremalnych może prowadzić do istotnych błędów projektowych.

Połączenia śrubowe, obciążone osiowo siłą podłużną N , mogą ulegać przemieszczeniom y w kierunku działającego obciążenia. Funkcje $N(y)$ tak obciążonych złączy stanowią ich charakterystyki sztywnościowe. Zależności między obciążeniem a przemieszczeniem połączeń na śrubowe łączniki są zazwyczaj nieliniowe (patrz rys. 1.4). Przyczyną tego jest niesprężysty charakter odkształceń łączników, a także elementów i części składowych styków śrubowych oraz poślizgi złączy.

Połączenia pod względem ich odkształcalności na działającą siłę podłużną N można podzielić na połączenia odkształcalne i nieodkształcalne. Do pierwszych należą połączenia zakładkowe niesprężane na śruby zwykłe lub o wysokiej wytrzymałości, gdyż pod wpływem działających obciążeń w połączeniu występują przemieszczenia trzpieni łączników względem otworów, w których są umieszczane. Do drugiej grupy należy zaliczyć przede wszystkim zakładkowe połączenia pasowane oraz cierne i doczołowe sztywne styki sprężane. Charakteryzuje je mała odkształcalność oraz brak poślizgów połączenia.

Śrubowe połączenia zakładkowe niesprężone, obciążone osiowo, w których są spełnione wymagania zdolności do przemieszczeń mogą być traktowane jako sztywne lub mało podatne pod warunkiem, że poślizg główny powodujący docisk trzpieni śrub do ścianek otworów nastąpi pod obciążeniem montażowym.

Na rysunku 5.1 pokazano ścieżkę równowagi statycznej połączenia zakładkowego niesprężonego, w którym wystąpił poślizg wynikający z luzu między trzpieniem śruby a otworem w elemencie łączonym. Poślizg w tym styku wystąpi po pokonaniu sił tarcia między powierzchniami stykowymi złącza. W połączeniach pasowanych oraz ciernych odkształcalność podłużna złącza jest bardzo mała.



Rys. 5.1. Ścieżka równowagi statycznej połączenia zakładkowego z luzami montażowymi

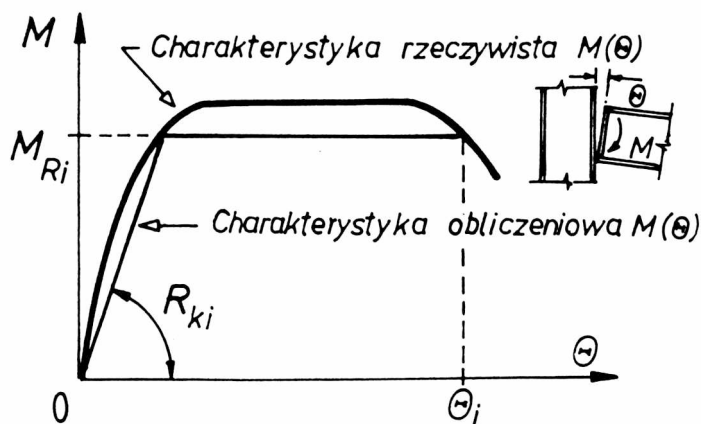
Przemieszczenia śrubowych połączeń doczołowych w bardzo małym stopniu zależą od wydłużalności śrub i są w zasadzie generowane przez odkształcalność elementów czołowych styków (zależą od grubości blach czołowych lub pasów oraz uzębrowań złączy). Szczególnie małą zdolność do wydłużeń mają śruby w połączeniach sprężanych.

W analizie wpływu podatności połączeń na rozkład sił wewnętrznych i przemieszczeń ustroju należy uwzględnić pełną wartość przemieszczeń połączeń odpowiadającą rozpatrywanemu stanowi obciążenia.

Śrubowe połączenia obciążone momentem zginającym można scharakteryzować trzema parametrami: nośnością obliczeniową przy zginaniu M_{Ri} , sztywnością obrotową złącza R_{ki} oraz obliczeniową zdolnością do obrotu θ_i . Parametry charakteryzujące zginany styk śrubowy przedstawiono na rys. 5.2.

Z uwagi na nośność M_{Ri} węzły dzieli się według [51] na: nominalnie przegubowe, o pełnej nośności i częściowej nośności.

Połączenia przegubowe [51] powinny przenosić siły poprzeczne V i osiowe N występujące w styku. Wartość przenoszonego momentu zginającego M



Rys. 5.2. Parametry charakteryzujące styk zginany

w takim połączeniu (w tzw. przegubie technicznym) nie może niekorzystnie oddziaływać na momenty zginające w konstrukcji, tj. zdolność obrotowa θ_i węzła nie może zaburzać redystrybucji sił wewnętrznych w ustroju.

Nośność połączenia M_{Ri} o pełnej nośności [51] powinna być większa od nośności na zginanie M_{Rb} łączonego elementu (belki), zdolność natomiast do obrotu θ_i połączenia powinna umożliwiać zakładaną w analizie redystrybucję sił wewnętrznych (powstanie niezbędnej liczby przegubów).

Nośność na zginanie M_{Ri} połączenia o częściowej nośności [51] nie powinna być mniejsza od obliczonych sił wewnętrznych, może być jednak mniejsza niż nośność na zginanie M_{Rb} łączonego elementu (belki). Zdolność do obrotu θ_i oraz sztywność węzłów R_{ki} takich połączeń powinna umożliwiać powstanie wszystkich, uwzględnianych w analizie statycznej przegubów plastycznych.

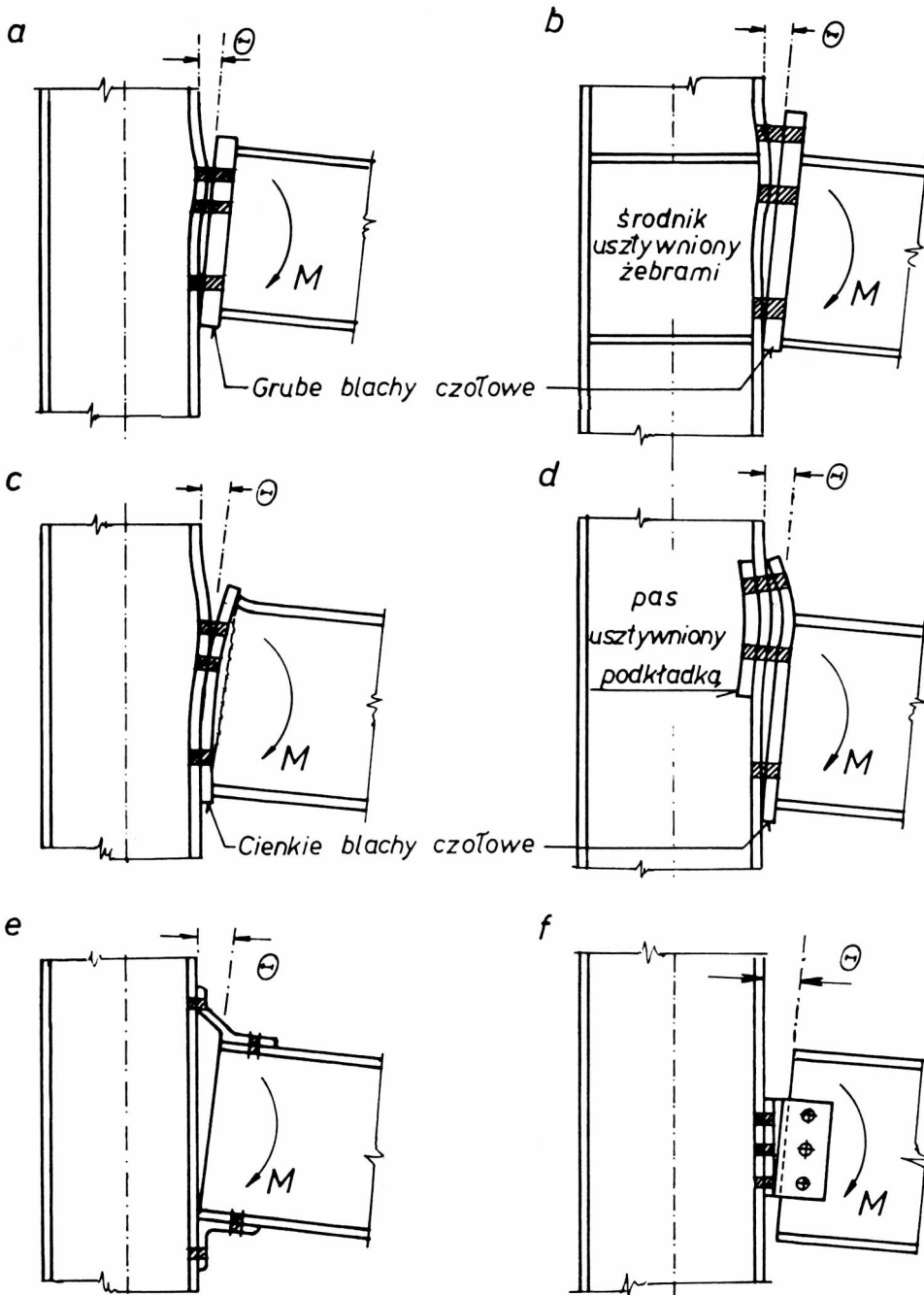
Ze względu na sztywność R_{ki} połączenia dzieli się według [51] na: nominalnie przegubowe, sztywne oraz podatne.

Połączenia nominalnie przegubowe powinny być tak skonstruowane, aby nie przenosiły znacznych momentów, które mogłyby niekorzystnie oddziaływać na elementy konstrukcji.

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

Połączenia nie spełniające kryteriów nominalnie przegubowych i sztywnych kwalifikuje się jako podatne.

Na rysunku 5.3a pokazano odkształcenia pasa słupa o nieuźebrowanym środniku, połączonego z belką wyposażoną w grubą blachę czołową. Odkształcenie pasa słupa w takim rozwiązaniu konstrukcyjnym można ograniczyć stosując zebra usztywniające środnik słupa (patrz rys. 5.3b). W razie zbliżonych sztywności pasa słupa i blachy czołowej belki elementy przyłgowe styku ulegną podobnym odkształceniom (rys. 5.3c). Ograniczenie odkształceń analizowanego styku doczołowego można uzyskać stosując podkładki usztywniające (rys. 5.3d).



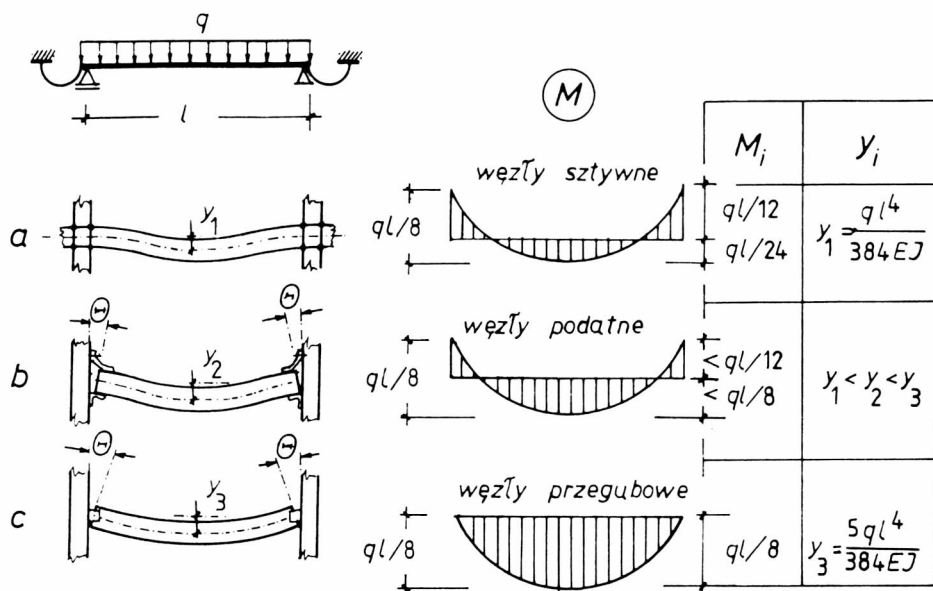
Rys. 5.3. Przykłady odkształceń połączeń belki ze słupem

Na rys. 5.3e i f przedstawiono odkształcenia kątowników służących do połączenia belki ze słupem.

Jest oczywiste, że nośności graniczne mierzone momentem zginającym M_{Ri} , sztywności obrotowe R_{ki} oraz zdolności do obrotu θ_i styków pokazanych na

rys. 5.3 są różne. Identyfikacja tych parametrów (M_{Ri} , R_{ki} , θ_i) jest możliwa, gdy są znane ścieżki równowagi statycznej węzłów. Uzyskuje się je eksperymentalnie badając modele w skali naturalnej, bądź drogą prognozowania analitycznego krzywych $M(\theta)$. Szerokie omówienie światowych badań doświadczalnych węzłów podatnych wraz z analizą porównawczą, a także metody prognozowania krzywych $M(\theta)$ podano w pracach [15], [19], [40], [42], [43].

Na rysunku 5.4 przedstawiono wpływ podatności węzłów: sztywnego spawanego (rys. 5.4a), podatnego (rys. 5.4b) o konstrukcji jak na rys. 5.3e oraz półprzegubowego (rys. 5.4c), o konstrukcji pokazanej na rys. 5.3f, na rozkład momentów zginających i przemieszczeń w ryglu ramy. Sztywność zamocowania pręta w węzle ma istotny wpływ na momenty zginające i przemieszczenia w ustroju (węzły podatne wpływają na inną redystrybucję sił wewnętrznych niż dla modelu o sztywnych lub przegubowych połączeniach prętów w węzłach). Moment zginający belki o częściowym zamocowaniu (rys. 5.4b) przyjmowany do oceny bezpieczeństwa, jest zawsze mniejszy od maksymalnych momentów belki podpartej przegubowo lub utwierdzonej na końcach. Jednocześnie ugięcie przęsła belki o połączeniach podatnych jest zawsze mniejsze od ugięcia belki swobodnie podpartej. Wskutek tego belka o częściowym zamocowaniu może mieć przekrój mniejszy niż belka projektowana według tradycyjnie przyjmowanych schematów, spełniając równocześnie wymagania stanu granicznego nośności i użytkowania.



Rys. 5.4. Wpływ podatności węzłów na rozkład momentów zginających oraz przemieszczeń w elemencie zginanym o węzłach: a – sztywnych, b – podatnych, c – przegubowych

Stosowanie węzłów podatnych (odkształcalnych), odbiegających od skrajnego przypadku połączenia sztywnego, wynikające z dążenia do uproszczeń technologicznych (eliminowanie żeber, usztywnień, zastępowanie węzłów spawanych połączeniami 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 konstrukcje te nie spełniają założeń klasycznej statyki budowli), jak i wytrzymałości oraz stateczności, ponieważ odbiegają od wyidealizowanych konwencjonalnych modeli teoretycznych.

Stosowane w konstrukcjach przeguby techniczne wykazują pewien stopień zamocowania pręta w węźle. Dlatego też istnieją przesłanki do uwzględnienia sprężystości zamocowania prętów w węzłach i dokładniejsze oszacowanie nośności i ugięć ustroju. Wymienione okoliczności sprawiają, iż niezbędne okazuje się stosowanie modeli obliczeniowych węzłów i styków ustrojów lepiej odwzorowujących rzeczywiste zachowanie się stosowanych w konstrukcjach stalowych połączeń śrubowych.

W literaturze anglojęzycznej węzły o sztywnościach pośrednich między sztywnymi i przegubowymi określa się jako *semi-rigid connection* (połączenia częściowo sztywne), a także *flexibility connection* (połączenia podatne). W polskiej literaturze używa się określeń tego typu węzłów: częściowo sztywne; półsztywne; najczęściej zaś — podatne.

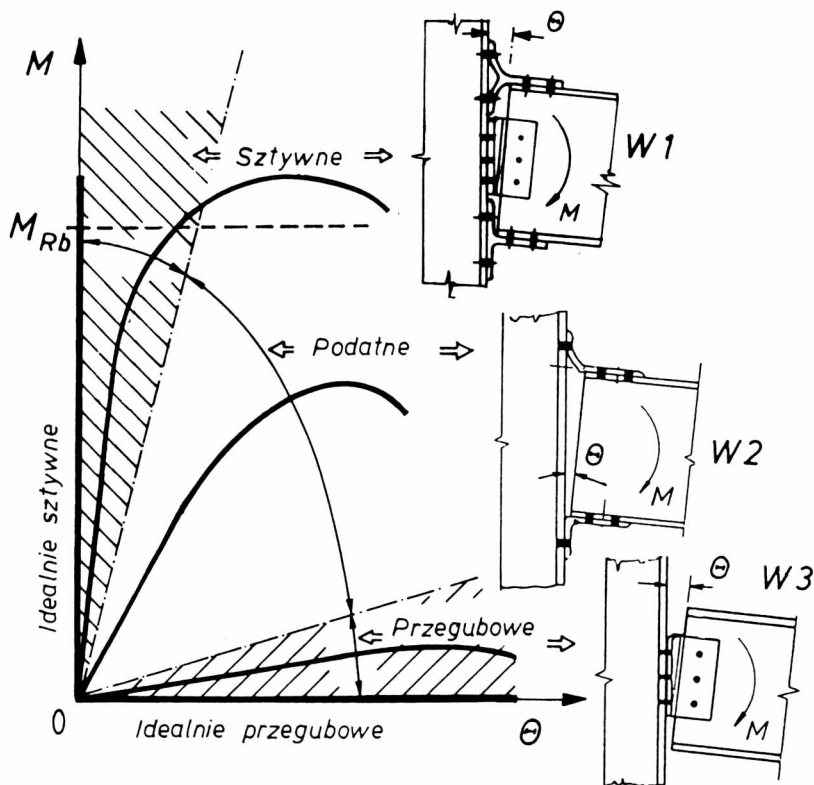
Model połączenia podatnego (częściowo sztywnego) umożliwia określenie z dużą dokładnością zachowania się węzłów, które z różnych przyczyn odbiegają od schematu złącza przegubowego lub w pełni sztywnego. Przede wszystkim jednak świadome sterowanie sztywnością węzłów i świadome rozmieszczenie tych węzłów w układzie konstrukcyjnym umożliwia niejako sterowanie nośnością graniczną i sztywnością ustroju (np. generowanie odporności konstrukcji na wpływy sejsmiczne). W ramach przechyłowych połączenia podatne prowadzą do zwiększenia przemieszczeń oraz wyężenia konstrukcji. Przeważająca większość zastosowań węzłów podatnych przypada na ramy stężone, gdzie ich oddziaływanie jest zwykle korzystniejsze niż węzłów przegubowych.

Ścieżki równowagi statycznej połączeń podatnych (półsztywnych; *semi-rigid*) są z reguły nieliniowe. Nieliniowe są również ŚRS ustrojów z takimi węzłami.

Zależnie od rodzaju konstrukcji, schematu statycznego i obciążenia, jako węzły podatne mogą być traktowane połączenia o sztywnościach od $1 \cdot 10^4$ do $5 \cdot 10^5$ kNm/rad, jako węzły sztywne natomiast połączenia o sztywności ponad $1 \cdot 10^5$ kNm/rad [33]. W konstrukcjach projektowanych, z uwzględnieniem rezerwy plastycznej, węzły sztywne powinny mieć podatność nie mniejszą niż $1 \cdot 10^5$ kNm/rad.

Na rysunku 5.5 przedstawiono wykresy zdolności do obrotu wyróżnionych trzech typów węzłów. Wykresy sporządzono dla osi współrzędnych: kąta obrotu θ oraz momentu zginającego M . Prosta M_{Rb} oznacza moment zginający, możliwy do przeniesienia przez belkę. Ścieżki równowagi statycznej węzłów pokazane na rys. 5.5 są nieliniowe. Zdolność do obrotu połączenia *półprzegubowego*, nazywanego również przegubem technicznym (o konstrukcji pokazanej na rys. 5.3f), jest zazwyczaj mała i może być niejednokrotnie pomijana w analizie statycznej (uwzględnia się ją jednak niekiedy w obliczeniach stateczności).

Właściwości konstrukcyjne wszystkich połączeń powinny być zgodne z założeniami przyjętymi w analizie statycznej konstrukcji (w modelu wyznaczania sił wewnętrznych) i procedurze obliczania nośności granicznej elementów (plastycznej, sprężystej).



Rys. 5.5. Ścieżki równowagi statycznej węzłów sztywnych, podatnych i przegubowych

Eurokod 3 [51] definiując układy prętowe rozróżnia w aspekcie połączeń następujące układy:

- o węzłach podatnych (*półciągle*), gdy cechy konstrukcyjne połączeń wymagają formalnego uwzględnienia ich parametrów $M(\theta)$, $N(y)$ w analizie globalnej;
- ciągłe (o węzłach sztywnych), gdy jedynie cechy konstrukcyjne elementów wymagają uwzględnienia ich w analizie globalnej;
- proste (przegubowe), gdy nie jest wymagane, aby węzły przenosiły momenty zginające.

Konstruując połączenia przyjęte w analizie statycznej jako przegubowe należy zwrócić uwagę, aby nie przenosiły one znacznych momentów zginających, a także zapewniały zakładaną w modelu obliczeniowym wyznaczania sił wewnętrznych zdolność do obrotu. Zagadnienie to sprowadza się do odwzorowania konstrukcyjnego założonego modelu obliczeniowego, gdyż zbyt

sztynne przeguby techniczne mogą spowodować inną redystrybucję momentów zginających w ustroju. Ograniczenie zdolności do obrotu węzłów nominalnie przegubowych może spowodować, iż w warunkach obliczeniowych obciążeń granicznych nie powstaną zakładane w analizie przeguby plastyczne. W komentarzu [27] do normy [60] oraz Eurokodzie 3 [51] definiuje się nośność połączenia nominalnie przegubowego M_R jako $M_R < 0,25 M_{pl}$ (M_{pl} – nośność plastyczna łączonego elementu).

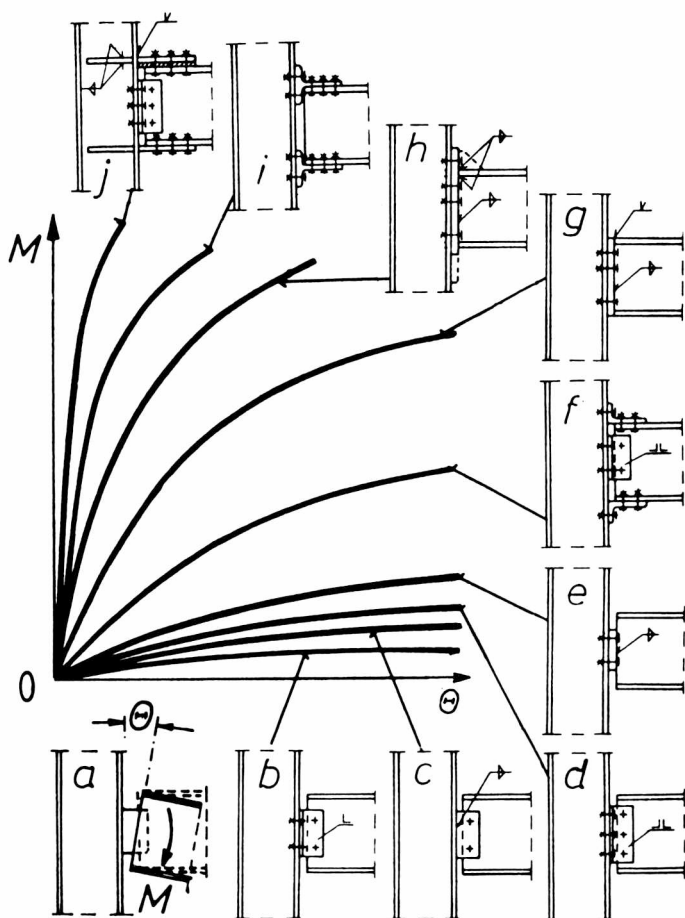
Połączenia sztywne powinny być tak zaprojektowane, aby ich odkształcenia nie miały wpływu ani na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji, ani na jej globalne odkształcenia. Nośność obliczeniowa połączeń sztywnych powinna być nie mniejsza niż nośność przekroju łączonych elementów. W komentarzu [27] do normy [60] oraz Eurokodzie 3 [51] definiuje się nośność połączeń sztywnych M_R jako $M_R \geq 1,2 M_{pl}$ (M_{pl} – nośność plastyczna łączonego elementu), co zapewnia utworzenie się przegubu plastycznego w granicznym stanie wyężenia poza węzłem.

Połączenia nie spełniające wymagań dotyczących połączeń sztywnych lub nominalnie przegubowych należy traktować jako podatne.

Na rysunku 5.6 przedstawiono najczęściej stosowane śrubowe węzły ram o prętach dwuteowych [16]. Połączenia rygli ze słupami ram charakteryzuje podatność, która jest zawarta między wymaganiami granicznymi w odniesieniu do połączeń sztywnych i przegubowych. Belka pod obciążeniem obraca się w połączeniu o kąt θ (patrz rys. 5.6a), który charakteryzuje podatność węzła. Wartość tego kąta zawiera się w granicach $0 < \theta < \theta_p$ (gdzie θ_p – kąt obrotu końca belki w połączeniu przegubowym). Taka sytuacja powoduje, że na węzeł działa moment zginający obciążający słup w wartościach $M_r < M < 0$ (gdzie M_r – moment na końcu rygla, gdy węzły rygla są traktowane jako sztywne). Charakterystyki zachowania się węzłów o różnej konstrukcji, w postaci krzywych (moment zginający M – kąt obrotu θ), pokazano na rys. 5.6 [16].

Zachowanie się węzłów podatnych jest badane doświadczalnie. Badania doświadczalne izolowanych węzłów ram umożliwiają: sporządzenie ŚRS w postaci krzywych $M(\theta)$, określenie nośności granicznej na zginanie M_{Ri} 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 wykonanych doświadczeń proponowane są do analiz teoretycznych modele aproksymujące krzywe $M(\theta)$ podatności węzłów. Identyfikacja właściwości połączeń podatnych oraz zachowania się konstrukcji z takimi węzłami stanowi przedmiot badań wielu ośrodków naukowych. Zagadnieniom tym jest poświęcona książka J. Bródki i A. Kozłowskiego [15]. Omówiono w niej obszernie wyniki światowych badań połączeń belek dwuteowych ze słupami o następujących rozwiązaniach: jednostronna nakładka na środku belki (rys. 5.6c), zdwojone przykładki na środku belki, nakładki z kątowników na stopkach belki (rys. 5.3e), czołowa blacha głowicowa (rys. 5.6e), czołowa blacha wpuszczana (rys. 5.6g), czołowa blacha wystająca (rys. 5.6h), nakładka stopki

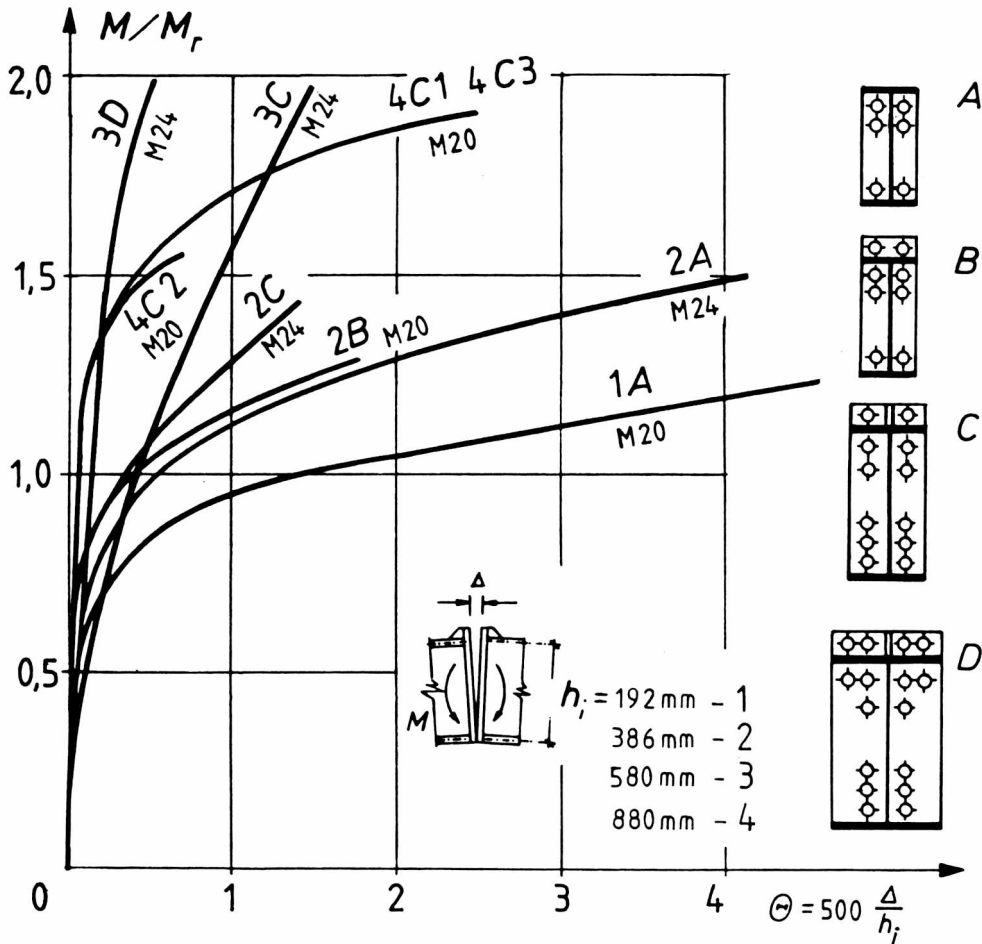
wraz z przykładką środnika (rys. 5.6j), nakładki z króciaków teowych (rys. 5.6i), a także węzłów słupów rurowych z dwuteowymi belkami.



Rys. 5.6. Charakterystyki $M(\theta)$ styków śrubowych belek ze słupami [16]

Na rysunku 5.7 pokazano wyniki badań doświadczalnych doczołowych zginanych połączeń sprężanych belek o przekroju dwuteowym [34] wykonanych w Centralnym Ośrodku Badawczo-Projektowym Konstrukcji Metalowych *Mostostal*. Na osi pionowej (rys. 5.7) naniesiono stosunek momentu zginającego w połączeniu M do nośności połączenia mierzony momentem rozwarcia styku M_r , na osi poziomej zaś podano kąt rozwarcia styku θ . Z analizy wykresów pokazanych na rys. 5.7 wynika, że charakterystyki badanych węzłów opisują nieliniowe ścieżki równowagi statycznej $M(\theta)$, sztywność ich natomiast maleje wraz ze zwiększeniem obciążenia. Wykonane w *Mostostalu* badania wykazały, że zdolność do przemieszczeń połączeń doczołowych wynika przede wszystkim z podatności blach czołowych. Sztywność tych połączeń podczas zginania zależy głównie od nośności i rozmieszczenia śrub w strefie rozciąganej oraz od wysokości konstrukcyjnej styku. Badania wykonane w *Mostostalu* [3], [4], [33], [34] umożliwiają ocenę

szttywności doczołowych połączeń śrubowych sprężonych i niesprężonych, bez skosów i ze skosami (z tzw. trzecim pasem).



Rys. 5.7. Wyniki badań doświadczalnych doczołowych styków zginanych dźwigarów o przekrojach dwuteowych [34]

Eksperymentalna identyfikacja charakterystyk $M(\theta)$ węzłów jest kosztowna zarówno ze względu na potrzebę badań licznych rozwiązań konstrukcyjnych, jak i na gradację wymiarów połączeń. Wykonane dotychczas badania doświadczalne węzłów dostarczyły danych do rozwoju metod analitycznego prognozowania zależności $M(\theta)$. Otrzymanie w miarę prostego, możliwie bliskiego wynikom badań doświadczalnych, wyrażenia prognozującego zależność $M(\theta)$ jest bardzo utrudnione ze względu na mnogość czynników wpływających na zachowanie się węzła. Oprócz odkształceń części składowych połączeń (śrub, blach czołowych, nakładek) należy uwzględnić odkształcenia przyległych elementów, zwłaszcza pasów i środków.

Metody prognozowania krzywych $M(\theta)$ można podzielić [15] w zależności od postaci prognozowanej funkcji matematycznej (zagadnienie omówione

w dalszej części tego rozdziału) oraz w zależności od metody otrzymywania funkcji modelu węzła.

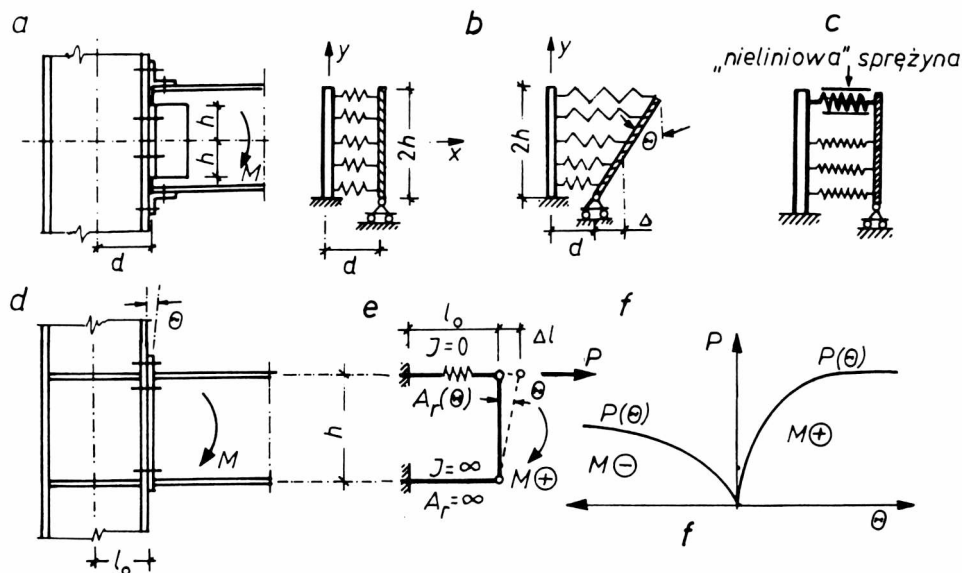
Modelowanie podatności węzłów z uwagi na sposób otrzymywania funkcji $M(\theta)$ można podzielić [15] na następujące modele: aproksymacyjne, półempiryczne, mechaniczne, z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) lub sztucznych sieci neuronowych (SSN).

Modele aproksymacyjne, mimo możliwości bardzo dokładnego dopasowania, nie zawsze są zadowalające, gdyż wymagają dużej liczby badań doświadczalnych i nie mogą być ekstrapolowane poza zakres badawczy.

Modele półempiryczne wymagają mniejszej liczby badań doświadczalnych, a parametry opisujące ich wytyżenia mają fizyczne znaczenie, co umożliwia świadome kształtowanie węzła. Analiza nośności i odkształceń poszczególnych składników węzła umożliwia identyfikację słabych miejsc w połączeniu. Tworzenie takiego modelu obliczeniowego węzła opiera się na obserwacji zachowania się złącza i jego poszczególnych części składowych podczas badań doświadczalnych, w celu identyfikacji źródeł deformacji połączenia. Następnie dokonuje się opisu analitycznego odkształceń części składowych węzła. Superpozycja składowych deformacji daje globalny obraz zachowania się połączenia.

Modele mechaniczne są bardzo efektywnym sposobem modelowania, pod warunkiem zastosowania wiarygodnych charakterystyk sprężyn opisujących zachowanie się węzłów.

Na rysunku 5.8 przedstawiono przykłady mechanicznych modeli podatnych połączeń belki ze słupem (rys. 5.8a), jako zespołu sprężyn o charakterystykach liniowych (rys. 5.8b) [43] lub nieliniowych (rys. 5.8c) [18]. Na rysunku 5.8e i f pokazano model obliczeniowy aproksymujący charakterystykę połączenia doczołowego belki ze słupem (rys. 5.8d) [24], składający się ze sprężyny



Rys. 5.8. Przykłady modelowania podatności połączeń

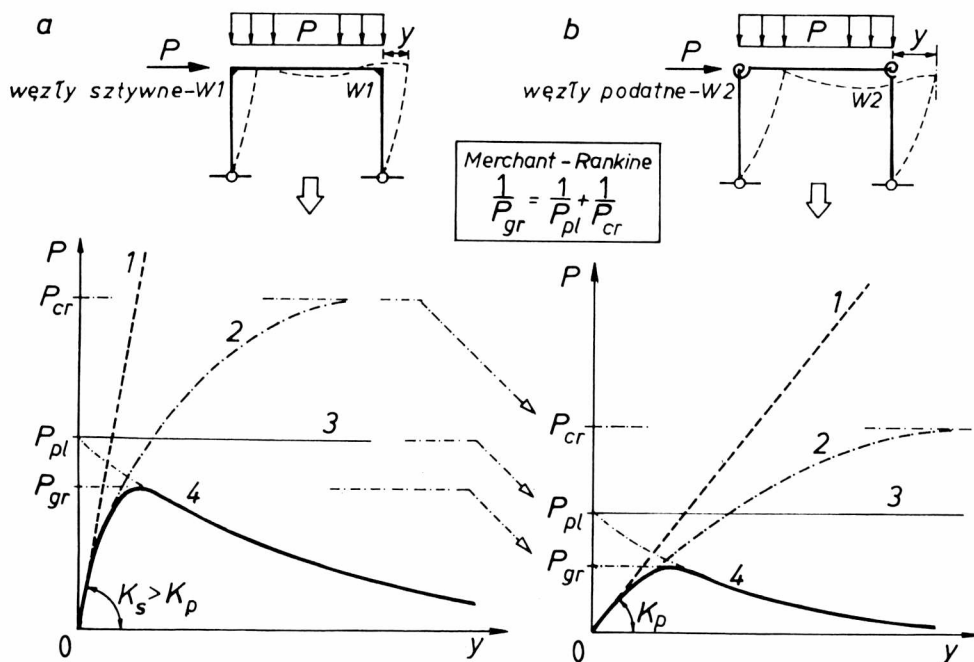
(w strefie rozciąganej) i nieściśliwego pręta (w strefie ściskanej). W pracy [24] przedstawiono analizę statyczną ramy z węzłami podatnymi, modelowanymi stosunkowo prostymi schematami, pokazanymi na rys. 5.8e i f.

Znacznie wierniejszą aproksymację zachowania się węzłów uzyskuje się modelując je metodą elementów skończonych [15]. Jej zastosowanie polega na zbudowaniu numerycznego modelu węzła (przez podział na elementy skończone), w którym uwzględnia się możliwe wszystkie składniki węzła i współdziałania. W metodzie tej wymagana jest nie tylko wnikiwość w odwzorowaniu części składowych węzła, ale i dobór odpowiedniej siatki podziału oraz rodzaju elementów skończonych, metody analizy, modeli materiałów.

Sztuczna sieć neuronowa [15] zastosowana do analizy złączy podatnych składa się z dużej liczby jednostek (węzłów) ułożonych w warstwy. Wewnętrzny sygnał w sieci jest transmitowany z jednej warstwy do następnej i przetwarzany przez uwzględnienie wag. Otrzymywanie tych wag odbywa się poprzez *uczenie* sieci, które polega na wprowadzeniu dużej liczby wyników badań eksperymentalnych. Wykorzystanie sieci jest możliwe na dwa sposoby: w postaci krzywych $M(\theta)$ dla wprowadzonych innych niż użyte do *uczenia* sieci parametrów węzła lub funkcji $M(\theta)$ w postaci ogólnej zależności matematycznej.

Ostatecznym celem modelowania podatności węzłów jest otrzymanie zależności $M(\theta)$ przydatnych w nieliniowej analizie konstrukcji.

Na rysunku 5.9 przedstawiono ŚRS ramy portalowej o sztywnych (rys. 5.9a) i podatnych (rys. 5.9b) węzłach łączących rygiel ze słupem. Na rysunku 5.9 liniami przerywanymi (1) oznaczono ŚRS wyznaczone dla sprężystego modelu materiału i analizy według teorii pierwszego rzędu (bez uwzględnienia wpływu



Rys. 5.9. Ścieżki równowagi statycznej ramy portalowej o węzłach: a — sztywnych, b — podatnych

przemieszczeń na wyężenie ustroju). Krzywe (2) na rysunku 5.9 są ŚRS ram, wyznaczonymi dla sprężystego modelu materiału i analizy według teorii drugiego rzędu (z uwzględnieniem wpływu przemieszczeń na siły wewnętrzne w konstrukcji). Liniami (3) na rysunku 5.9 oznaczono ŚRS ram, wyznaczone dla sztywno-plastycznego modelu materiału i analizy według teorii pierwszego rzędu. ŚRS badanych ram, wyznaczone dla sprężysto-plastycznego modelu materiału i uwzględnieniu wpływu przemieszczeń na ich wyężenie (analiza według teorii drugiego rzędu) oznaczono na rys. 5.9 linią grubą (4). Krzywe (4) na rysunku 5.9 są najlepszymi aproksymacjami zachowania się badanych ram. Ekstrema ŚRS wyznaczają odpowiednio nośności: krytyczne P_{cr} , plastyczne P_{pl} oraz graniczne P_{gr} analizowanych ram (obowiązuje tu formuła Merchanta-Rankine'a – patrz rys. 5.9). Z porównania wykresów ŚRS ram o węzłach sztywnych (rys. 5.9a) i węzłach podatnych (rys. 5.9b) wynika, iż ramę o podatnych połączeniach charakteryzuje mniejsza sztywność układu, a co za tym idzie większe przemieszczenia poziome, których konsekwencją są mniejsze nośności: krytyczna P_{cr} , plastyczna P_{pl} oraz graniczna P_{gr} .

Zagadnienie oceny granic, które umożliwiłyby w projektowaniu zaliczenie konkretnych węzłów do sztywnych, podatnych lub przegubowych zostało wystarczająco dobrze rozpoznane. Norma projektowania konstrukcji stalowych [60] w punktach 3.2.1. oraz 6.1b zobowiązuje projektantów do uwzględnienia podatności połączeń w obliczeniach konstrukcji. W normie [60] nie podano jednak ani żadnych parametrów charakteryzujących zachowanie się połączeń, ani żadnych wskazówek, jak ich podatność uwzględnić w globalnej analizie konstrukcji. W komentarzu [27] do normy [60] ograniczono się jedynie do podania rekomendowanych przez Eurokod 3 [51] klasyfikacji połączeń. Aby wymagania normy [60] można było wprowadzić do praktyki projektowej, powinny być ogólnie dostępne charakterystyki $M(\theta)$ najczęściej stosowanych połączeń oraz opracowane sposoby analizy konstrukcji z połączeniami podatnymi. Charakterystyki $M(\theta)$ typowych węzłów podatnych przedstawiono w [15].

Eurokod 3 [51] podaje propozycje zarówno odnośnie do modelowania, jak i klasyfikacji sztywności węzłów podatnych.

W klasyfikacji węzłów rozróżnia się konstrukcje stężone i niestężone, gdyż inne jest zachowanie się węzłów podatnych w jednych i drugich typach ustrojów nośnych.

Układ można uważać za stężony, jeśli sztywność ustroju stężącego (stężeń) w płaszczyźnie obciążeń poziomych jest dostatecznie duża, aby można było z uzasadnioną dokładnością przyjąć, że wszystkie obciążenia poziome są przenoszone przez stężenia. Szkielet stalowy według Eurokodu 3 [51] można uważać za stężony, jeżeli tężniki redukują jego przemieszczenia co najmniej o 80%.

Według normy [60] ramę można uważać za sztywno stężoną w swej płaszczyźnie, gdy sztywność postaciowa układu *rama – stężenie* (RS) jest co najmniej pięciokrotnie większa niż sztywność postaciowa ramy (R) tzn.:

$$\frac{1}{\psi_{RS}} \geq \frac{5}{\psi_R}, \quad (5.1)$$

gdzie: ψ_{RS}, ψ_R – odpowiednie wartości przechyłu od poziomej siły jednostkowej (przechył należy interpretować jako tangens kąta obrotu cięciwy słupa między punktami podparcia).

W klasyfikacji według [51] wprowadza się następujące parametry bezwymiarowe

$$\bar{m} = \frac{M}{M_{pl,R}}, \quad (5.2)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_r}{\theta_p}, \quad (5.3)$$

gdzie:

$$\theta_p = \frac{M_{pl,R} L_b}{EJ_b}, \quad (5.4)$$

w których: E – współczynnik sprężystości podłużnej,
 J_b – moment bezwładności przekroju belki (rygla),
 L_b – długość belki,
 M – moment zginający, działający w węźle od strony belki (rygla),
 $M_{pl,R}$ – nośność plastyczna (obliczeniowa) przekroju belki (rygla),
 θ_r – kąt obrotu połączenia belki względem słupa (zwykle określony doświadczalnie) lub na podstawie równań prognozowania.

Linie rozgraniczające funkcje $\bar{m}(\bar{\theta})$ połączeń sztywnych od złączy podatnych według Eurokodu 3 [51] określają zależności:

– dla ram nieusztynwionych (przechyłowych)

$$\bar{m} = 25\bar{\theta}, \quad \text{jeśli} \quad \bar{m} \leq \frac{2}{3}, \quad (5.5)$$

$$\bar{m} = \frac{25\bar{\theta} + 4}{7}, \quad \text{jeśli} \quad \frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1, \quad (5.6)$$

– dla ram usztynwionych (nieprzechyłowych)

$$\bar{m} = 8\bar{\theta}, \quad \text{jeśli} \quad \bar{m} \leq \frac{2}{3}, \quad (5.7)$$

$$\bar{m} = \frac{20\bar{\theta} + 3}{7}, \quad \text{jeśli} \quad \frac{2}{3} < \bar{m} \leq 1. \quad (5.8)$$

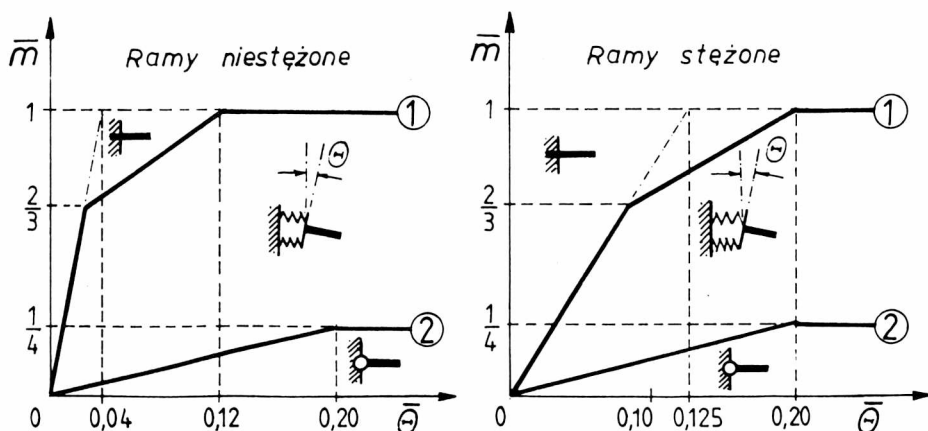
Prezentację graficzną tej klasyfikacji przedstawiono na rys. 5.10. Aby zidentyfikować typ połączenia (sztywny, podatny, przegubowy) należy dysponować jego ścieżką równowagi statycznej $M(\theta)$.

Jeśli krzywa połączenia $\bar{m}(\bar{\theta})$ znajduje się w polu ograniczonym przez:

– oś rzędnych i łamaną ciągłą (1), to węzeł może być traktowany jako sztywny;

– łamane ciągłe (1) i (2), to węzeł jest podatny;

— oś odciętych i łamaną ciągłą (2), to węzeł może być traktowany jako przegubowy.



Rys. 5.10. Klasyfikacja podatności węzłów według [51]

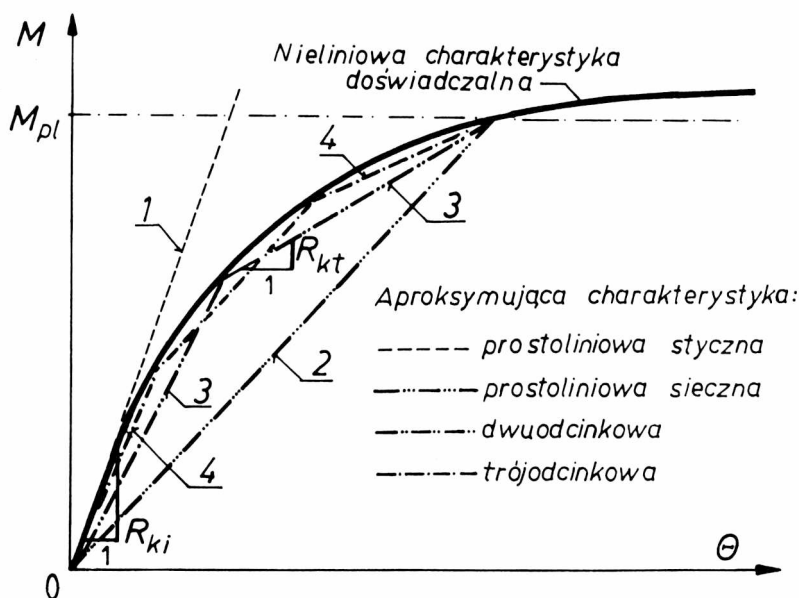
Dotychczasowe badania eksperymentalne dostarczyły licznych informacji o podstawowych typach ścieżek równowagi statycznej, głównie ramowych węzłów łączących belki ze słupami. Umożliwia to matematyczny opis krzywych $M(\theta)$ węzłów charakteryzowanych przez parametry, a nie przez konkretne wymiary badanych doświadczalnie modeli. W pracy [15] szczegółowo omówiono stosowane rodzaje modeli matematycznych połączeń, ze względu na postać funkcji $M(\theta)$, a to: prostoliniowe, odcinkowo-liniowe, wielomianowe, sklejane, potęgowe i wykładnicze.

Rzeczywiste ŚRS połączeń belek ze słupami są na ogół nieliniowe. Przybliżone obliczeniowe charakterystyki moment — obrót połączeń (węzłów) można według Eurokodu 3 [51] ustalić na podstawie formuł matematycznych, przyjmując adekwatną krzywą o dowolnej postaci analitycznej dopasowanej do eksperymentalnej ŚRS. ŚRS połączeń $M(\theta)$ można także przyjmować w postaci zlinearyzowanej (np. dwu- lub trójliniowej) pod warunkiem, że krzywa przybliżona leży całkowicie poniżej charakterystyki dokładnej.

Ustalenie przybliżonych prostoliniowych i odcinkowo-liniowych charakterystyk moment — obrót połączeń przedstawiono na rys. 5.11, gdzie M_{pl} oznaczono nośność graniczną węzła.

Najstarszym modelem jest prosta styczna do krzywej doświadczalnej, oznaczona na rys. 5.11 linią przerywaną (1), a charakterystykę połączenia określa sztywność początkowa R_{ki} . Słuszność tego modelu pogarsza się w miarę zwiększenia obciążenia momentem M . Ten niedostatek modelu liniowego stycznego można częściowo usunąć przyjmując model liniowo-sieczny, prowadząc z początku układu współrzędnych prostą (linia (2) na rys. 5.11) do przecięcia się z krzywą doświadczalną $M(\theta)$, odpowiadającą obliczeniowej rzędnej momentu zginającego. Przyjęcie charakterystyki $M(\theta)$ w postaci prostej (2) jest zbyt asekuracyjne. Zwiększenie skuteczności modelu

uzyskuje się przyjmując linię łamaną dwuodcinkową (linia (3) na rys. 5.11) lub trójodcinkową (linia (4) na rys. 5.11). Zachowanie się połączenia jest wówczas reprezentowane przez sztywność początkową R_{ki} oraz sztywności styczne w wybranych punktach krzywej doświadczalnej $M(\theta)$. Przyjęcie charakterystyk zlinearyzowanych w postaci prostych (3) i (4) powinno być potwierdzone licznymi badaniami doświadczalnymi (którymi nie zawsze dysponujemy). Najchętniej stosuje się liniowy model dwuodcinkowy, gdy R_{ki} jest ustalone w odniesieniu do stycznej odcinka krzywej doświadczalnej bliskiej obciążeniu granicznemu. Eurokod 3 [51] zaleca między innymi bardzo *ostrożną* postać $M(\theta)$, złożoną z dwóch odcinków linii prostych, z których drugi jest równoległy do osi odciętych. Zaletą liniowych modeli aproksymujących podatność węzłów jest możliwość korzystania z programów komputerowych do liniowej analizy konstrukcji.



Rys. 5.11. Aproxymacje ścieżek równowagi statycznej węzłów podatnych

Jest znanych wiele nieliniowych modeli charakterystyk $M(\theta)$, które przedstawiono w pracach [15], [16], [26], [31], [40], [41], [43].

Nieliniowy model prognozowania charakterystyki $M(\theta)$ węzła podatnego zaproponowali m.in. Kishi i Chen [26], procedury obliczeniowe zaś tego modelu podano w [31]. Do prognozowania charakterystyk sztywnościowych węzłów podatnych $M(\theta)$ według [26] proponuje się zależności potęgowe:

$$M = \frac{R_{ki} \theta}{(1 + \theta_1^n)^{1/n}}, \quad (5.9)$$

lub w równoważnym zapisie

$$\theta = \frac{M}{R_{ki} (1 - m^n)^{1/n}}, \quad (5.10)$$

w którym

$$m = M/M_u, \quad (5.11a)$$

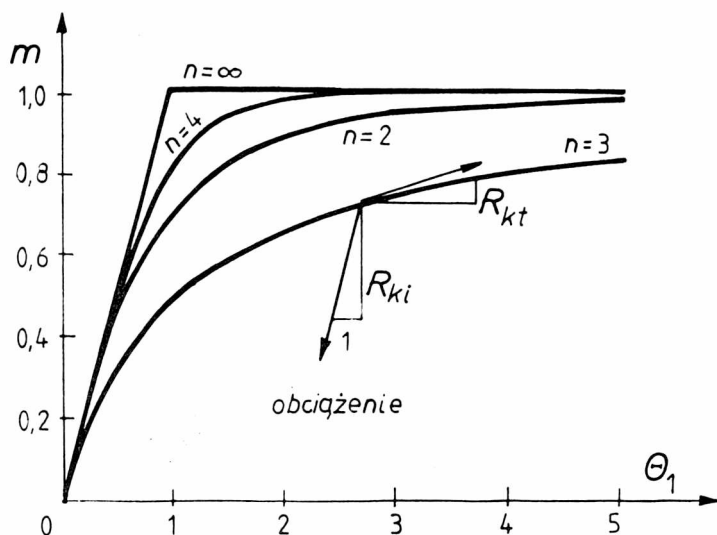
$$\theta_1 = \theta/\theta_0, \quad (5.11b)$$

gdzie: M – moment zginający, działający w połączeniu (węźle) od strony rygła,
 M_u – nośność graniczna połączenia, z uwzględnieniem nieliniowości materiału,
 θ – kąt obrotu belki względem słupa,
 $\theta_0 = M_u/R_{ki}$ – wartość odniesienia obrotu plastycznego,
 R_{ki} – początkowa sztywność połączenia (styczna do krzywej w punkcie początkowym układu współrzędnych),
 n – parametr kształtu krzywej dopasowywania, dobierany na podstawie porównania wyników krzywej teoretycznej i doświadczalnej.

Na rysunku 5.12 przedstawiono wykresy potęgowego modelu [26] podatności węzłów we współrzędnych bezwymiarowych $m(\theta_1)$, (m , θ_1 – według (5.11)).

Sztywność styczną R_{kt} węzła obciążonego momentem M dla prezentowanego modelu [26] można wyznaczyć ze wzoru

$$R_{kt} = \frac{R_{ki}}{(1 + \theta_1^n)^{1+1/n}}. \quad (5.12)$$

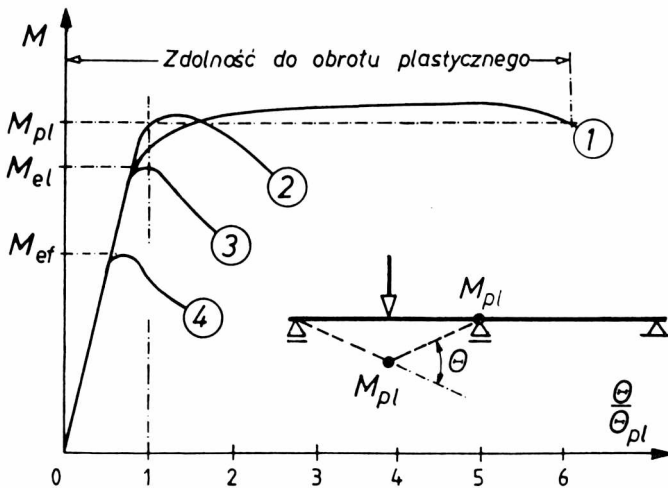


Rys. 5.12. Nieliniowa aproksymacja podatności węzłów [26]

Klasyfikacja nośności węzłów na następujące rodzaje: o pełnej nośności, częściowej nośności lub przegubowe, a także ich zdolności do obrotu jest

związana z poziomem prowadzonych analiz wyznaczania sił wewnętrznych w ustroju (według procedur sprężystych lub plastycznych). Norma [60] oraz Eurokod 3 [51] wprowadza klasyfikację przekrojów poprzecznych prętów, która wyznacza możliwość prowadzenia globalnej analizy plastycznej (ustroje o przekrojach elementów klasy 1) lub sprężystej (konstrukcje o przekrojach elementów klasy 1, 2, 3 i 4).

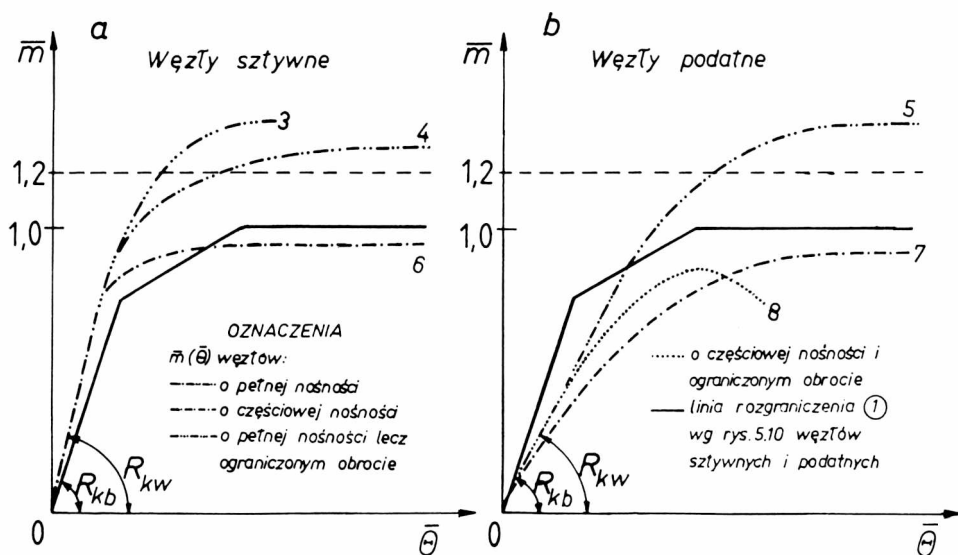
Niezbędnym warunkiem praktycznego obliczania konstrukcji stalowych z uwzględnieniem rezerwy plastycznej jest wykazanie, że możliwe jest osiągnięcie nośności granicznej częściowo lub całkowicie uplastycznionych przekrojów i węzłów ustroju. Warunkiem wystąpienia przewidywanego teorią obciążeń granicznych przemieszczenia ustroju między utworzeniem się pierwszego i ostatniego przegubu plastycznego (redystrybucji sił wewnętrznych) jest możliwość dokonania obrotu przez przeguby plastyczne (w tym węzły) podczas wzrostu obciążenia do wartości plastycznego obciążenia granicznego. Oznacza to, że zdolność do obrotu w przegubie plastycznym (np. w przecie lub w węźle) musi być tak duża, aby nie zaszła redukcja momentu plastycznego. Dlatego analizując charakterystyki węzłów bada się zarówno ich nośność, jak i zdolność do obrotu. Zdolność do pełnego obrotu plastycznego, z jednoczesnym zachowaniem nośności, mają według [51] i [60] pręty o przekrojach klasy 1 (rys. 5.13).



Rys. 5.13. Klasyfikacja przekrojów prętów według [51] i [60]

Węzły, których nośność jest większa od nośności łączonych prętów nazwano węzłami o pełnej nośności, natomiast węzły, których nośność jest mniejsza nazwano węzłami o częściowej nośności. Obydwa typy węzłów mogą mieć wystarczającą lub ograniczoną zdolność do obrotu plastycznego [51].

Na rysunku 5.14 przedstawiono przykłady charakterystyk węzłów sztywnych (rys. 5.14a) oraz podatnych (rys. 5.14b), o pełnej nośności, (krzywe 3, 4, 5), o częściowej nośności (krzywe 6, 7, 8), oraz o pełnej nośności i ograniczonym obrocie (krzywa 3), a także o częściowej nośności i ograniczonym obrocie (krzywa 8).



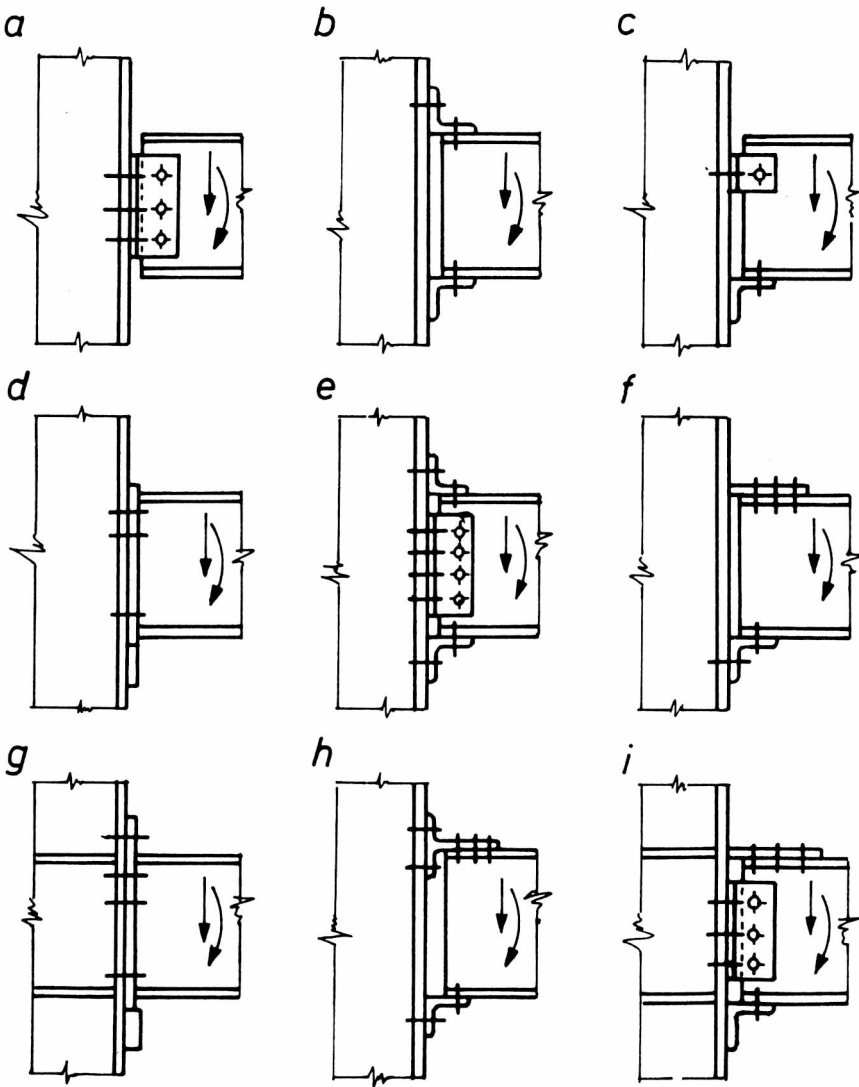
Rys. 5.14. Charakterystyki węzłów o pełnej i częściowej nośności oraz ograniczonym obrocie: a – sztywnych, b – podatnych

Obliczeniowe charakterystyki węzłów i styków śrubowych określają ich nośność na zginanie, sztywność obrotową oraz zdolność do obrotu (patrz rys. 5.2). Nośność obliczeniowa na zginanie węzła odpowiada szczytowej wartości charakterystyki $M(\theta)$. W analizie statycznej nieliniową sztywność obrotową węzła można uwzględniać według [51] metodą przyrostową (krokową) lub przyjmować sieczną stowarzyszoną z określonym przypadkiem obciążenia w stanie granicznym. Obliczeniową zdolność węzła do obrotu, np. połączenia belki ze słupem, należy przyjmować równą wartości obrotu uzyskanej dla maksymalnej nośności obliczeniowej połączenia.

Połączenia doczołowe są zwykle stykami podatnymi z uwagi na odkształcalność elementów złącza. Gdy blachy czołowe belek lub pasów słupów, a także uźebrowania styku są dostatecznie grube, wtedy połączenia doczołowe spełniają kryteria węzłów sztywnych. Przykłady połączeń śrubowych belek ze słupami o różnej sztywności pokazano na rys. 5.15 [33].

Aby połączenie zakładkowe, oprócz siły poprzecznej mogło przenosić moment zginający w swej płaszczyźnie powinno mieć odpowiednią sztywność, która zależy od rozmieszczenia i podatności poszczególnych łączników. Jako sztywne mogą być traktowane jedynie zakładkowe śrubowe połączenia cierne

i pasowane. Połączenia zakładkowe na śruby zwykle należy ocenić jako podatne. Jeśli rozstaw śrub jest mały lub występują znaczne luzy w otworach zakładkowo łączonych elementów zginanych, to złącza takie nie są zdolne do przenoszenia dużych momentów zginających.



Rys. 5.15. Przykłady połączeń belek ze słupami: a-c — przegubowe, d-f — podatne, g-i — sztywne [33]

W projektowaniu węzłów śrubowych należy jednak pamiętać, aby zdolność do obrotu styku śrubowego nie była mniejsza od zdolności węzła do obrotu przyjętego w analizie statycznej.

Jak już wspomniano, wiedza w dziedzinie modelowania sztywności węzłów jest przedmiotem aktualnie prowadzonych badań w wielu ośrodkach

naukowych. Są zidentyfikowane ścieżki równowagi statycznej wybranych, najczęściej stosowanych połączeń śrubowych (patrz np. [3], [4], [15], [18], [19], [22], [30], [31], [33], [40], [42], [43]). Istnieje już olbrzymia liczba badań, chociaż powtarzalność prób w badanej serii jest bardziej skromna. Pewne wskazówki projektowe dotyczące szacowania podatności śrubowych połączeń doczołowych podaje Eurokod 3 [51] w załączniku J.3. Wprowadzenie do praktyki projektowania uwzględniania wpływu podatności węzłów, wymaga opracowania dużych programów komputerowych (statyka, stateczność, obliczanie według teorii drugiego rzędu konstrukcji z uwzględnieniem rezerwy plastycznej).

6. Przykłady obliczeń połączeń śrubowych

W rozdziale tym na przykładach obliczeń połączeń śrubowych przedstawiono praktyczny sposób korzystania z postanowień normy [60]. W procedurze projektowania połączeń śrubowych można wyróżnić następujące etapy obliczeniowe:

- wstępne przyjęcie budowy geometrycznej złącza, rodzaju śrub, kategorii połączenia,
- identyfikacja parametrów wytrzymałościowych śrub,
- określenie wielkości sił wewnętrznych działających w połączeniu i sprowadzeniu ich do środka ciężkości grupy łączników (w połączeniach zakładkowych) lub środka obrotu złącza (w połączeniach doczołowych),
- wyznaczenie sił wypadkowych przypadających na łączniki (w styku zakładkowym) lub nośności połączenia (w styku doczołowym oraz zakładkowym) i sprawdzenie warunków stanu granicznego nośności i użytkowania (w zależności od kategorii połączenia),
- sprawdzenie wytrzymałościowe pozostałych elementów w stykach (np. blach węzłowych osłabionych otworami na śruby, spoin itp.).

Przedstawione przykłady dobrano w taki sposób, aby zaprezentować podstawowe problemy projektowe obliczania połączeń śrubowych. Obliczeniowe nośności śrub można wyznaczyć z odpowiednich wzorów lub odczytać bezpośrednio z tablic zamieszczonych w poprzednich rozdziałach.

W tablicy 2.1 podano obliczeniowe nośności śrub na ścinanie w jednej płaszczyźnie S_{Rv} .

Nośności obliczeniowe śrub na docisk $S_{Rb,1}$ do ścianki o grubości 10 mm, dla przyjętego rozstawu a_i (zapewniającego wartość współczynnika $\alpha = 2,5$ we wzorze (2.6)) zamieszczono w tabl. 2.5.

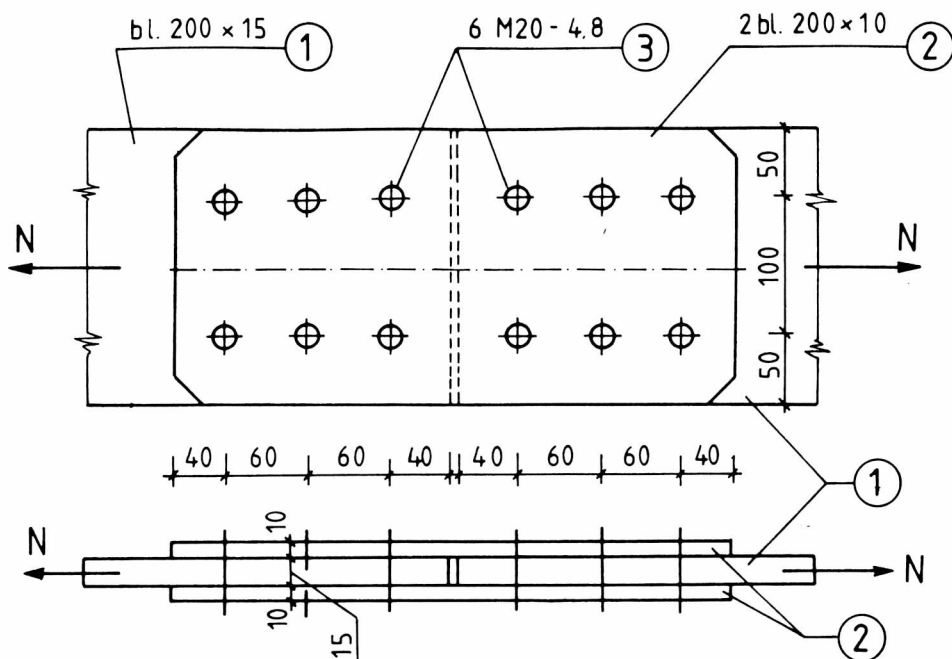
W tablicy 2.3 podano nośności obliczeniowe śrub na rozciąganie S_{Rt} , w tabl. 2.6 zaś z warunku poślizgu styku S_{Rs} dla następujących współczynników tarcia: $\mu = 0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,45$ i $0,50$, a także siłę sprężania S_0 i moment sprężający M_s .

Nośności obliczeniowe śrub na rozciąganie w doczołowych połączeniach sprężonych, obciążonych statycznie $S_{Rr,s}$ i dynamicznie $S_{Rr,d}$ w stanie granicznym użytkowania podano w tabl. 3.1.

W tablicy 3.6 (dla połączeń niesprężanych) i tabl. 3.7 (dla połączeń sprężanych) zamieszczono interakcyjne nośności śrub, obciążonych prostopadle i równolegle do osi łączników (nośność śrub w złączach ścinanych i rozciąganych).

Przykład 1

Zaprojektować śrubowy styk zakładkowy kategorii A pręta rozciąganego o przekroju bl. 200×15 mm i konstrukcji pokazanej na rys. 6.1. Dane: rozciągająca siła osiowa $N = 600$ kN, śruby M20 klasy 4.8, dwie przykładki o przekroju bl. 200×10 mm; pręt rozciągany i przykładki wykonane ze stali St3S.



Rys. 6.1. Konstrukcja połączenia zakładkowego

Projektowane połączenie kategorii A należy obliczać w stanie granicznym nośności na ścięcie i docisk śrub, a ponadto należy sprawdzić nośność pręta rozciąganego i przyładek, z uwzględnieniem osłabienia otworami. Połączenie jest symetryczne i działające w nim osiowe obciążenie rozkłada się proporcjonalnie na wszystkie śruby.

Dla stali St3S o grubości elementów pręta i przyładek $t \leq 16$ z tabl. 2 w [60] odczytano wartość $R_e = 235$ MPa, $R_m = 375$ MPa, $f_d = 215$ MPa.

Dla śrub klasy 4.8 z tabl. 1.2 odczytano wartość $R_m = 420$ MPa.

Przekrój poprzeczny ścinanych śrub M20 wynosi

$$A_v = A = \pi d^2 / 4 = 3,14 \cdot 20^2 / 4 = 3,14 \text{ cm}^2.$$

Nośność obliczeniową S_{Rv} śruby M20, która w analizowanym przykładzie jest dwucięta ($m = 2$) można wyznaczyć ze wzoru (2.10)

$$S_{Rv} = 0,45 R_m A_v m = 0,45 \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 2 = 118,6 \text{ kN},$$

lub odczytać z tabl. 2.1 (nośność śruby jednociętej $S_{Rv} = 59,3$ kN) i obliczyć

$$S_{Rv} = 2 \cdot 59,3 = 118,6 \text{ kN}.$$

Potrzebna liczba śrub po jednej stronie styku z warunku ścinania łączników wynosi

$$n = N/S_{Rv} = 600/118,6 = 5,06.$$

W projektowanym połączeniu przyjęto 6 śrub.

Minimalną wartość współczynnika α we wzorze (2.6) wyznaczono z warunku $S_{Rv} \leq S_{Rb}$ i wynosi ona

$$\alpha \geq \frac{S_{Rv}}{f_d d \sum t} = \frac{118,6}{215 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 0,015} = 1,838.$$

Odległość skrajnej śruby od brzegu blachy w kierunku działającego obciążenia powinna spełniać warunek

$$a_1 \geq \alpha d = 1,838 \cdot 20 = 36,8 \text{ mm}; \text{ przyjęto } a_1 = 40 \text{ mm}.$$

Rozstaw śrub w kierunku działającego obciążenia powinien wynosić

$$a \geq (\alpha + 3/4)d = (1,838 + 0,75) \cdot 20 = 51,76 \text{ mm}; \text{ przyjęto } a = 60 \text{ mm}.$$

Przyjęto rozstaw śrub $a_2 = 50 \text{ mm}$ i $a_3 = 100 \text{ mm}$ oraz, że styk nie jest narażony na bezpośrednie oddziaływanie czynników atmosferycznych. Ostateczne ustalenie rozstawu śrub należy skorygować uwzględniając normowe [60] wymagania podane w tabl. 4.2, które wynoszą:

$$a_{1\min} = 1,5d = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ mm} < a_1 = 40 \text{ mm},$$

$$a_{1\max} = \min(12t; 150 \text{ mm}) = \min(12 \cdot 10; 150) = 120 \text{ mm} > a_1 = 40 \text{ mm},$$

$$a_{2\min} = 1,5d = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ mm} < a_2 = 50 \text{ mm},$$

$$a_{2\max} = \min(12t, 150 \text{ mm}) = 120 \text{ mm} > a_2 = 50 \text{ mm},$$

$$a_{3\min} = 2,5d = 2,5 \cdot 20 = 50 \text{ mm} < a_3 = 100 \text{ mm},$$

$$a_{3\max} = \min(14t; 200 \text{ mm}) = \min(14 \cdot 10; 200) = 140 \text{ mm} > a_3 = 100 \text{ mm},$$

$$a_{\min} = 2,5d = 2,5 \cdot 20 = 50 \text{ mm} < a = 60 \text{ mm},$$

$$a_{\max} = 2a_{3\max} - a_3 = 2 \cdot 140 - 100 = 180 \text{ mm} > a = 60 \text{ mm}.$$

Ostatecznie przyjęto wartości: $a = 60 \text{ mm}$, $a_1 = 40 \text{ mm}$, $a_2 = 50 \text{ mm}$, $a_3 = 100 \text{ mm}$. Rozmieszczenie śrub w styku pokazano na rys. 6.1.

O nośności śruby na docisk S_{Rb} decyduje docisk do cieńszej ścianki otworu $t = \min(2 \cdot 10; 15) = 15 \text{ mm}$.

Według wzoru (2.5) współczynnik α wynosi

$$\alpha = \min \left[\frac{a_1}{d}; \left(\frac{a}{d} - \frac{3}{4} \right); 2,5 \right] = \left[\frac{40}{20}; \left(\frac{60}{20} - \frac{3}{4} \right); 2,5 \right] = 2,0.$$

Obliczeniowa nośność śruby z warunku docisku trzpienia do ścianki otworu wyznaczona według wzoru (2.6) wynosi

$$S_{Rb} = \alpha d f_d \sum t_i = 2,0 \cdot 0,02 \cdot 215 \cdot 10^3 \cdot 0,015 = 129,0 \text{ kN}.$$

Współczynnik redukcyjny η we wzorze (2.12) wynosi $\eta = 1$, gdyż

$$L = 2a = 2 \cdot 60 = 120 \text{ mm} < 15d = 15 \cdot 20 = 300 \text{ mm}.$$

Miarodajna nośność łączników S_R wynosi

$$S_R = \min(S_{Rv}, S_{Rb}) = \min(118,6; 129,0) = 118,6 \text{ kN}.$$

Nośność obliczeniową analizowanego, obciążonego osiowo połączenia F_{Rj} sprawdzono ze wzoru (2.12)

$$F_{Rj} = \eta \eta S_R = 6 \cdot 1,0 \cdot 118,6 = 711,6 \text{ kN} > N = 600 \text{ kN}.$$

Tak więc łączniki spełniają warunki stanu granicznego nośności. W związku z osłabieniem przekroju otworami na śruby M20 należy sprawdzić nośność łączonych elementów (blach). Średnicę otworów okrągłych w połączeniu określono korzystając z tabl. 4.1 i wynosi ona

$$d_o = d + \Delta = 20 + 2 = 22 \text{ mm}.$$

Pole przekroju brutto A i netto A_n pręta rozciąganego wynosi

$$A = 20,0 \cdot 1,5 = 30,0 \text{ cm}^2,$$

$$A_n = (20,0 - 2 \cdot 2,2) \cdot 1,5 = 23,4 \text{ cm}^2.$$

Sprowadzone pole przekroju pręta rozciąganego A_ψ według wzoru (5) w [60] wynosi

$$A_\psi = A_n \frac{0,8 R_m}{R_e} = 23,4 \frac{0,8 \cdot 375}{235} = 29,87 \text{ cm}^2 < A = 30,0 \text{ cm}^2.$$

Warunek nośności (2.19) elementu rozciąganego N_{Rt} (według wzoru (2.20)) sprawdzono ze wzoru

$$N_{Rt} = A_\psi f_d = 29,87 \cdot 10^{-4} \cdot 215 \cdot 10^3 = 642,25 \text{ kN} > N = 600 \text{ kN}.$$

Nośność pręta rozciąganego, osłabionego otworami na śruby jest wystarczająca do przeniesienia obciążenia N .

Sprawdzenie nośności przykładek nie jest potrzebne, gdyż ich łączny przekrój jest większy od przekroju rozciąganego pręta.

Przykład 2

Zaprojektować śrubowe połączenie montażowe kategorii A pasa kratownicy z dwóch kątowników $100 \times 100 \times 8$, ze stali 18G2A z warunku nośności przekroju rozciąganego. Dane: pole przekroju poprzecznego kątowników $A = 31,0 \text{ cm}^2$.

Parametry wytrzymałościowe stali 18G2A odczytane z tabl. 2 w [60] wynoszą:

dla $t \leq 16 \text{ mm}$ $R_e = 355 \text{ MPa}$; $R_m = 490 \text{ MPa}$; $f_d = 305 \text{ MPa}$;

dla $16 \text{ mm} < t \leq 30 \text{ mm}$ $R_e = 345 \text{ MPa}$; $R_m = 490 \text{ MPa}$; $f_d = 295 \text{ MPa}$.

Zastosowano w połączeniu śruby M16 klasy 8.8, dla których należy (patrz tabl. 4.1) wykonać otwory $d_o = d + \Delta = 16 + 2 = 18 \text{ mm}$.

Sprowadzone pole przekroju poprzecznego pasa kratownicy wyznaczone według wzorów (5) i (6) w [60] wynosi

$$A_{\psi} = A_{n1} \frac{0,8R_m}{R_e} + (A - A_1) = 2 \cdot (10 - 1,8) \cdot 0,8 \frac{0,8 \cdot 490}{355} + \\ + 31,0 - 2 \cdot 10,0 \cdot 0,8 = 29,5 \text{ cm}^2 < A = 31,0 \text{ cm}^2.$$

Nośność rozciąganego pasa kratownicy N_{Rt} , osłabionego otworami na śruby, wyznaczona ze wzoru (32) w [60] wynosi

$$N = N_{Rt} = A_{\psi} f_d = 29,5 \cdot 10^{-4} \cdot 305 \cdot 10^3 = 900 \text{ kN}.$$

Przyjęto blachę łączącą pręty pasa dolnego o przekroju $160 \times 20 \text{ mm}$ ze stali 18G2A. Pole przekroju poprzecznego brutto A , netto A_n i sprowadzone pole przekroju A_{ψ} oraz nośność blachy łączącej kątowniki wynoszą:

$$A = 16,0 \cdot 2,0 = 32,0 \text{ cm}^2,$$

$$A_n = (16,0 - 1,8) \cdot 2,0 = 28,4 \text{ cm}^2,$$

$$A_{\psi} = 28,4 \frac{0,8 \cdot 490}{345} = 32,26 \text{ cm}^2 > A = 32,0 \text{ cm}^2,$$

$$A_{\psi} = 32,0 \text{ cm}^2,$$

$$N_{Rt} = A_{\psi} f_d = 32,0 \cdot 10^{-4} \cdot 295 \cdot 10^3 = 944 \text{ kN} > N.$$

Nośność jednociętych śrub M16 klasy 8.8 odczytano z tabl. 2.1 i wynosi ona $S_{Rv} = 72,4 \text{ kN}$. W analizowanym połączeniu śruby są dwucięte, a ich nośność na ścinanie wynosi

$$S_{Rv} = 72,4 \cdot 2 = 144,8 \text{ kN}.$$

Przyjmując iż rozstawy śrub w styku będą spełniały warunki geometryczne podane w tabl. 2.5, tj. $a \geq 55 \text{ mm}$, $a_1 \geq 40 \text{ mm}$ i $a_2 \geq 30 \text{ mm}$ nośność śrub na docisk S_{Rb} , do ścianki o grubości $t = \min(2 \cdot 8; 20) = 16 \text{ mm}$ wynosi

$$S_{Rb} = \frac{t}{10} S_{Rb,1} = \frac{16}{10} \cdot 122,0 = 195,2 \text{ kN}.$$

Miarodajna nośność śrub wynosi

$$S_R = \min(S_{Rv}, S_{Rb}) = \min(144,8; 195,2) = 144,8 \text{ kN}.$$

Potrzebna liczba łączników w styku wynosi

$$n = \frac{N}{S_R} = \frac{900}{144,8} = 6,2.$$

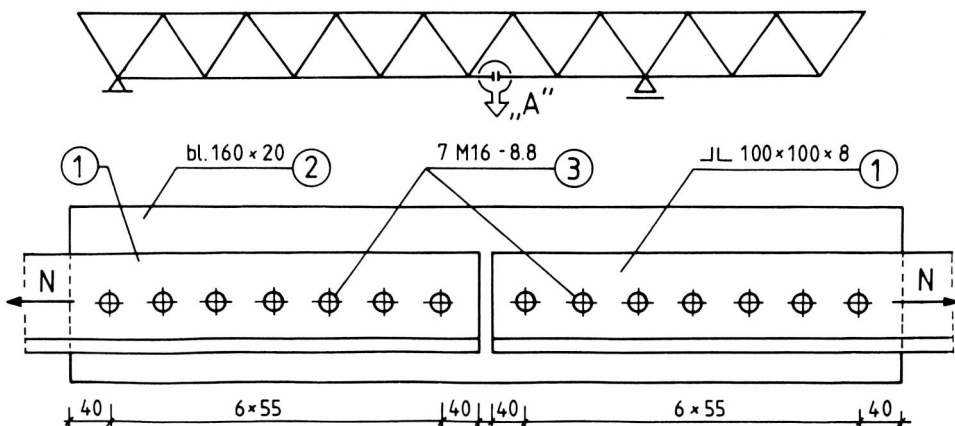
Ostatecznie przyjęto 7 śrub M16 rozmieszczonych jak na rys. 6.2.

Długość połączenia L wynosi

$$L = 6a = 6 \cdot 5,5 = 33 \text{ cm} > 15d = 15 \cdot 1,6 = 24 \text{ cm}.$$

W związku z tym należy zredukować nośność połączenia wyznaczając współczynnik redukcyjny η według wzoru (2.11)

$$\eta = 1 - \frac{L - 15d}{200d} = 1 - \frac{33 - 15 \cdot 1,6}{200 \cdot 1,6} = 0,972.$$



Rys. 6.2. Konstrukcja styku pasa dolnego kratownicy

Nośność obliczeniowa połączenia wyznaczona według wzoru (2.12) wynosi

$$F_{Rj} = \eta \eta S_R = 7 \cdot 0,972 \cdot 144,8 = 985,2 \text{ kN} > N = 900 \text{ kN}.$$

Zaprojektowane połączenie śrubowe spełnia warunki stanu granicznego nośności według [60]. W obliczanym przykładzie pominięto moment zginający od mimośrodowego usytuowania śrub względem osi ciężkości kątowników, który w analizowanym przykładzie ma drugorzędne znaczenie. Sposób uwzględnienia zginania w połączeniu zakładkowym przedstawiono w przykładach 4 i 5.

Przykład 3

Zaprojektować połączenie cienne pasa belki dwuteowej o przekroju $400 \times 20 \text{ mm}$ ($A = 80,0 \text{ cm}^2$), ze stali 18G2A rozciągane siłami: obliczeniową $N_{ob} = 1500 \text{ kN}$ i charakterystyczną $N_{ch} = 1200 \text{ kN}$. W styku zastosowano 1 nakładkę o przekroju $400 \times 12 \text{ mm}$ i 2 nakładki o przekroju $180 \times 12 \text{ mm}$. Obliczenia styku o konstrukcji pokazanej na rys. 6.3, należy wykonać dla połączenia kategorii B i C.

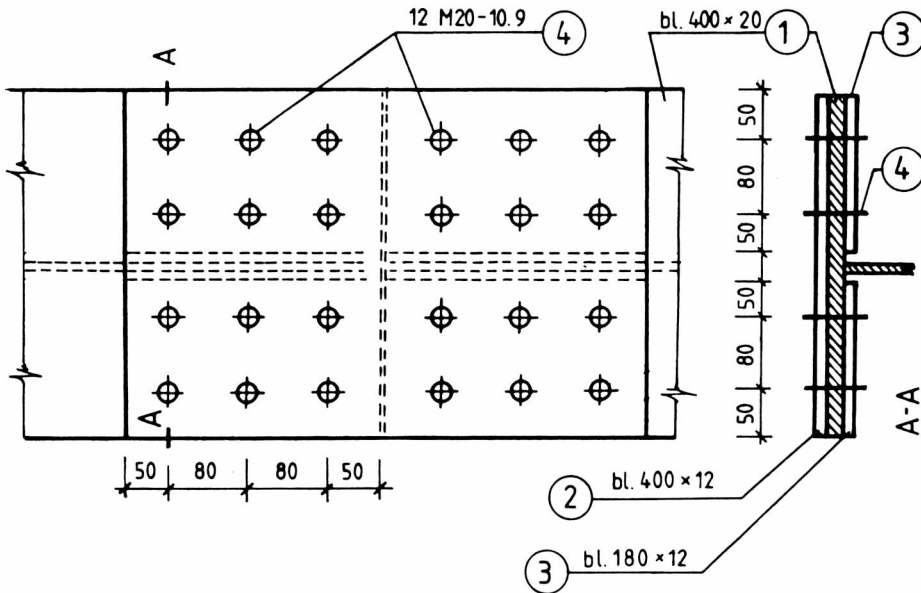
W projektowanym połączeniu zastosowano śruby M20 klasy 10.9. Nośność śruby M20 na ścinanie w jednej płaszczyźnie, odczytana z tabl. 2.1 wynosi $S_{Rv} = 150 \text{ kN}$. W styku pokazanym na rys. 6.3 śruby są dwucięte, a ich nośność na ścinanie wynosi

$$S_{Rv} = 2 \cdot 150 = 300 \text{ kN}.$$

Z tabl. 2 normy [60] odczytano następujące parametry wytrzymałościowe stali 18G2A pasa belki dwuteowej:

$$R_m = 490 \text{ MPa}, \quad R_e = 345 \text{ MPa}, \quad f_d = 295 \text{ MPa}.$$

Nośność śruby M20 na docisk S_{Rb} dla przyjętego na rys. 6.3 rozstawu łączników, który spełnia warunki geometryczne podane w tabl. 4.2, do ścianki o grubości $t = \min(2 \cdot 12; 20) = 20 \text{ mm}$ wynosi



Rys. 6.3. Konstrukcja połączenia pasa belki dwuteowej

$$\alpha = \min \left[\frac{a_1}{d}; \left(\frac{a}{d} - \frac{3}{4} \right); 3,0 \right] = \min \left[\frac{50}{20}; \left(\frac{80}{20} - \frac{3}{4} \right); 3,0 \right] = 2,5,$$

$$S_{Rb} = \alpha d f_d \sum t_i = 2,5 \cdot 2,0 \cdot 295 \cdot 10^3 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} = 295 \text{ kN}.$$

Nośność śruby na rozciąganie odczytano z tabl. 2.6 i wynosi ona $S_{Rt} = 166 \text{ kN}$. Przyjęto iż powierzchnie w styku będą przygotowane przed sprężaniem przez opalenie płomieniem acetylenowo-tlenowym i z tabl. 2.2 odczytano wartość współczynnika tarcia $\mu = 0,4$. Nośność śruby z warunku poślizgu styku sprężonego wyznaczono ze wzoru (2.16), przy założeniu, iż łączniki będą zakładane w otworach okrągłych $\alpha_s = 1,0$

$$S_{Rs} = \alpha_s \mu (S_{Rt} - S_t) m = 1,0 \cdot 0,4 \cdot (166 - 0) \cdot 2 = 132,8 \text{ kN}.$$

Nośność S_{Rs} można również odczytać z tabl. 2.6 ($S_{Rs} = 2 \cdot 66,4 = 132,8 \text{ kN}$). Połączenie należy sprężyć siłą S_0 , którą można odczytać z tabl. 2.6 lub obliczyć ze wzoru

$$S_0 = \frac{0,70}{0,65} S_{Rt} = \frac{0,70}{0,65} \cdot 166 = 178 \text{ kN}.$$

Moment sprężający M_s śruby M20 można odczytać z tabl. 2.6 lub wyznaczyć ze wzoru (2.17)

$$M_s = 0,18 d S_0 = 0,18 \cdot 0,02 \cdot 178 = 0,640 \text{ kNm}.$$

Połączenia cienne kategorii B (patrz tabl. 2.4) należy obliczać w stanie granicznym nośności na ściecie i docisk śrub oraz w stanie granicznym użytkowania na poślizgu styku.

Miarodajna nośność śrub M20 klasy 10.9 w projektowanym styku klasy B w stanie granicznym nośności wynosi

$$S_R = \min(S_{Rv}, S_{Rb}) = \min(300,0; 295,0) = 295,0 \text{ kN}.$$

Potrzebną liczbę śrub (zakładając, że $\eta = 1,0$) wyznaczono analizując:

- ściecie i docisk śrub

$$n = \frac{N_{ob}}{S_R} = \frac{1500}{295,0} = 5,08,$$

- poślizg styku

$$n = \frac{N_{ch}}{S_{Rs}} = \frac{1200}{132,8} = 9,04.$$

Zastosowano 12 śrub i rozmieszczono je jak na rys. 6.3 (warunki konstrukcyjne rozmieszczenia śrub według tabl. 4.2 są spełnione).

Uwaga: Nośność pasa rozciąganego oraz blach nakładek w styku w przypadku połączeń ciernych sprawdza się jak dla połączenia na śruby zwykłe (patrz przykład 1 i 2). Gdy śruby są rozmieszczone jak na rys. 6.3, wtedy nośność blach osłabionych otworami jest zapewniona.

Połączenia cierne kategorii C (patrz tabl. 2.4) należy sprawdzać w stanie granicznym nośności z warunku poślizgu, potrzebna zaś liczba śrub wynosi

$$n = \frac{N_{ob}}{S_{Rs}} = \frac{1500}{132,8} = 11,29.$$

Ostatecznie zastosowano 12 śrub rozmieszczając je jak na rys. 6.3.

W połączeniach ciernych kategorii C do sprawdzenia nośności elementu o przekroju osłabionym otworami, rozciąganego siłą F przyjmuje się siłę zredukowaną F_a według wzoru (2.43).

Sprawdzenie nośności przekroju A–A (rys. 6.3):

- liczba śrub w sprawdzanym przekroju $n_a = 4$,
- liczba śrub przed sprawdzanym przekrojem w kierunku obciążenia $n_b = 0$,
- siła zredukowana

$$F_a = F \left(1 - \frac{n_b}{n} - 0,4 \frac{n_a}{n} \right) = 1500 \left(1 - 0,4 \frac{4}{12} \right) = 1300,0 \text{ kN},$$

- sprowadzone pole przekroju

$$A_\psi = A_n \frac{0,8R_m}{R_e} = (40,0 - 4 \cdot 2,2) \cdot 2,0 \frac{0,8 \cdot 490}{345} = 70,9 \text{ cm}^2 < A = 80,0 \text{ cm}^2,$$

$$N_{Rt} = A_\psi f_d = 70,9 \cdot 10^{-4} \cdot 295 \cdot 10^3 = 2091,6 \text{ kN} > F_a = 1300,0 \text{ kN}.$$

Nośność pasa osłabionego otworami na łączniki, gdy układ śrub jest taki, jak na rys. 6.3, jest wystarczająca do przeniesienia prognozowanych wytyżeń.

Przykład 4

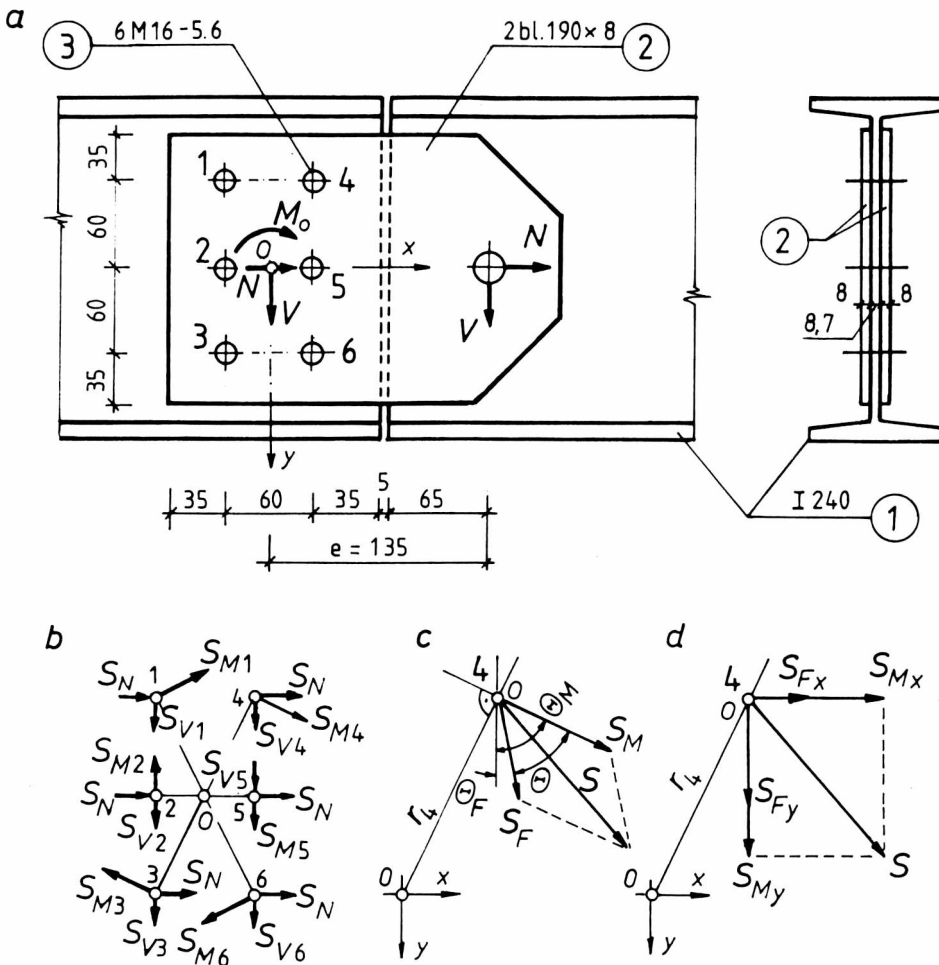
Sprawdzić nośność śrubowego styku przegubowego połączenia kategorii A belki dwuteowej 240, o konstrukcji pokazanej na rys. 6.4a. W przegubie działa siła poprzeczna $V = 100,0$ kN i siła podłużna $N = 60,0$ kN.

Materiał belki dwuteowej oraz dwóch przykładek: stal St3S, o $f_d = 215$ MPa. Przekrój poprzeczny przykładek bl. 190×8 mm. Śruby M16 klasy 5.6.

Nośność obliczeniową śrub na ścinanie w jednej płaszczyźnie odczytano z tabl. 2.1. W obliczanym połączeniu śruby są dwucięte, a ich nośność wynosi

$$S_{Rv} = 2 \cdot 45,2 = 90,4 \text{ kN.}$$

Rozmieszczenie śrub w styku pokazanym na rys. 6.4 spełnia warunki geometryczne podane w tabl. 2.5, a nośność śrub na docisk do ścianki o grubości $t = \min(2 \cdot 8,0; 8,7) = 8,7$ mm wynosi



Rys. 6.4. Konstrukcja przegubowego połączenia belki

$$S_{Rb} = \frac{t}{10} S_{Rb,1} = \frac{8,7}{10} \cdot 86,0 = 74,8 \text{ kN}.$$

Miarodajna nośność łączników wynosi

$$S_R = \min(S_{Rv}, S_{Rb}) = \min(90,4; 74,8) = 74,8 \text{ kN}.$$

Środek ciężkości grupy 6 śrub znajduje się w punkcie 0. Współrzędne (x_i, y_i) oraz odległości r_i względem środka ciężkości grupy łączników wynoszą

$$\begin{array}{lll} x_1 = -30 \text{ mm}, & y_1 = -60 \text{ mm}, & r_1 = \sqrt{30^2 + 60^2} = 67 \text{ mm}, \\ x_2 = -30 \text{ mm}, & y_2 = 0 \text{ mm}, & r_2 = 30 \text{ mm}, \\ x_3 = -30 \text{ mm}, & y_3 = 60 \text{ mm}, & r_3 = 67 \text{ mm}, \\ x_4 = 30 \text{ mm}, & y_4 = -60 \text{ mm}, & r_4 = 67 \text{ mm}, \\ x_5 = 30 \text{ mm}, & y_5 = 0 \text{ mm}, & r_5 = 30 \text{ mm}, \\ x_6 = 30 \text{ mm}, & y_6 = 60 \text{ mm}, & r_6 = 67 \text{ mm}, \end{array}$$

$$\sum r_i^2 = 4 \cdot 67^2 + 2 \cdot 30^2 = 19\,756 \text{ mm}^2.$$

Siły wewnętrzne w środku ciężkości połączenia wynoszą

$$\begin{aligned} F_x &= N = 60,0 \text{ kN}, \\ F_y &= V = 100,0 \text{ kN}, \\ M_o &= V \cdot e = 100,0 \cdot 0,135 = 13,5 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Na rysunku 6.4b przedstawiono rozkłady sił wewnętrznych w łącznikach od występującego w złączu obciążenia F_x, F_y, M_o . Z analizy wyężenia styku wynika, iż najbardziej obciążona jest śruba (4), gdyż składowe od momentu zginającego M_o , siły poprzecznej F_y i siły osiowej F_x działające na nią sumują się oraz jest ona najbardziej oddalona od środka ciężkości grupy śrub ($r_4 = r_{\max}$).

Analizowane połączenie kategorii A należy obliczać w stanie granicznym nośności na ścięcie i docisk śrub. W tym celu należy wyznaczyć ekstremalne wyężenie łącznika i porównać je z miarodajną nośnością śruby. Ponadto należy sprawdzić nośność dwuteownika i przykładek w przekrojach osłabionych otworami.

Siłę wypadkową (ekstremalną) przypadającą na śrubę (4) można obliczyć dwoma sposobami: w ujęciu według normy [60]; korzystając ze wzoru (2.31) lub metodą tradycyjną polegającą na określeniu wartości rzutów sił składowych na osie x, y i wyznaczeniu wypadkowej tych rzutów, tj. ze wzoru (2.32). Rozkłady sił składowych w łączniku (4) dla sposobu normowego [60] pokazano na rys. 6.4c; na rys. 6.4d zaś dla sposobu tradycyjnego.

Procedura wyznaczenia ekstremalnego wyężenia śrub w ujęciu według normy [60] jest następująca. Siła składowa S_F działająca na każdą śrubę od siły wypadkowej F (o składowych F_x i F_y) wynosi

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{60,0^2 + 100,0^2} = 116,62 \text{ kN}, \\ S_F &= F/n = 116,62/6 = 19,43 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Kąt nachylenia siły F i S_F do osi y wynosi

$$\theta_F = \arctg(F_x/F_y) = \arctg(60,0/100,0) = 30,96^\circ.$$

Siła składowa S_M od momentu zginającego M_o w śrubie (4) wynosi

$$S_M = M_o r_4 / \sum r_i^2 = 13,5 \cdot 0,067 / 19\,756 / 10^{-6} = 45,78 \text{ kN}.$$

Kąt nachylenia siły S_M do osi y wynosi

$$\theta_M = \arctg(-y_4/x_4) = \arctg(60/30) = 63,43^\circ.$$

Kąt między wektorami S_F i S_M wynosi

$$\theta = |\theta_M - \theta_F| = |63,43 - 30,96| = 32,47^\circ.$$

Siła wypadkowa dla śruby (4), wyznaczona według wzoru (2.31), wynosi

$$\begin{aligned} S_4 &= \sqrt{(S_M + S_F \cos \theta)^2 + (S_F \sin \theta)^2} = \\ &= \sqrt{(45,78 + 19,43 \cos 32,47^\circ)^2 + (19,43 \sin 32,47^\circ)^2} = 63,1 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Procedura obliczeniowa wyznaczania siły wypadkowej dla śruby (4) na podstawie rzutów sił (rys. 6.4d) jest następująca. Siły składowe S_{Fx} i S_{Fy} od wpływu obciążenia poprzecznego V i podłużnego N wynoszą

$$S_{Fx} = F_x/n = 60,0/6 = 10,00 \text{ kN},$$

$$S_{Fy} = F_y/n = 100,0/6 = 16,67 \text{ kN}.$$

Siły składowe S_{Mx} i S_{My} od momentu zginającego M_o , obliczone według wzorów (2.28) i (2.29), wynoszą

$$S_{Mx} = \frac{M_o y_4}{\sum (x_i^2 + y_i^2)} = \frac{13,5 \cdot 0,06}{19\,756 \cdot 10^{-6}} = 41,00 \text{ kN},$$

$$S_{My} = \frac{M_o x_4}{\sum (x_i^2 + y_i^2)} = \frac{13,5 \cdot 0,03}{19\,756 \cdot 10^{-6}} = 20,50 \text{ kN}.$$

Siła wypadkowa w śrubie (4) wyznaczona według wzoru (2.32) wynosi

$$\begin{aligned} S_4 &= \sqrt{(S_{Fx} + S_{Mx})^2 + (S_{Fy} + S_{My})^2} = \\ &= \sqrt{(10,00 + 41,00)^2 + (16,67 + 20,50)^2} = 63,1 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Sprawdzenie warunku nośności dla śruby (4) otrzymano porównując jej wyężenie z miarodajną nośnością

$$S_{\max} = S_4 = 63,1 \text{ kN} < S_R = 74,8 \text{ kN}.$$

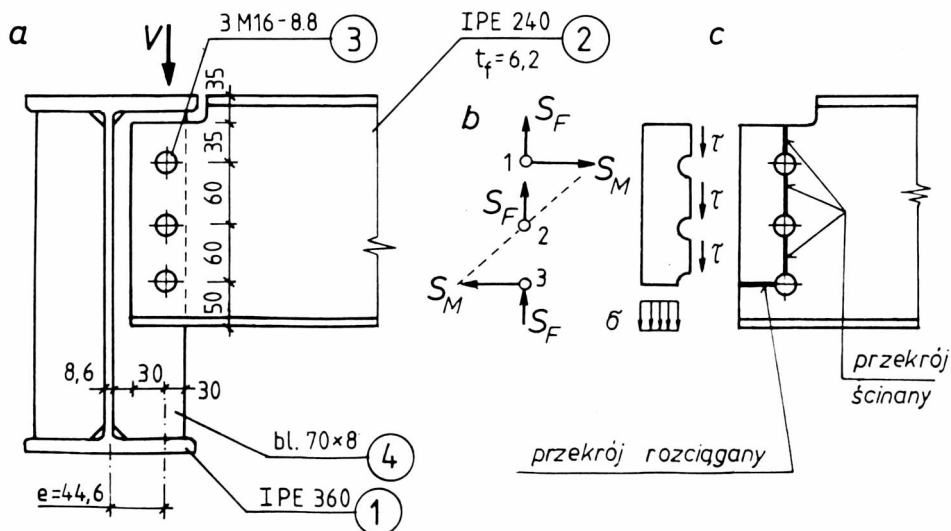
Łączniki w połączeniu pokazanym na rys. 6.4a spełniają normowe [60] wymagania stanu granicznego nośności. W projektowanym złączu należy ponadto sprawdzić nośność dwuteownika i przykładek w przekrojach osłabionych otworami.

Przykład 5

Zaprojektować połączenie zakładkowe kategorii A dwuteowej belki stropowej o przekroju I PE 240 z podciągami o przekroju z dwuteownika równoległościennego I PE 360 przenoszące obciążenie poprzeczne $V = 100$ kN. Konstrukcję połączenia przedstawiono na rys. 6.5a.

Dane: podciąg I PE 360 ze stali 18G2A o $f_d = 305$ MPa; belka I PE 240 ze stali St3S o $f_d = 215$ MPa; grubość środnika I PE 240 $t_w = 6,2$ mm; grubość żebra podciagu $t = 8$ mm.

W projektowanym połączeniu zastosowano 3 śruby M16 klasy 8.8 usytuowane jak na rys. 6.5a. Z tablicy 2.1 odczytano obliczeniową nośność śrub jednociętych, która wynosi $S_{Rv} = 72,4$ kN.



Rys. 6.5. Połączenie belki z podciągami

Dla zastosowanego rozstawu śrub, korzystając z tabl. 2.5, wyznaczono dla $t = \min(6,2; 8,0) = 6,2$ mm obliczeniową nośność śrub na docisk

$$S_{Rb} = \frac{t}{10} S_{Rb,1} = \frac{6,2}{10} \cdot 86,0 = 53,32 \text{ kN}.$$

Miarodajna obliczeniowa nośność śrub wynosi

$$S_R = \min(S_{Rv}; S_{Rb}) = \min(72,4; 53,32) = 53,32 \text{ kN}.$$

W połączeniu działa siła poprzeczna V oraz moment zginający, który wynosi

$$M_o = V \cdot e = 100 \cdot 0,0446 = 4,46 \text{ kNm}.$$

Siły składowe, pokazane na rys. 6.5b, od obciążenia poprzecznego S_F (według (2.30)) i od momentu zginającego S_M (według (2.28)) wynoszą

$$S_F = \frac{V}{n} = \frac{100}{3} = 33,33 \text{ kN},$$

$$S_M = \frac{M_o y_1}{\sum y_i^2} = 4,46 \frac{0,06}{2 \cdot 0,06^2} = 37,17 \text{ kN}.$$

Siła wypadkowa S w śrubie (1) wynosi

$$S = \sqrt{S_M^2 + S_F^2} = \sqrt{37,17^2 + 33,33^2} = 49,92 \text{ kN} < S_R = 53,32 \text{ kN},$$

i spełnione są normowe [60] wymagania stanu granicznego nośności łączników.

W projektowanym połączeniu należy sprawdzić belkę dwuteową z I PE 240 w przekroju osłabionym otworami ze względu na możliwość tzw. blokowego ścięcia (ścięcie i rozerwanie) ze wzoru (2.44). Schemat sprawdzanego fragmentu belki z I PE 240 pokazano na rys. 6.5c. Otwory na śruby M16 wynoszą 18 mm.

Przekroje netto: rozrywany A_{nt} i ścinany A_{nv} środnika belki wynoszą

$$A_{nt} = 0,62(3 - 0,5 \cdot 1,8) = 1,30 \text{ cm}^2,$$

$$A_{nv} = 0,62(3,5 + 2 \cdot 6,0 - 2,5 \cdot 1,8) = 6,82 \text{ cm}^2.$$

Warunek nośności środnika osłabionego otworami według (2.44) ma następującą postać

$$F_{Rj} = f_d \left(0,6 A_{nv} + \frac{n_v}{n} A_{nt} \right) = 215 \cdot 10^3 \left(0,6 \cdot 6,82 \cdot 10^{-4} + \frac{3}{3} \cdot 1,30 \cdot 10^{-4} \right) =$$

$$= 115,93 \text{ kN},$$

$$F_{Rj} = 115,93 \text{ kN} < V = 100 \text{ kN}.$$

Środnik belki I PE 240, osłabiony otworami na śruby, spełnia warunki stanu granicznego nośności według [60].

Przykład 6

Zaprojektować doczołowe, śrubowe połączenie kategorii D rozciąganego pręta o przekroju z dwóch ceowników 80, ze słupem dwuteowym I PE 400. Konstrukcję połączenia przedstawiono na rys. 6.6. Połączenie śrubowe należy zaprojektować z warunku nośności pręta rozciąganego.

Dane: pręt rozciągany, dwa ceowniki 80, o przekroju poprzecznym $A = 22,0 \text{ cm}^2$ ze stali St3SX, o wytrzymałości obliczeniowej $f_d = 215 \text{ MPa}$; śruby M16 klasy 8.8.

Nośność rozciąganego pręta o przekroju z dwóch ceowników 80 wynosi

$$N_{Rt} = A f_d = 22,0 \cdot 10^{-4} \cdot 215 \cdot 10^3 = 473,0 \text{ kN}.$$

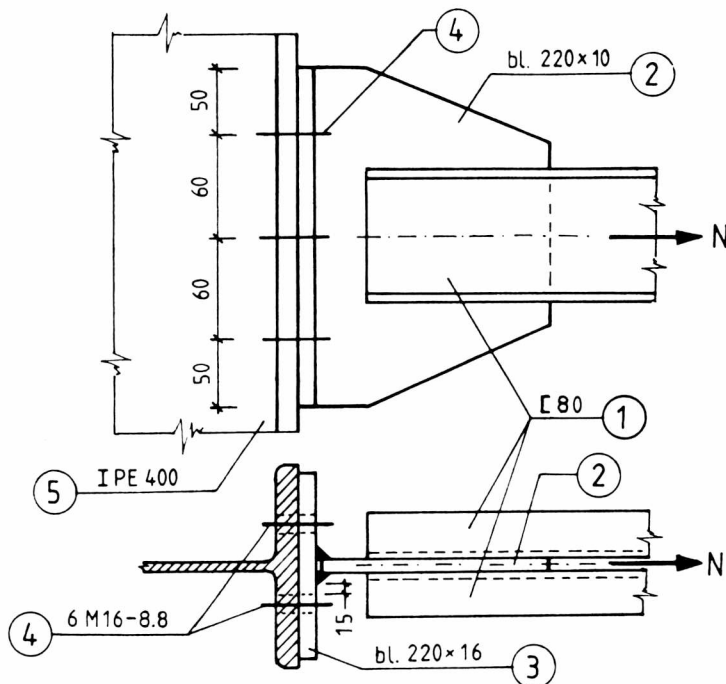
Zgodnie z warunkami podanymi w tabl. 3.5 połączenia doczołowe kategorii D projektuje się z warunku nośności śrub na zerwanie.

Z tablicy 2.3 odczytano nośność obliczeniową śrub M16 klasy 8.8 na rozciąganie, która wynosi $S_{Rt} = 81,3 \text{ kN}$. Potrzebną liczbę śrub w połączeniu wyznaczono ze wzoru

$$n = N_{Rt} / S_{Rt} = 473,0 / 81,3 = 5,82.$$

Przyjęto 6 śrub rozmieszczonych jak na rys. 6.6. Odległość c między krawędzią spoiny a brzegiem otworu nie powinna przekraczać średnicy śruby ($c \leq d$). Przyjęto odległość od krawędzi spoiny do brzegu otworu $c = 15$ mm. Szerokość współdziałania b_s we wzorze (3.3) wynosi

$$b_s = 60 \text{ mm} \leq 2(c + d) = 2(15 + 16) = 62 \text{ mm}.$$



Rys. 6.6. Konstrukcja rozciąganego połączenia doczołowego

Minimalną grubość blachy czołowej ze stali St3S, o $f_d = 215$ MPa wyznaczono ze wzoru (3.3)

$$t_{\min} = 1,2 \sqrt{\frac{c S_{Rt}}{b_s f_d}} = 1,2 \sqrt{\frac{15 \cdot 81,3}{60 \cdot 215 \cdot 10^3}} = 0,01167 \text{ m} = 11,67 \text{ mm}.$$

Zastosowano blachę czołową o grubości $t = 16$ mm.

Blacha czołowa w połączeniu pokazanym na rys. 6.6 nie jest usztywniona żebrami. Zachodzi zatem konieczność redukcji nośności połączenia ze względu na wpływ tzw. efektu dźwigni.

Współczynnik efektu dźwigni wyznaczony według wzoru (3.8) wynosi

$$\beta = 2,67 - \frac{t}{t_{\min}} = 2,67 - \frac{16}{11,67} = 1,298.$$

Nośność obliczeniową połączenia niesprężonego kategorii D, z uwzględnieniem wpływu efektu dźwigni określono ze wzoru (3.10) i wynosi ona

$$N_{Rj} = \frac{1}{\beta} n S_{Rt} = \frac{1}{1,298} \cdot 6 \cdot 81,3 = 375,8 \text{ kN} < N_{Rt} = 473,0 \text{ kN}.$$

Nośność połączenia z blachą czołową o grubości 16 mm jest mniejsza od nośności rozciąganego pręta.

Aby spełnić założony w analizowanym przykładzie warunek nośności połączenia, nie mniejszej niż nośność pręta można zwiększyć grubość blachy czołowej lub średnicę śrub, albo też zmienić klasę łączników na wyższą. Zwiększenie liczby śrub jest w tym wypadku mniej efektywne, ponieważ zmniejsza się szerokość współdziałania, a przez to zwiększy się minimalna grubość blachy t oraz współczynnik efektu dźwigni β .

Wartość współczynnika β , przy której nośność połączenia za pomocą 6 śrub będzie zapewniona, wynosi

$$\beta \leq \frac{n S_{Rt}}{N_{Rt}} = \frac{6 \cdot 81,3}{473,0} = 1,03,$$

potrzebną zaś grubość blachy czołowej t wyznaczono przekształcając wzór (3.8)

$$t = t_{\min} (2,67 - \beta) = 11,67 (2,67 - 1,03) = 19,13 \text{ mm}.$$

Przyjmując $t = 20 \text{ mm}$ spełnia się założenie projektowe $N_{Rj} > N_{Rt}$.

Przykład 7

Zaprojektować doczołowe połączenie sprężone kategorii E, statycznie obciążonego, rozciąganego ściągu o przekroju $270 \times 20 \text{ mm}$. Konstrukcję ściągu pokazano na rys. 6.7. Dane: pręt rozciągany $270 \times 20 \text{ mm}$ wykonano ze stali St3S o $f_d = 205 \text{ MPa}$; zastosowano śruby M20 klasy 10.9 o $R_m = 1040 \text{ MPa}$; wartość charakterystyczna siły rozciągającej $N_{ch} = 700,0 \text{ kN}$; wartość obliczeniowa siły rozciągającej $N_{ob} = 900,0 \text{ kN}$.

W połączeniu kategorii E (patrz tabl. 3.5), o stanie granicznym nośności decyduje zerwanie śrub (tj. nośność obliczeniowa śrub S_{Rt}), a o stanie granicznym użytkowania zaś – rozwarcie styku (nośność obliczeniowa śrub S_{Rr}). Nośność połączenia w obu stanach granicznych sprawdza się na podstawie wzoru (3.9).

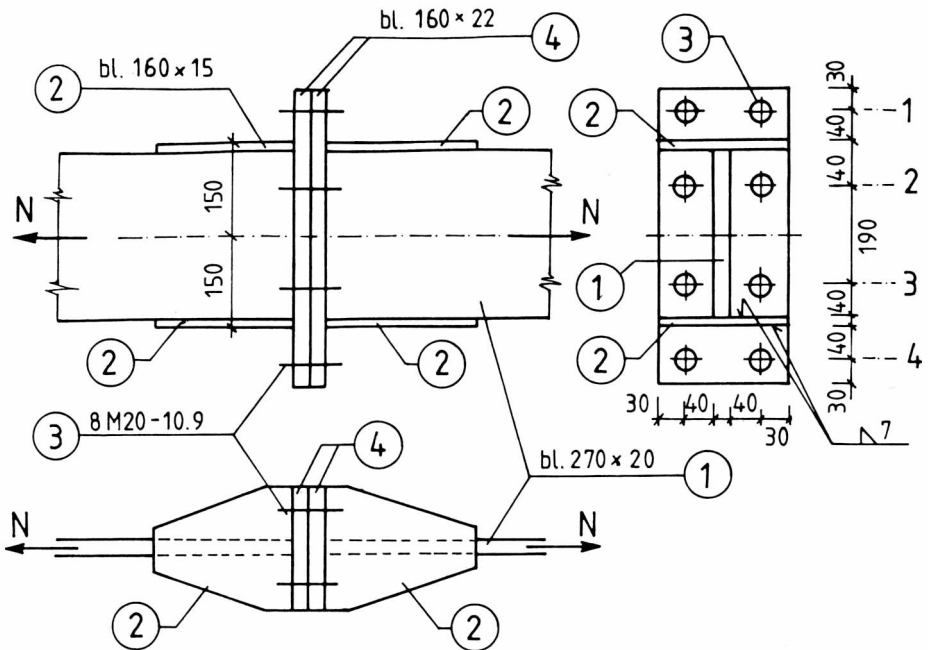
Nośność obliczeniową na rozciąganie śrub M20 klasy 10.9 odczytano z tabl. 3.1 i wynosi ona $S_{Rt} = 166,0 \text{ kN}$. Nośność obliczeniową śrub obciążonych statycznie na rozciąganie w stanie granicznym użytkowania można odczytać z tabl. 3.1 lub wyznaczyć ze wzoru (3.12) i wynosi ona

$$S_{Rr} = 0,85 S_{Rt} = 0,85 \cdot 166,0 = 141,1 \text{ kN}.$$

Potrzebną liczbę śrub w połączeniu wyznaczono ze wzoru

$$n = \max(N_{ob}/S_{Rt}; N_{ch}/S_{Rr}) = \max(900/166; 700/141,1) = 5,42.$$

Zastosowano 8 śrub rozmieszczonych jak na rys. 6.7.



Rys. 6.7. Konstrukcja styku ściągu rozciąganego

Minimalną grubość blachy czołowej w połączeniu sprężonym obciążonym statycznie określono ze wzoru (3.4) i wynosi ona

$$t_{\min} = d \sqrt[3]{\frac{R_m}{1000}} = 20 \sqrt[3]{\frac{1040}{1000}} = 20,3 \text{ mm.}$$

Przyjęto grubość blachy czołowej $t = 22 \text{ mm}$. Współczynnik efektu dźwigni β według wzoru (3.8) wyznacza się dla $t_{\min}$ obliczonego według wzoru (3.3). Odległość od krawędzi spoiny pachwinowej o grubości 7 mm do brzegu otworu c wynosi

$$c = 40 - 10 - 0,5 \cdot 22 = 19 \text{ mm} < d = 20 \text{ mm.}$$

Szerokość współdziałania blachy czołowej dla rozstawu śrub pokazanego na rys. 6.7 wynosi

$$b_s = \min [160/2; 2(c + d) = 2(19 + 20)] = 78 \text{ mm.}$$

Minimalna grubość blachy czołowej wyznaczona ze wzoru (3.3) wynosi

$$t_{\min} = 1,2 \sqrt{\frac{19 \cdot 166}{78 \cdot 205 \cdot 10^3}} = 0,01685 \text{ m.}$$

Współczynnik efektu dźwigni wyznaczony ze wzoru (3.8) wynosi

$$\beta = 2,67 - \frac{t}{t_{\min}} = 2,67 - \frac{22}{16,85} = 1,36,$$

$$1/\beta = 1/1,36 = 0,733 > \omega_i.$$

Nośność obliczeniową projektowanego połączenia kategorii E w stanie granicznym nośności wyznaczono ze wzoru (3.11) przyjmując współczynniki rozdziału obciążeń (według rys. 3.7) dla szeregów wewnętrznych (Nr 2 i 3 na rys. 6.7) $\omega_t = 1,0$ i dla szeregów zewnętrznych (Nr 1 i 4 na rys. 6.7) $\omega_t = 0,7$

$$N_{Rj} = S_{Rt} \sum_{i=1}^n \omega_{it} = 166(4 \cdot 1,0 + 4 \cdot 0,7) = 1129 \text{ kN} > N_{ob} = 900,0 \text{ kN}.$$

Nośność obliczeniową projektowanego połączenia kategorii E w stanie granicznym użytkowania wyznaczono ze wzoru (3.11) przyjmując współczynniki rozdziału obciążeń dla szeregów wewnętrznych $\omega_t = 1,0$ i dla szeregów zewnętrznych $\omega_r = 0,6$

$$N_{Rj} = S_{Rr} \sum_{i=1}^n \omega_{ri} = 141,1(4 \cdot 1,0 + 4 \cdot 0,6) = 903 \text{ kN} > N_{ch} = 700,0 \text{ kN}.$$

Zaprojektowane połączenie doczołowe kategorii E spełnia normowe [60] wymagania stanu granicznego nośności i użytkowania.

Siłę sprężającą śruby odczytano z tabl. 3.1 i wynosi ona $S_0 = 178,0 \text{ kN}$. W projektowanym połączeniu należy ponadto sprawdzić nośność spoin według zasad podanych w [60].

Przykład 8

Sprawdzić nośność sztywnego, doczołowego połączenia belki I PE 450 ze słupem HEB 500 ze stali 18G2A, o konstrukcji przedstawionej na rys. 6.8. W styku obciążonym statycznie występują siły wewnętrzne: moment zginający obliczeniowy $M = 400 \text{ kNm}$ i charakterystyczny $M_{ch} = 300 \text{ kNm}$ oraz siła poprzeczna $V = 420 \text{ kN}$. Założono, że blacha czołowa belki będzie sfrezowana, a połączenie kategorii E na śruby M24 klasy 10.9 o $R_m = 1040 \text{ MPa}$ będzie wstępnie sprężone.

Połączenie kategorii E (patrz tabl. 3.5) oblicza się w stanie granicznym nośności na zerwanie śrub i stanie granicznym użytkowania z warunku rozwarcia styku.

W styku doczołowym przedstawionym na rys. 6.8 przyjęto, iż siła poprzeczna V przekazana będzie dzięki dociskowi na stołeczek przyspawany do pasa słupa (poz. (5) na rys. 6.8).

Z tabl. 3.1 odczytano nośność śrub na rozciąganie S_{Rt} oraz $S_{Rr,s}$, które wynoszą

$$S_{Rt} = 239 \text{ kN} \text{ i } S_{Rr,s} = 203 \text{ kN}.$$

Minimalną grubość blachy czołowej w doczołowym styku sprężanym wyznaczono ze wzoru (3.4) i wynosi ona

$$t_{\min} = d \sqrt[3]{\frac{R_m}{1000}} = 24 \sqrt[3]{\frac{1040}{1000}} = 24,31 \text{ mm}.$$

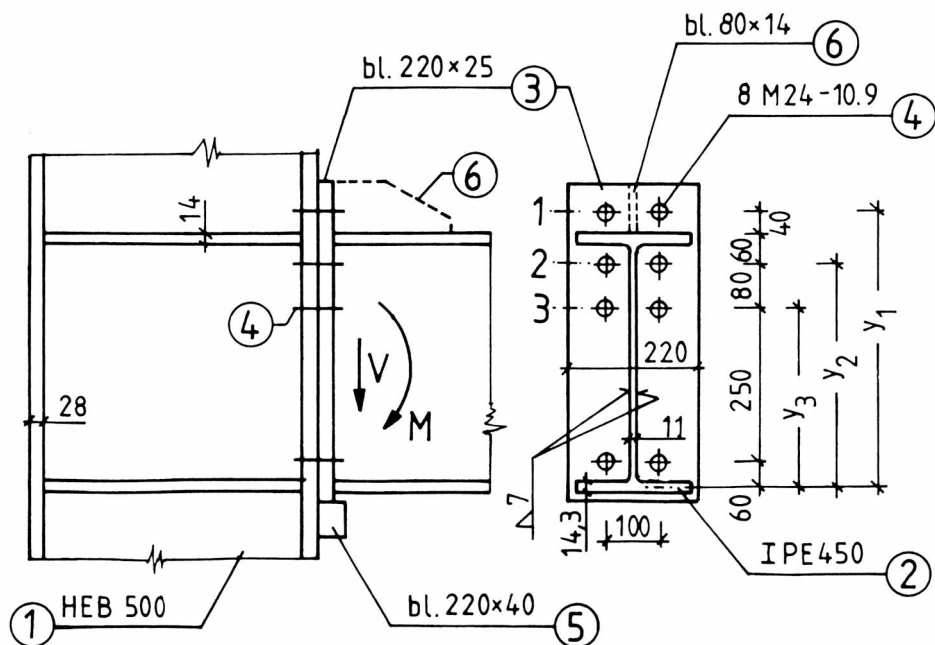
Zastosowano blachę czołową o grubości $t = 25 \text{ mm}$. Grubość pasa słupa spełnia warunek $t_f = 28 \text{ mm} > t_{\min} = 24,31 \text{ mm}$.

W obliczeniach nośności styku zginanego uwzględnia się te szeregi śrub, których odległość osi obrotu (w osi dolnego pasa ściskanego) jest nie większa niż $0,6$ osiowej odległości pasów. W styku pokazanym na rys. 6.8 odległości śrub od osi obrotu wynoszą

$$y_1 = 60 + 250 + 80 + 60 + 40 = 490 \text{ mm},$$

$$y_2 = 60 + 250 + 80 = 390 \text{ mm},$$

$$y_3 = 60 + 250 = 310 \text{ mm} > 0,6h_o = 0,6 \cdot (450 - 14,3) = 261,4 \text{ mm}.$$



Rys. 6.8. Konstrukcja doczołowego połączenia zginanego (przykłady 8–10)

Z tablicy 3.2 odczytano współczynniki rozdziału obciążeń w styku zginanym, które wynoszą dla stanu granicznego nośności

$$\omega_{i1} = 0,8,$$

$$\omega_{i2} = 1,0,$$

$$\omega_{i3} = 0,8.$$

Stan graniczny nośności styku zginanego sprawdzono ze wzoru (3.15)

$$\begin{aligned} M_{Rj} &= S_{Ri} \sum_i m_i \omega_{ii} y_i = 2 \cdot 239 (0,8 \cdot 0,49 + 1,0 \cdot 0,39 + 0,8 \cdot 0,31) = \\ &= 492,34 \text{ kNm} > M = 400 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Odpowiednie współczynniki rozdziału obciążenia podczas sprawdzania stanu granicznego z warunku rozwarcia styku (dla stanu granicznego użytkowania) odczytane z tabl. 3.2 wynoszą

$$\begin{aligned}\omega_{r1} &= 0,7, \\ \omega_{r2} &= 1,0, \\ \omega_{r3} &= 0,8.\end{aligned}$$

W odniesieniu do elementów dwuteowych o wysokości $h > 400$ mm, sprawdzając stan graniczny użytkowania, należy przyjmować zredukowane wartości ramion sił wewnętrznych, które wynoszą

$$\begin{aligned}y_{i\text{red}} &= y_i - h/6, \\ y_{1\text{red}} &= 490 - 450/6 = 415 \text{ mm}, \\ y_{2\text{red}} &= 390 - 450/6 = 315 \text{ mm}, \\ y_{3\text{red}} &= 310 - 450/6 = 235 \text{ mm}.\end{aligned}$$

Nośność obliczeniową w stanie granicznym użytkowania obliczono według wzoru (3.17) (brak żebra usztywniającego górną część blachy czołowej) i wynosi ona

$$\begin{aligned}M_{Rj} &= 2S_{Rr,s} \left(\omega_{r1} y_1 + \sum_{i=2}^3 \omega_{ri} \frac{y_i^2}{y_2} \right) = \\ &= 2 \cdot 203 [0,7 \cdot 0,415 + (1,0 \cdot 0,315^2 + 0,8 \cdot 0,235^2)/0,315] = 302,77 \text{ kNm}, \\ M_{Rj} &= 302,77 \text{ kNm} > M_{ch} = 300,0 \text{ kNm}.\end{aligned}$$

Styk o konstrukcji pokazanej na rys. 6.8 spełnia wymagania normowe [60] stanu granicznego użytkowania.

W projektowanym połączeniu należy sprawdzić nośność spoin łączących blachę czołową z belką, według zasad podanych w [60].

Przykład 9

Wyznaczyć obliczeniowy M_o i charakterystyczny M_{ch} moment zginający styku śrubowego kategorii E, pokazanego na rys. 6.8 z usztywnioną żebrzem blachą czołową (poz. (6) na rys. 6.8).

Współczynniki rozdziału obciążeń w uźebrowanym styku czołowym ustalone według tabl. 3.2 wynoszą

$$\begin{aligned}\omega_{t1} &= 0,9, & \omega_{r1} &= 0,7, \\ \omega_{t2} &= 1,0, & \omega_{r2} &= 1,0, \\ \omega_{t3} &= 0,8, & \omega_{r3} &= 0,8.\end{aligned}$$

Moment obliczeniowy, jaki może przenieść uźebrowany styk czołowy kategorii E, wyznaczony ze wzoru (3.15) wynosi

$$\begin{aligned}M_{Rj,\dot{z}} &= S_{Rt} \sum_i m_i \omega_{ti} y_i = 2 \cdot 239 (0,9 \cdot 0,49 + 1,0 \cdot 0,39 + 0,8 \cdot 0,31) = \\ &= 515,76 \text{ kNm},\end{aligned}$$

$$M_o = M_{Rj,\dot{z}} = 515,76 \text{ kNm}.$$

Moment charakterystyczny jaki może przenieść uźebrowany styk kategorii E, wyznaczony ze wzoru (3.16) wynosi

$$\begin{aligned} M_{Rj,\dot{z}} &= 2S_{Rr} \sum_{i=1}^3 \omega_{ri} \frac{y_i^2}{y_{\max}} = \\ &= 2 \cdot 203 (0,7 \cdot 0,415^2 + 1,0 \cdot 0,315^2 + 0,8 \cdot 0,235^2) / 0,415 = \\ &= 258,23 \text{ kNm}, \end{aligned}$$

$$M_{ch} = M_{Rj,\dot{z}} = 258,23 \text{ kNm}.$$

Należy zauważyć, iż obliczeniowa nośność graniczna, z warunku zerwania śrub dla stanu granicznego nośności, połączenia doczołowego uźebrowanego jest większa od nośności styku nieuźebrowanego

$$M_{Rj} < M_{Rj,\dot{z}}.$$

Obliczeniowa nośność graniczna natomiast, z warunku rozwarcia styku (dla stanu granicznego użytkowania), doczołowego połączenia uźebrowanego jest mniejsza niż styku nieuźebrowanego

$$M_{Rj} > M_{Rj,\dot{z}}.$$

Przykład 10

Wyznaczyć nośność obciążonego dynamicznie doczołowego styku kategorii F przedstawionego na rys. 6.8.

Minimalna grubość blachy czołowej w styku sprężonym obciążonym statycznie (obliczona w przykładzie 8) wynosi

$$t_{\min,1} = 24,31 \text{ mm}.$$

Odległość od krawędzi spoiny do brzegu otworu wynosi

$$c = 50 - 11/2 - 10 - 13 = 21,5 \text{ mm}.$$

Szerokość współdziałania b_s wynosi

$$b_s = \min [220/2; 2(c+d) = 2(21,5 + 24,0)] = 91 \text{ mm}.$$

Minimalna grubość blachy czołowej ze stali 18G2A, o $f_d = 295 \text{ MPa}$ w styku niesprężonym wynosi

$$t_{\min,2} = 1,2 \sqrt{\frac{c \cdot S_{Rt}}{b_s \cdot f_d}} = 1,2 \sqrt{\frac{21,5 \cdot 239}{91 \cdot 295 \cdot 10^3}} = 0,0166 \text{ m} = 16,60 \text{ mm}.$$

Minimalna grubość blachy czołowej w styku sprężonym obciążonym dynamicznie wynosi

$$t_{\min} \geq \max(1,62t_{\min,2}; 1,25t_{\min,1}) = \max(1,62 \cdot 16,60; 1,25 \cdot 24,31) = 30,38 \text{ mm}.$$

Zastosowano blachę czołową o grubości $t = 32 \text{ mm}$.

Zgodnie z tabl. 3.5 dla styków kategorii F jest wymagana odporność połączenia na rozwarcie w stanie granicznym nośności. Obliczeniową nośność

śrub obciążonych dynamicznie z warunku rozwarcia styku można odczytać z tabl. 3.1 lub wyznaczyć ze wzoru (3.13) i wynosi ona

$$S_{Rr,d} = 0,6S_{Rt} = 0,6 \cdot 239 = 143,4 \text{ kN}.$$

Nośność obliczeniową analizowanego styku (który w przypadku obciążeń dynamicznych zaleca się konstruować bez żebra usztywniającego blachę czołową) wyznaczono ze wzoru (3.17) oraz współczynników rozdziału obciążenia ω_{ri} oraz ramion sił wewnętrznych y_{ired} (patrz przykład 8)

$$\begin{aligned}\omega_{r1} &= 0,7, & y_{1red} &= 415 \text{ mm}, \\ \omega_{r2} &= 1,0, & y_{2red} &= 315 \text{ mm}, \\ \omega_{r3} &= 0,8, & y_{3red} &= 235 \text{ mm},\end{aligned}$$

i wynosi ona

$$\begin{aligned}M_{Rj,d} &= 2S_{Rr,d} \left(\omega_{r1} y_1 + \sum_{i=2}^3 \omega_{ri} \frac{y_i^2}{y_2} \right) = \\ &= 2 \cdot 143,4 [0,7 \cdot 0,415 + (1,0 \cdot 0,315^2 + 0,8 \cdot 0,235^2)/0,315] = 213,88 \text{ kN}.\end{aligned}$$

Porównując nośności styku pokazanego na rys. 6.8 w stanie granicznym nośności, obliczone w przykładach 8–10 należy zauważyć, iż zachodzi nierówność

$$M_{Rj,z} > M_{Rj} > M_{Rj,d}.$$

Przykład 11

Zaprojektować doczołowe połączenie kategorii D, o konstrukcji przedstawionej na rys. 6.9, rozciąganego pręta stężenia, w wariantcie niesprężanym i sprężanym. Siła osiowa w pręcie $W = 782,6 \text{ kN}$, a jej składowe: równoległa N i prostopadła V do osi śrub wynoszą $N = 700 \text{ kN}$, $V = 350 \text{ kN}$.

Połączenie należy zaprojektować na śruby M24 klasy 8.8, zakładając, że grubość blachy czołowej pręta stężenia i półka dźwigara dwuteowego są dostatecznie grube i nie występuje efekt dźwigni, a ponadto $S_{Rb} > S_{Rv}$.

Procedura obliczeń niesprężonego połączenia, w którym śruby są rozciągane i ścinane jest następująca. Z tablic 2.1 i 2.3 odczytano nośności śrub na ścinanie i rozciąganie

$$S_{Rt} = 190 \text{ kN}, \quad S_{Rv} = 169,0 \text{ kN}.$$

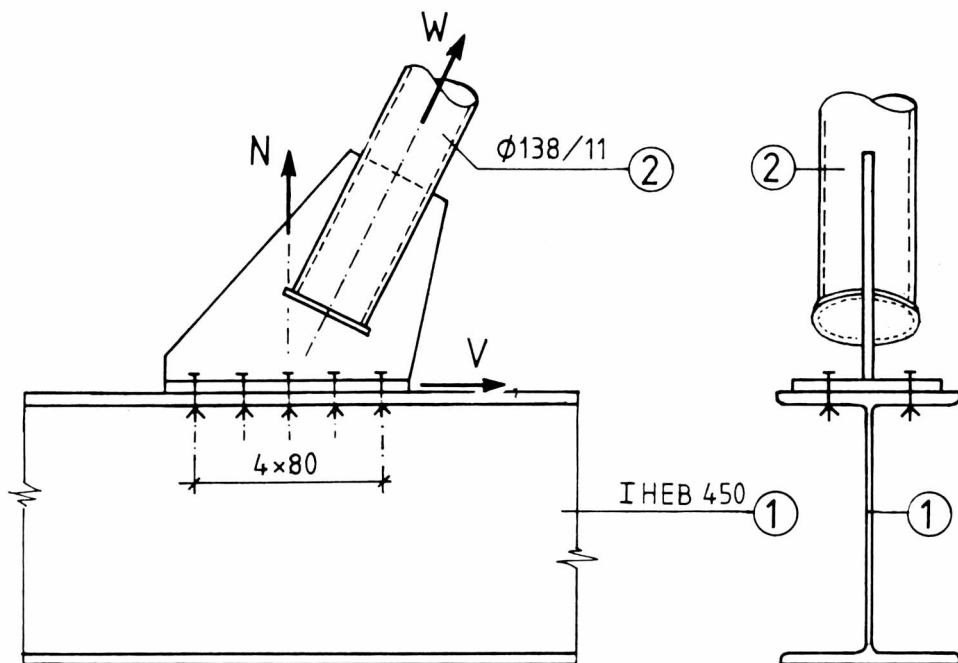
Potrzebną liczbę śrub w połączeniu z warunku rozciągania i ścinania łączników oszacowano wstępnie ze wzoru

$$n = \max \left(\frac{N}{S_{Rt}}, \frac{V}{S_{Rv}} \right) = \max \left(\frac{700}{190}, \frac{350}{169} \right) = 3,68.$$

W połączeniu zastosowano 4 śruby, w których wyężenie wynosi

$$S_t = \frac{N}{n} = \frac{700}{4} = 175 \text{ kN},$$

$$S_v = \frac{V}{n} = \frac{350}{4} = 87,5 \text{ kN}.$$



Rys. 6.9. Konstrukcja połączenia doczołowego pręta rozciąganego

W związku z jednoczesnym obciążeniem śrub N i V należy sprawdzić ich nośność interakcyjną z nierówności (3.24)

$$\left(\frac{S_t}{S_{Rt}}\right)^2 + \left(\frac{S_v}{S_{Rv}}\right)^2 = \left(\frac{175}{190}\right)^2 + \left(\frac{87,5}{169}\right)^2 = 1,12 > 1.$$

Zastosowane w analizowanym połączeniu niesprężonym 4 śruby nie spełniają normowych [60] wymagań stanu granicznego nośności.

Zastosowano w obliczanym połączeniu 6 śrub, a ich wyężenie wynosi

$$S_t = \frac{N}{n} = \frac{700}{6} = 116,7 \text{ kN},$$

$$S_v = \frac{V}{n} = \frac{350}{6} = 58,3 \text{ kN},$$

$$\left(\frac{S_t}{S_{Rt}}\right)^2 + \left(\frac{S_v}{S_{Rv}}\right)^2 = \left(\frac{116,7}{190}\right)^2 + \left(\frac{58,3}{169}\right)^2 = 0,496 < 1.$$

Dla takiej liczby łączników w połączeniu niesprężonym spełniony jest normowy [60] wymóg wytrzymałościowy interakcyjnego wyężenia śrub.

Obliczenia projektowanego połączenia można usprawnić korzystając z tabl. 3.6. Dla parametru X według wzoru (3.26)

$$X = \frac{V}{N} = \frac{350}{700} = 0,5,$$

z tablicy 3.6d odczytano interakcyjne nośności śruby

$$S_{t,1} = 165,63 \text{ kN}, \quad S_{v,1} = 82,81 \text{ kN}.$$

Potrzebna liczba śrub wynosi

$$n = \frac{N}{S_{t,1}} = \frac{V}{S_{v,1}} = \frac{700}{165,63} = \frac{350}{82,81} = 4,22.$$

Procedura obliczeń sprężanego połączenia, w którym występuje obciążenie prostopadłe i równoległe do osi łączników jest następująca.

Przyjęto, iż powierzchnie styku będą przygotowane przez oczyszczenie szczotką drucianą z zendry i rdzy, a współczynnik tarcia według tabl. 2.2 wynosi $\mu = 0,3$. Z tablicy 2.6 odczytano nośność obliczeniową śruby z warunku poślizgu $S_{Rs} = 57,0 \text{ kN}$ oraz siłę sprężania $S_0 = 204,0 \text{ kN}$.

Potrzebna liczba śrub z warunku poślizgu, bez uwzględnienia osiowego rozciągania trzpieni śrub składową osiową S_t wynosi

$$n = \frac{N}{S_{Rs}} = \frac{350}{57,0} = 6,14.$$

Zastosowano w połączeniu 8 śrub, wyłączenia ich zaś od składowych obciążenia N i V wynoszą

$$S_t = \frac{N}{n} = \frac{700}{8} = 87,5 \text{ kN},$$

$$S_s = \frac{V}{n} = \frac{350}{8} = 43,75 \text{ kN}.$$

Wyłączenie śrub w połączeniu sprężonym obciążonym prostopadłe i równoległe do osi śrub sprawdzono ze wzoru (2.16); założono otwory okrągłe do zakładania śrub średnio dokładnych

$$S_{Rs} = \alpha_s \mu (S_{Rt} - S_t) m = 1,0 \cdot 0,3 (190,0 - 87,5) \cdot 1,0 = 30,75 \text{ kN},$$

$$S_{Rs} = 30,75 \text{ kN} < S_s = 43,75 \text{ kN}.$$

Przyjęta liczba 8 śrub sprężających M24 w analizowanym styku nie spełnia wymagań stanu granicznego nośności. Należy więc zwiększyć liczbę łączników $n = 10$ i powtórzyć przedstawioną procedurę obliczeniową.

Zadanie to można rozwiązać również korzystając ze wzoru (3.25). Dla zastosowanych 10 śrub ich wyłączenia wynoszą

$$S_t = \frac{N}{10} = \frac{700}{10} = 70,0 \text{ kN},$$

$$S_s = \frac{V}{10} = \frac{350}{10} = 35,0 \text{ kN},$$

$$\frac{S_t}{S_{Rt}} + \frac{S_s}{S_{Rs}} = \frac{70,0}{190,0} + \frac{35,0}{57,0} = 0,982 < 1,0.$$

W tym przypadku warunki wytrzymałościowe śrub są spełnione.

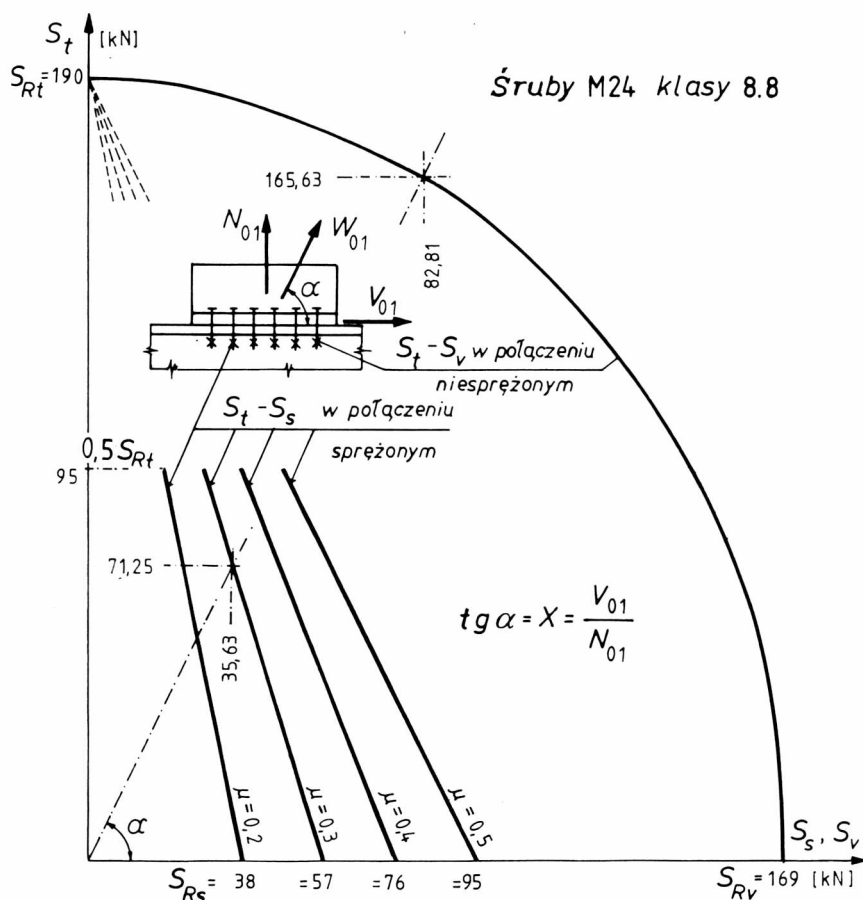
Podobnie jak dla połączenia niesprężanego można z tabl. 3.7 dla parametru $X = 0,5$ (według wzoru (3.26)) odczytać interakcyjną nośność śruby w połączeniu sprężonym, która wynosi

$$S_{Rt,1} = 71,25 \text{ kN}, \quad S_{Rs,1} = 35,63 \text{ kN},$$

a potrzebną liczbę śrub wyznaczyć ze wzoru

$$n = \frac{N}{S_{Rt,1}} = \frac{V}{S_{Rs,1}} = \frac{700}{71,25} = \frac{350}{35,63} = 9,82.$$

W projektowanym połączeniu zastosowano rozstaw śrub w kierunku działającego wyężenia $a = 80 \text{ mm}$ i $a_1 = 60 \text{ mm}$. Współczynnik redukcyjny według (2.11) $\eta = 1$, gdyż $L = 4 \cdot 80 = 320 \text{ mm} < 15d = 15 \cdot 24 = 360 \text{ mm}$ i nie zachodzi potrzeba redukcji nośności złącza.



Rys. 6.10. Interakcyjna nośność śrub M24 klasy 8.8 w połączeniach niesprężanych $S_t - S_v$ oraz sprężanych $S_t - S_s$

Graficzną interpretację wyłączenia analizowanego styku doczołowego rozciąganego i ścinanego przedstawiono na rys. 6.10. Na rysunku tym pokazano interakcyjne nośności śrub M24 klasy 8.8 w połączeniach niesprężonych ($S_t - S_v$) oraz sprężonych ($S_t - S_s$). Następnym sprężeniem doczołowego połączenia ścinanego i rozciąganego, w którym są ograniczone przemieszczenia, jest zmniejszenie nośności $S_t - S_s$ śrub, w stosunku do nośności $S_t - S_v$ śrub w połączeniach niesprężanych.

Literatura

- [1] ACKROYD M.H., GERSTLE K. H., *Strength and Stiffness of Type 2 Steel Frames*. Trans. ASCE, Journal Structural Division, 108 (ST7), 1982, s. 1541-1556.
- [2] AUGUSTYN J., Technologiczność konstrukcji stalowych, Arkady, Warszawa 1981.
- [3] AUGUSTYN J., ŁAGUNA J., ŚLIWKA WŁ., *Badania sprężonych połączeń doczołowych stalowych elementów rozciąganych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 7/1982.
- [4] AUGUSTYN J., ŁAGUNA J., ŚLIWKA WŁ., *Badania sprężonych połączeń doczołowych belek dwuteowych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 11-12/1982.
- [5] AUGUSTYN J., ŁAGUNA J., *Propozycje klasyfikacji połączeń na podstawie stanów granicznych konstrukcji stalowych*, XXXII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, t. 3, Krynica 1986, s. 83-88.
- [6] AUGUSTYN J., BRÓDKA J., ŁAGUNA J., *Obliczanie nośności śrub i połączeń zakładowych według PN-90/B-03200*, Inżynieria i Budownictwo Nr 6/1991, s. 227-230.
- [7] AUGUSTYN J., BRÓDKA J., ŁAGUNA J., *Projektowanie połączeń śrubowych doczołowych według PN-90/B-03200*, Inżynieria i Budownictwo Nr 7/1991, s. 259-261.
- [8] BIEGUS A., KOWAL Z., *Badania doświadczalne podpory regulowanej do podpierania struktur przestrzennych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 4/1980, s. 138-141.
- [9] BIEGUS A., SEIDEL W., *Śrubowe połączenia tłoczące*, Konferencja Naukowa „Materiały i połączenia w konstrukcjach metalowych”, Płock 1986, s. 25-30.
- [10] BIEGUS A., SEIDEL W., *Badania nośności granicznej śrubowych połączeń tłoczących*, Biuletyn Techniczny Mostostal, Nr 2/1987, s. 18-25.
- [11] BIEGUS A., *Podstawy probabilistyczne analizy bezpieczeństwa konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [12] BIEGUS A., *Nośność graniczna stalowych konstrukcji prętowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Wrocław 1997.
- [13] BRÓDKA J., LEDZION-TROJANOWSKA Z., *Przykłady obliczania konstrukcji stalowych*, tom 1. Obliczanie nośności prętów i ich połączeń, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1992.
- [14] BRÓDKA J., GOCZEK J., *Podstawy konstrukcji metalowych*, t. 1, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993.
- [15] BRÓDKA J., KOZŁOWSKI A., *Szywność i nośność węzłów podatnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Białystok – Rzeszów 1996.
- [16] BRÓDKA J., *Ocena podatności połączeń konstrukcji stalowych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 4/1996, s. 236-242.
- [17] CHEN W.F., LUI E.M., *Stability Design of Steel Frames*, CRC Press, Boston, 1991.
- [18] CHMIELOWIEC M. i RICHARD R.M., *Moment Rotation Curves for Partially Restained Steel Connections*, Raport to AISC, University of Arizona 1987.
- [19] *Connections in Steel Structures II*, Behaviour, Strength and Design, Ed by Bjørhövde R., Haaijer G., Colson A., Stark J. W. B., American Institute of Steel Construction, Chicago 1991.
- [20] DISQUE R.O., *Applied Plastic Design in Steel*, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1971.
- [21] FISHER J., BEEDLE L., *Criteria of Designing Bearing – Type Bolted Joints*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 91, ST5, 1965.
- [22] GRANSTROM A., *The Strength of Bolted End-Plate Connections*, Stålbyggnadsinstitutet, Raport 15:13, February 1979.
- [23] *Handbook of Steel Construction Including CSA Standard CAN/CSA – S16. 1-94*, Canadian Institute of Steel Construction, Sixth Edition, Ontario 1995.
- [24] 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.

- [25] *Katalog łączników „Huck” firmy Huck United Kingdom Limited.*
- [26] KISHI N., CHEN W.F., *Moment — Rotation Relations of Semirigid Connection with Angles*, Journal of Structural Eng. Vol. 116, No. 7, July 1990.
- [27] *Komentarz do normy PN-90/B-03200*, Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Konstrukcji Metalowych, Mostostal, Warszawa 1992.
- [28] KOWAL Z., *Wybrane działy z konstrukcji metalowych*, Cz. I i II. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1973.
- [29] KOWAL Z., *Wstęp do teorii konstrukcji metalowych*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1977.
- [30] KULAK G., FISHER J., *Behaviour of Slip Resistant Bolted Joints*, JABSE Periodica, 4/1985.
- [31] LIEW J.Y.R., WHITE D.W., CHEN W.F., *Limit States Design of Semi-Rigid Frames Using Advanced Analysis*, Part 1, Connection Modeling and Classification, Journal of Constructional, Steel Research, Vol. 26, 1993.
- [32] LIPSON S.L., *Single — Angle Welded — Bolted Connections*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 103, No ST3, March 1977.
- [33] ŁAGUNA J., ŁYPACEWICZ K., *Połączenia śrubowe i nitowe*, Arkady, Warszawa 1986.
- [34] ŁAGUNA J., *Badania nośności wybranych typów połączeń sprężonych elementów konstrukcyjnych z dwuteowników walcowanych*, COBPKM Mostostal, praca 07.2/P69.2.3, Warszawa 1984.
- [35] MENDERA Z., *Nośność połączeń doczołowych sprężanych śrubami o wysokiej wytrzymałości*, Inżynieria i Budownictwo Nr 6/1982, s. 104-107.
- [36] MURZEWSKI J., *Wytrzymałość śrub w połączeniach sprężonych i nie sprężonych*, Inżynieria i Budownictwo Nr 6/1980.
- [37] NETHERCOT D. A., KIRBY P. A., RIFAI A. M., *Design of Columns in PR Construction*, Analytical Studies, Canadian Journal Civil Eng., 14(4)/1987, s. 485-497.
- [38] NIEWIADOMSKI J., GŁĄBIK J., KAZEK M., ZAMOROWSKI J., *Obliczanie konstrukcji stalowych wg PN-90/B-03200*, Wydawnictwo Politechniki Gliwickiej, Gliwice 1996.
- [39] *Przykłady liczbowe do PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*, praca zbiorowa pod kierunkiem J. Bródki, COBPKM Mostostal, Warszawa 1989.
- [40] *Semi-rigid Connections in Steel Frames*, Ed by Lorenz R. F., Kato B., Chen W. F., McGraw-Hill, New York 1992.
- [41] STANKIEWICZ B., *Nośność i sztywność długich połączeń śrubowych*, Instytut Techniki Budowlanej, praca doktorska, Warszawa 1991.
- [42] *Structural Connection. Stability and Strength*, Ed by Narayanan R., Elsevier Applied Science, London 1989.
- [43] WALES M.W., ROSSOW E. C., *Coupled Moment — Axial Force Behaviour in Bolted Joints*, Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No 5, May 1983, s. 1250-1266.
- [44] *Wytyczne projektowania wykonania i odbioru doczołowych połączeń elementów konstrukcji stalowych sprężonych śrubami o wysokiej wytrzymałości*, COBPKM Mostostal, Warszawa 1978.
- [45] *Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru połączeń ciernych*, COBPKM Mostostal, Warszawa 1979.
- [46] YURA I. A., BIRKEMOE P., RICLES I. M., *Beam Web Shear Connections: An Experimental Study*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, ST2, 1982.
- [47] ZIÓŁKO J., WŁODARCZYK W., MENDERA Z., WŁODARCZYK S., *Stalowe konstrukcje specjalne*, Arkady, Warszawa 1995.
- [48] ŻMUDA J., *Podstawy projektowania konstrukcji metalowych*. Arkady, Warszawa 1996.

Normy

- [48] BS 5950 *Structural use of steelwork in building*, Part 1, 1990.
- [49] CAN/CSA — S16.1-94 *Limit States Design of Steel Structures*.
- [50] DIN 18800 TEIL 1-4 *Stahlbauten*.
- [51] Eurocode No 3. *Design of Steel Structures. Part 1, General Rules and Rules for Buildings*, 1993.

- [52] Essentials of Eurocode 3. Design Manual for Steel Structures in Buildings, ECCS – Advisory Committee 5, No. 65, 1991.
- [53] PN-82/B-02000. Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.
- [54] PN-82/B-02001. Obciążenia budowli. Obciążenia stałe.
- [55] PN-82/B-02003. Obciążenia budowli. Obciążenia technologiczne.
- [56] PN-82/B-02004. Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne technologiczne.
- [57] PN-86/B-02005. Obciążenia budowli. Obciążenia suwnicami pomostowymi i wciągarkami.
- [58] PN-80/B-02010. Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.
- [59] PN-77/B-02011. Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
- [60] PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [61] PN-85/B-03215. Konstrukcje stalowe. Zakotwienie słupów i kominów.
- [62] PN-96/B-06200. Konstrukcje stalowe budowlane. Wymagania i badania (projekt).
- [63] PN-86/H-84018. Stal niestopowa o podwyższonej wytrzymałości. Gatunki.
- [64] PN-89/H-84023.04. Stal określonego zastosowania. Stal niskowęglowa zwykłej jakości. Gatunki.
- [65] PN-78/M-82005. Podkładki okrągłe zgrubne.
- [66] PN-83/M-82039. Podkładki okrągłe do połączeń sprężanych.
- [67] PN-82/M-82054.03. Śruby, wkręty i nakrętki. Własności mechaniczne śrub i wkrętów.
- [68] PN-85/M-82101. Śruby z łbem sześciokątnym.
- [69] PN-85/M-82105. Śruby z łbem sześciokątnym z gwintem na całej długości.
- [70] PN-86/M-82144. Nakrętki sześciokątne.
- [71] PN-83/M-82171. Nakrętki sześciokątne powiększone do połączeń sprężanych.
- [72] PN-66/M-82341. Śruby pasowane z łbem sześciokątnym i gwintem krótkim.
- [73] PN-66/M-82342. Śruby pasowane z łbem sześciokątnym i gwintem długim.
- [74] PN-83/M-82343. Śruby z łbem sześciokątnym powiększonym do połączeń sprężanych.
- [75] PN-79/M-82009. Podkładki klinowe czworokątne do dwuteowników.
- [76] PN-79/M-82018. Podkładki klinowe czworokątne do ceowników normalnych.



Niniejsza praca na temat wytrzymałościowych modeli połączeń śrubowych zakładkowych i doczołowych stanie się z pewnością cenną pomocą dla studentów i inżynierów praktyków.

Autor zwraca szczególną uwagę na identyfikację modeli fizycznych, konfrontując je z teoretycznymi, przedstawia także sposoby praktycznego ich wykorzystania na przykładach obliczeń połączeń. Omawia ponadto bardzo ważne zagadnienie projektowe – zdobywające dopiero zwolenników – dotyczące charakterystyk sztywnościowych połączeń podatnych (*semi-rigid*).

Publikacja powiązana ze znaną literaturą krajową i zagraniczną jest systematycznym wykładem wiadomości i zaleceń praktycznego projektowania śrubowych połączeń budowlanych zgodnych z normą krajową PN-90/B-03200 oraz Eurokodem 3.

