



POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO

ANTONI BIEGUS

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH
WEDŁUG EUROKODU 3

CZĘŚĆ 4 – POŁĄCZENIA ŚRUBOWE

WYKŁADY



WROCŁAW 2012

ANTONI BIEGUS

PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH WEDŁUG EUROKODU 3
CZĘŚĆ 4 – POŁĄCZENIA ŚRUBOWE

SPIS TREŚCI

1. Charakterystyka ogólna połączeń śrubowych	4
2. Asortyment śrub, nakrętek i podkładek oraz ich właściwości	7
3. Klasyfikacja połączeń śrubowych	11
4. Otwory na śruby i zasady rozmieszczania śrub w połączeniach	14
5. Obliczeniowa nośność śrub	18
5.1. Wprowadzenie	18
5.2. Obliczeniowa nośność śruby na rozciąganie	20
5.3. Obliczeniowa nośność śruby na ścinanie	21
5.4. Obliczeniowa nośność śruby na docisk	22
5.5. Obliczeniowa nośność śruby na przeciąganie	26
5.6. Interakcyjna obliczeniowa nośność śruby jednocześnie rozciąganej i ścinanej	26
5.7. Obliczeniowa nośność śruby sprężanych	27
6. Kategorie połączeń śrubowych	32
7. Obliczanie śrubowych połączeń zakładkowych	34
7.1. Nośność grupy łączników	34
7.2. Nośność połączeń z jednym szeregiem śrub	34
7.3. Nośność połączeń z przekładkami	35
7.4. Nośność połączeń długich	36
7.5. Nośność z warunku rozerwania blokowego	37
7.6. Nośność kątowników połączonych jednym ramieniem i innych niesymetrycznie łączonych elementów	38
7.7. Nośność połączeń zakładkowych obciążonych momentem zginającym	40
8. Projektowanie śrubowych połączeń doczołowych	42
8.1. Wprowadzenie	42
8.2. Nośność śrubowych rozciąganych, niesprężonych połączeń doczołowych	44
8.3. Nośność śrubowych rozciąganych sprężonych połączeń doczołowych	48
8.4. Nośność śrubowych zginanych niesprężonych połączeń doczołowych	50
9. Wybrane zagadnienia projektowania i realizacji połączeń śrubowych	52
Załącznik 1	59
Literatura	65

PODZIĘKOWANIE

*Autor serdecznie dziękuje Panu dr. inż. Dariuszowi Czepiżakowi za trud korekty
pracy i wniesione uwagi redakcyjne oraz merytoryczne*

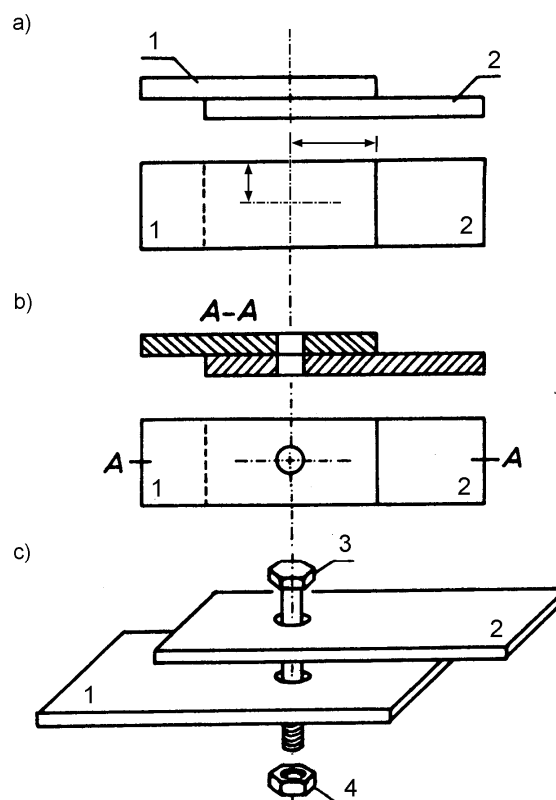
Połączenia śrubowe

1. Charakterystyka ogólna połączeń śrubowych

Połączenia śrubowe stanowią jeden z podstawowych sposobów zespalania elementów składowych stalowych konstrukcji budowlanych i należą do najstarszych sposobów łączenia wyrobów z żelaza i stali. Przenoszą one siły osiowe i tnące oraz momenty zginające w styku ograniczając (w różnym stopniu) wzajemne przemieszczenia łączonych części konstrukcji. Uzyskuje się je po przeprowadzeniu następujących operacji technologicznych:

- trasowanie otworów (rys. 1a) tj. wyznaczenie punktów usytuowania śrub na powierzchni elementów łączonych,
- wiercenie otworów (rys. 1b),
- umieszczanie w otworach łączonych elementów śrub (3) oraz dokręcenie ich nakrętek (4), z jednoczesną kontrolą ich naciągu tj. dokręcenia lub sprężenia (rys. 4.1c).

W zależności od prześwitu między trzpieniem śruby i otworem, a także od stopnia dokręcenia (sprężenia) śruby (czego konsekwencją jest wzajemne sprężenie stykających się łączonych elementów), uzyskuje się połączenie o małej lub dużej zdolności do przemieszczeń.



Rys. 1. Wykonanie połączenia śrubowego: 1, 2 – łączone elementy, 3 – śruba, 4 – nakrętka

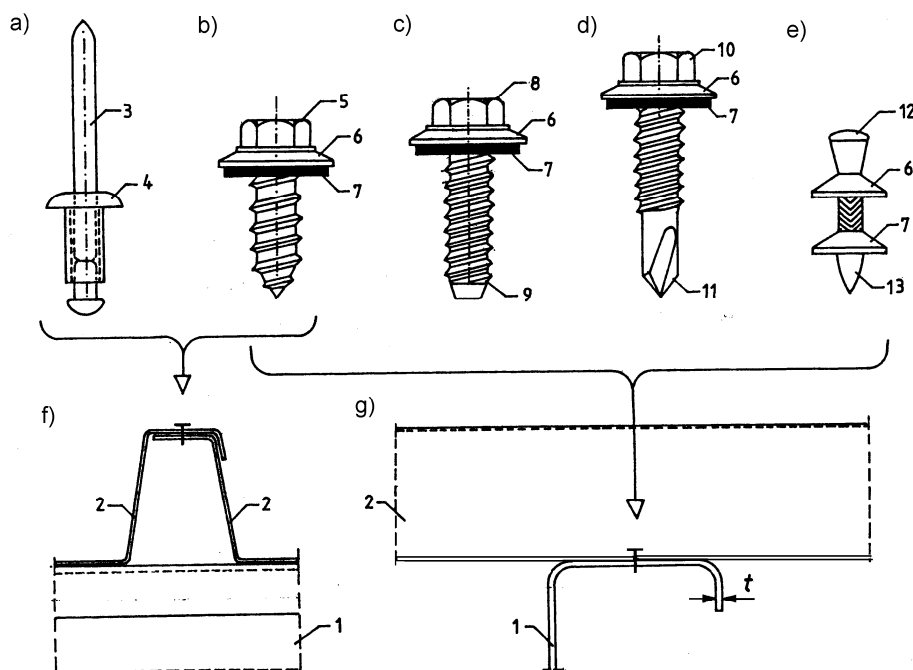
Wieloletnie doświadczenia w eksploatacji tych połączeń wykazały, że stosowanie śrub w stalowych konstrukcjach budowlanych jest korzystne zarówno z uwagi na pewność styków śrubowych jak i ze względu na łatwość ich wykonania. Połączenia śrubowe są stosowane przede wszystkim do wykonywania styków elementów lub ich części podczas montażu na budowie. Montaż konstrukcji stalowych, w których zaprojektowano styki śrubowe jest prosty, nie wymaga stosowania kosztownych urządzeń i może być realizowany przez pracowników o stosunkowo niewysokich kwalifikacjach. Powszechne stosowanie śrubowych połączeń montażowych wynika z łatwości i szybkości zakładania śrub w trudnych sytuacjach (np. na dużej wysokości), mała pracochłonność tych czynności, a także niezależnienie 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 fundamentem. Na podkreślenie zasługują aspekty technologiczno-montażowe omawianego typu połączeń, w odniesieniu do uzyskiwanych dokładności rozmieszczenia otworów w styku i wymiarów elementów. Trasowanie i wykonanie otworów w wytwórniach konstrukcji stalowych jest czynnością prostą i łatwa jest kontrola jakości i dokładności wykonania styków montażowych. W odniesieniu do złożonych konstrukcji wykonuje się w wytwórni próbnym montaż (scalanie kontrolne) konstrukcji stalowych. Sprawia to, iż podczas scalania konstrukcji w warunkach budowy nie występują komplikacje montażowe.

Ostatnio stosuje się na szerszą skalę tzw. śruby sprężające, które są wykonane ze stali o wysokich wytrzymałościach. Śruby te dokręca się (spręża) za pomocą specjalnego klucza (dynamometrycznego), który umożliwia kontrole wstępnego naciągu łączników. Zadaniem sprężenia śrub jest silne dociśnięcie do siebie łączonych elementów, wskutek czego siły, np. w połączeniu zakładkowym są przenoszone przez tarcie stykających się powierzchni tych elementów. Do niewątpliwych zalet tego typu połączeń należy zaliczyć: większą sztywność i odporność zmęczeniową złączy w stosunku do nitów i śrub niesprężanych, brak tendencji do relaksacji i pełzania (nośność nie zmienia się z upływem czasu) oraz brak poślizgów w złączy. Stosowanie śrub wykonanych ze stali o wysokich wytrzymałościach w połączeniach niesprężanych zmniejsza ilość łączników w styku, czego konsekwencją jest mniejsza pracochłonność wykonawstwa warsztatowego i montażowego.

Pewne podobieństwo do połączeń śrubowych, polegające na osadzeniu podczas montażu w uprzednio przygotowanych otworach trzpieni walcowych wykazują połączenia nitowane i sworzniowe. Połączenia nitowe, ze względu na trudniejsze wykonawstwo i gorsze cechy wytrzymałościowe zostały praktycznie wyparte przez połączenia śrubowe. Połączenia sworzniowe stosuje się w przypadkach przegubowych połączeń elementów, gdy należy możliwie precyzyjnie odwzorować przyjęty schemat statyczny ustroju nośnego.

Połączenia cienkich elementów o grubościach $t < 3$ mm (np. blach fałdowych) odbywa się na budowie i wówczas używa się nitów jednostronnych (rys. 2a), blachowkrętów (rys. 2b) wkrętów samogwintujących (rys. 2d), śrub samowiercących (rys. 2d), wstrzeliwanych gwoździ (nazywanych kołkami – rys. 2e) lub rzadziej śrub o małych średnicach. Informacje na temat projektowania połączeń blach cienkich są przedstawione w PN-EN 1993-1-3. Nośności takich łączników są określane przez ich producentów.

W opracowaniu podano informacje dotyczące obliczania śrubowych połączeń elementów o grubościach ścianek nie mniejszych niż 3 mm.



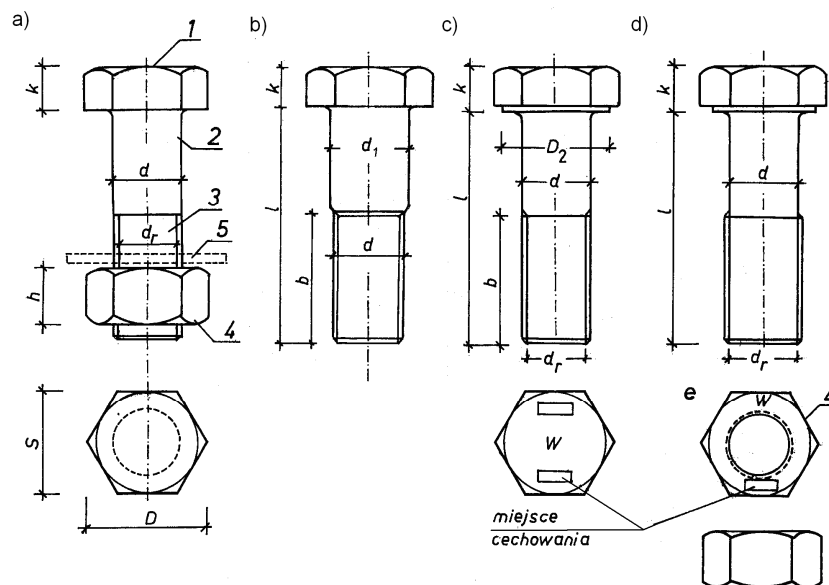
Rys. 2. Łączniki (a-e) stosowane w połączeniach blach fałdowych: 1 – płatew lub rygiel, 2 – blacha fałdowa, 3 – rdzeń nitu jednostronnego, 4 – tulejka, 5 – blachowkręt, 6 – podkładka stalowa lub aluminiowa, 7 – podkładka uszczelniająca, 8 – wkręt samogwintujący, 9 – końcówka gwintująca, 10 – wkręt samowiercący, 11 – końcówka wiercząca, 12 – gwoździec wstrzeliwany, 13 – grot gwoździa

2. Asortyment śrub, nakrętek i podkładek oraz ich właściwości

Na rys. 3 przedstawiono śrubę z łbem sześciokątnym – (1), trzpieniem walcowym gładkim o średnicy d – (2), nagwintowanym – (3) na części jego długości lub na całej jego długości. Rdzeniem śruby jest jej część nagwintowana, która pozostaje po odliczeniu nacięć gwintu. Łeb śruby jest graniastostłupem o podstawie sześcioboku i o wysokości k . Znormalizowane typy śrub o gwincie metrycznym oznacza się symbolem M i liczbą odpowiadająca średnicy d gwintu śruby (w mm). W konstrukcjach stalowych stosuje się następujący typoszereg średnic śrub: 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 42, 48, 56, 64.

Nakrętka o wysokości h jest również graniastostłupem sześciokątnym mającym walcowe wydrążenie – nagwintowane i dostosowane do średnicy trzpienia.

W połączeniach śrubowych należy stosować między łączonym elementem a nakrętką – 4, podkładkę – 5 (rys. 4a). W połączeniach obciążonych dynamicznie należy stosować podkładki sprężyste (rys. 4c), które zapobiegają odkręcaniu się nakrętek.



Rys. 3. Śruby z łbem sześciokątnym; 1 – łeb, 2 – trzpień, 3 – rdzeń, 4 – nakrętka, 5 – podkładka

W budownictwie używa się śrub o gwincie trójkątnym (naciętym mechanicznie lub wytłoczonym), przystosowanych do średnic metrycznych. Śruby są produkowane w trzech klasach dokładności wykonania, które oznaczono symbolami: A – dokładne, B – średniodokładne, C – zgrubne. Różnią się one sposobem obróbki i dokładnością wykonania powierzchni (chropowatości) ich trzpieni.

Śruby zgrubne (klasy C) są obrobione jedynie na odcinku gwintowanym i dlatego też muszą one mieć odpowiedni luz w otworze łączonych elementów. Luz ten zależy od średnicy śruby (wynosi od 1,0 do 3,0 mm) i ma decydujący wpływ na nośność oraz odkształcenia połączeń. Śruby o takiej klasie wykonania są stosowane w połączeniach tymczasowych, w stykach montażowych słabo wyteżonych obciążonych statycznie i w połączeniach elementów o drugorzędym znaczeniu konstrukcyjnym.

Śruby o średnio dokładnej klasie wykonania (klasy B) mają trzpienie dodatkowo toczone. Śruby o takiej jakości wykonania są podstawowymi łącznikami stosowanymi w nośnych konstrukcjach budowlanych. Śruby klasy B stosuje się w połączeniach zakładkowych i doczołowych, niesprężanych i sprężanych.

Śruby wykonane ze stali o wysokiej wytrzymałości, z łbem sześciokątnym powiększonym (rys. 3c) lub z łbem zwykłym, są produkowane tylko w klasie B. Śruby te przeznaczone do stosowania przede wszystkim do połączeń sprężanych. Są one w zestawach śrubowych w systemie HV (klasy 10.9) lub HR (8.8 i 10.9). Ze względu na przenoszenie znacznych sił rozciągających nakrętki śrub sprężających mogą mieć wymiary zwiększone w stosunku do śrub zwykłych (rys. 3c i d).

Śruby o dokładnej jakości wykonania (klasy A) i kształtach pokazanych na rys. 3b (z gwintem krótkim lub długim) są wykonywane z pogrubionym trzpieniem. Śruby o takiej klasie stosuje się w połączeniach pasowanych, z luzem między trzpieniem a ścianką otworu od 0,2 do 0,3 mm. Otwory w łączonych elementach do śrub pasowanych wykonuje się dwuetapowo. Wstępnie są one wiercone o średnicy mniejszej od nominalnej średnicy trzpienia. Po próbnym scaleniu łączonych elementów wykonuje się rozwiercanie otworów do średnicy nominalnej. Połączenia ze śrubami pasowanymi są pracochłonne i kosztowne, dlatego projektuje się je w przypadkach, gdy jest konieczne ograniczenie przemieszczeń w styku.

Śruby i nakrętki podzielono na klasy nie tylko w zależności od jakości wykonania, ale też od właściwości mechanicznych stali, z których są wykonane. Klasy wytrzymałościowe śrub oznacza się symbolem składającym się z dwóch liczb przedzielonych kropką. Pierwsza liczba oznacza setną część wytrzymałości na rozciąganie stali gotowych śrub f_{ub} (w MPa). Druga liczba dziesiętna wyraża stosunek granicy plastyczności stali f_{yb} do jej wytrzymałości f_{ub} . Symbol 10.9 oznacza na przykład śrubę o wytrzymałości stali na rozciąganie $f_u = 1000$ MPa i stosunku $f_{yb} / f_{ub} = 0,9$ (rys. 4).

W połączeniach niesprężanych przewidziane są śruby klas: 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8 i 10.9. Śruby klas 8.8 oraz 10.9 stosuje się w połączeniach sprężanych.



Rys. 4. Przykład symbolu znakowania śruby

W tabelicy 1 podano właściwie dobrane pod względem cech wytrzymałościowych zestawy śrub, nakrętek i podkładek w połączeniach niesprężanych i sprężanych.

Wybrane cechy wytrzymałościowe odpowiadające poszczególnym klasom własności śrub i nakrętek podano w tabl. 2 i 3.

Tablica 1. Zestawy śrubowe zalecane do połączeń śrubowych

Rodzaj połączenia	Śruby		Nakrętki		Podkładki	
	klasa	norma	klasa ^{6/}	norma	twardość HV ^{6/}	norma
Niesprężanie	4.6	PN-EN ISO 4016 ^{1/}	4	PN-EN ISO 4034 PN-EN ISO 7719	100	PN-EN ISO 7091 PN-79/M-82009 ^{3/, 6/} PN-79/M-82018 ^{3/, 5/}
	4.8	PN-EN ISO 4018 ^{1/}	5 ^{2/}			
	5.6	PN-EN ISO 4014 PN-EN ISO 4017 ^{1/}	5			
	5.8		PN-EN ISO 4032 PN-EN ISO 7719	200 ^{4/}	PN-EN ISO 7089 PN-EN ISO 7090	
	6.8					6
	8.8					8, 10 ^{2/}
	10.9	10				
	50	50				
70	70					
sprężone	8.8	PN-EN 14399-3	8	PN-EN 14399-3	300 do 370	PN-EN 14399-3 PN-EN 14399-6 PN-EN 14399-9
	10.9	PN-EN 14399-3	10	PN-EN 14399-3 PN-EN 14399-49		
		PN-EN 14399-4				
		PN-EN 14399-7				
PN-EN 14399-8						

^{1/} - z gwintem na całej długości,

^{2/} - dla śrub $d > 16$ mm klasy 4,

^{3/} - podkładki klinowe,

^{4/} - twardość zalecana,

^{5/} - zalecane do śrub z powłoką metaliczną,

^{6/} - wartości minimalne.

W połączeniach śrubowych (rys. 3) stosowane są nakrętki sześciokątne (4), o klasach jakości wykonania i wytrzymałości, adekwatnych do użytych klas śrub. Klasy nakrętek przyporządkowane klasom śrub podano w tabl. 1. Śrubom o jakości wykonania C oraz B odpowiadają nakrętki o jakości wykonania również C i B.

Tablica 2. Właściwości mechaniczne śrub ze stali węglowej stopowej według PN-EN ISO 898-1

Klasa własności	3.6 ^{4/}	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 d ≤ 16	8.8 d > 16	9.8 ^{4/}	10.9	12.9 ^{4/}
Wytrzymałość na rozciąganie min MPa	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
Granica plastyczności min ^{1/} MPa	190	240	340	300	420	480	640	640	720	940	1100
Udarność KU ^{3/} min J				25			30	30	25	20	15
Twardość HV min	95	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385
Twardość HV max	220 ^{2/}					250	320	335	360	380	435
Wydłużenie po rozrywaniu min %	25	22		20			12	12	10	9	8

^{1/} dla śrub klas od 3.6 do 6.8 wartość dolna R_{el} , dla śrub klas od 8.8 do 12.9 umowna $R_{0,2}$,

^{2/} twardość mierzona na końcu śruby max 250 HV, dla śrub klas 10.9 max 390 HV,

^{3/} według norm PN-EN 15048, PN-EN 14399-3 i PN-EN 14399-4 w połączeniach konstrukcji stalowych wymagana jest udarność KV 27 J śrub klas 4.6, 5.6, 8.8, 10.9, 50, 70, 80 w temperaturze -20°C , a śrub klas 4.8, 5.8 i 6.8 w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$,

^{4/} śruby klas 3.6, 9.8 i 12.9 nie są przewidziane w normie PN-EN 1090-2 do stosowania w połączeniach konstrukcji stalowych.

Tablica 3. Właściwości mechaniczne nakrętek ze stali węglowej stopowej wg PN-EN ISO 898-1

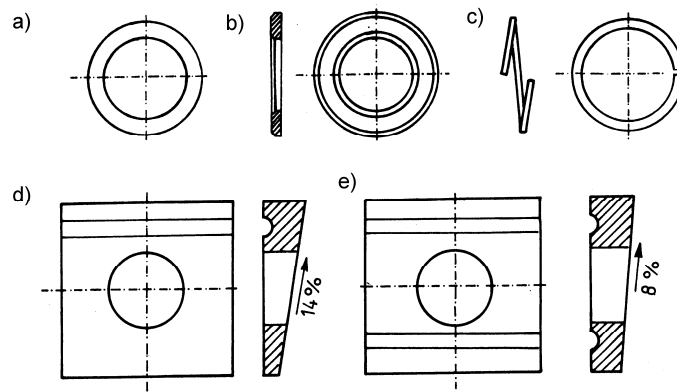
Klasa własności	4	5		6		8		9 ^{1/}	10	12 ^{1/}
Średnica	d > 16	d > 16	d ≤ 16	d > 16	d ≤ 16	d ≤ 16	d ≤	d > 16	d > 16	d > 16
Naprężenia pod obciążeniem próbnym MPa	510	610	630	700	720	880	920	920 950 ^{2/}	1060 1050 ^{2/}	1200 1190 ^{2/}
Twardość HV min	117	130	146	150	170	200	233	188	272	272
Twardość HV min	302	302	302	302	302	303	353	302	353	353

^{1/} nakrętki podwyższone odmiany 2,

^{2/} śruby o średnicy $d \leq 16$.

W połączeniach pasowanych ze śrubami klasy A stosuje się nakrętki o jakości wykonania B. Charakterystykę wytrzymałościową nakrętki można odczytać z jej klasy wytrzymałościowej, oznaczoną symbolem cyfrowym (4, 5, 8, 10), który stanowi 0,01 wytrzymałości na rozciągania stali nakrętek (w MPa).

W połączeniach śrubowych między łączonym elementem a nakrętką stosuje się podkładki okrągłe (rys. 5a) w klasie dokładności wykonania A lub C. W połączeniach sprężanych, w celu należytego przekazania nacisku na elementy łączone, pod łby śrub oraz ich nakrętki stosuje się podkładki dokładne, pokazane na rys. 5b. Są one wykonane ze stali ulepszonej cieplnie i mają twardość Vickersa HV w przedziale $300 \div 370 \text{ N/mm}^2$. Cechą charakterystyczną tych podkładek jest jednostronne sfazowanie po obwodzie zewnętrznym i wewnętrznym pod kątem 45° . W połączeniach konstrukcji poddanych działaniu obciążeń zmiennych nakrętki śrub zabezpiecza się przed okręcaniem stosując podkładki sprężyste (rys. 5e). Dwuteowniki normalne i ceowniki mają półki o zmiennej grubości. W połączeniach ich półek należy stosować czworokątne podkładki klinowe, o kształtach pokazanych na rys. 5d i e.



Rys. 5. Podkładki pod śruby

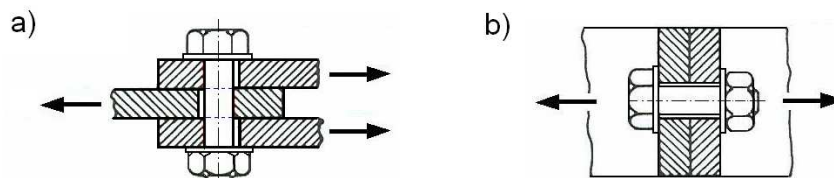
W połączeniach, które mają spełniać rolę konstrukcyjną (z wyjątkiem np. śrub montażowych pełniących rolę stabilizującą przed wykonaniem konstrukcyjnych połączeń spawanych) należy stosować co najmniej dwie śruby, nie mniejsze niż M16 (w połączeniach konstrukcji z kształtownikami giętymi na zimno nie mniejsze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

3. Klasyfikacja połączeń śrubowych

Z uwagi na sposób wzajemnego usytuowania łączonych elementów oraz wyężenia łączników połączenia śrubowe dzieli się na:

- zakładkowe (nakładkowe), w których kierunek głównej składowej obciążenia złącza jest prostopadły do osi łączników (rys. 6a oraz 7a, 7b),
- doczołowe, w których kierunek głównej składowej obciążenia złącza jest równoległy do osi łączników (rys. 6b oraz 7c, 7d).

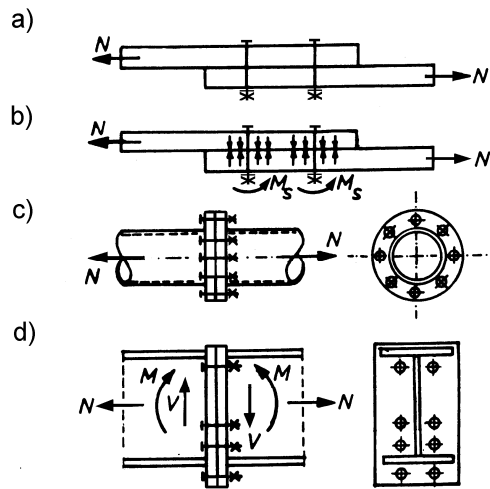
Na rys. 7d pokazano połączenie doczołowe ścinane i rozciągane, w których trzpienie śrub są wyężone prostopadle i równoległe do osi łączników.



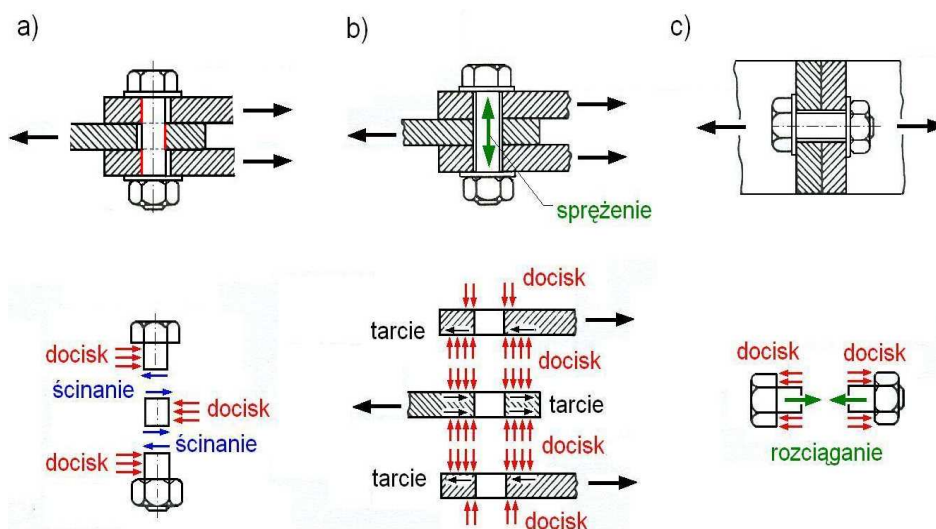
Rys. 6. Połączenie zakładkowe (a) i doczołowe (b)

Złącza zakładkowe i doczołowe mogą być niesprężone (rys. 6a, 7a,) lub sprężane (7b). Sprężenie połączeń uzyskuje się wprowadzając wstępny naciąg trzpieni śrub, w wyniku kon-

trolowanego dokręcenia ich nakrętek. Połączenia, w których śruby nie są wstępnie napięte uważa się za niesprężone (zwykłe).



Rys. 7. Przykłady połączeń śrubowych zakładkowych (a, b) i doczołowego (c, d) oraz schematy ich obciążeń (opis w tekście)



Rys. 8. Wytyżenie połączeń zakładkowych i doczołowych, sprężanych i niesprężanych

W śrubowych połączeniach otwory do osadzania łączników są wykonane o odpowiednio większej średnicy (uwzględniającej odchyłki wykonawcze) od średnicy śruby. W przypadku niesprężonych połączeń zakładkowych, luzy między trzpieniami śrub a otworami w elementach łączonych są zasadniczą przyczyną występowania przemieszczeń takich styków. Mniejszymi przemieszczeniami złączy charakteryzują się połączenia pasowane, które wymagają

jednak rozwiercania otworów na montażu do średnicy trzpienia śrub pasowanych. W celu ograniczenia przemieszczeń stosuje się sprężanie połączeń śrubowych (rys. 87b). W zakładkowych połączeniach niesprężanych obciążenie w styku przekazywane jest przez trzpienie śrub (które są ścinane i dociskane do ścianek otworów) i łączone elementy przemieszczają się względem siebie (rys. 8a). W zakładkowych złączach sprężanych, w wyniku dociśnięcia łączonych elementów przez kontrolowane dokręcenie nakrętek śrub, obciążenie przenoszone jest przez siły tarcia między łączonymi elementami. Wówczas nie występuje przemieszczanie łączonych elementów względem siebie (rys. 8b). W takich połączeniach kontrolowane dokręcenie nakrętek sprawia, iż trzpienie śrub są rozciągane.

Połączenia doczołowe są wyposażone w blachy czołowe. Stosuje się je między innymi w stykach i w węzłach ram pełnościennych, gdzie przenoszą momenty zginające i rozciągające siły podłużne (rys. 7d). Kierunek głównej składowej obciążenia jest wtedy równoległy do osi łączników. Połączenia doczołowe niesprężone przenoszą siły wewnętrzne w styku przez rozciąganie śrub. Sprężenie (kontrolowane dokręcenie nakrętek śrub) tych połączeń umożliwia przekazywanie się obciążeń rozciągających dzięki zmniejszeniu się naprężeń dociskowych (ściskających) w styku między blachami czołowymi (rys. 8c). Połączenie doczołowe charakteryzuje mała odkształcalność oraz znaczna wytrzymałość.

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

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 uwarunkowań konstrukcyjnych umożliwiających wkładanie śrub i kontrolę ich dokręcenia. Ważnym zagadnieniem w doborze typu połączenia jest analiza podatności i nośności styku śrubowego, w aspekcie modelu przyjętego w analizie statycznej ustroju (połączenie przegubowe, sztywne, podatne). Stosowanie połączeń podatnych (odkształcalnych, „semi-rigid”) prowadzi do zmniejszenia kosztów wykonania elementów w wytwórni i skrócenia czasu czynności montażowych. Jednak takie połączenia znacznie komplikują analizę statyczną ustroju (gdyż konstrukcje te nie spełniają założeń klasycznej statyki budowli) jak i wytrzymałości i stateczności, ponieważ odbiegają od wyidealizowanych konwencjonalnych modeli połączeń sztywnych bądź przegubowych. W takim przypadku należy posługiwać się nieliniową analizą statyczną i sprawdzaniem eksperymentalnym, a nośność połączeń obliczać według PN-EN 1993-1-8.

4. Otwory na śruby i zasady rozmieszczania śrub w połączeniach

W łączonych elementach należy wykonać otwory przejściowe, w których umieszcza się śruby. Stosuje się otwory okrągłe zwykłe i powiększone oraz owalne krótkie i długie.

Zazwyczaj stosuje się otwory okrągłe, średnio dokładne, większe od średnicy śruby d o Δ (gdzie: Δ – luz montażowy). Średnicę przejściową otworów na śruby d_0 dobiera się na podstawie średnicy trzpienia śruby i klasy jej wykonania ze wzoru

$$d_0 = d + \Delta, \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta = 1$ mm – dla śrub zwykłych M8, M10, M12, klas B i C,

$\Delta = 2$ mm – dla śrub zwykłych M16, M20, M24, klas B i C,

$\Delta = 3$ mm – dla śrub zwykłych M27, M30, M36, M42, klas B i C.

W połączeniach pasowanych luz otworów przyjmuje się $\Delta \leq 0,2$ mm, gdy $d \leq 22$ mm, $\Delta \leq 0,3$ mm, gdy $d > 22$ mm. W celu umożliwienia „gubienia” odchyłek geometrycznych łączonych elementów w połączeniach montażowych, stosuje się niekiedy otwory powiększone, o średnicy

$$d_0 = d + 2\Delta. \quad (2)$$

W połączeniach, w których należy zapewnić wzajemną przesuwność elementów stosuje się otwory owalne (patrz rys. w tabl. 4). Mogą one być o dwóch kształtach – owalne krótkie o wymiarach $(d + \Delta) \times (d + 4\Delta)$ lub owalne długie o wymiarach $(d + \Delta) \times 2,5(d + \Delta)$. Jeśli stosuje się otwory powiększone lub owalne to obowiązkowo należy założyć podkładkę pod nakrętkę i pod łeb śruby.

Zalecane średnice i długości otworów do śrub niepasowanych według PN-EN 1090-2 podano w tabl. 4.

Wymiary otworów przejściowych na śruby wpływają bezpośrednio na wielkość wzajemnych przemieszczeń łączonych elementów. Najczęściej w połączeniach zwykłych, ciernych oraz doczołowych stosuje się otwory okrągłe "zwykłe" o średnicach d_0 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.

Tablica 4. Zalecane średnice i długości otworów do śrub niepasowanych według PN-EN 1090-2

Średnica nominalna łącznika	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27 i powyżej
Otwory okrągłe, zwykłe	$d + 1^{1/, 2/}$		$d + 2$				$d + 3$	
Otwory okrągłe, powiększone	$d + 3$		$d + 4$				$d + 6$	$d + 8$
Otwory owalne, krótkie ^{3/}	$d + 4$		$d + 6$				$d + 8$	$d + 10$
Otwory owalne, długie ^{3/}	$d + 1,5 d$							

^{1/} prześwit można zwiększyć o grubość powłok na trzpieniu łącznika,

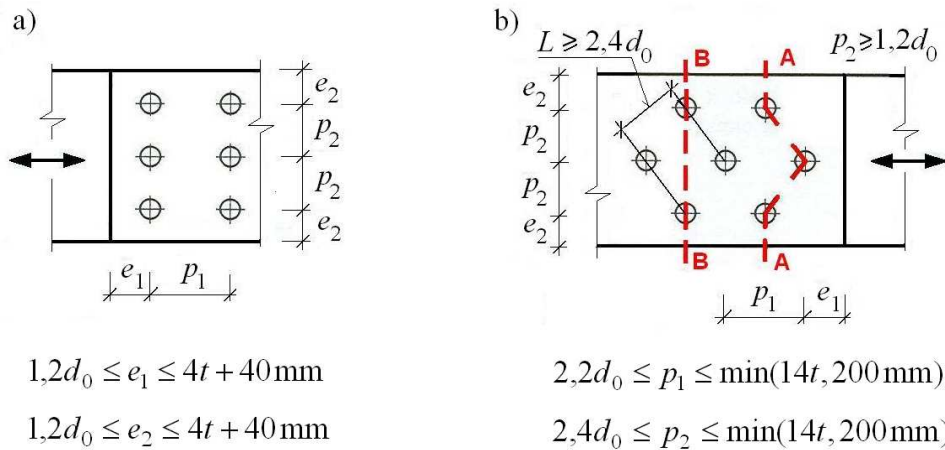
^{2/} dla śrub M12 i M14 mogą być stosowane otwory o średnicy $d + 2$ mm, w warunkach podanych w PN-EN 1090-2,

^{3/} podaną długość otworu i szerokość przyjmuje się jak dla otworów okrągłych zwykłych.

Łączniki w połączeniu należy rozmieszczać symetrycznie w stosunku do przekazywanej siły lub środka ciężkości łączonych elementów w taki sposób, aby siły wewnętrzne w poszczególnych częściach przekroju były nie większe od nośności umieszczanych na nich śrub. Rozstaw i odległości łączników od brzegów mają decydujący wpływ na nośność i zdolność przemieszczeń połączenia. Ograniczenia wielkości rozstawów śrub wynikają z potrzeby zachowanie szczelności styków i ich odporności na korozję.

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 łączzonego elementu, utraty stateczności przez części łączone, a także odpowiedniej szczelności ze względów antykorozyjnych. Odległości śrub w połączeniach zakładkowych, od krawędzi łączonych elementów zostały przyjęte w PN-EN 1993-1-8 jako minimalne, zależne od średnicy otworu na śruby i jako maksymalne, zależne od grubości łączonych elementów. Graniczne odległości rozmieszczenia śrub przedstawiono na rys. 9 oraz w tabl. 5.

Odległości minimalne rozstawu łączników wynikają z warunków wytrzymałościowych na docisk, rozerwanie i ścięcie blach łączonych elementów. Rozmieszczając śruby w połączeniu należy zachowywać odstępy zbliżone do minimalnych. W przypadku dużych rozstawów śrub powierzchnie łączone nie przylegają do siebie, co sprzyja wnikaniu wilgoci i korozji powierzchni przylgowych w złączu. Ograniczenie maksymalnych odległości rozstawów śrub w połączeniach związane jest również z możliwością utraty stateczności przez ściskane części łączone (stąd uzależnienie od grubości części łączonych).



Rys. 9. Rozstaw śrub w połączeniu zakładkowym według PN-EN 1993-1-8 w układzie:
a) prostokątnym, b) przestawionym

Tablica 5. Najmniejsze i największe rozstawy i odległości czołowe i boczne śrub
w połączeniach według PN-EN 1993-1-8

Odległość i rozstawy patrz rys. 9	Minimum	Maksimum ^{1/3/}		
		Konstrukcje wykonane ze stali wg PN-EN 10025 z wyjątkiem stali trudnordzewiejącej PN-EN 10025-5		Konstrukcje wykonane ze stali trudnordzewiejącej
		Stal narażona na wpływy atmosferyczne lub korozyjne	Stal nie narażona na wpływy atmosferyczne lub korozyjne	Stal stosowana bez zabezpieczeń
Odległość czołowa e_1	$1,2d_0$	$4t \div 40 \text{ mm}$	$(3d_0)$	wartość większa: $8t$ lub 125 mm
Odległość boczna e_2	$1,2d_0$	$4t \div 40 \text{ mm}$	$(1,5d_0)$	wartość większa: $8t$ lub 125 mm
Odległość e_3, e_4 otworów owalnych	$1,5d_0$			
Rozstaw p_1	$2,2d_0$	wartość mniejsza: $14t$ lub 200 mm	$(3,75d_0)^{2/}$	wartość mniejsza: $14t_{\min}$ lub 175 mm
Rozstaw $p_2^{4/}$	$2,4d_0$	wartość mniejsza: $14t$ lub 200 mm	$(3d_0)^{2/}$	wartość mniejsza: $14t_{\min}$ lub 175 mm

^{1/} największe wartości rozstawów oraz odległości czołowych i bocznych podano w nawiasach dla największej nośności na docisk. Wartości te nie są ograniczane, z wyjątkiem następujących przypadków:

- w elementach ściskanych, aby nie dopuścić do wybrzuszenia i zapobiec korozji elementów eksponowanych,
- w eksponowanych elementach rozciąganych, aby zapobiec korozji,

^{2/} lub wartość mniejsza $14t$ lub 200 mm ,

^{3/} t grubość cieńszej zewnętrznej części łączonej,

^{4/} przy przedstawionych szeregach łączników może być stosowany najmniejszy rozstaw szeregów $p_2 = 1,2 d_0$ pod warunkiem, że najmniejsza odległość L między dwoma łącznikami wynosi co najmniej $2,3d_0$, (patrz rys. 9b).

Śruby w połączeniach należy w miarę możliwości rozmieszczać symetrycznie w stosunku do osi działania obciążenia (w układzie prostokątnym (rys. 9a) lub przemiennym (rys. 9b).

Projektując połączenia doczołowe należy rozmieszczać śruby odpowiednio do wielkości i rozkładu sił wewnętrznych w styku. W połączeniach doczołowych prętów rozciąganych nale-

zy śruby rozmieszczać symetrycznie w stosunku do środka ciężkości przekroju łączonych elementów. W przypadku doczołowych połączeń zginanych śruby rozmieszcza się wokół pasa rozciąganego. Z uwagi na dążenie do ograniczenia odkształceń blach czołowych śruby w stykach doczołowych umieszcza się możliwie blisko usztywnionych krawędzi. Odległość c osi śrub od krawędzi lub wyokrąglenia pasa przy średniku zaleca się przyjmować

$$d + 2 \text{ mm} \leq c \leq 1,5d \quad (3)$$

Należy zaznaczyć, że zbyt małe odległości między śrubami w styku doczołowym mogą osłabić nośność zginanego przekroju blachy czołowej. Usztywnienie blachy czołowej żebrami wpływa na zmniejszenie odkształceń styków doczołowych. Nie należy jednak stosować uzębionych styków doczołowych w przypadku złączy obciążonych dynamicznie. Zmniejszenie podatności blachy czołowej można wówczas uzyskać przez zastosowanie grubszych blach, a także podkładek prostokątnych lub kwadratowych pod śruby.

Średnicę śruby w połączeniu zakładkowym przyjmuje się w zależności od grubości cieńszego z łączonych elementów. Zazwyczaj przyjmuje się średnicę trzpienia d śruby w przedziale

$$1,5t_{\min} \leq d \leq 2,5t_{\min}, \quad (4)$$

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

Sumaryczna grubość łączonych części w złączy 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 przypadku zakładkowych połączeń niesprężanych, gdy trzpień śruby jest ścinany i dociskany do ścianki otworu to należy przewidzieć odpowiednią liczbę podkładek w złączy w celu wyeliminowania wyteżenia gwintowanej części trzpienia w złączy. 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. Długość śrub ustala się, więc w zależności od długości "skleszczenia" łączonych elementów korzystając z norm oraz tablic do projektowania konstrukcji stalowych, gdzie podano asortyment długości produkowanych łączników.

5. Obliczeniowa nośność śrub

5.1. Wprowadzenie

Nośność obliczeniową śruby (połączenia, krytycznego przekroju złącza) według PN-EN 1993-1-8 wyznacza się ze wzoru

$$F_{i,Rd} = \frac{a_i C_i f_i}{\gamma_{Mi}}, \quad (5)$$

gdzie:

C_i – charakterystyka geometryczna elementu (np.: $C_i = A$ – pole przekroju trzpienia śruby, $C_i = A_s$ – pole przekroju rdzenia śruby, $C_i = dt$ – powierzchnia docisku śruby do ścianki elementu, itp.),

a_i – współczynnik korygujący (uwzględniający model wyężenia),

f_i – parametr wytrzymałościowy (np.: $f_y, f_{y,b}$ – granica plastyczności stali odpowiednio łączonego elementu lub śruby, f_u, f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie stali odpowiednio łączonego elementu lub śruby),

γ_{Mi} – częściowy współczynnik nośności (według tab. 6).

Tablica 6. Współczynniki częściowe dotyczące węzłów wg PN-EN 1993-1-8

Nośność elementów i przekrojów	γ_{M0}, γ_{M1} i γ_{M2} wg PN-EN1993-1-1
Nośność śrub	$\gamma_{M2} = 1,25$
Nośność nitów	
Nośność sworzni	
Nośność spoin	
Nośność blach na docisk	
Nośność na poślizg - w stanie granicznym nośności (kategoria C) - w stanie granicznym użytkowalności (kategoria B)	$\gamma_{M3} = 1,25$ $\gamma_{M3,ser} = 1,1$
Nośność na docisk śrub z iniekcją	$\gamma_{M4} = 1,0$
Nośność węzłów kratownic z kształtowników rurowych	$\gamma_{M4} = 1,0$
Nośność sworzni w stanie granicznym użytkowalności	$\gamma_{M6,ser} = 1,0$
Siła sprężająca w śrubach o wysokiej wytrzymałości	$\gamma_{M7} = 1,1$

Granice plastyczności stali f_{yb} i wytrzymałość na rozciąganie stali f_{ub} śrub różnych klas według PN-EN 1993-1-8 podano w tabl. 2 i 7.

Tablica 7. Wartości granicy plastyczności f_{yb} i wytrzymałości na rozciąganie f_{ub} stali śrub oraz nośności obliczeniowe śrub (kN) z warunku ścięcia trzpienia $F_{v,Rd}$, ścięcia rdzenia $F_{vs,Rd}$ i rozciągania $F_{t,Rd}$ wyznaczone wg PN-EN 1993-1-8

Śruba	Powierzchnia przekroju mm^2	Klasa śruby	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
		f_{yb} MPa	240	320	300	400	480	640	900
		f_{ub} MPa	400	400	500	500	600	800	1000
M12	$A = 113$	$F_{v,Rd}$	21,70	21,70	27,12	27,12	32,54	43,39	54,24
	$A_s = 84,3$	$F_{vs,Rd}$	16,18	13,49	20,23	16,86	20,23	32,37	33,72
		$F_{t,Rd}$	24,28	24,28	30,35	30,35	36,42	48,56	60,70
M16	$A = 201$	$F_{v,Rd}$	38,60	38,60	48,24	48,24	57,89	77,18	96,48
	$A_s = 157$	$F_{vs,Rd}$	30,14	25,12	37,68	31,40	31,68	60,29	62,80
		$F_{t,Rd}$	45,21	45,21	56,52	56,52	67,82	90,43	113,04
M20	$A = 314$	$F_{v,Rd}$	60,29	60,29	75,36	75,36	90,43	120,57	150,72
	$A_s = 245$	$F_{vs,Rd}$	47,04	39,20	58,80	49,00	58,80	94,08	98,00
		$F_{t,Rd}$	70,56	70,56	88,20	88,20	105,84	141,12	176,40
M22	$A = 380$	$F_{v,Rd}$	72,96	72,96	91,20	91,20	109,44	145,92	182,40
	$A_s = 303$	$F_{vs,Rd}$	58,17	48,48	72,72	60,60	72,72	116,35	121,20
		$F_{t,Rd}$	87,26	87,26	109,08	109,08	130,90	174,53	218,16
M24	$A = 452$	$F_{v,Rd}$	86,78	86,72	108,48	108,48	130,17	173,57	216,96
	$A_s = 353$	$F_{vs,Rd}$	67,78	56,48	84,72	70,60	84,72	135,55	141,20
		$F_{t,Rd}$	101,66	101,66	127,08	127,08	152,50	203,33	254,16
M27	$A = 573$	$F_{v,Rd}$	110,02	110,02	137,52	137,52	165,02	220,03	275,04
	$A_s = 459$	$F_{vs,Rd}$	88,13	73,44	110,16	91,80	110,16	176,25	183,60
		$F_{t,Rd}$	132,19	132,19	165,24	165,24	198,27	264,38	330,48
M30	$A = 707$	$F_{v,Rd}$	135,74	135,74	169,69	169,69	203,62	271,49	339,36
	$A_s = 561$	$F_{vs,Rd}$	107,72	89,76	134,64	112,2	134,64	215,42	224,40
		$F_{t,Rd}$	161,57	161,57	201,96	201,96	242,35	323,14	403,92
M36	$A = 1018$	$F_{v,Rd}$	195,46	195,46	244,32	244,32	293,18	390,91	488,64
	$A_s = 817$	$F_{vs,Rd}$	156,86	130,72	196,08	163,40	196,08	313,73	326,80
		$F_{t,Rd}$	235,18	235,30	294,12	294,12	352,94	470,59	588,24

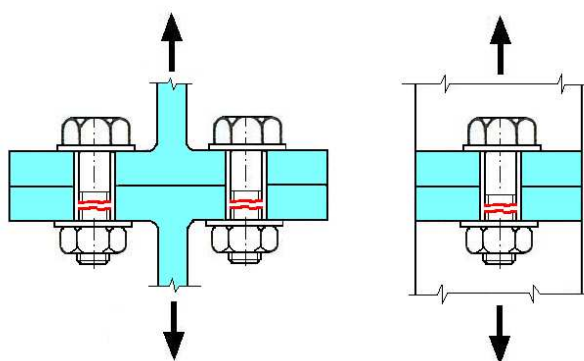
W PN-EN 1993-1-8 we wzorach dotyczących oceny wytrzymałości łączników i połączeń współczynniki nośności γ_{Mi} występują w sposób „jawny”. Podano je w tabl. 6.

W zakładkowych połączeniach niesprężonych siły wewnętrzne w styku wywołują ścinanie i docisk trzpienia śruby, co pokazano na rys. 7a. W podobnym stanie wyężenia znajdują się zakładkowe połączenia nitowane 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 tarcia między częściami składowymi połączenia, wprowadza się naciąg trzpienia śrub przez dokręcenie nakrętki. Śruba w takim złączu jest, więc rozciągana (rys. 7b), a jej nośność w połączenia jest uwarunkowana poślizgiem styku (wzajemnym przemieszczeniem łączonych elementów). W połączeniach doczołowych śruba jest rozciągana.

W ogólnym przypadku, w celu oceny nośności połączeń śrubowych niezbędne jest określenie obliczeniowej nośności śruby na: rozciąganie $F_{t,Rd}$, ścinanie $F_{v,Rd}$, docisk $F_{b,Rd}$, jednoczesne ścinanie i rozciąganie, a także z warunku poślizgu $F_{s,Rd}$. Zagadnienia te będą omówione w kolejnych punktach.

5.2. Obliczeniowa nośność śruby na rozciąganie

Wyczerpanie nośności śruby rozciąganej następuje w wyniku rozerwania rdzenia śruby, co pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Schemat wyężenia rozciąganej śruby

Obliczeniową nośność śruby z łbem sześciokątnym na rozciąganie wg PN-EN 1993-1-8 (z warunku zerwania jego rdzenia – rys. 10) określa się ze wzoru:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9f_{ub}A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (6)$$

gdzie:

f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie stali śruby,

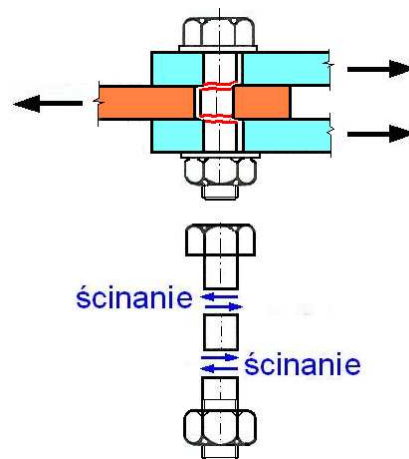
A_s – pole przekroju czynnego rdzenia śruby przy rozciąganiu (tabl. 10),

$\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności.

Nośności na rozciąganie śrub z łbem sześciokątnym M12÷M36 (różnych klas), obliczone zgodnie z PN-EN 1993-1-8, podano w tabl. 7.

5.3. Obliczeniowa nośność śruby na ścinanie

Wyczerpanie nośności śruby obciążonej siłą prostopadłą do jej osi może nastąpić w wyniku ścinania trzpienia, co pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Schemat wyłączenia ścinanej śruby

Obliczeniową nośność śruby na ścinanie wg PN-EN 1993-1-8 oblicza się ze wzoru:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_i}{\gamma_{M2}}, \quad (7)$$

w którym

- gdy ścinana jest gwintowana część śruby $A_i = A_s$ oraz
 - $\alpha_v = 0,6$ - dla klas 4.6, 5.6, i 8.8 i

– $\alpha_v = 0,5$ - dla klas 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9;

- gdy zaś płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby
 $A_i = A$ oraz $\alpha_v = 0,6$,

gdzie:

A – pole przekroju trzpienia śruby,

A_s – pole przekroju rdzenia śruby,

f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie stali śruby,

$\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności.

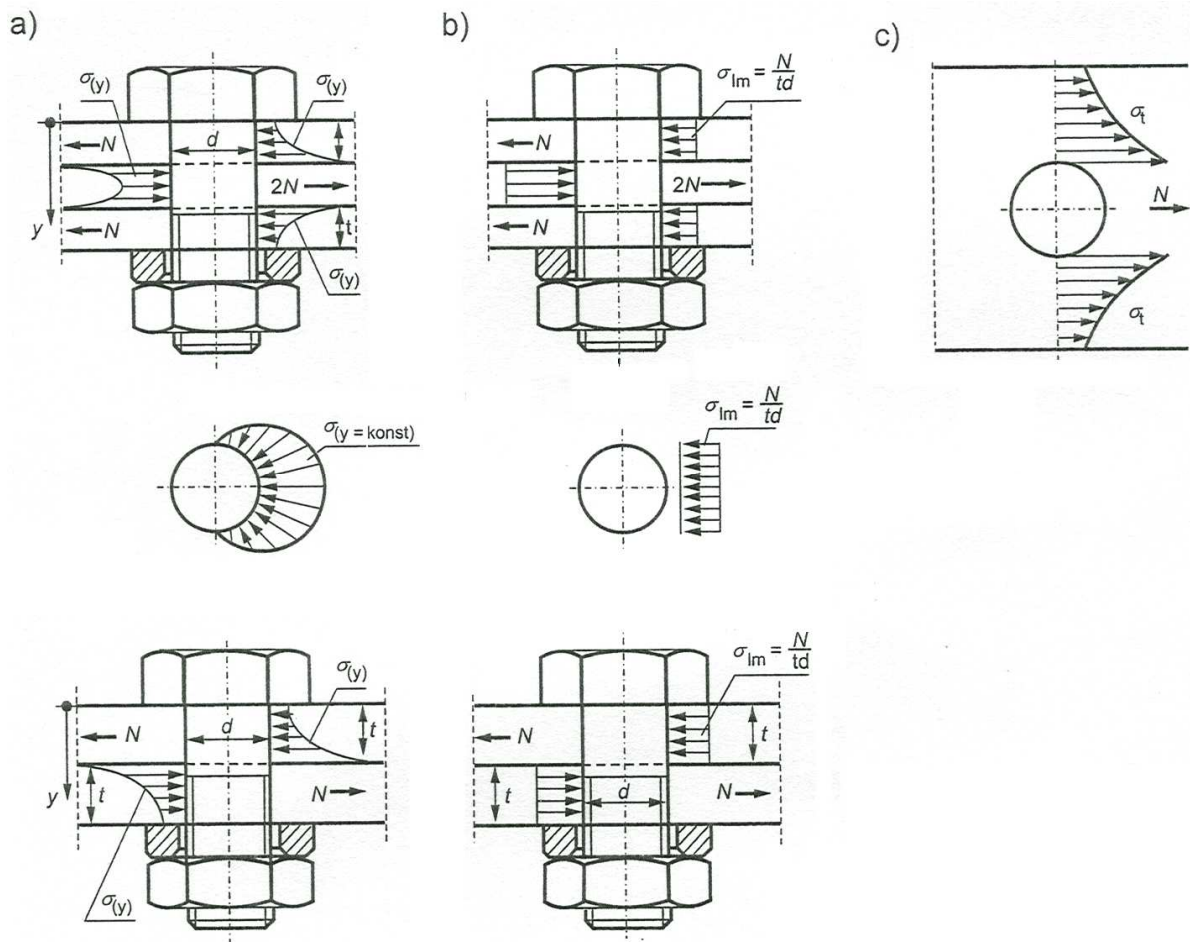
Nośności śrub M12÷M36 (różnych klas) na ścinanie obliczone według PN-EN 1993-1-8, gdy płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez część gwintowaną $F_{v,Rd}$ oraz gdy płaszczyzna ścinania przechodzi przez część gwintowaną $F_{vs,Rd}$ podano w tabl. 5.

5.4. Obliczeniowa nośność śruby na docisk

W połączeniu zakładkowym niesprężonym przekazywanie obciążeń następuje przez bezpośredni docisk trzpienia śruby do ścianki otworu (rys. 12). Wyteżenie dociskowe na ścianki otworów łączonych elementów jest nierównomierne (z powodu luzów i zginania trzpienia). Naprężenia dociskowe rozkładają się według kosinusoidy na średnicy otworu. Na grubości ścianki łączonych elementów rozkład naprężeń od docisku jest nieliniowy i zależy od rodzaju rozwiązania konstrukcyjnego. Tak więc rzeczywisty rozkład naprężeń docisku trzpienia śruby do ścianki otworu, zarówno w kierunku obwodowym jak i w kierunku grubości blach, nie jest równomierny, co pokazano na rys. 12a.

W przypadku otworów okrągłych zwykłych do obliczeń przyjmuje się jednak uproszczony, równomierny rozkład tych naprężeń (według rys. 12b), w przeliczeniu na rzut wyteżonej poboczniczy trzpienia, to jest pole powierzchni docisku.

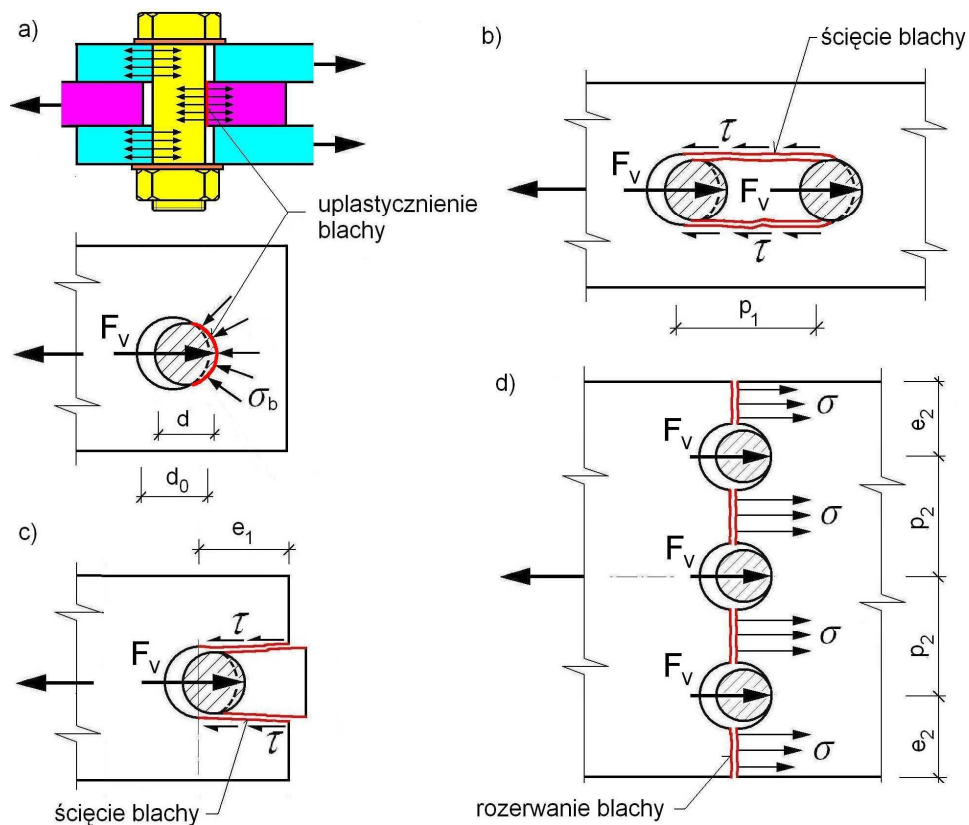
Analizując nośność śruby na docisk bada się nie tylko wyczerpanie wytrzymałości z warunku docisku trzpienia śruby do otworu (uplastycznienie blachy – rys. 13a), ale również ścięcie blachy między otworami na kierunku obciążenia (rys. 13b), ścięcie blachy między otworem i brzegiem blachy na kierunku obciążenia (rys. 13c), rozerwanie blachy w kierunku prostopadłym do osi wyteżenia (rys. 13d). Bezpośredni wpływ na postać wyczerpania nośności w wyniku ścięcia lub rozerwania blachy ma rozmieszczenie śrub w połączeniu, które przedstawiono na rys. 13.



Rys. 12. Rozkład naprężeń docisku trzpienia śruby do ścianki otworu: a) rzeczywisty, b) obliczeniowy, c) rozkład naprężeń w przekroju łączonego elementu

Nośność na docisk do ścianki otworu zależy nie tylko od pola powierzchni i wytrzymałości stali. W sposób zasadniczy zależy ona od odległości łączników e_1 i e_2 oraz odległości między łącznikami p_1 .

Na rys. 9 podano najmniejsze i największe rozstawy oraz odległości śrub w połączeniu zakładkowym według PN-EN 1993-1-8. Uzależniono je od średnicy otworów przejściowych na śruby d_0 . Minimalne odległości wynoszą $e_1 = 1,2d_0$ oraz $e_2 = 1,2d_0$. Minimalny rozstaw śrub w kierunku obciążenia wynosi $p_1 = 2,5d$, minimalny rozstaw szeregów śrub wynosi $p_2 = 2,4d_0$.



Rys. 13. Mechanizmy zniszczenia połączenia zakładkowego: a) uplastycznienie blachy w wyniku docisku trzpienia śruby do ścianki, b) ścięcie blachy między otworami na śruby na kierunku zgodnym z kierunkiem obciążenia, c) ścięcie blachy między otworem i brzegiem blachy, d) rozerwanie blachy w kierunku prostopadłym do osi wyważenia

Obliczeniową nośność śruby na docisk wg PN-EN 1993-1-8 określa się ze wzoru:

$$F_{b,Rd,i} = \frac{k_{1,i} \alpha_{b,i} f_u d t_{\Sigma}}{\gamma_{M2}}, \quad (8)$$

w którym przyjmuje się:

- dla śrub skrajnych

$$k_{1,s} = \min \left[\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right); 2,5 \right], \quad (9)$$

$$\alpha_{b,s} = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right), \quad (10)$$

- dla śrub pośrednich

$$k_{1,p} = \min \left[\left(1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \right); 2,5 \right], \quad (11)$$

$$\alpha_{b,p} = \min \left[\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right], \quad (12)$$

gdzie:

f_u – wytrzymałość na rozciąganie stali łączonego elementu,

d – średnica trzpienia śruby,

t_Σ – sumaryczna grubość ścianki podlegającej dociskowi w złączeniu o tym samym kierunku przekazywania obciążenia,

$\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności.

Z analizy wzorów (8)-(12) wynika, że obliczone według PN-EN 1993-1-8 nośności na docisk śrub skrajnych i pośrednich mogą być różne. W przypadku usytuowania śrub w minimalnych rozstawach $e_1 = e_2 = 1,2d_0$, $p_1 = 2,2d_0$, i $p_2 = 2,4d_0$, nośność obliczeniowa śrub na docisk jest najmniejsza i wynosi 26,55% - dla skrajnych i 31,85% - dla śrub pośrednich ich nośności maksymalnej. Maksymalną nośność śrub na docisk uzyskuje się, gdy ich rozstawy wynoszą $e_1 \geq 3,0d_0$, $e_2 \geq 1,5d_0$, $p_1 \geq 3,75d_0$, oraz $p_2 \geq 3,0d_0$.

Nośność śrub na docisk $F_{b,Rd}$ w otworach powiększonych wynosi 0,8 nośności śrub zwykłych. Nośność śrub na docisk $F_{b,Rd}$ w otworach owalnych, wydłużonych prostopadle do kierunku obciążenia, wynosi 0,6 nośności na docisk śrub w otworach okrągłych normalnych.

5.5. Obliczeniowa nośność śruby na przeciągnięcie

Według PN-EN 1993-1-8 należy sprawdzić nośność układu złożonego z śruby i blachy, w której może wystąpić przeciągnięcie śruby przez otwór w blasze (przebicie ze ścięciem: może wystąpić w przypadku cienkich blach).

Obliczeniową nośność śrub na przeciągnięcie oblicza się według PN-EN 1993-1-8 ze wzoru

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (13)$$

gdzie:

f_u – wytrzymałość na rozciąganie stali łączonego elementu,

t_p – grubość blachy czołowej pod łbem lub pod nakrętką śruby,

d_m – wartość średnia z dwóch wymiarów: koła wpisanego oraz opisanego na obrysie łba lub nakrętki (przyjmuje się wartość mniejszą),

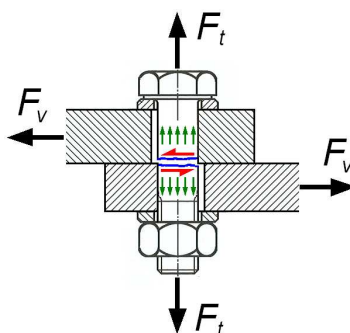
$\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności.

5.6. Interakcyjna obliczeniowa nośność śruby jednocześnie rozciąganej i ścinanej

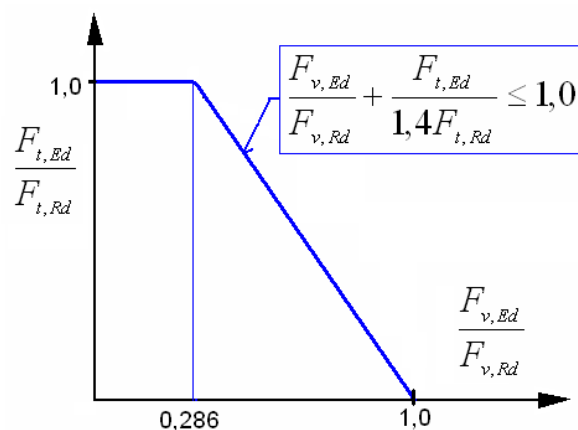
Zgodnie z PN-EN 1993-1-8 interakcyjne wyężenie śrub jednocześnie rozciąganych siłą $F_{t,Ed}$ i ścinanych siłą $F_{v,Ed}$ (rys. 14) sprawdza się ze wzoru

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0. \quad (14)$$

Zależność interakcyjna śrub rozciąganych i ścinanych (14) według PN-EN 1993-1-8 jest odcinkowo liniowa (rys. 15).



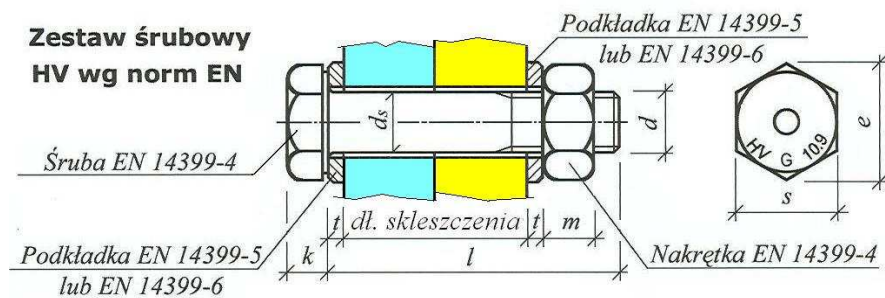
Rys. 14. Wyężenie śruby rozciąganej i ścinanej



Rys. 15. Zależność interakcyjnego wyężenie śruby rozciąganej i ścinanej

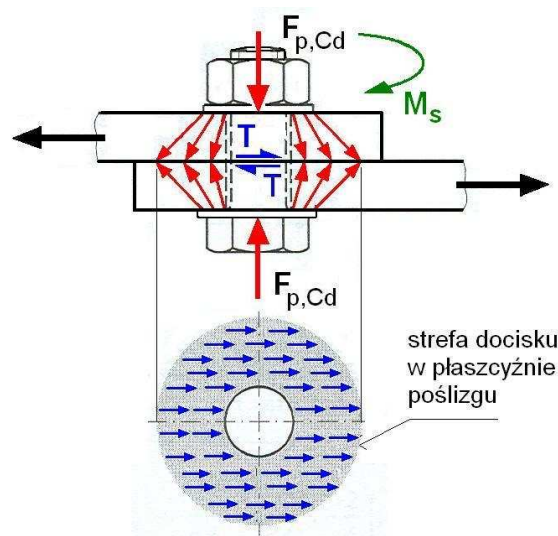
5.7. Obliczeniowa nośność śrub sprężanych

Zgodnie z PN-EN 1993-1-8 w połączeniach sprężanych należy stosować śruby wysokiej wytrzymałości według europejskich norm (tabl. 1). Dotyczą one zestawów śrubowych przeznaczonych do stosowania w konstrukcjach stalowych. Należy stosować zestawy śrub i nakrętek systemu HR, klasy 8.8 i 10.9 według PN-EN 14399-3 lub zestawy śrub i nakrętek systemu HV, klasy 10.9 według PN-EN 14399-4, a także podkładki według PN-EN 14399-5 i PN-EN 14399-6 (rys. 16). Wymagania dotyczące zapewnienia jakości, znakowania, identyfikacji i badań przydatności wyrobów śrubowych określają PN-EN 14399-1 i PN-EN 14399-2.



Rys. 16. Zestaw śrubowy HV według norm europejskich

W zakładkowych połączeniach ciernych obciążenie z jednego elementu na drugi jest przekazywane przez tarcie w płaszczyznach ich przylegania (rys. 17). Tarcie powstaje wskutek nacisku siłą sprężania, jaką wywiera sprężona śruba.



Rys. 17. Schemat wyłączenia sprężonego połączenia zakładkowego

Potrzebną siłę docisku (sprężenia) w połączeniu uzyskuje się przez odpowiednie, kontrolowane dokręcenie nakrętek śrub sprężających. Poślizg złącza jest więc powstrzymywany przez tarcie uzyskiwane dzięki naciągowi śruby sprężającej, wskutek którego w płaszczyznach styku blach, między blachami a łbem i nakrętką śrub jest wprowadzony docisk. W związku z tym śruba jest wyteżona przez osiowe rozciąganie siłą sprężającą $F_{p,Cd}$.

Obliczeniową siłę sprężania śruby według PN-EN 1993-1-8 oblicza się ze wzoru:

$$F_{p,Cd} = 0,7 \frac{f_{ub} A_s}{\gamma_{M7}}, \quad (15)$$

gdzie:

f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie stali śruby,

A_s – pole przekroju czynnego rdzenia śruby przy rozciąganiu (tabl. 7),

$\gamma_{M7} = 1,10$ – częściowy współczynnik nośności.

W zakładkowym połączeniu sprężonym unika się kontaktu śrub z ściankami otworów, gdyż występują luzy wskutek istnienia otworów o większych średnicach niż średnice trzpieni śrub, a występujące tarcie w złączu uniemożliwia przemieszczanie się łączonych elementów.

Siła tarcia zależy nie tylko od siły sprężającej $F_{p,Cd}$ (dociskające łączone blachy do siebie) ale również od współczynnika tarcia μ między łączonymi elementami. Współczynnik tarcia μ zależy do rodzaju obróbki (przygotowania) powierzchni łączonych elementów. Współczynniki tarcia μ według PN-EN 1090-2 w tabl. 8.

Tabl. 8. Współczynniki tarcia według PN-EN 1090-2

Klasa powierzchni ciernej	Najmniejszy współczynnik tarcia μ	Sposób obróbki powierzchni
A	0,50	– śrutowanie lub piaskowanie bez śladów rdzy i wżerów
		– śrutowanie lub piaskowanie i metalizowanie natryskowe aluminium
		– śrutowanie lub piaskowanie i metalizowanie natryskowe produktem cynkowym, potwierdzone badaniami.
B	0,40	– śrutowanie lub piaskowanie i malowanie farbą krzemianową alkaliczno-cynkową o grubości od 0,50 μm do 0,80 μm
C	0,30	– oczyszczenie szczotką drucianą lub opalenie bez śladów rdzy
D	0,20	– bez obróbki

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 usuwania zgorzeliny,
- przez malowanie powłokami krzemowo-cynkowymi,
- przez czyszczenie chemiczne (zmywanie rozpuszczalnikami).

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

Obliczeniową nośność graniczną śruby ze względu na poślizg według PN-EN 1993-1-8 oblicza się ze wzorów:

- w stanie granicznym nośności (połączenie kategorii C)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}, \quad (16)$$

- w stanie granicznym użyteczności (połączenie kategorii B)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3,ser}} F_{p,C}, \quad (17)$$

gdzie:

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s, \quad (18)$$

n – liczba styków ciernych,

μ – współczynnik tarcia (według PN-EN 1090-2; tabl. 8),

k_s – współczynnik kształtu otworów na śruby według tabl. 9,

$\gamma_{M3} = 1,25$ – częściowy współczynnik w stanie granicznym nośności,

$\gamma_{M3,ser} = 1,10$ – częściowy współczynnik w stanie granicznym użyteczności.

Tabl. 9. Współczynniki kształtu otworów na śruby k_s wg PN-EN 1993-1-8

Opis	k_s
Śruby w otworach normalnych	1,00
Śruby w otworach powiększonych lub owalnych krótkich wydłużonych prostopadle do kierunku obciążenia	0,85
Śruby w otworach owalnych długich wydłużonych prostopadle do kierunku obciążenia	0,70
Śruby w otworach owalnych krótkich wydłużonych równoległe do kierunku obciążenia	0,76
Śruby w otworach owalnych długich wydłużonych równoległe do kierunku obciążenia	0,63

Jeśli w połączeniu oprócz siły ścinającej $F_{v,Ed}$ lub $F_{v,Ed,ser}$, działa dodatkowo siła rozciągająca $F_{t,Ed}$ lub $F_{t,Ed,ser}$ obliczeniową nośność śruby na poślizg określa się ze wzorów:

– w stanie granicznym nośności (połączenie kategorii C)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}}, \quad (19)$$

– w stanie granicznym użyteczności (połączenie kategorii B)

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3,ser}}. \quad (20)$$

W połączeniach doczołowych, w których siła docisku w strefie ściskanej równoważy siłę rozciągającą, redukcja nośności nie jest wymagana.

Z analizy wzorów (19) i (20) wynika, iż w przypadku ścinania i rozciągania połączenia siłę rozciągającą $F_{t,Ed}$ lub $F_{t,Ed,ser}$ przyjmuje się ze współczynnikiem zmniejszającym 0,8.

Wprowadzenie naciągu śruby powoduje rozciąganie jej trzpienia i równocześnie dociśnięcie stykających się powierzchni łączonych elementów. Oczywiście jest więc, że takie połączenie ma dużą nośność, gdy stosuje się śruby o wysokiej wytrzymałości (klasy 8.8 i 10.9). Naciąg śrub w złączu sprężanym uzyskuje się przez obrót nakrętki kluczem dynamometrycznym. Wartość momentu dokręcającego M_o , zapewniającego wymaganą minimalną nominalną siłę sprężenia (w śrubie o średnicy d) można oszacować ze wzoru

$$M_o = k_m d F_p. \quad (21)$$

gdzie: $F_p = 0,7 A_s f_{ub}$, k_m - współczynnik, którego wartość podano tabl. 10.

Tabl. 10. Siły sprężania i momentów dokręcenia śrub

Średnica gwintu śruby	Śruby klasy 10.9			Śruby klasy 8.8		
	Siła sprężania F_p (kN)	Moment dokręcenia ^{1/, 2/} M_o (Nm)		Siła sprężania F_p (kN)	Moment dokręcenia ^{1/, 2/} M_o (Nm)	
		$k_m = 0,18$	$k_m = 0,15$		$k_m = 0,18$	$k_m = 0,15$
M12	59	130	110	47	100	85
M16	110	320	260	88	250	210
M20	172	620	520	137	500	410
M22	212	840	700	170	670	560
M24	247	1 070	890	198	860	720
M27	321	1 560	1 399	257	1 250	1 050
M30	393	2 120	1 770	314	1 700	1 400
M36	572	3 700	3 090	458	2 970	2 470

^{1/} moment dokręcenia śrub klas K1 i K2 należy przyjmować dla wartości k_m podanych przez producenta,

^{2/} współczynnik $k_m = 0,18$ przyjęto dla śrub klasy K0 z gwintem oliwionym, a $k_m = 0,15$ przyjęto dla śrub klasy K0 z gwintem smarowanym pastą molibdenową MoS₂.

W tabl. 10 wartości momentów dokręcenia śrub. Zabieg kontrolowanego dokręcania nakrętek śrub dokonywany jest kluczem dynamometrycznym, który umożliwia pomiar momentu M_o dokręcenia (sprężenia). Przed przystąpieniem do sprężania połączeń należy sprawdzić ustawioną na kluczu wartość momentu dokręcenia. Technologię sprężania połączeń omówiono obszernie w PN-EN 1090-2.

6. Kategorie połączeń śrubowych

Dobór rodzaju połączenia śrubowego oraz jego kategorii wiąże się ściśle z założonym w analizie statyczno-wytrzymałościowej modelem (schematem) węzła lub styku, w aspekcie oczekiwań odnośnie jego zachowania się pod obciążeniem. Chodzi o to, aby przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne połączenia odpowiadało założonej w analizie statycznej sztywności węzłów i styków (podatność na obrót i przemieszczenia). Uzyskanie wymaganych cech styków śrubowych jest możliwe między innymi w wyniku wyboru odpowiedniej kategorii połączenia A, B, C, D lub E (tabl. 11) oraz odpowiednie szacowanie nośności i ukształtowanie. Podział połączeń na kategorie ułatwia precyzowanie wymagań bezpieczeństwa odpowiednio do rodzaju obciążeń i wymagań użytkowych w zależności od obliczeniowego stanu granicznego. Tablicę 11 podziału połączeń śrubowych na kategorie należy rozumieć jako wytyczne doboru złączy przy podejmowaniu decyzji projektowych. W zależności od obciążenia lub ograniczenia wynikającego z rozpatrywanego stanu granicznego użytkownika dobiera się rodzaj połączenia (zakładkowe, doczołowe), jego konstrukcję (żebra, grubości blach) oraz stosowane w nich łączniki (zgrubne, średnio dokładne, pasowane, niesprężane, sprężane).

Tablica. 11. Kryteria obliczeniowe połączeń śrubowych

Kategoria	Kryteria obliczeniowe ^{1/, 2/}	Uwagi
Połączenia zakładkowe		
A połączenie typu dociskowego	$F_{v,Ed} \leq \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd})$	Sprężenie nie jest wymagane jeśli wymagana jest zdolność do przemieszczeń $F_{v,Rd} > F_{b,Rd}$
B połączenie cierne w stanie granicznym użyteczności	$F_{v,Ed.ser} \leq R_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd})$ $\sum F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Odporność na poślizg w stanie granicznym użyteczności, zaleca się śruby do sprężenia klas 8.8 10.9 lub 80 ^{3/}
C połączenie cierne w stanie granicznym nośności	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd})$ $\sum F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Odporność na poślizg w stanie granicznym nośności, zaleca się śruby do sprężenia klas 8.8 10.9 lub 80 ^{3/}
Połączenie doczołowe		
D niesprężane	$F_{t,Ed} \leq \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd})$	Sprężenie nie jest wymagane. Zaleca się stosować śruby klas 4.6 do 6.8
E sprężane	$F_{t,Ed} \leq \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd})$	Zaleca się śruby do sprężania klas 8.8 10.9 lub 80 ^{3/} , przy obciążeniach dynamicznych powinien być także spełniony warunek $F_{t,Ed} \leq F_{z,Cd}$

^{1/} obliczeniowa siła rozciągająca $F_{t,Ed}$ powinna uwzględniać siłę efektu dźwigni. Śruby obciążone siłami rozciągającą i ścinającą powinny także spełniać warunki odnoszące się do złożonego stanu wyteżenia.

^{2/} w połączeniach o pełnej nośności powinien być spełniony warunek:

- w połączeniach zakładkowych $\min(\sum F_{b,Rd}, \sum F_{v,Rd}) \geq N_{u,Rd}$; gdzie $N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2}$,
- w połączeniach doczołowych $\sum F_{t,Rd} \geq N_{pl,Rd}$; gdzie $N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0}$

^{3/} zaleca się sprawdzenie relaksacji śrub klasy 80 przed stosowaniem do sprężania.

Według PN-EN 1993-1-8 śrubowe połączenie zakładkowe należy projektować stosownie do jednej z trzech kategorii, których kryteria obliczeniowe zestawiono w tabl. 11.

Śrubowe połączenia zakładkowe kategorii A (typu dociskowego) dotyczą złączy, których stan graniczny jest uwarunkowany nośnością na docisk lub nośnością na ścinanie łączników. W połączeniach tej kategorii można stosować śruby wszystkich klas od 4.6 do 10.9. Obliczeniowe obciążenie nie powinno przekraczać nośności łączników na ścinanie i docisk $F_{v,Ed} \leq \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd})$. Ponadto należy sprawdzić stan graniczny nośności łączonych części w przekroju netto, ze względu na osłabienie otworami $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$.

Śrubowe połączenia zakładkowe kategorii B dotyczą złączy sprężonych odpornych na poślizg w stanie granicznym użyteczności. W połączeniach tej kategorii należy stosować zestaw śrub klasy 8.8 i 10.9. Obciążenie charakterystyczne w połączeniu zakładkowym kate-

gorii B, w stanie granicznym użytkowości nie może przekraczać nośności złącza na poślizg (tabl. 11). Wartość charakterystyczna obciążenia ścinającego nie powinna być większa od nośności obliczeniowej połączenia na poślizg $F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd}$, a ponadto wartość obliczeniowa obciążenia nie powinna przekroczyć nośności obliczeniowej na ścinanie i docisk $F_{v,Ed} \leq \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd})$, ani też nośności obliczeniowej przekroju netto $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$.

Śrubowe połączenia zakładkowe kategorii C dotyczą złączy sprężanych odpornych na poślizg w stanie granicznym nośności. W takich połączeniach należy stosować zestawy śrub klasy 8.8 i 10.9. Obciążenie obliczeniowe w połączeniu sprężonym kategorii C, w stanie granicznym nośności nie może przekraczać nośności złącza na poślizg $F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$. Śrubowe sprężone połączenia kategorii C należy więc obliczać na poślizg styku, który w tym przypadku jest stanem granicznym nośności. Ponadto należy sprawdzić nośność złącza ze względu na docisk ścinanie $F_{v,Ed} \leq \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd})$ oraz osłabienie otworami łączonych elementów $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$.

Połączenia zakładkowe kategorii A, B i C można stosować w złączach obciążonych statycznie i nieprzemiennie.

W przypadku obciążeń zmiennych co do znaku zalecane jest stosowanie połączeń sprężonych ciernych lub pasowanych, a w przypadku obciążeń dynamicznych (wielokrotnie zmiennych lub udarowych) – połączeń ciernych kategorii C oraz połączeń pasowanych. Złącza kategorii B stosuje się, gdy należy ograniczyć przemieszczenia styków.

Śrubowe połączenia doczołowe kategorii D dotyczą złączy na śruby zwykłe lub o wysokiej wytrzymałości i nie są one sprężane. W obliczeniach połączeń tej kategorii D rozpatruje się stan graniczny nośności z warunku zerwania trzpienia śruby i przeciągnięcia łba śruby przez blachę $F_{t,Ed} \leq \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd})$. Obciążenie to oblicza się z uwzględnieniem efektu dźwigni, wynikającego z podpierania się brzegów odkształconych blach czołowych. Połączenia tej kategorii nie powinny być stosowane przy wielokrotnie zmiennych obciążeniach rozciągających. Do połączeń kategorii D powinny być dobierane śruby znacznej ciągliwości. Z tego powodu nie zaleca się stosować w nich śrub klasy 8.8 i 10.9.

Śrubowe połączenie doczołowe kategorii E jest sprężane. W takim połączeniu stosuje się zestawy śrubowe klasy 8.8 i 10.9. Przenoszą one obciążenia rozciągające równoległe do osi trzpieni śrub przez zmniejszenie docisku łączonych części styku wywołanego wstępnym sprężeniem. Połączenia tej kategorii są zalecane między innymi w przypadkach występowania obciążeń dynamicznych. W tak obciążonych stykach, z uwagi na ograniczoną wytrzymałość

zmęczeniową śrub o wysokiej wytrzymałości, łączniki nie powinny pracować przy zmiennych naprężeniach rozciągających – przed czym zabezpiecza ich wstępne sprężenie. Zmiany amplitudy wytyżeń łączników będą miały miejsce przy zaniku naprężeń docisku między blachami czołowymi wokół najbardziej obciążonej śruby. W obliczeniach połączeń tej kategorii E rozpatruje się stan graniczny nośności z warunku zerwania trzpienia śruby i przeciągnięcia śruby przez blachę $F_{t,Ed} \leq \min(F_{t,Rd}, B_{p,Rd})$. W przypadku wielokrotnie zmiennych obciążeń rozciągających obliczeniowa siła działająca na śrubę w połączeniu nie powinna przekroczyć obliczeniowej wartości siły sprężania $F_{t,Ed} \leq F_{p,Cd}$. To wymaganie wynika z potrzeby, aby przed obliczeniowym stanem granicznym nie nastąpiło rozwarście styku sprężanego i wskutek tego obciążenie śruby pełnym zakresem zmienności naprężeń.

7. Obliczanie śrubowych połączeń zakładkowych

7.1. Nośność grupy łączników

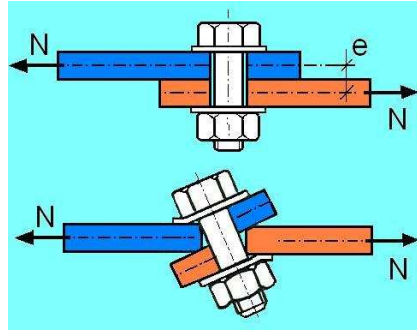
Obliczeniową nośność grupy łączników można przyjmować jako sumę nośności obliczeniowych pojedynczych łączników na docisk $F_{b,Rd}$ pod warunkiem, że nośność obliczeniowa na ścinanie każdego łącznika $F_{v,Rd}$ jest nie mniejsza od jego nośności obliczeniowej na docisk $F_{b,Rd}$. Jeśli ten warunek nie jest spełniony, obliczeniową nośność łączników oblicza się jako iloczyn liczby łączników i najmniejszej nośności łącznika w grupie.

7.2. Nośność połączeń z jednym szeregiem śrub

W pojedynczym złączy zakładkowym z jednym szeregiem śrub należy stosować podkładki pod łbem i nakrętką (rys. 18). W tym połączeniu występuje obciążenie mimośrodowe w stosunku do płaszczyzny styku. Śruba w takim połączeniu jest nie tylko ścinana i dociskana, ale również jej trzpień jest zginany. W związku z tym nośność śruby w połączeniu z jednym szeregiem łączników (obciążonych prostopadle do tego szeregu) należy zredukować.

Nośność obliczeniową śruby na docisk $F_{b,Rd}$ w takim złączy jest ograniczona warunkiem:

$$F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 f_u d t_{\Sigma}}{\gamma_{M2}} \quad (22)$$



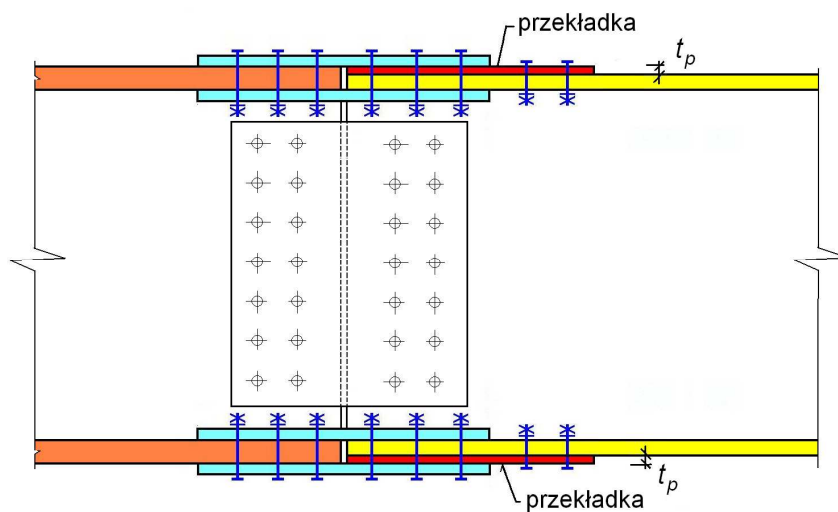
Rys. 18. Schemat wyężenia połączenia na jedną śrubę

7.3. Nośność połączeń z przekładkami

Na rys. 19 pokazano zakładkowy styk śrubowy dźwigara dwuteowego, w którym zastosowano przekładki (elementy wypełniające połączenie pasów o różnej grubości). W tym połączeniu śruba jest nie tylko ścinana i dociskana, ale również jej trzpień jest zginany, co powoduje redukcje jej nośności.

Jeśli śruby pracujące na ścinanie i docisk przechodzą przez przekładkę o grubości t_p większej niż średnica trzpienia śruby d (rys. 19), to nośność obliczeniową na ścinanie $F_{v,Rd}$ należy pomnożyć przez współczynnik redukcyjny obliczany ze wzoru:

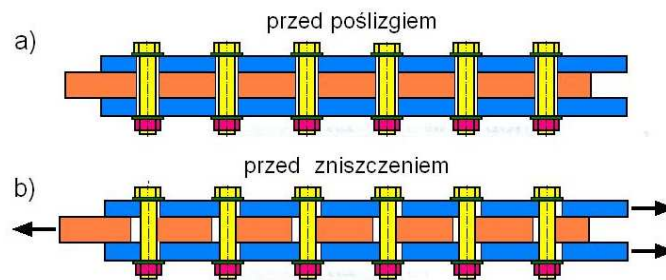
$$\beta_p = \frac{9d}{8d + 3t_p} \leq 1. \quad (23)$$



Rys. 19. Połączenie zakładkowe z przekładką

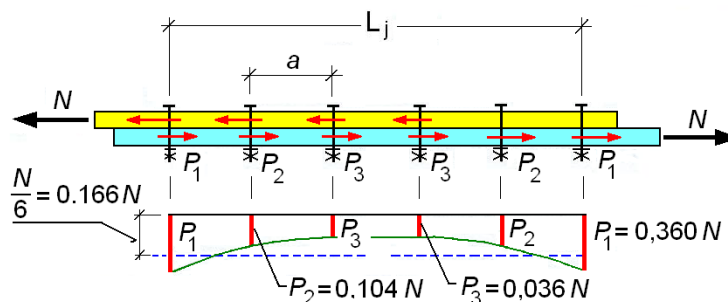
7.4. Nośność połączeń długich

W połączeniu zakładkowym niesprężonym, w którym występuje wiele łączników śruby nie są wyciągnięte jednakowo. W takim połączeniu istnieją przeswity między trzpieniami śrub a ściankami otworów. Wskutek poślizgów są one likwidowane nierównomiernie (niejednocześnie), powodując kolejno (lecz przypadkowo z uwagi na losowość geometrii systemu) owalizację otworów i docisk trzpieni do ścianek otworów (rys. 20).



Rys. 20. Schemat przemieszczeń w połączeniu zakładkowym : a) przed poślizgiem, b) przed zniszczeniem

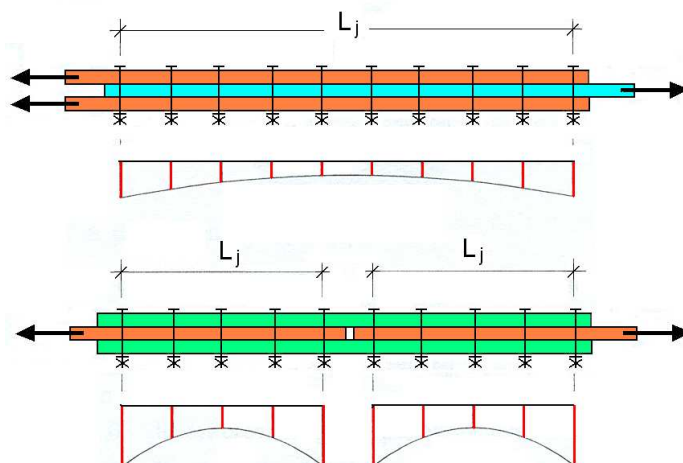
Podczas wzrostu obciążenia działającego na złącze (rys. 20) siły przenoszone przez śruby stopniowo wyrównują się, lecz nie dochodzi do całkowitego zrównania ich wartości. W "krótkich" połączeniach zakładkowych, w których odległość skrajnych łączników w rzędzie równoległym do kierunku obciążenia $L \leq 15d$ (niezależnie od liczby śrub w rzędzie) można przyjąć, że nie występują istotne różnice wyciągnięcia łączników. W modelu obliczeniowym takich połączeń zakłada się, że obciążenie jest przenoszone jednakowo przez wszystkie śruby, które równocześnie osiągają swoją nośność graniczną. W „długich” połączeniach zakładkowych o długości $L > 15d$, różnice przenoszonych sił przez poszczególne śruby (rzędów skrajnych względem rzędów środkowych) są większe, co pokazano na rys. 21. Wykazały to badania teoretyczne i doświadczalne.



Rys. 21. Rozkład sił w połączeniu zakładkowym długim

Jeśli odległość osiowa L_j między skrajnymi łącznikami mierzona w kierunku obciążenia jest większa niż $15d$ (rys. 22), to nośność obliczeniową na ścinanie wszystkich łączników $F_{v,Rd}$ redukuje się współczynnikiem β_{Lf} określonym wzorem:

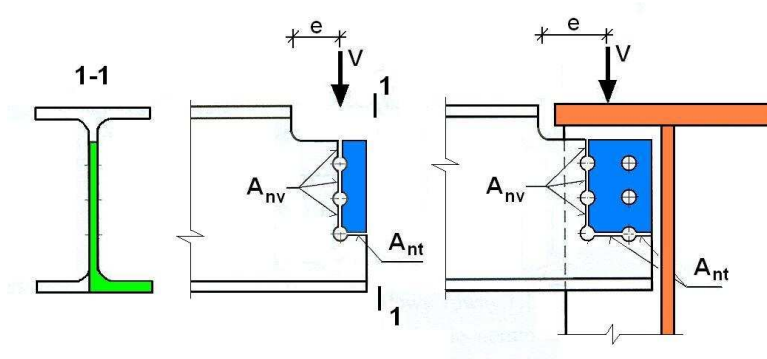
$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \text{ lecz } 0,75 \leq \beta_{Lf} \leq 1,0. \quad (24)$$



Rys. 22. Schemat długiego połączenia zakładkowego

7.5. Nośność z warunku rozerwania blokowego

W połączeniach zakładkowych elementów rozciąganych, zginanych i ścinanych należy sprawdzić rozerwanie blokowe. Ta forma wyczerpania nośności przekroju osłabionego otworami następuje w wyniku jednoczesnego ścięcia przekroju netto A_{nv} wzdłuż kierunku obciążenia oraz rozerwanie przekroju netto A_{nt} w poprzek kierunku obciążenia (rys. 23).



Rys. 23. Schemat rozerwania blokowego połączenia belki z podciągami

Rozpatrywanie tej formy zniszczenia pozwala na pominięcie oddzielnego sprawdzania naprężeń ścinających i rozciągających w przekroju netto części łączonych.

Według PN-EN 1993-1-8 obliczeniową nośność na rozerwanie blokowe przekroju osłabionego wyznacza się ze wzorów:

- w przypadku symetrycznej grupy śrub obciążonej osiowo

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}}, \quad (25)$$

- w przypadku grupy śrub obciążonej mimośrodowo

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}}, \quad (26)$$

gdzie:

f_y – granica plastyczności stali łączonego elementu,

f_u – wytrzymałość na rozciąganie stali łączonego elementu,

A_{nt} – pole rozciąganej części przekroju netto (rys. 23),

A_{nv} – pole ścinanej części przekroju netto (rys. 23),

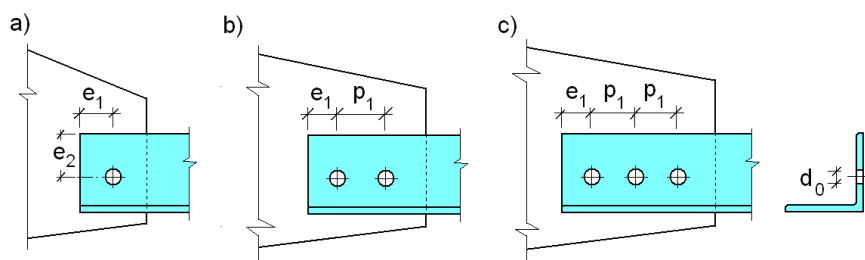
$\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności,

$\gamma_{M0} = 1,00$ – częściowy współczynnik nośności.

7.6. Nośność kątowników połączonych jednym ramieniem i innych niesymetrycznie łączonych elementów

W połączeniu osiowo rozciąganych kątowników połączonych jednym ramieniem (rys. 24) lub ceowników połączonych środkiem występuje zginanie w węźle. Jest ono spowodowane mimośrodowym usytuowaniem grupy łączników w stosunku do środka ciężkości przekroju. Wpływ zginania na nośność zależy od liczby śrub w połączeniu i w bardzo dużym stopniu zmniejsza nośność przekroju netto.

W przypadku elementów niesymetrycznych oraz elementów symetrycznych obciążonych symetrycznie (np. kątowników połączonych jednym ramieniem – rys. 24) należy w ocenie nośności uwzględnić mimośrodę oraz wpływ rozstawu i odległości śrub od brzegu.



Rys. 24. Kątowniki połączone jednym ramieniem: a) na jedną śrubę, b) na dwie śruby, c) na trzy śruby

Według PN-EN 1993-1-8 pojedynczy rozciągany kątownik może być traktowany jak obciążony osiowo, przy czym jego nośność obliczeniową określa się ze wzorów:

- przy jednej śrubie (rys. 24a)

$$N_{u1,Rd} = \frac{2(e_2 - 0,5d_0)tf_u}{\gamma_{M2}}, \quad (27)$$

- przy dwóch śrubach (rys. 24b)

$$N_{u2,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (28)$$

- przy trzech śrubach (rys. 24c)

$$N_{u3,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (29)$$

gdzie:

f_u – wytrzymałość na rozciąganie stali łączonego elementu,

t – grubość ścianki kątownika,

A_{net} – pole przekroju netto kątownika; dla kątowników nierównoramiennych łączonych węższym ramieniem, przyjmuje się A_{net} równe polu przekroju netto zastępczego kątownika o szerokości obu ramion równej szerokości ramienia węższego,

β_2, β_3 – współczynniki redukcyjne zależne od rozstawu śrub p_1 wg tabl. 12; dla pośrednich wartości p_1 współczynniki β_2 oraz β_3 można interpolować,

$\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności.

Tabl. 12. Współczynniki redukcyjne β_2, β_3

Rozstaw	$p_1 \leq 2,5d_0$	$p_1 \geq 5,0d_0$
2 śruby	$\beta_2 = 0,4$	$\beta_2 = 0,7$
3 śruby i więcej	$\beta_3 = 0,5$	$\beta_3 = 0,7$

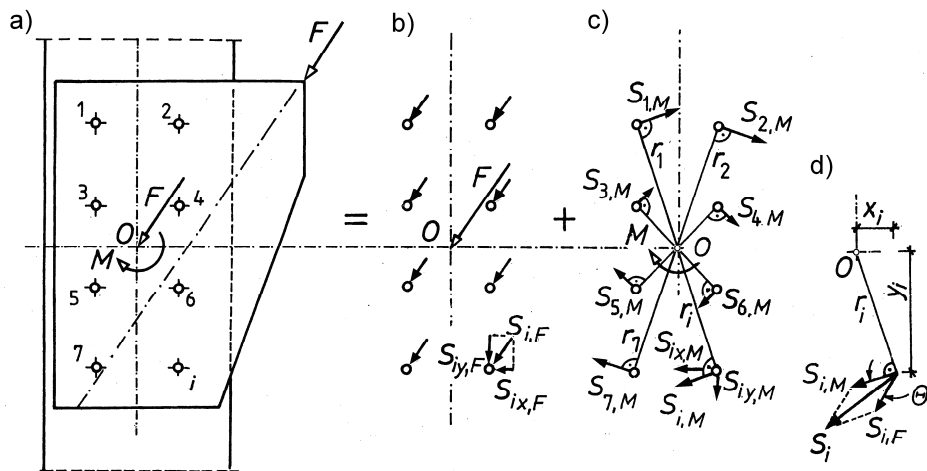
7.7. Nośność połączeń zakładkowych obciążonych momentem zginającym

Z uwagi na sposób wyłożenia śrubowe połączenia zakładkowe dzieli się na:

- proste, gdy obciążenie każdego łącznika jest jednakowe, co ma miejsce tylko wtedy, gdy siła obciążająca złącze przechodzi przez środek ciężkości łączników w płanie,
- złożone, gdy obciążenia poszczególnych łączników są zróżnicowane, co ma miejsce wtedy, gdy siła obciążająca złącze nie przechodzi przez środek ciężkości łączników w płanie.

W złączach prostych wypadkowa sił wewnętrznych przechodzi przez środek ciężkości połączenia i nie występuje moment zginający w styku. W obliczeniach takich połączeń przyjmuje się, że obciążenie osiowe rozdziela się proporcjonalnie na poszczególne łączniki.

W złożonym połączeniu zakładkowym oprócz siły osiowej występuje moment zginający w płaszczyźnie styku M . W modelu obliczeniowym takich połączeń przyjmuje się, że moment zginający w złączu M , rozdziela się na poszczególne śruby w postaci sił $S_{i,M}$, które są prostopadłe do ich ramion obrotu r_i względem środka ciężkości łączników O . Siły te są proporcjonalne do odległości łączników od środka obrotu, który można utożsamiać ze środkiem ciężkości grupy łączników przenoszących obciążenie momentem. Schemat wyłożenia połączenia zakładkowego, obciążonego siłą osiową F i momentem zginającym M pokazano na rys. 25.



Rys. 25. Schemat obciążenia złącza zakładkowego obciążonego momentem i siłą osiową

Siły składowe $S_{i,M}$ od momentu zginającego M , działającego w połączeniu (rys. 25c), wyznacza się zakładając, że są one proporcjonalne do odległości r_i danego łącznika od środka obrotu wszystkich łączników O. Zachodzi więc zależność

$$M = S_{1,M} r_1 + S_{2,M} r_2 + \dots + S_{n,M} r_n = \sum_{i=1}^n S_{i,M} r_i, \quad (30)$$

przy czym:

$$\frac{S_{1,M}}{S_{M,\max}} = \frac{r_1}{r_{\max}}, \quad \frac{S_{2,M}}{S_{M,\max}} = \frac{r_2}{r_{\max}}, \quad \text{itd}, \quad (31)$$

gdzie:

$S_{M,i}$ – siła w i -tej śrubie od działającego w połączeniu momentu zginającego M ,

$S_{M,\max}$ – największa siła w śrubie od działającego w połączeniu momentu zginającego M ,

r_i – odległość i -tej śruby od środka ciężkości łączników O,

r_{\max} – odległość śruby w której występuje $S_{M,\max}$ od środka ciężkości łączników O.

Największa siła w śrubie $S_{M,\max}$ występuje w łączniku najdalej oddalonym od środka obrotu O złącza. Siłę tę wyznacza się przekształcając zależności (30) i (31) i wynosi ona

$$S_{M,\max} = \frac{M r_{\max}}{\sum_i^n r_i^2}. \quad (32)$$

W układzie ortogonalnym odległość r_i i -tej śruby od środka ciężkości łączników O można przedstawić jako

$$r_i^2 = x_i^2 + y_i^2, \quad (33)$$

i wówczas składowe sił $S_{i,M}$ (rys. 25b i c) wynoszą

$$S_{ix,M} = \frac{-M y_i}{\sum_i^n (x_i^2 + y_i^2)}, \quad (34)$$

$$S_{iy,M} = \frac{M x_i}{\sum_i^n (x_i^2 + y_i^2)}, \quad (35)$$

gdzie: x_i, y_i – współrzędne łączników w połączeniu (rys. 25d).

Zakładając równomierny rozdział osiowej siły F na wszystkie łączniki w połączeniu (rys. 25b) siła $S_{i,F}$ w i -tej śrubie wynosi

$$S_{i,F} = \frac{F}{n}, \quad (36)$$

gdzie: n – liczba łączników w połączeniu.

Stan graniczny nośności połączenia zakładkowego obciążonego momentem zginającym M i siłą osiową F , sprawdza się ze wzoru

$$S_i = \sqrt{(S_{i,M} + S_{i,F} \cos \theta_i)^2 + (S_{i,F} \sin \theta_i)^2} < F_{Rd}, \quad (37)$$

gdzie:

S_i – siła wypadkowa (rys. 25) przypadająca na i -ty łącznik (tj. suma wektora sił składowych według wzorów (32) i (36)),

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

F_{Rd} – miarodajna nośność obliczeniowa śruby ($\min(F_{v,Rd}, F_{b,Rd}, F_{s,Rd})$).

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 (34) i (35)) – we współrzędnych prostokątnych, wypadkową obciążenia śruby S_i wyznacza się ze wzoru

$$S_i = \sqrt{(S_{ix,M} + S_{ix,F})^2 + (S_{iy,M} + S_{iy,F})^2} < F_{Rd}. \quad (38)$$

8. Projektowanie śrubowych połączeń doczołowych

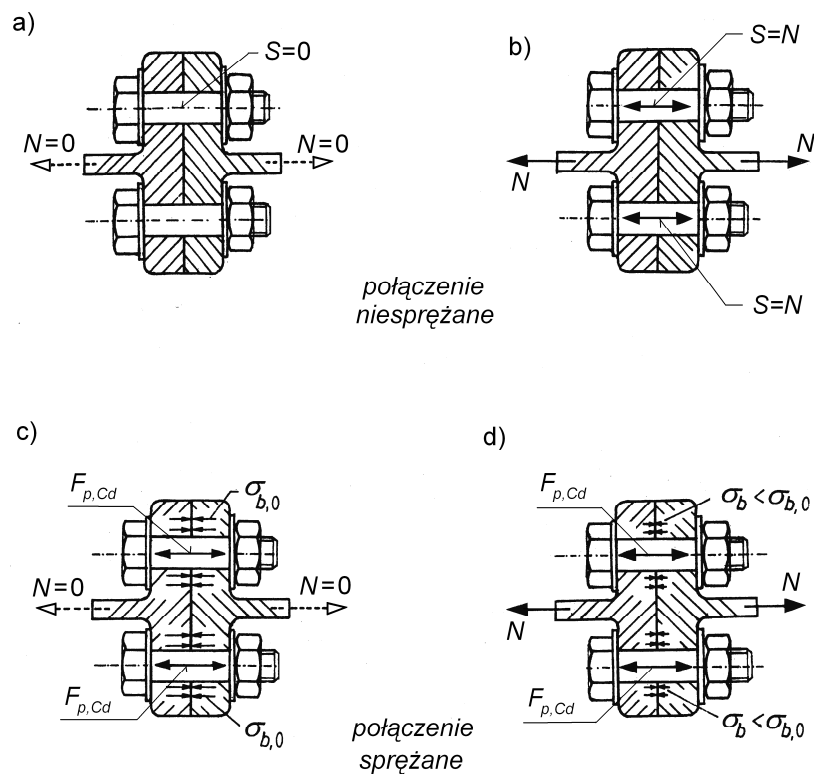
8.1. Wprowadzenie

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).

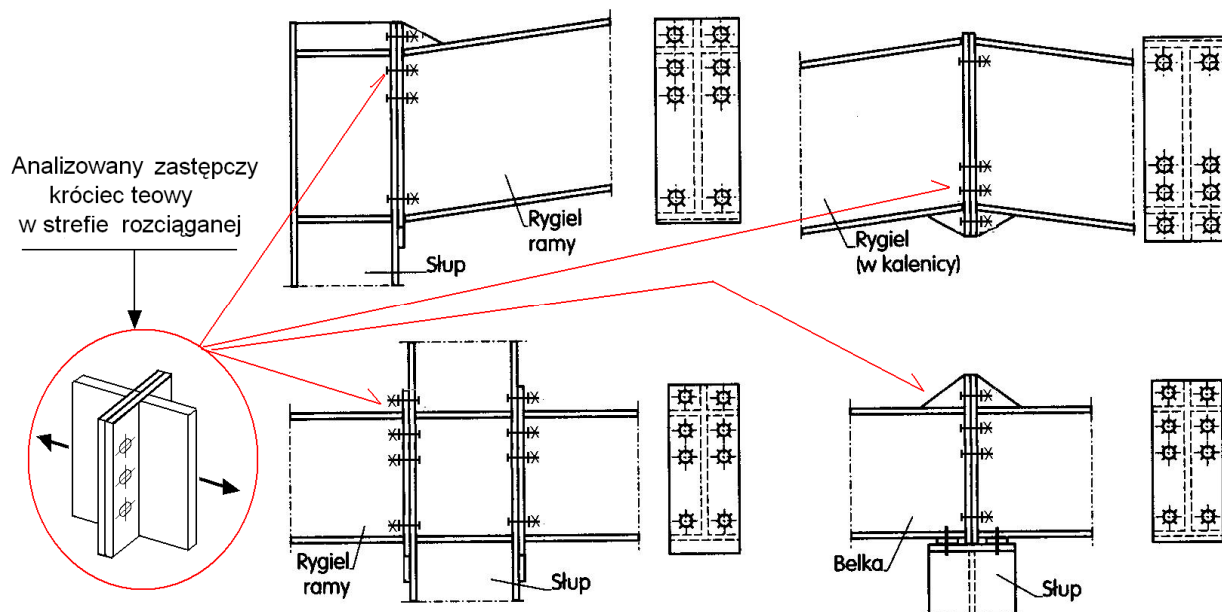
W przypadku doczołowych połączeń niesprężanych trzpień śruby jest rozciągany dopiero po wystąpieniu obciążeń w złączu (rys. 26a i b).

W doczołowych połączeniach sprężonych dokonuje się wstępnego naciągu śrub i ich trzpienie są rozciągane przed wystąpieniem obciążeń w styku (rys. 26c). Przyłożenie obciążeń do połączenia zmniejsza wyężenie dociskowe (rys. 26d) w przylegających do siebie jego blachach czołowych, a siła rozciągająca w śrubie nie ulega zmianie w szerokim zakresie wyężień styku. Połączenia doczołowe sprężone w porównaniu z połączeniami niesprężonymi charakteryzuje mały zakres zmian wyężenia śrub oraz większa sztywność złączy.

Pokazany na rys. 26 rozciągany króciec teowy może być przyjęty jako model w analizie wyężenia rozciąganej strefy zginanych styków doczołowych ram pokazanych na rys. 27. Dlatego w dalszej części tego rozdziału będzie analizowane wyężenie rozciąganego króćca teowego.



Rys. 26. Wyężenie śrubowych połączeń doczołowych: a), b) – niesprężonych, c), d) – sprężonych; a), c) – przed obciążeniem, b), d) – po obciążeniu



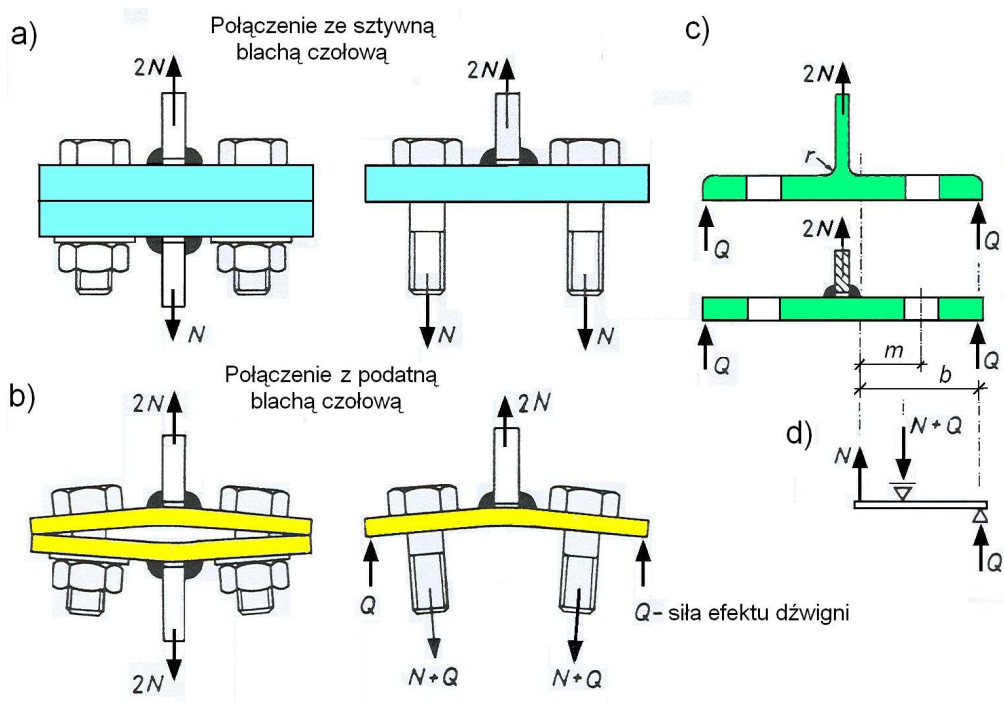
Rys. 27. Doczołowe, śrubowe styki doczołowe wyęzione momentem zginającym.

8.2. Nośność śrubowych rozciąganych, niesprężonych połączeń doczołowych

Jeśli w niesprężonych połączeniach prostych (rys. 26) blachy czołowe są o dostatecznej sztywności to przyrosty sił w śrubach są proporcjonalne do przyłożonych obciążeń, a śruby są jedynie rozciągane. Nośność obliczeniowa śruby w takim połączeniu jest ograniczona jej wytrzymałością na rozciąganie. Kontrola stanu granicznego połączenia sprowadza się do spełnienia warunku nieprzekroczenia przez siły wewnętrzne nośności śrub na rozciąganie.

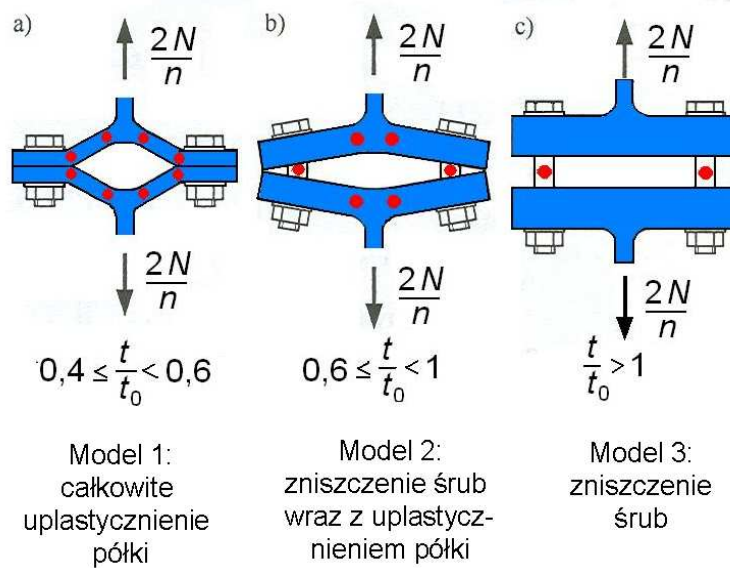
Gdy blachy czołowe w analizowanych złączach są stosunkowo cienkie, usztywnione tylko wzdłuż jednego brzegu, następuje wzrost sił w śrubach spowodowany tzw. efektem dźwigni. Przyrosty sił w śrubach są wówczas większe, aniżeli wynikałoby to z przyrostów obciążenia. Wyjaśnia to schemat doczołowego połączenia prostego (króćca teowego), przedstawiony na rys. 28b. Efekt dźwigni w doczołowych połączeniach wynika z występowania w styku deformacji giętej, której skutkiem jest powstanie na końcach blach czołowych sił docisku Q (podważających blachę czołową w złączu). W wyniku występowania efektu dźwigni śruba o nominalnym obciążeniu N jest wyęzona siłą $S = N + Q$.

Siły Q efektu dźwigni w połączeniu są powodowane ugięciem y jej blachy czołowej. Zależą one zatem od względnej sztywności oraz proporcji geometrycznych części składowych połączenia tj. od grubości blachy czołowej t , odległości m oraz b_s , rys. 28). Można je wyznaczyć z warunku równowagi statycznej (patrz schemat statyczny pokazany na rys. 28d).



Rys. 28. Schemat powstawania efektu dźwigni w połączeniu doczołowym: a, b, c – konstrukcja oraz odkształcenia złącza, d – schemat statyczny wyężenia złącza

Na rys. 29 pokazano przemieszczenia oraz mechanizmy zniszczenia połączeń doczołowych o różnych proporcjach sztywności blach czołowych do wytrzymałości rozciągniętych śrub („kropki” na rys. 29 oznaczają uplastycznienie elementów).



Rys. 29. Mechanizmy wyczerpania nośności połączenia doczołowego (opis w tekście)

W połączeniu z grubymi blachami czołowymi (rys. 29a) następuje zerwanie śrub zanim wystąpi zgięciowe uplastycznienie zginanych blach czołowych. W takim przypadku efekt dźwigni nie występuje $Q = 0$. Jeśli blachy czołowe są bardzo cienkie (rys. 29c) to następuje ich uplastycznienie. Ze względu na bardzo duże przemieszczenia styku oraz zginanie trzpieni śrub, połączenia takie nie powinny być projektowane. Na rys. 29b pokazano model wyczerpania nośności połączenia doczołowego, gdy uplastycznieniu ulegają trzpienie śrub oraz blachy czołowe. W takim modelu wyężenia połączenia występuje efekt dźwigni.

Za stan graniczny połączenia o modelu zniszczenia pokazanym na rys. 29b, uważa się taki, kiedy obliczeniowemu zerwaniu trzpienia śruby towarzyszy powstanie przegubu plastycznego blachy w miejscu brzegu spoiny pachwinowej lub na początku wyokrąglenia między stopką a pasem kształtownika walcowanego (model 2 na rys. 29). Najmniejszą grubość blachy czołowej króćca teowego, przy której nie występuje efekt dźwigni można wyznaczyć ze wzoru

$$t_f \geq t_{f,\min} = 1,8 \sqrt{\frac{mA_s f_{ub}}{l_{eff} f_y}} \quad (39)$$

gdzie:

A_s – pole przekroju czynne śruby,

m – odległość osi śruby od brzegu spoiny (rys. 27c),

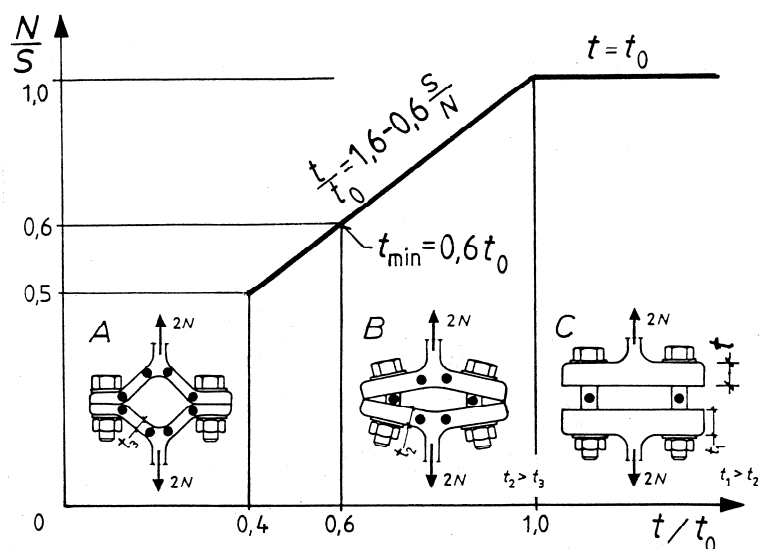
l_{eff} – długość efektywna przypadająca na jedną śrubę,

t_f – grubość blachy czołowej,

f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie stali śruby,

f_y – granica plastyczności stali blachy czołowej.

Na rys. 30 przedstawiono wpływ grubości blachy czołowej na wyężenie śrub i formy zniszczenia badanych połączeń. Na osi poziomej rys. 30 podano stosunek grubości blachy t do grubości $t_o = t_{f,\min}$ wyznaczonej wg (39) – 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. 30 wynika, iż dla grubości blach czołowych $0,4 \leq t/t_o < 1$ siła S w śrubie wywołana efektem dźwigni wynosi $2N < S < N$ i wystąpią 4 załomy plastyczne. Jeśli $t/t_o > 1$ to efekt dźwigni nie wystąpi $Q = 0$, a połączenie ulega zniszczeniu poprzez zniszczenie śrub.



Rys. 30. Wykres wpływu grubości blach w połączeniu doczołowym na siły w śrubach

Aby efekt dźwigni był mały, w połączeniach doczołowych śruby należy rozmieszczać w możliwie najmniejszych odległościach od pasów i środków (rys. 28). Przyjęcie minimalnych grubości blach w stykach czołowych niesprężonych wg wzoru (39) prowadzić może do niepożądanych, nadmiernych przemieszczeń w złączy. Dlatego też w przypadku sprężonych styków doczołowych minimalną grubość blachy czołowej w złączy obciążonym statycznie można wyznaczyć ze wzoru

$$t_f = d \sqrt[3]{\frac{f_{ub}}{1000} \frac{235}{f_y}}, \quad (40)$$

gdzie:

f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie stali śruby,

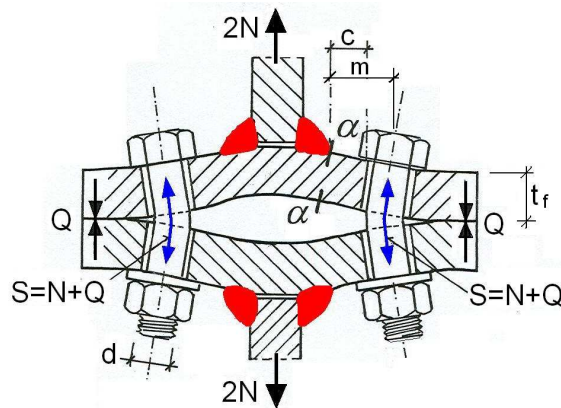
f_y – granica plastyczności stali blachy czołowej.

d – średnica trzpienia śruby.

W wyniku występowania efektu dźwigni siła w śrubie wynosi $N + Q$ (rys. 27d). Wpływ efektu dźwigni na zwiększone wyężenie śrub uwzględnia współczynnik efektu dźwigni β , który wyraża wzrost wyężenia śruby obciążonej nominalną siłą N w wyniku działania sił "podważających" Q i wynosi on

$$\beta = \frac{N + Q}{N} = \frac{S}{N} = 2,67 - 1,67 \frac{t_f}{t_{f, \min}} \geq 1. \quad (41)$$

Wyteżenie śruby wywołane efektem dźwigni wynosi $S > N$, śruba zaś jest nie tylko rozciągana, ale i zginana, co pokazano na rys. 31. Powoduje to redukcję nośności śrubowego połączenia doczołowego.

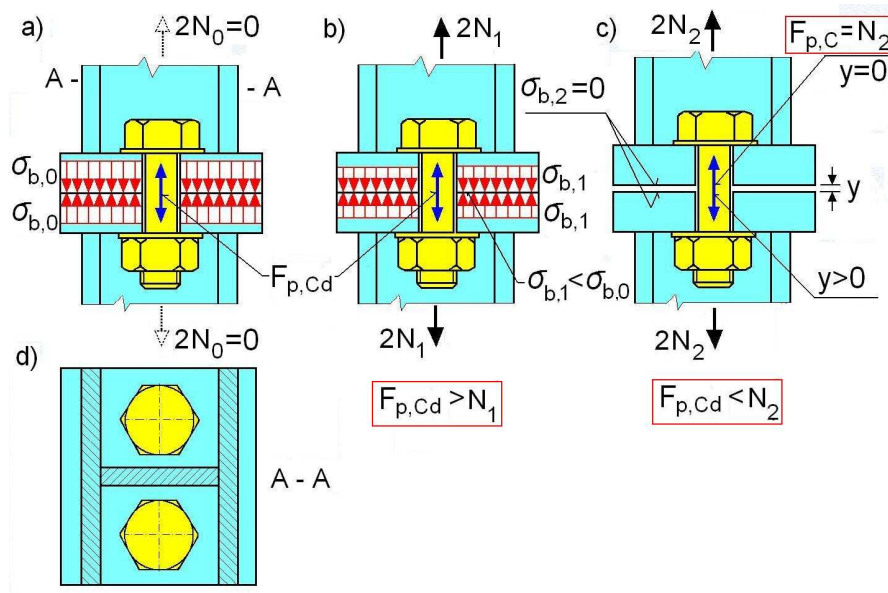


Rys. 31. Schemat odkształcenia śrub i blach w połączeniu doczołowym

Z uwagi na występowanie sił efektu dźwigni oraz odkształcalności elementów składowych połączenia (patrz rys. 28÷31) ocena nośności granicznej styków doczołowych jest stosunkowo złożona. Procedury obliczeniowe oszacowania analizowanych połączeń podano w PN-EN 1993-1-8 oraz literaturze przedmiotu. W Załączniku 1 podano przez W. Kaweckiego, P. Kaweckiego A. Klimka i J. Łagunę uproszczoną procedurę projektowania doczołowych połączeń sprężanych na podstawie PN-EN 1993-1-8 (Inżynieria i Budownictwo nr 7/2008).

8.3. Nośność śrubowych rozciąganych sprężonych połączeń doczołowych

Rozpatruje się wyteżenie śrubowego połączenia doczołowego, o konstrukcji pokazanej na rys. 32, w którym wprowadzono sprężenie trzpieni dwóch śrub, przez dokręcenie nakrętek łączników. Zakłada się, że idealnie przylegające do siebie blachy czołowe są sprężyste i odpowiednio grube, a sprężenie śrub wywołuje w nich równomierne naprężenie dociskowe $\sigma_{b,o}$. W tym stanie, przed obciążeniem styku doczołowego ($2N = 0$), w trzpieniach śrub sprężenie wywołało powstanie sił rozciągających $F_{p,C}$, a naprężenia dociskowe $\sigma_{b,o}$ spowodowały sprężyste odkształcenie (zmniejszenie grubości) blach czołowych. Obciążenie takiego styku doczołowego (rys. 32b) siłą N_1 mniejszą od wstępnego sprężenia $F_{p,C}$ powoduje zmniejszenie wzajemnego docisku blach czołowych $\sigma_{b,1} < \sigma_{b,o}$.



Rys. 32. Schemat wyłączenia doczołowego sprężonego połączenia rozciąganego

Należy zauważyć, że przyłożenie obciążenia $2N_1 < 2F_{p,Cd}$ w styku nie powoduje zmiany sił sprężających $F_{p,Cd}$ w trzpieniach śrub, gdyż obciążenie $2N_1$ jest równoważone przez siłę wzajemnego docisku blach, o wartości $(\sigma_{b,o} - \sigma_{b,1}) A$ (gdzie A jest polem powierzchni docisku blach czołowych). Największe obciążenie $2N_1$, które nie powoduje ani rozwarcia ($y = 0$) styku doczołowego (zanik naprężeń dociskowych σ_b między blachami czołowymi), ani zmian siły sprężającej $F_{p,Cd}$ w trzpieniu śruby wynosi $2N = \sigma_{b,o} A = 2F_{p,Cd}$.

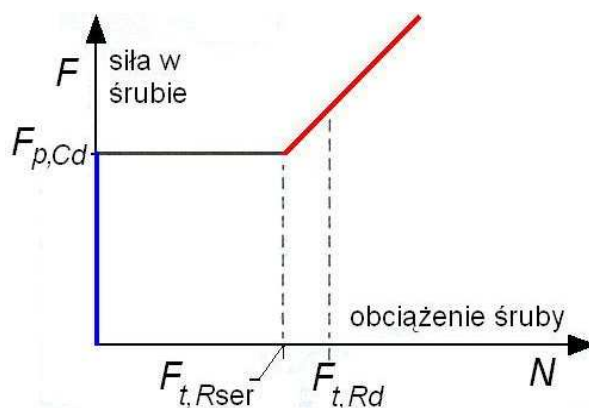
Przyłożenie siły zewnętrznej $2N_2$, większej niż siła wzajemnego docisku blach czołowych, o wartości $\sigma_{b,1} A$ powoduje rozwarcie (szczelinę pomiędzy blachami czołowymi w złączu) analizowanego styku doczołowego ($y > 0$). Następuje to dla obciążeń N_j większych niż siła wstępnego naciągu śrub $F_{p,Cd}$.

Podsumowując można stwierdzić, że sprężane śrubowe połączenia doczołowe przenoszą obciążenia rozciągające przez zmniejszenie docisków łączonych części styku, które zostały wywołane wstępnym jego sprężeniem.

Analiza wyłączenia połączenia doczołowego (rys. 32) pokazuje celowość wstępnego sprężania styku śrubowego. 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 $F_{p,Cd}$. W doczołowych stykach niesprężonych przyłożenie obciążeń N_i przenoszone jest w całości przez rozciąganie trzpieni śrub. W połą-

czeniu sprężonym zaś w szerokim zakresie obciążeń $0 < N_i < n F_{p,Cd}$ nie następuje zmiana wyteżenia śrub (gdzie: n – ilość śrub sprężających w złączu).

Tę właściwość sprężonych połączeń dobrze ilustruje wykres na rys. 33, gdzie przedstawiono zależność siły w śrubie F od obciążenia N . Jeżeli obciążenie N_i śruby nie przekroczy jej nośności $F_{t,Rser}$, to siła w śrubie jest prawie stała i wynosi $F_{p,Cd}$ (rys. 33). Po przekroczeniu nośności $F_{t,Rser}$ następuje rozprężenie się blach i powrót do ich grubości początkowej przed sprężeniem oraz wzrost siły w śrubie jak, jak w połączeniu niesprężonym.



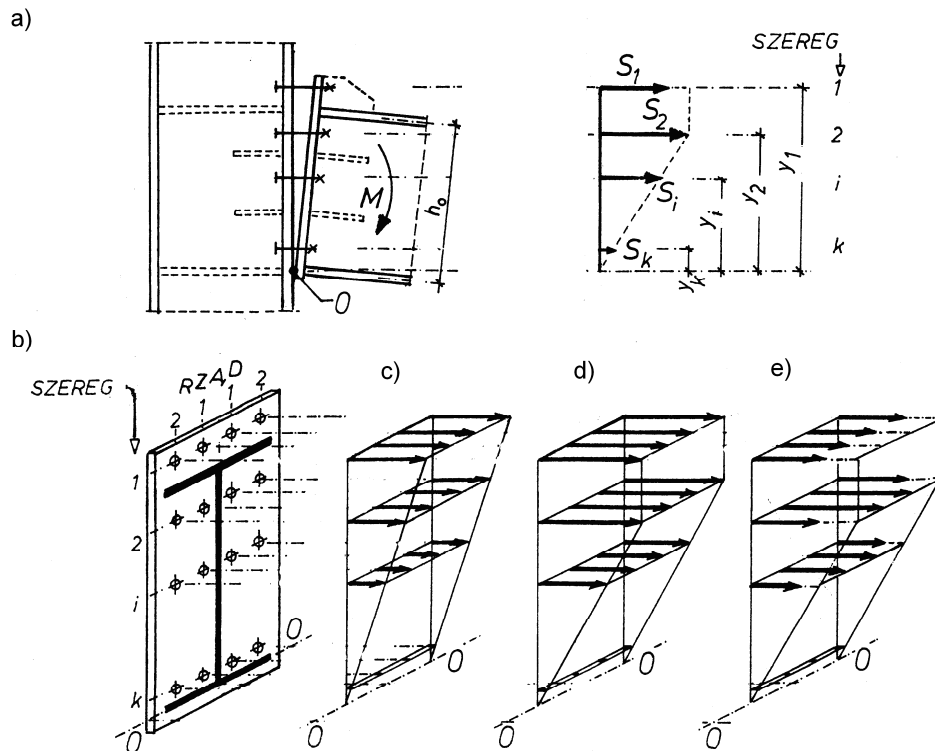
Rys. 33. Zależność sił w śrubie F od obciążenia N

Drugą istotną zaletą doczołowego styku sprężonego jest jego sztywność (mała odkształcalność), w porównaniu z niesprężonymi stykami zakładkowymi, oraz doczołowymi. Projektowanie doczołowych połączeń sprężonych jest szczególnie uzasadnione w przypadkach obciążeń dynamicznych, (gdyż zapobiega się zmęczeniu stali śrub) a także gdy wymagana jest duża sztywność połączeń.

Istotnym zagadnieniem w projektowaniu połączeń doczołowych sprężonych jest odpowiednia sztywność blach czołowych, która ma bezpośredni wpływ na wzrost wyteżenia trzpieni śrub w wyniku tzw. efektu dźwigni. Zmniejszenie wpływu efektu dźwigni na dodatkowe wyteżenie śrub uzyskuje się przez uźebrowanie blach czołowych, które nie zawsze jest uzasadnione ekonomicznie (z uwagi na pracochłonność wykonania takich styków), a także nie zalecane w przypadku obciążeń dynamicznych złącza doczołowego. Dlatego też częściej stosuje się odpowiednio grube nieuźebrowane blachy czołowe.

8.4. Nośność śrubowych zginanych niesprężonych połączeń doczołowych

Analizuje się śrubowy, niesprężony styk doczołowy połączenia belki ze słupem, pokazany na rys. 34, który jest zginany momentem M . W styku tym, oś obrotu (oś obojętna złącza) belki względem słupa jest w osi dolnego pasa ściskanego belki. Ze względu na charakter wyęźnienia śrub w analizowanym styku jest to połączenie złożone, gdyż siły w łącznikach nie są jednakowe (wzrastają w miarę oddalania się od osi obrotu belki względem słupa).



Rys. 34. Schemat wyęźnienia doczołowego, niesprężonego styku zginanego

W zależności od proporcji geometrycznych części składowych połączenia: grubości blachy czołowej belki, grubości pasa słupa, usztywnienia styku żebrami, a także ilości śrub w rzędzie wystąpi różny rozdział obciążeń na poszczególne śruby. Na rys. 34c pokazano sprężysty, liniowy po wysokości, rozkład sił w śrubach, sztywnego (o grubych blachach czołowych) zginanego styku doczołowego. Na rys. 34d pokazano sprężysto-plastyczny rozkład sił w analizowanym sztywnym połączeniu belki ze słupem, na rys. 34e zaś w złączu podatnym (o cienkich blachach czołowych). Rozdział obciążenia na poszczególne śruby w zginanych połączeniach doczołowych zależy od obciążenia i podatności blach czołowych (pasa słupa) w miejscach osadzenia śrub. Normowe modele obliczeniowe zginanych połączeń doczołowych są skorygowanymi doświadczalnie modelami teoretycznymi.

Nośność zginanych połączeń doczołowych zależy głównie od nośności śrub usytuowanych w szeregach położonych najbliżej pasa rozciąganego belki.

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

Jeśli założy się, że blachy czołowe w styku są dostatecznie sztywne (grube), to warunek równowagi sił w zginanym momencie M styku doczołowym ma następującą postać

$$M = \sum_i S_i y_i, \quad (42)$$

gdzie: S_i – siła w i -tej śrubie, y_i – ramię działania siły w i -tej śrubie.

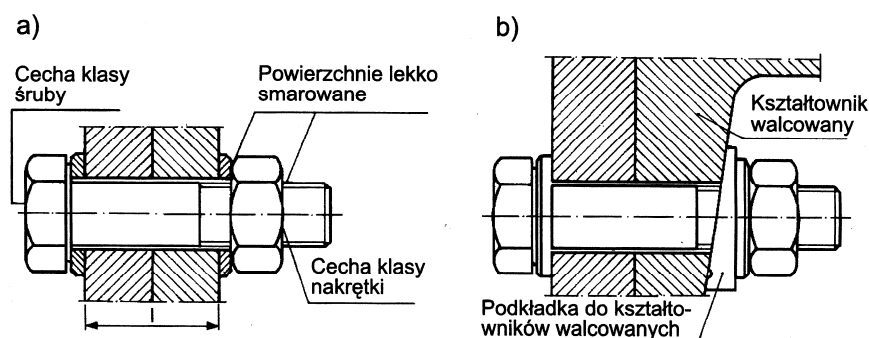
Z uwagi na występowanie sił efektu dźwigni i odkształcalności elementów składowych połączenia ocena nośności zginanych styków doczołowych jest złożona. Procedury obliczeniowe oszacowania tych połączeń podano w PN-EN 1993-1-8 oraz literaturze przedmiotu. W Załączniku 1 podano przez W. Kaweckiego, P. Kaweckiego A. Klimka I J. Łagunę uproszczoną procedurę projektowania doczołowych połączeń sprężanych na podstawie PN-EN 1993-1-8.

9. Wybrane zagadnienia projektowania i realizacji połączeń śrubowych

W połączeniach zakładkowych i doczołowych sprężonych stosuje się:

- śruby z łbem zwykłym lub powiększonym klas nie niższych niż 8.8, w wykonaniu B,
- nakrętki zwykłe lub powiększone o klasie właściwości mechanicznych zgodnej z klasą śrub, w wykonaniu B,
- podkładki okrągłe do połączeń sprężanych, o twardości 300÷370 HV, w wykonaniu dokładnym.

W połączeniu sprężanym należy stosować 2 podkładki pod łbem śruby i pod nakrętką. Prawidłowo złożone śrubowe połączenie sprężone pokazano na rys. 35. W połączeniach kategorii B, C i E śruby o wysokiej wytrzymałości klasy 8.8 lub 10.9 powinny być sprężane siłami wyznaczonymi według wzoru (15). Śruby o wysokiej wytrzymałości można także stosować w połączeniach kategorii A.



Rys. 35. Prawidłowo złożone połączenie ze śrubą sprężającą

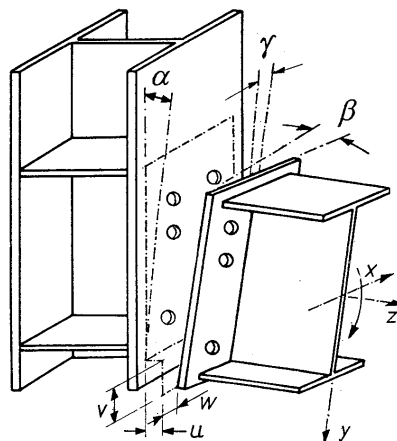
W realizacji śrubowych połączeń można wyróżnić fazę wykonawstwa warsztatowego – w wytwórni konstrukcji stalowych oraz fazę scalania montażowego – na budowie. W wytwórniach konstrukcji stalowych (warsztatach) wykonujemy następujące czynności dotyczące bezpośrednio połączeń śrubowych: przecinanie blach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

Trasowanie polega na nanoszeniu oznaczeń rozmieszczenia otworów śrub na elementach łączonych. Gdy mogą wystąpić odkształcenia technologiczne (spawalnicze) łączonych elementów, trasowanie otworów wykonuje się po zespawaniu elementów składowych w podzespoły montażowe. Realizując konstrukcje powtarzalne korzystnie jest stosować wzorniki do trasowania.

Otwory przejściowe w elementach łączonych na śruby klasy B lub C wykonuje się metodą wiercenia lub przebijania (z zastosowaniem przebijarek o nacisku hydraulicznym). Przebijanie otworów jest tańsze i szybsze, lecz krawędzie otworów przejściowych są nierówne. Tak wykonane otwory można stosować w elementach o grubościach nie większych niż 25 mm i od $(d + 3)$ mm ze stali o wytrzymałości na rozciąganie $f_u \leq 390$ MPa oraz nie większej od 12,5 mm ze stali o wytrzymałości na rozciąganie $f_u = 390 \div 690$ MPa. Można je stosować w elementach drugorzędnych oraz w elementach konstrukcji obciążonych statycznie. W takim wypadku podczas "przebijania otworu" następuje deformowanie brzegów materiału na obwodzie otworów. Z tych też względów najczęściej otwory wierci się za pomocą wiertarek – dla średnic śrub $d \leq 55$ mm i wytaczarek – dla średnic śrub $d > 55$ mm. Gdy wymagane są otwory wiercone, to można stosować wycinanie i rozwiercanie otworów. Przebijanie otworów bez

ich późniejszego rozwiercania nie powinno mieć miejsca 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 wpływu losowego usytuowania otworów w łączonych elementach na komplikacje w trakcie montażu, wskazane jest wiercenie otworów przy zastosowaniu szablonów oraz metodą jednoczesnego wycinania otworów lub wiercenia wielowrzecionowego.

W połączeniach doczołowych wymagana jest dokładność kąta nachylenia oraz płaskości styku blach czołowych. Dlatego też konieczne jest zapewnienie odpowiednio dokładnej płaszczyzny cięcia łączonych kształtowników, stosowanie właściwej technologii spawania, a niekiedy frezowania powierzchni przylgowych styków. Niewłaściwa technologia wykonania złączy powoduje powstanie imperfekcji geometrycznych styków: kątowych α , β , γ oraz liniowych u , w , v (rys. 36).



Rys. 36. Imperfekcje geometryczne (kątowe i liniowe) styków doczołowych

Niedokładności powstające podczas wytwarzania styków doczołowych (wady konstrukcyjne) są przyczyną zmniejszania nośności granicznej połączeń doczołowych, powstania wstępnych montażowych sił wewnętrznych w ustroju, a także zmian prognozowanego zachowania się węzłów, które może prowadzić do geometrycznej zmienności konstrukcji.

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

Najczęściej w połączeniach stosuje się okrągłe otwory na śruby, rzadziej zaś okrągłe powiększone, owalne krótkie lub długie (rys. 8: tabl. 4). 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 obniżenie nośności w styku niesprężanym lub obniżenia nośności z warunku poślizgu w połączeniu ciernym. W przypadku śrub fundamentowych można wykonać otwory powiększone, pod warunkiem, że stosuje się podkładki o odpowiednich wymiarach i grubości. Otwory jednak w podkładkach nie powinny być większe niż otwory okrągłe.

W zakładkowych połączeniach ciernych powierzchnie przylegania części składowych złącza powinny być przed montażem odpowiednio przygotowane, w celu zapewnienia przewidywanego w dokumentacji technicznej współczynnika tarcia μ . 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 (tabl. 8). W zależności od przyjętej technologii przygotowania powierzchni uzyskuje się następujące współczynniki tarcia

- $\mu = 0,2 \div 0,3$ – po oczyszczeniu chemicznym środkami do odfuszczenia lub wyjątkowo po oczyszczeniu szczotkami drucianymi; po metalizacji natryskowej cynkiem o grubości powłoki minimum $50 \mu\text{m}$; po malowaniu farbą z proszkiem cynku,
- $\mu = 0,4 \div 0,45$ – po opaleniu płomieniem (temperatura powierzchni materiału nie może przekraczać 200°C) i czyszczeniu szczotką drucianą; po śrutowaniu cierniwem z ciętego drutu,
- $\mu = 0,45 \div 0,5$ – po śrutowaniu śrutem żeliwnym lub po piaskowaniu piaskiem krzemowym, o grubości ziaren $0,7 \div 1,2 \text{ mm}$; po metalizacji natryskowej krzemowo-cynkowej lub aluminiowej (AlMg5) o grubości powłoki $150 \div 300 \mu\text{m}$; po malowaniu powłoką krzemowo-cynkową.

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

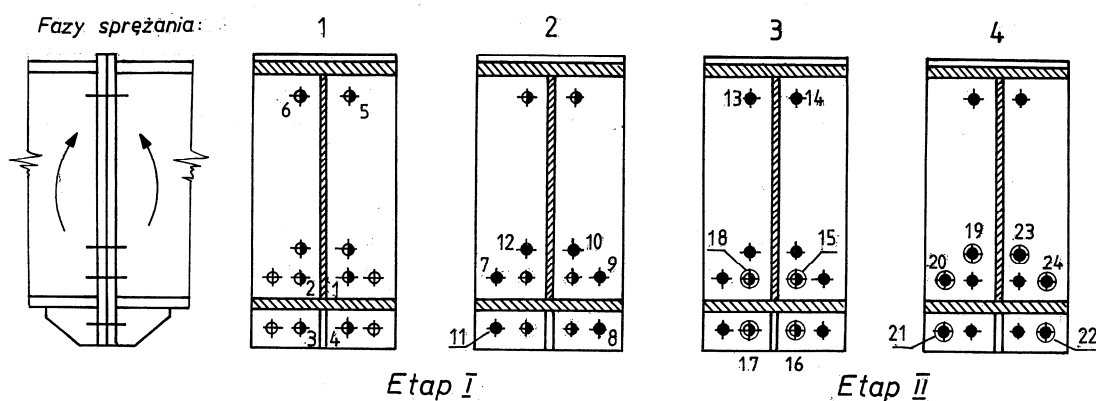
Istotnym zagadnieniem w realizacji połączeń śrubowych jest przyleganie powierzchni stykowych, szczególnie w połączeniach sprężanych. Jeśli w dokumentacji technicznej nie podano inaczej to prześwit między powierzchniami stykowymi w złączu nie powinien przekraczać: 2 mm – w połączeniach niesprężanych i 1 mm – w połączeniach sprężanych.

W połączeniach sprężanych, po założeniu śrub montażowych (wypełnia się nimi 25% otworów w styku) dodatkowo bada się szczelność styku szczelinomierzem o grubości $0,2 \text{ mm}$, który nie powinien wchodzić więcej niż na głębokość 10 mm .

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 (bez przedłużania) lub pierwszego uderzenia klucza udarowego. Śruba po dokręceniu nie powinna przesuwać się, ani wyraźnie drgać przy ostukiwaniu młotkiem kontrolnym.

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 przebiegać po uprzednim sprawdzeniu stanu śrub nakrętek i podkładek, oczyszczeniu ich w kąpieli odfuszczej i wysuszeniu. Gwinty śrub i nakrętek powleka się smarem stałym, który nie będzie penetrował do styku (pastę molibdenową MoS_2 lub smar grafitowy. Do śrub ocynkowanych zaleca się stosować pastę molibdenową.

Po założeniu śrub pomocniczych (montażowych) i sprawdzeniu szczelności styku szczelnomierzem 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. Sprężanie połączeń (zakładkowych i doczołowych) należy przeprowadzać 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 pokazano na rys. 37.



Rys. 37. Przykład kolejności dokręcania śrub sprężających w zginanym styku doczołowym

Istotnym zagadnieniem w realizacji połączeń sprężanych jest kontrola wprowadzonego naciągu śrub. Protokoły kontroli i odbioru technicznego doczołowych połączeń sprężanych są dokumentami warunkującymi przekazanie obiektu do użytku.

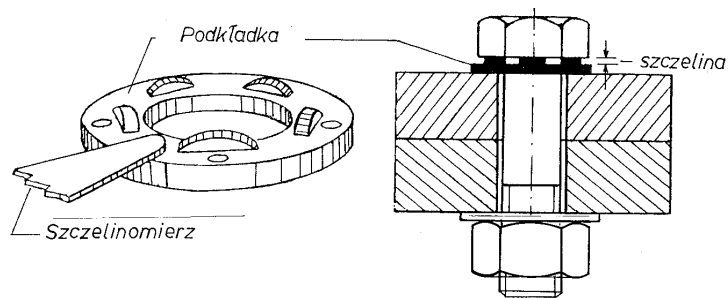
Sprężanie śrub w połączeniach może być wykonywane jedną z następujących metod:

- kontrolowanego momentu dokręcenia śrub kluczem dynamometrycznym,
- kontrolowanego kąta obrotu nakrętki,
- kombinowaną,
- bezpośrednich wskaźników napięcia.

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 pokrętką umieszczoną 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.

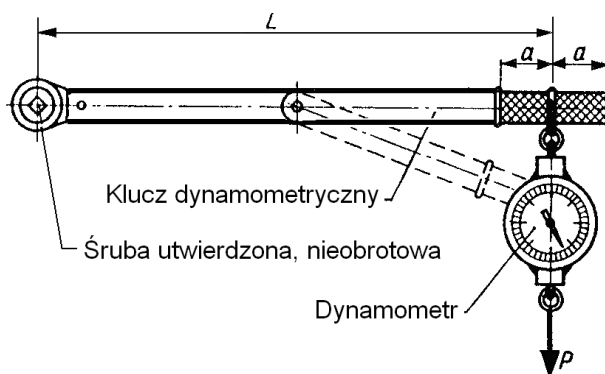
Kontrola sprężania za pomocą sprawdzenia kąta obrotu nakrętki jest mniej dokładna niż kontrola z zastosowaniem kluczy dynamometrycznych i odbywa się w następujących etapach. Wszystkie śruby w połączeniu powinny być jednakowo dokręcone „do pierwszego oporu”. Następnie należy trwale oznaczyć (w sposób łatwy do kontroli) położenie nakrętek względem gwintu śrub. Końcowe dokręcenie śrub klasy 8.8 należy wykonać przez obrót nakrętek o kąt podany w PN-En 1090-2, który zależy od całkowitej grubości złącza. W przypadku śrub klasy 10.9 stosuje się metodę kombinowaną tj. wstępne dokręcenie kluczem dynamometrycznym wszystkich śrub momentem dokręcenia o wartości 75% momentu wyznaczonego według (4.17), a następnie dokręcenie nakrętek jak dla śrub klasy 8.8.

Przykładem bezpośredniego wskaźnika napięcia śruby sprężających jest zastosowanie specjalnych podkładek pod jej łbem (rys. 38). Podczas dokręcania nakrętki wystające zgrubienia podkładki wgniatają się w gładką powierzchnię pod łbem śruby. Siłę sprężenia określa się przez pomiar szczelinierzem szczeliny między łbem i podkładką.



Rys. 38. Podkładki pod śruby sprężające umożliwiające kontrolę sprężenia

Klucze dynamometryczne stosowane do dokręcania śrub powinny mieć dokładność nie mniejszą niż $\pm 5\%$. Prawidłowość działania kluczy dynamometrycznych ręcznych należy kontrolować codziennie przed rozpoczęciem pracy (rys. 39). Klucze dynamometryczne i hydrauliczne powinny być kontrolowane po każdej zmianie momentu.



Rys. 39. Schemat uproszczonej metody sprawdzenia kluczy dynamometrycznych

Kontrola po sprężeniu złączy 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.

ZAŁĄCZNIK 1

Dr inż. WOJCIECH KAWECKI
Mgr inż. PAWEŁ KAWECKI
Mgr inż. ANDRZEJ KLIMEK
Dr inż. JAN ŁAGUNA
Biuro Inżynierskie Mostostal

Uproszczona procedura projektowania sztywnych doczołowych połączeń sprężanych na podstawie PN-EN 1993-1-8

Projektowanie połączeń, podobnie jak projektowanie samych konstrukcji stalowych, rozpoczyna się od kształtowania, a kończy na potwierdzeniu prawidłowości projektu obliczeniami. W normie PN-EN 1993-1-8 [1] i artykule [2] opisano zastosowania metody składnikowej do obliczeń doczołowych połączeń śrubowych kształtowników klasy 1. i 2., obciążonych przeważająco statycznie i zawierających tylko 2 śruby w szeregu. Podstawowym założeniem tej metody jest zdolność do plastycznej redystrybucji sił w przekrojach elementów łączonych i w samym połączeniu, umożliwiającą pełne wykorzystanie nośności poszczególnych stref połączenia. Metoda ta może być stosowana pod pewnymi warunkami również przy większej liczbie śrub w szeregu oraz w połączeniach blachownic ze środnikami klasy 3. i 4. Niniejszy artykuł ma na celu pokazanie sposobów projektowania takich połączeń, jako nominalnie sztywnych pełnonośnych i niepełnonośnych, spełniających warunki podane w 5.2.2.5 [1], lub też traktowanych jako sztywne w praktyce inżynierskiej. Te najczęściej stosowane połączenia mogą być projektowane według uproszczonej procedury obliczeniowej, przy założeniu odpowiednio grubych i usztywnionych blach czołowych. Nie ma przy tym potrzeby szczegółowego sprawdzania nośności wszystkich składników, co ma miejsce przy połączeniach podatnych i jest niezbędne w programach komputerowych. Jest jednak potrzebna znajomość rozkładu sił wewnętrznych i przestrzeganie zasad kształtowania połączeń. Uproszczoną procedurę projektowania można podzielić na następujące etapy:

I – projekt wstępny określający kategorię połączenia, usytuowanie, liczbę, średnicę i klasę śrub oraz grubość blach czołowych i ich usztywnienie, na podstawie oceny przekrojów elementów łączonych i obciążenia węzła,

II – wyznaczenie nośności połączenia śrubowego według strefy rozciąganej (od strony belki i od strony słupa); jeśli ta no-

śność jest mniejsza od wymaganej, to należy skorygować projekt i ponownie wyznaczyć nośność, aż do uzyskania nośności wymaganej; tak samo jak nośność może być weryfikowana sztywność połączenia,

III – sprawdzenie nośności strefy ściskanej i ewentualne jej wzmocnienie,

IV – sprawdzenie nośności panelu środnika słupa na ścinanie i ewentualne jego wzmocnienie,

V – zaprojektowanie śrub na siłę poprzeczną,

VI – zaprojektowanie złączy spawanych.

Etapy III, IV i V występują zależnie od rodzaju połączenia.

Etap I – projekt wstępny połączenia

• **Ustalenie rodzaju i kategorii połączenia.** Nominalnie sztywne połączenia doczołowe mają zdolność do obrotu, umożliwiającą projektowanie ich jako pełnonośnych i niepełnonośnych, w ustrojach obliczanych z zastosowaniem analizy sprężystej. Przy stosowaniu analizy sprężysto-plastycznej lub plastycznej konstrukcji projektuje się połączenia pełnonośne z odpowiednim zabezpieczeniem przed utworzeniem się przegubu plastycznego w miejscu połączenia. Śrubowe połączenia doczołowe kategorii D (niesprężane) są stosowane przy obciążeniach przeważająco statycznych, gdy nie zachodzi potrzeba uzyskania znacznej sztywności węzłów. Doczołowe połączenia sprężane kategorii E projektuje się w celu zapewnienia sztywności węzłów oraz przy obciążeniach wielokrotnie zmiennych. Przy tych obciążeniach, stanem granicznym śrub w połączeniu jest rozwarcie styku sprężonego, po którym śruby są obciążone pełnym zakresem zmienności naprężeń. W normie [3] nośność śruby ze względu na rozwarcie styku określono jako 60% nośności przy obciążeniu statycznym. Zachowując ten poziom naprężeń i przyjmując jako podstawę obliczeniową wartość siły sprężenia $F_{p,Cd}$, można nośność obliczeniową śru-

by w styku sprężonym przy obciążeniu wielokrotnie zmiennym określić jako wartość $0,6 F_{p,Cd}$. Do sprężania są używane śruby klasy 8.8 lub 10.9 (śruby klasy 12.9 nie są dopuszczone do stosowania w budownictwie stalowym).

• **Wstępne zaprojektowanie śrub w połączeniu.** Przy ustalaniu usytuowania, liczby, średnicy i klasy wytrzymałości śrub w strefie rozciąganej przyjmuje się następujące założenia:

- usytuowanie śrub w połączeniu powinno być zgodne z rozkładem sił wewnętrznych w przekrojach elementów łączonych,
- nośność śrub szeregów przylegających do pasa rozciąganego w połączeniach pełnoośnionych powinna być nie mniejsza niż nośność tego pasa,
- nośność śrub szeregów przylegających do ścianki środka lub żebra rozciąganego powinna być nie mniejsza niż nośność tej ścianki o długości efektywnej,
- w połączeniach niepełnoośnionych można projektować śruby na największe wyiężenie łączonych ścianek, trzeba jednak zapewnić odpowiednie wykonanie i dopasowanie elementów podczas montażu, aby śruby nie zostały przeciążone z powodu zakłócenia rozkładu sił wewnętrznych przez odchyłki wykonawcze,
- rozstaw skrajnych śrub w szeregach przylegających do pasa nie powinien być większy niż szerokość tego pasa (w celu uniknięcia nadmiernej koncentracji naprężeń w spoinach na brzegach pasa),
- odległość osi śruby od lica ścianki zaleca się przyjmować nie mniejszą niż $1,5d$ i nie większą niż $2,0d$ (gdzie d – średnica nominalna śruby),
- do połączeń sprężanych kategorii E stosuje się śruby klasy 8.8 i 10.9; śruby te, wobec małej zdolności do odkształcenia, nie powinny być stosowane w sztywnych połączeniach niesprężanych kategorii D.

• **Określenie grubości blach czołowych.** Grubość blach czołowych t_p w połączeniach nominalnie sztywnych sprężanych śrubami klasy 10.9 można przyjmować na podstawie katalogu [4] przy dwóch szeregach śrub przylegających do pasa rozciąganego (por. rys. 3b, 4b, 4c) $t_p = 1,0d$ – gdy w szeregu są dwie śruby oraz $t_p = 1,25d$ – gdy w szeregu są cztery śruby. W połączeniach, w których śruby są usytuowane tylko między pasami (por. rys. 4a), grubość blach przyjmuje się $t_p = 1,5d$ przy dwóch i czterech śrubach w szeregu. Gatunek stali blach czołowych przyjmuje się taki sam, jak w elementach łączonych. W połączeniach na śruby klasy niższej niż 10.9 można przyjmować grubości blach czołowych t_p wyznaczone ze wzoru (1), decydując się na zmniejszenie sztywności połączeń proporcjonalnie do zmniejszenia ich nośności

$$t_{pr} = t_p \sqrt[3]{\frac{f_{ub}}{1000}} \quad (1)$$

gdzie:

t_p – grubość blachy przy śrubach 10.9,
 f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie śruby.

W połączeniach obciążonych wielokrotnie zmiennie grubość blach czołowych przyjmuje się taką, aby w połączeniu nie występował efekt dźwigni. Blachy zginane dwukierunkowo powinny mieć wtedy grubość nie mniejszą niż $t_p = 1,0d$, z zachowaniem zaleconych wyżej odległości śrub od ścianek. Najmniejszą grubość blachy zginanej w jednym kierunku $t_{p,min}$ można wyznaczyć na podstawie wzorów podanych w tabl. 6.2 [1], przy założeniu zniszczenia śrub wraz z uplastycznieniem blachy. Powinna ona wynosić

$$2 \sqrt{\frac{mF_{t,Rd}}{l_{eff} f_{y,p}}} \quad (2)$$

gdzie:

$F_{t,Rd}$ – nośność obliczeniowa śruby na rozciąganie,

m – odległość osi śruby od brzegu spoiny; według (5) zamiast wartości m można podstawić we wzorze (2) wartość $(m - 0,5d)$,
 l_{eff} – długość efektywna blachy,
 $f_{y,p}$ – granica plastyczności stali blachy czołowej.

Etap II – wyznaczenie nośności połączenia według strefy rozciąganej

• **Połączenia elementów rozciąganych osiowo.** Połączenie rozciągane na 8 śrub z usztywnieniem blach czołowych dwoma żebrami pokazano na rys. 1a. Modelem tego połączenia może być króciec krzyżowy „w” z blachą zginaną dwukierunkowo i 2 króćce teowe „z” z blachami zginanymi w jednym kierunku. Grubość blach czołowych przyjmuje się w tym przypadku $t_p = 1,25d$. Oznaczenia odległości śrub w króćcach podano na rys. 2. Śruby osadzone w blachach zginanych jednokierunkowo są dodatkowo obciążone siłami efektu dźwigni, ale wobec większej podatności blachy są mniej wyiężone niż śruby osadzone we fragmentach blach zginanych dwukierunkowo. Nośność szeregu dwóch śrub w połączeniu przyjmuje się jako wartość mniejszą z obliczeniowej nośności śrub na rozciąganie i nośności blachy czołowej na zginanie, wyznaczonych z wzorów podanych w tabl. 6.2 [1]

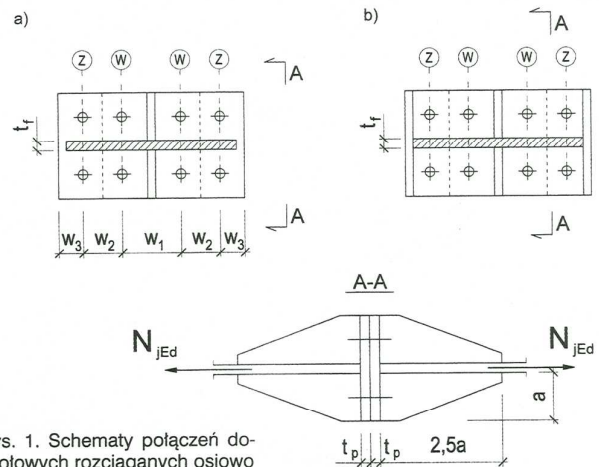
$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,Rd} + 2nF_{t,Rd}}{m+n} \quad (3)$$

$$F_{T,3,Rd} = 2F_{t,Rd} \quad (4)$$

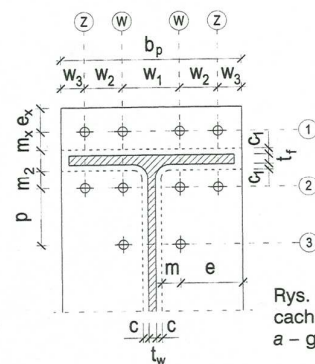
gdzie:

$M_{pl,Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff,2} t_p^2 f_{y,p} / \gamma_{M0}$, $n = e_{min}$ – odległość osi śruby od swobodnego brzegu blachy, lecz $n \leq 1,25m$,
 $F_{t,Rd}$ – obliczeniowa nośność śruby na rozciąganie,
 l_{eff} – długość efektywna blachy czołowej lub uźebrowanego pasa słupa według tabl. 1.

Długości efektywne pasów słupów nieuźebrowanych w węzłach z belkami, przy dwóch śrubach w szeregu, podano



Rys. 1. Schematy połączeń do-czołowych rozciąganych osiowo



w tabl. 2. Wartości n przy wyznaczaniu nośności szeregów śrub według wzoru (3) przyjmuje się w szeregu 1: $n = \min(1,25m_x, e_x)$, w króćcu teowym 2z: $n = 1,25m_z$, w króćcu krzyżowym 2w: $n = \min(1,25m, w_2)$, w szeregu 3 i 4: $n = \min(1,25m, e)$,

Rys. 2. Oznaczenia odległości śrub w króćcach ($c = 0,8a\sqrt{2} = 1,12a$ lub $c = 0,8r$, gdzie a – grubość spoiny pachwinowej, r – promień wyokrąglenia)

Tabela 1
Długości efektywne blachy czołowej i uźebrowanego pasa słupa $l_{eff}^{(1)}$

Szereg	Króciec	Numer szeregu	Króciec wewnętrzny (w) w styku na 4 lub na 2 śruby w szeregu ⁽²⁾		Króciec teowy zewnętrzny (z) w styku na 4 śruby w szeregu
			szeregi nr 1+2 lub nr 2	szeregi śrub nr 1+2+3+i lub nr 2+3+i	
Na zewnątrz pasa (żebra) rozciągane	teowy	1	2 śruby w szeregu $0,5b_p \leq 5d$ 4 śruby w szeregu $0,25b_p \leq 5d$		$0,25b_p \leq 5d$
	krzyżowy		$am^{(3,4)}$		$0,5w_2+w_3 \leq 5d$
Od wewnątrz pasa (żebra) rozciągane	krzyżowy	2	$am^{(3,4)}$	$0,5p+\alpha m^{(3)} - (2m+0,625e)$	–
	teowy		–	–	$0,5w_2+w_3 \leq 5d$
Pośredni przy środkiku	teowy	3	–	p	–
Przy żebrze pośrednim ⁽⁵⁾	krzyżowy	3	–	$0,5p+am^{(3)} - (2m+0,625e)$	–
Skrajny przy środkiku	teowy	4	–	$0,5p+2m+0,625e$	–

¹⁾ Oznaczenia pokazano na rys. 2.
²⁾ Przyjęto $e \geq 1,5d$, $2d \geq m \geq 1,3d$, $w_1 \geq 4d$, $w_2 \geq 2,5d$, $6d \geq p \geq 3d$, w króćcach teowych $l_{eff} \leq 5d$, przy braku brzożu swobodnego $e = 1,25m$. W innych przypadkach należy sprawdzić warunki według tabl. 6.6 [1].
³⁾ α – według rys. 6.11 [1].
⁴⁾ Gdy $m \leq 2d$, $n = \min(e, 1,25m)$, $e \geq 1,5d$ (w szeregu 2 śrub), oraz $e \geq 1,5d$, $w_2 \geq 2,5d$ (w szeregu 4 śrub), można przyjmować $F_{T,Rd(w)} = 2F_{T,Rd}$ w przypadku śrub klasy 10.9 i blach ze stali S235 o grubości $t_p \geq 1,25d$ lub blach ze stali S355 o grubości $t_p \geq d$.
⁵⁾ Połączenie żebra pośredniego ze środkikiem powinno mieć nośność nie mniejszą niż wyznaczona w przypadku długości $l_{eff} = am - (2m + 0,625e + 0,5p)$.

Tabela 2
Długości efektywne nieuźebrowanego pasa słupa l_{eff}

Szereg	Numer szeregu	Króciec teowy na 2 śruby w szeregu ⁽¹⁾	
		szeregi nr 1+2 lub nr 2	szeregi śrub nr 1+2+3+i lub nr 2+3+i
Na zewnątrz pasa belki	1	$e_x+2m+0,626e^{(2)}$	
Od wewnątrz pasa belki	2	$0,5p+2m+0,625e$	p
Pośredni przy środkiku	3	–	p
Skrajny przy środkiku	4	–	$0,5p+2m+0,625e$

¹⁾ Przyjęto $e \geq 1,5d$, $2d \geq m \geq 1,3d$, $w_1 \geq 4d$, $6d \geq p \geq 3d$. W innych przypadkach należy sprawdzić warunki według tabl. 6.4 [1].
²⁾ Długość przy zakończeniu słuca (gdy słuca jest kontynuowany, długość jak w szeregu nr 2 w odniesieniu do szeregów śrub nr 1+2).

Nośność obliczeniową połączenia według rys. 1a zawierającego 4 śruby (w) w króćcu krzyżowym i 4 śruby (z) w króćcach teowych wynosi: $N_{t,Rd} = 2(F_{T,Rd(w)} + F_{T,Rd(z)})$.

Model połączenia na 8 śrub z czterema żebrami jak na rys. 1b tworzą króćce krzyżowe. Grubość blach czołowych, ze względu na podparcie na dwóch krawędziach, można w tym przypadku przyjąć $t_p = 1,0d$. Nośność połączenia na osiem śrub w jednakowych króćcach krzyżowych $N_{t,Rd} = 4F_{T,Rd(w)}$. Modelując pokazane na rys. 3 styki rozciąganych osiowo elementów o przekrojach dwuteowych klasy 1. lub 2., można również wyodrębnić śruby osadzone w króćcach krzyżowych (rys. 3a śruby 2w; rys. 3b śruby 1w i 2w) oraz śruby osadzone w króćcach teowych (rys. 3a śruby 1z, 1w, 2z, 3w; rys. 3b śruby 1z, 2z, 3w). Gdy na rys. 3a usunie się szeregi 1, pozostanie schemat połączenia, w którym śruby znajdują się tylko pomiędzy pasami dwuteownika. Grubości blach czołowych przyjmuje się $t_p = 1,25d$ w przypadku połączeń 3a i 3b oraz $t_p = 1,5d$ w przypadku braku szeregów 1. Nośność połączenia oblicza się jako sumę

nośności połączeń króćców krzyżowych i teowych. Przykłady obliczeń połączeń rozciąganych tą metodą podano w [5]. Bardzo istotnym warunkiem zapobiegającym przedwczesnemu zerwaniu śrub w połączeniu pełnoosiowym jest wymaganie, aby nośność szeregów śrub przylegających do pasa rozciąganego (traktowanych oddzielnie) nie była mniejsza od jego nośności na rozciąganie, a w połączeniu niepełnoosiowym – od największej siły obliczeniowej, która może w nim wystąpić

$$\sum_1^2 F_{T,Rd} \geq \frac{b_f t_f f_{yf}}{\gamma_{M0}} \quad (5)$$

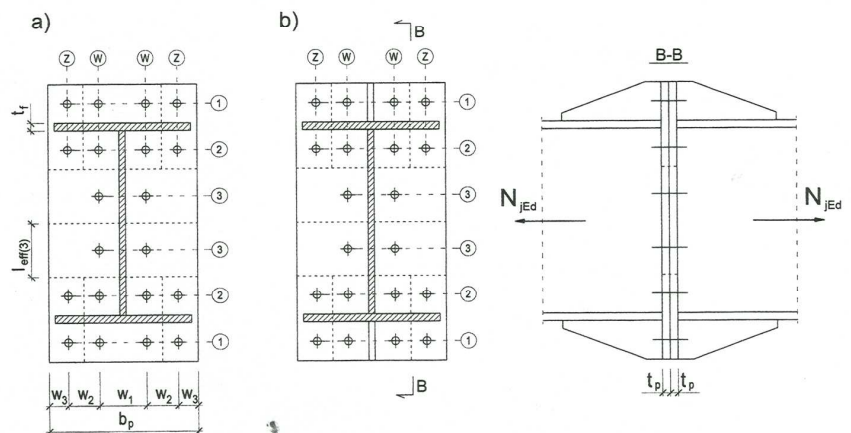
gdzie:

b_f , t_f – szerokość i grubość pasa,
 f_{yf} – granica plastyczności stali w pasie;
w połączeniach niepełnoosiowych można zamiast niej podstawić największe naprężenie obliczeniowe.

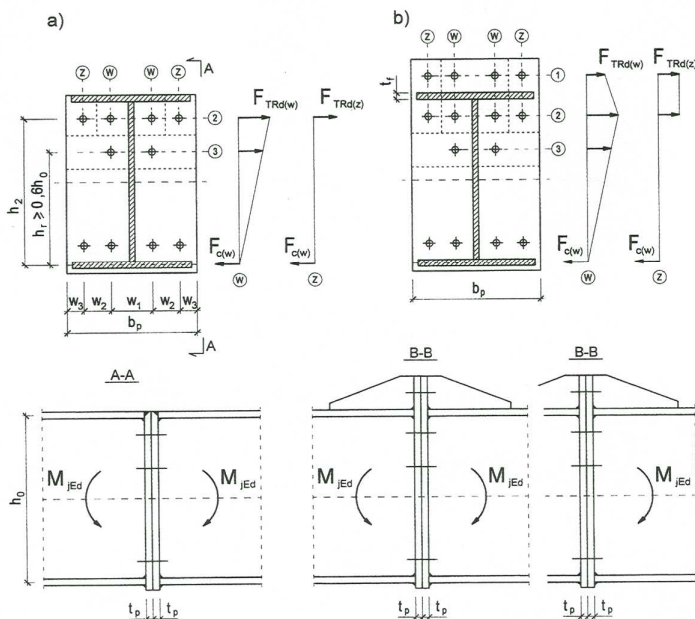
• **Styki belek o przekrojach dwuteowych klasy 1. i 2.** Na rysunku 4 poka-

zono schematy połączeń belek zginanych o przekrojach klasy 1. lub 2. z czterema śrubami w szeregach przylegających do pasa rozciąganego. Połączenia te można modelować według [6], analogicznie jak połączenia zginane z dwoma śrubami w szeregu, dodając udział śrub przylegających do pasa w rzędach „z”. Plastyczna redystrybucja sił wewnętrznych w połączeniu zginanym jest ograniczona nie tylko właściwościami przekrojów elementów łączonych i samego połączenia, ale również zdolnością śrub do wydłużenia. Aby zabezpieczyć się przed przedwczesnym zerwaniem śrub, w połączeniu sprężonym z relatywnie grubymi blachami czołowymi na śruby o małej średnicy jest konieczne odpowiednie ograniczenie grubości blach czołowych lub obliczeniowego wyteżenia śrub w szeregach przylegających tylko do środkika belki. Z tego powodu, gdy nośność szeregu dwóch śrub jest większa niż $1,9 F_{t,Rd}$, wprowadzono w 6.2.7.2 (9) [1] ograniczenie nośności szeregów śrub przylegających do środkika i położonych bliżej środka obrotu, w sposób liniowo proporcjonalny do odległości od tego środka (por. rys. 4).

W normie [3] ograniczono liczbę szeregów śrub do 3 oraz ich odległości od środka obrotu do wartości nie mniejszej niż $0,6h_0$ (h_0 – odległość między osiami pasów dwuteownika). Przyjmowanie rozkładu sił wewnętrznych liniowo proporcjonalnego do odległości od środka obrotu zaleca również norma [7] przy



Rys. 3. Schematy połączeń doczołowych prętów dwuteowych rozciąganych osiowo



Rys. 4. Schematy połączeń doczołowych belek o przekrojach klasy 1. i 2.

ju elementu. Warunek ten jest często trudny do spełnienia i dlatego wtedy przegub plastyczny sytuuje się w odległości około $1,5h$ od połączenia (gdzie h – wysokość przekroju belki). Połączenie projektuje się jako pełnonośne na przekrój odpowiednio wzmocniony, np. przez poszerzenie pasów, lub jako pełnonośne na przekrój niewzmocniony, po zwężeniu pasów belki w odległości ok. $1,5h$ od styku śrubowego.

obciążeniu wielokrotnie zmiennym. Wydaje się uzasadnione przestrzeganie minimalnej odległości śrub od środka obrotu według normy [3] w zginanych połączeniach doczołowych kategorii E. Aby zapobiec przedwczesnemu zerwaniu śrub, nośność szeregów śrub przylegających do pasa rozciąganego powinna także spełniać warunek opisany wzorem (5). Strefę rozciąganą połączenia zginanego, pokazanego na rys. 4a, może modelować króciec krzyżowy ze śrubami 2w oraz króciec teowy ze śrubami 2z i 3w. Grubość blachy czołowej przyjmuje się $1,5d$. Nośność połączenia na zginanie można wyznaczyć z wzoru

$$M_{j,Rd} = (F_{T,Rd(2w)} + F_{T,Rd(2z)})h_2 + F_{T,Rd(3)}h_3, \quad (6)$$

przy czym $F_{T,Rd(3)} = \min \left[\frac{F_{T,Rd(2w)}h_3}{h_2}, \frac{l_{eff(3)}t_w f_{yw}}{\gamma_{M0}} \right]$

gdzie:

$F_{T,Rd(2w)}, F_{T,Rd(2z)}, F_{T,Rd(3)}$ – nośności szeregów śrub modelowanych króćcami,

h_2, h_3 – odległości szeregów śrub od środka obrotu,

$l_{eff(3)}$ – długość efektywna blachy czołowej szeregu 3,

t_w – grubość środnika,

f_{yw} – granica plastyczności stali w środniku.

Modelem strefy rozciąganego połączenia według rys. 4b jest króciec krzyżowy ze śrubami 2w i króciec teowy ze śrubami 1w, 1z, 2z i 3w. Grubość blachy czołowej przyjmuje się $1,25d$. Nośność połączenia na zginanie można wyznaczyć z wzoru

$$M_{j,Rd} = (F_{T,Rd(1w)} + F_{T,Rd(1z)} + F_{T,Rd(2w)} + F_{T,Rd(2z)})h_2 + F_{T,Rd(3)}h_3, \quad (7)$$

przy czym $F_{T,Rd(3)} = \min \left[\frac{F_{T,Rd(2w)}h_3}{h_2}, \frac{l_{eff(3)}t_w f_{yw}}{\gamma_{M0}} \right]$

Strefę rozciąganą połączenia z wystającą blachą czołową usztywnioną zębem modelują króćce krzyżowe ze śrubami 1w i 2w oraz króćce teowe ze śrubami 1z, 2z i 3w. Grubość blachy czołowej przyjmuje się $1,25d$. Nośność połączenia na zginanie można wyznaczyć z wzoru (7).

Założenie rozkładu sił wewnętrznych liniowo proporcjonalnego do odległości od środka obrotu przy obciążeniu wielokrotnie zmiennym należy przyjmować od szeregu śrub najbardziej oddalonego od środka obrotu.

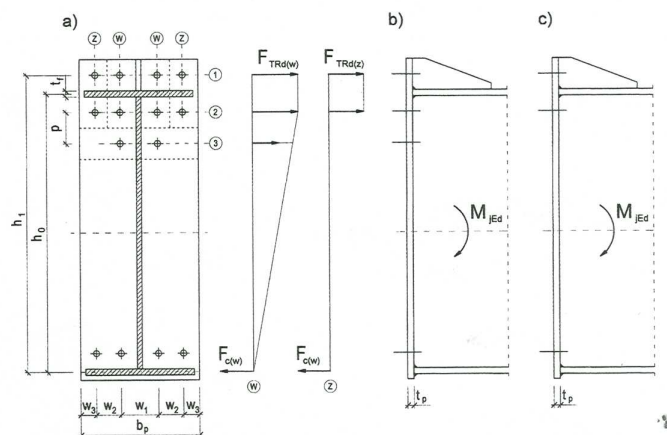
Jeżeli połączenie znajduje się w miejscu potencjalnego przegubu plastycznego, przyjmuje się zwykle, że jego nośność powinna być większa o 20% od nośności plastycznej przekro-

• **Styki blachownic o przekrojach klasy 3. i 4.**

Rozkład sił wewnętrznych w śrubowych połączeniach doczołowych blachownic o przekrojach klasy 3. lub 4. jest w znacznym stopniu zakłócany przez imperfekcje wykonawcze i błonowe oddziaływania środnika. Z tego powodu nośność na zginanie styków blachownic ze środnikami klasy 4. (rys. 5c) wyznacza się tylko na podstawie nośności szeregów śrub przylegających do pasa rozciąganego

$$M_{j,Rd} = (F_{T,Rd(1w)} + F_{T,Rd(1z)} + F_{T,Rd(2w)} + F_{T,Rd(2z)})h_0. \quad (8)$$

Grubość blachy czołowej przyjmuje się $1,25d$. W przypadku blachownic ze środnikami klasy 3. (rys. 5b) można uwzględnić również jeden szereg śrub przylegających tylko do środnika i obliczać nośność na zginanie według wzoru (6) lub (7). W blachownicy o smukłym środniku rozkład sił wewnętrznych w strefie połączenia śrubowego można poprawić, projektując dodatkowe żebra pionowe blisko blach czołowych. Zabieg ten zmienia smukłość ścianki środnika w strefie połączenia z blachą czołową oraz chroni połączenie śrubowe przed oddziaływaniami w stanie nadkrytycznym.



Rys. 5. Schematy połączeń doczołowych blachownic o przekrojach klasy 3. i 4.

• **Węzły belek ze słupami.** W przypadku stosowania uproszczonej metody obliczeń do połączeń sztywnych belek ze słupami, aby zapewnić sztywność połączenia od strony słupa, należy stosować żebra o przekroju takim, jak pasy belek oraz ewentualnie nakładki wzmocniające pasy słupów w szere-

gach śrub strefy rozciąganej. Nakładki te powinny zapewniać nośność szeregów śrub od strony słupa nie mniejszą niż nośność od strony belki. Wzmocnienie panelu środknika nakładką lub żebrami ukośnymi stosuje się zwykle w węzłach skrajnych, w przypadku zbyt małej nośności na ścinanie. Sprawdzenie nośności połączenia od strony słupa powinno uwzględniać siły wewnętrzne w słupie.

Etapy III, IV – sprawdzenie strefy ściskanej i panelu środknika słupa

Nośność ściskanej strefy sprawdza się, porównując sumę obliczeniowych nośności szeregów śrub z siłą w pasie wynikającą z podzielenia nośności przekroju belki przez odległość między osiami pasów

$$\sum_1 F_{T,Rd} \leq \frac{M_{c,Rd}}{h_0} \quad (9)$$

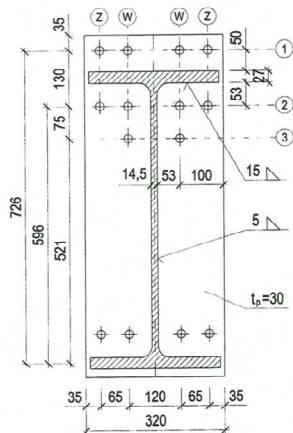
Sprawdzenie panelu środknika słupa na ścinanie wykonuje się według 6.2.6.1[1].

Etap V – zaprojektowanie śrub na siłę poprzeczną

Przyjmuje się zwykle założenie, że siłę poprzeczną w połączeniu przenoszą śruby nieuwzględniane w obliczeniach nośności na zginanie, albo projektuje się podparcie blachy czołowej przy licu słupa. Oprócz śrub uwzględnianych w obliczeniach nośności na zginanie stosuje się dodatkowe śruby w celu uzyskania przylegania blach w styku. Rozstaw tych śrub ustala się zależnie od warunków podanych w tabl. 3.3 normy [1]. W razie konieczności należy stosować redukcję nośności śrub, uwzględniając rozciąganie i ścinanie trzpienia.

Etap VI – zaprojektowanie złączy spawanych

Złącza spawane blachy czołowej z pasem rozciągającym i środknikiem powinny być projektowane na pełną nośność przekroju. Grubość dwustronnych spoin pachwinowych spełniająca ten warunek wynosi 0,5*t* przy łączeniu stali S235 oraz 0,6*t* przy łączeniu stali S355 (gdzie *t* – grubość pasa lub środknika). Na ogół nie stosuje się spoin pachwinowych grubszych niż 10 mm. Grubsze spoiny pachwinowe zastępuje się spoinami czołowymi lub spoiny pachwinowe uzupełnia się spoinami czołowymi z niepełnym przetopem. W węzłach potencjalnych przegubów plastycznych i obrotów spoiny powinny być zdolne, według 6.2.3 (5) [1], do przeniesienia momentu plastycznego przekroju elementu łączonego oraz obliczeniowej nośności węzła (połączenia) na zginanie zwiększonej o 40% w przypadku ram niewrażliwych na efekty drugiego rzędu (spełniających warunek (5.1) z PN-EN 1993-1-1) i o 70% w pozostałych przypadkach.



Rys. 6. Doczołowe połączenie sprężane belki HEA700

Przykład liczbowy

Porównać nośność $M_{j,Rd} = 1081 \text{ kN}\cdot\text{m}$ według katalogu [4] doczołowego styku sprężonego dwuteowej belki zginanej (rys. 6) o przekroju HEA700 ze stali S235 na 8 śrub M24 klasy 10.9 z nośnością obliczoną według procedury uproszczonej. Połączenie jest niepełno-nośne; nośność przekroju belki wynosi $M_{b,Rd} = 1466 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Nośność śruby na rozciąganie $N_{t,Rd} = 254 \text{ kN}$. Grubość blachy czołowej $t_p = 1,25d = 30 \text{ mm}$.

Długości efektywne blachy czołowej:

$$m_{1x} = 50 - 1,12 \cdot 15 = 33,2 \text{ mm}; n = e_1 = 35 \text{ mm};$$

$$l_{\text{eff}(1)} = 0,25b_p = 0,25 \cdot 320 = 80 \text{ mm} < 5d,$$

$$m_{2z} = 53 - 1,12 \cdot 15 = 36,2 \text{ mm};$$

$$n = e_{2z} = 1,25 \cdot 36,2 = 45,3 \text{ mm}; p = 75 \text{ mm} > 3d;$$

$$l_{\text{eff}(2z)} = 0,5w_2 + w_3 = 0,5 \cdot 65 + 35 = 67,5 \text{ mm},$$

$$m_{2(2w)} = m_{2z} = 36,2 \text{ mm}; m_{(2w)} = 53 - 1,12 \cdot 5 = 47,4 \text{ mm};$$

$$e_{2w} = w_2 = 65 \text{ mm}, n = 1,25m_3 = 1,25 \cdot 47,4 = 59,3 \text{ mm},$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = \frac{47,4}{47,4+65} = 0,42, \lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = \frac{36,2}{47,4+65} = 0,32; \text{ z rys.}$$

$$6.11[1] \alpha = 6,5.$$

– osobno $l_{\text{eff}(2w)} = \alpha m = 6,5 \cdot 47,4 = 308 \text{ mm},$
 – w grupie $l_{\text{eff}(2w)} = 0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) = 0,5 \cdot 75 + 6,5 \cdot 47,5 - (2 \cdot 47,5 + 0,625 \cdot 65) = 210 \text{ mm},$

$$m_3 = m_{(2w)} = 47,4 \text{ mm}; e_3 = 100 \text{ mm},$$

$$n = 1,25m_3 = 1,25 \cdot 47,4 = 59,3 \text{ mm}, l_{\text{eff}(3)} = 0,5p + 2m + 0,625e = 0,5 \cdot 75 + 2 \cdot 47,4 + 0,625 \cdot 100 = 195 \text{ mm}.$$

Nośności obliczeniowe szeregów śrub według wzoru (3):

– szereg 1

$$M_{pl,2,Rd(1)} = 0,25 \Sigma l_{\text{eff},1} t_p^2 f_y / \gamma_{M0} =$$

$$= 0,25 \cdot 2 \cdot 80 \cdot 30^2 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 8,46 \text{ kN}\cdot\text{m},$$

$$F_{T,2,Rd(1)} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \Sigma F_{t,Rd}}{m+n} = \frac{2 \cdot 8,46 \cdot 10^3 + 35 \cdot 4 \cdot 254}{33,2 + 35} = 770 \text{ kN},$$

– szereg 2

$$M_{pl,2,Rd,2z} = 0,25 \Sigma l_{\text{eff},1} t_p^2 f_y / \gamma_{M0} =$$

$$= 0,25 \cdot 67,5 \cdot 30^2 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 3,60 \text{ kN}\cdot\text{m},$$

$$M_{pl,2,Rd,2w} = 0,25 \Sigma l_{\text{eff},1} t_p^2 f_y / \gamma_{M0} =$$

$$= 0,25 \cdot 308 \cdot 30^2 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 16,23 \text{ kN}\cdot\text{m},$$

$$M_{pl,2,Rd,2w} = 0,25 \Sigma l_{\text{eff},1} t_p^2 f_y / \gamma_{M0} =$$

$$= 0,25 \cdot 210 \cdot 30^2 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 11,07 \text{ kN}\cdot\text{m},$$

$$F_{T,2,Rd(2z)} = \frac{2 \cdot 3,60 \cdot 10^3 + 45,3 \cdot 2 \cdot 254}{36,2 + 45,3} = 370 \text{ kN},$$

$$F_{T,2,Rd(2w)} = \frac{2 \cdot 16,23 \cdot 10^3 + 59,3 \cdot 2 \cdot 254}{47,4 + 59,3} = 586 \text{ kN} > 2 \cdot 254 = 508 \text{ kN},$$

$$F_{T,2,Rd(2w)} = \frac{2 \cdot 11,07 \cdot 10^3 + 59,3 \cdot 2 \cdot 254}{47,4 + 59,3} = 490 \text{ kN} > 1,9 \cdot 254 = 483 \text{ kN},$$

– szereg 3

$$M_{pl,2,Rd,3} = 0,25 \Sigma l_{\text{eff},1} t_p^2 f_y / \gamma_{M0} =$$

$$= 0,25 \cdot 195 \cdot 30^2 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 10,31 \text{ kN}\cdot\text{m},$$

$$F_{T,2,Rd(3)} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \Sigma F_{t,Rd}}{m+n} = \frac{2 \cdot 10,31 \cdot 10^3 + 59,3 \cdot 2 \cdot 254}{47,4 + 59,3} = 475 \text{ kN}.$$

Sprawdzenie warunków do wzoru (7):

$$F_{tw,Rd(3)} = l_{\text{eff}(3)} t_w f_{yw} =$$

$$= 195 \cdot 14,5 \cdot 235 \cdot 10^{-3} = 664 \text{ kN} > 475 \text{ kN},$$

$$F_{tw,Rd(3)} = \frac{F_{T,2,Rd(2w)} h_3}{h_2} = \frac{490 \cdot 0,521}{0,596} = 428 \text{ kN} < 475 \text{ kN}.$$

Podana według [4] na rys. 6 grubość spoin łączących środknik (5 mm) powinna być w przypadku zastosowania szeregu 3 zastąpiona grubością $0,5t_w$.

Nośności obliczeniowa połączenia według wzoru (7):

– z dwoma szeregami śrub $M_{j,Rd} = 770 \cdot 0,726 + (508 + 370)0,596 = 1082 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (uzyskany wynik jest zgodny z nośnością podaną w katalogu [4]),

– z trzema szeregami śrub $M_{j,Rd} = 770 \cdot 0,726 + (490 + 370)0,596 + 428 \cdot 0,521 = 1294 \text{ kN}\cdot\text{m}$.

Sprawdzenie warunku według wzoru (5)

$$\sum_1^2 F_{T,Rd} = 770 + 508 + 370 = 1648 \text{ kN} > \frac{b_t t_f f_{yf} h_0 M_{j,Rd}}{\gamma_{M0} h M_{b,Rd}} = \frac{300 \cdot 27 \cdot 235 \cdot 10^{-6} \cdot 663 \cdot 1294}{690 \cdot 1466} = 1614 \text{ kN}.$$

Po dodaniu czwartego szeregu śrub warunek (5) nie będzie spełniony. Połączenie pełnonośne można więc uzyskać zwiększając średnicę śrub.

Uwagi końcowe

W trakcie oceny metody i wyników obliczeń nasuwają się niżej podane wątpliwości.

1. Nośność króćca teowego skrajnego przy środniku, wyznaczana na podstawie długości efektywnej dotyczącej szeregu 4 (por. tabl. 1) może osiągnąć wartość nadmierną. W podanym przykładzie obliczeniowym wystarczy zmniejszyć grubość blachy o 1 mm, aby we wszystkich szeregach został spełniony warunek $F_{T,Rd,2w} < 1,9F_{t,Rd}$. Przesłanie wtedy obowiązywać liniowa redukcja nośności szeregów śrub, co pozwala zaprojektować według [1] połączenie pełnonośne o sześciu szeregach śrub, które nigdy tej nośności nie osiągnie.

2. Kryteria dotyczące pasa uźebrowanego słupa powinny być takie same, jak w przypadku blachy czołowej, a więc warunki dotyczące skrajnego szeregu w pobliżu żebra $e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$ oraz innego skrajnego szeregu $2e_1 + p$; $e_1 + 0,5p$ podane w tabl. 6.5 [1] nie wydają się uzasadnione.

Nośność szeregów śrub w metodzie składnikowej jest oceniana na podstawie modeli plastycznego zniszczenia blachy czołowej, z korektą wynikającą z charakterystyki przekroju ścianek. Dodatkowa korekta tych nośności według rozkładu li-

niowego jest zabiegiem sztucznym i została wprowadzona wobec pominięcia wpływu charakterystyki przekroju elementu na rozkład sił wewnętrznych w strefie przylegającej do połączenia. Zastosowane korekty nie zapewniają jednak, zdaniem autorów, właściwego bezpieczeństwa śrub we wszystkich przypadkach. Metoda składnikowa nie pozwala jeszcze na wyznaczenie, z zadowalającą dokładnością, stanu granicznego dowolnego śrubowego połączenia doczołowego. W przedstawionej metodzie uproszczonej wprowadzono więc dodatkowe ograniczenia dotyczące liczby szeregów śrub oraz ich nośności. Metoda ogólna wymaga uzupełnienia zaleceniami projektowymi. Rozwinięcie tego tematu wykracza poza ramy artykułu. Sprężysto-plastyczne analizy komputerowe modeli połączeń i badania doświadczalne powinny umożliwić dalsze uściślenie i korekty metody składnikowej.

Na koniec warto porównać uzyskane w przykładzie wyniki z bardzo prostym obliczeniem nośności połączenia przy zastosowaniu współczynników rozdziału według tabl. 17 [3] $\omega_1 = 0,7$, $\omega_2 = 0,8$, $\omega_3 = 0,8$:

– przy dwóch szeregach śrub $M_{j,Rd} = 4 \cdot 254 (0,7 \cdot 0,726 + 0,8 \cdot 0,596) = 1000 \text{ kN}\cdot\text{m}$,

– przy trzech szeregach śrub $M_{j,Rd} = 4 \cdot 254 (0,7 \cdot 0,726 + 0,8 \cdot 0,596) + 2 \cdot 254 \cdot 0,8 \cdot 0,521 = 1211 \text{ kN}\cdot\text{m}$.

PIŚMIENICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] PN-EN 1993-1-8 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [2] Kozłowski A., Pisarek Z., Wierzbicki S.: Projektowanie doczołowych połączeń śrubowych według PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8. „Inżynieria i Budownictwo”, 4/2009.
- [3] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [4] Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau Band 2; 2. Auflage; Deutscher Stahlbau Verband DSTV 2002.
- [5] Bródka J., Kozłowski A.: Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. Tom 1. PWT, 2009.
- [6] Design of Structural Connections to Eurocode 3 (FAQ) 6.5 Yield Line Patterns for End Plate Connection With Four Bolts in a Row. BRE 2003.
- [7] PN-EN 1993-6 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 6: Konstrukcje wsporcze dźwignic.

Literatura

- [1] Biegus A.: Projektowanie konstrukcji budowlanych według Eurokodów. Builder 2010.
- [2] Biegus A.: Połączenia śrubowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1997.
- [3] Biegus A.: Nośność śrub według Eurokodu 3. Builder nr 4/2008.
- [4] Biegus A.: Obliczanie nośności śrub według PN-EN 1993-1-8. Inżynieria i Budownictwo nr 3/2008.
- [5] Kozłowski A., Pisarek Z., Wierzbicki S.: Projektowanie zakładkowych połączeń śrubowych wg PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8. Inżynieria i Budownictwo nr 9/2008.
- [6] Łaguna J.: Dokręcanie śrub ocynkowanych w połączeniach sprężonych. Konstrukcje Stalowe nr 4/2004.
- [7] PN-90/B- 03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [8] PN-EN 1990: 2004. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [9] PN-EN 1993-1-1: 2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [10] PN-EN 1993-1-3: 2008. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [11] PN-EN 1993-1-8: 2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [12] PN-EN 1090-2:2009. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
- [13] PN-EN 14399-1: 2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 1: Wymagania ogólne.
- [14] PN-EN 14399-2: 2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 2: Badania przydatności do połączeń sprężanych.
- [15] PN-EN 14399-3: 2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 3: System HR. Zestawy śruby z łbem i nakrętki sześciokątnej.
- [16] PN-EN 14399-4: 2007 Część 4: System HV. Zestawy śruby z łbem i nakrętki sześciokątnej.
- [17] PN-EN 14399-5: 2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 5: Podkładki okrągłe.
- [18] PN-EN 14399-6: 2007. Zestawy śrubowe wysokiej wytrzymałości do połączeń sprężanych. Część 6: Podkładki okrągłe ze ścięciem.