

Konstrukcje stalowe - Połączenia



Wieża Eiffla, Paris 1889



Freedom Tower NY (na miejscu WTC)



Muzeum Guggenhaima, Bilbao, 2005



Centre Pompidou, Paryż, 1971-77



Beijing Stadium Pekin 2008

Opracowano z wykorzystaniem materiałów:

- [2.1] Arup O & Partners, *Worked Example for the Design of Steel Structures, Based on EuroCode 3*, SCI Publication, 1994
- [2.2.] Trebilcock P, Lawson M., *Architectural Design in Steel*, Spon Press, 2004
- [2.3] Steel Designers' Manual - 6th Edition (2003), ed: Davison B., Owens G., W., Blackwell Publishing, 2003
- [2.4] Budownictwo ogólne, tom 3: konstrukcje budynków, praca zbiorowa red. Wiesław Buczkowski, Arkady, 2009
- [2.5] Kozłowski A. (red), *Konstrukcje stalowe, Przykłady obliczeń wg PN-EN 1993-1*, cz. Pierwsza Wybrane elementy i połączenia
- [2. 6] Biegus A. *Zgodnie z Eurokodem 3 – część 5- wymiarowanie elementów*, Builder, czerwiec 2009

Leszek CHODOR , dr inż. bud, inż.arch.

leszek@chodor.co ; lch@chodor-projekt.net

Połączenia (podział ze względu na miejsce wykonywania)

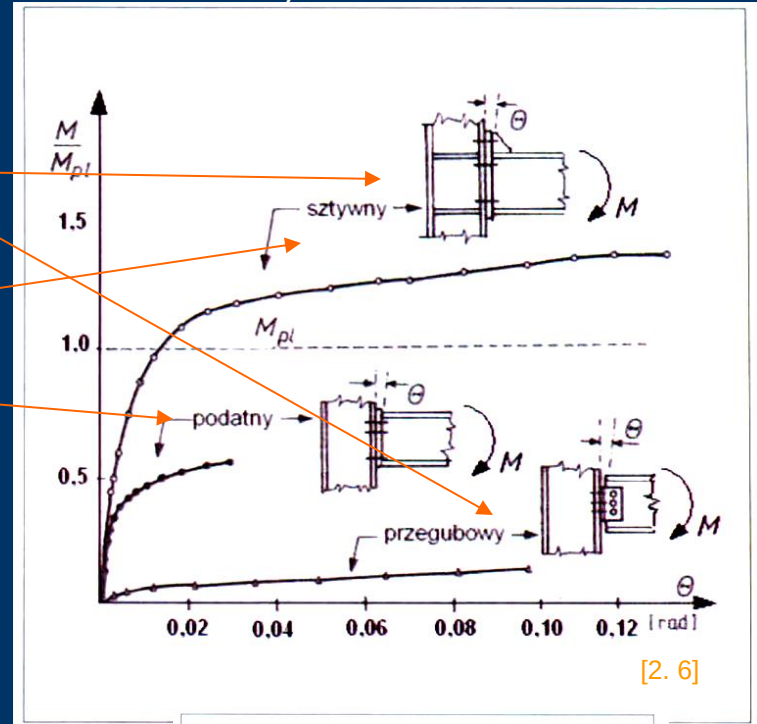
1. **warsztatowe** (wykonywane na warsztacie → przede wszystkim spawane)
2. **montażowe** (wykonywane na montażu → przede wszystkim śrubowe)

Połączenia (podział ze względu na typ łączników)

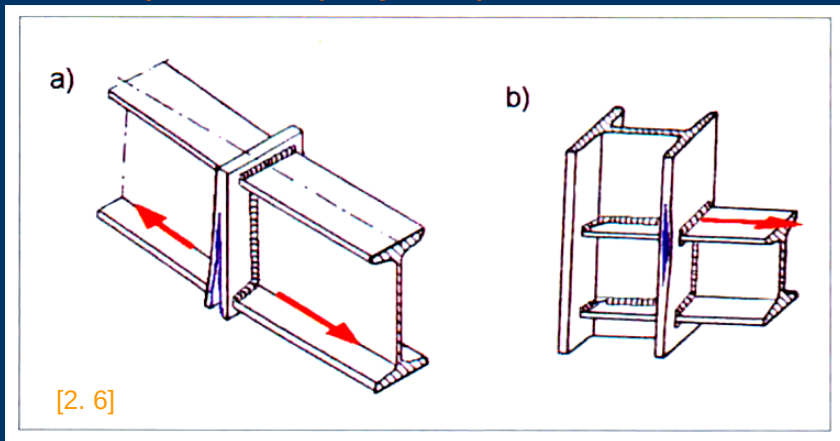
1. **spawane**: 1.1. pachwinowe, 1.2. czołowe, 1.3. inne
2. **śrubowe**: 2.1. doczołowe, 2.2. zakładkowe,
3. **zgrzewane**
4. **Klejone**

Połączenia ze względu na podatność

1. **Podatne (przegubowe)**
2. **Niepodatne (sztywne)**

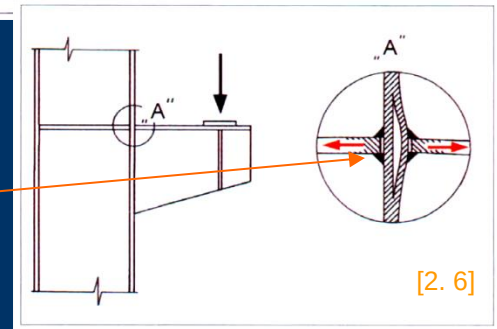


[2. 6]

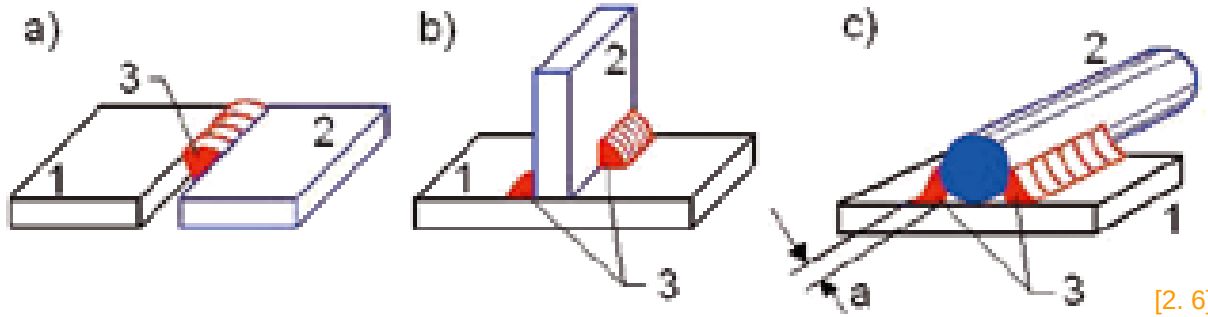


[2. 6]

Rys. 5. Przykłady pęknięć laminarnych (a – blachy czołowej, b – pasa słupa) wywołanych niedostateczną wytrzymałością międzywarstwową stali

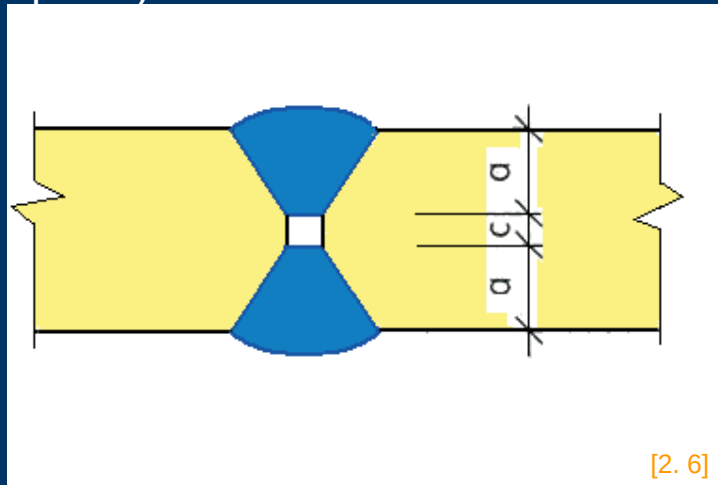


[2. 6]

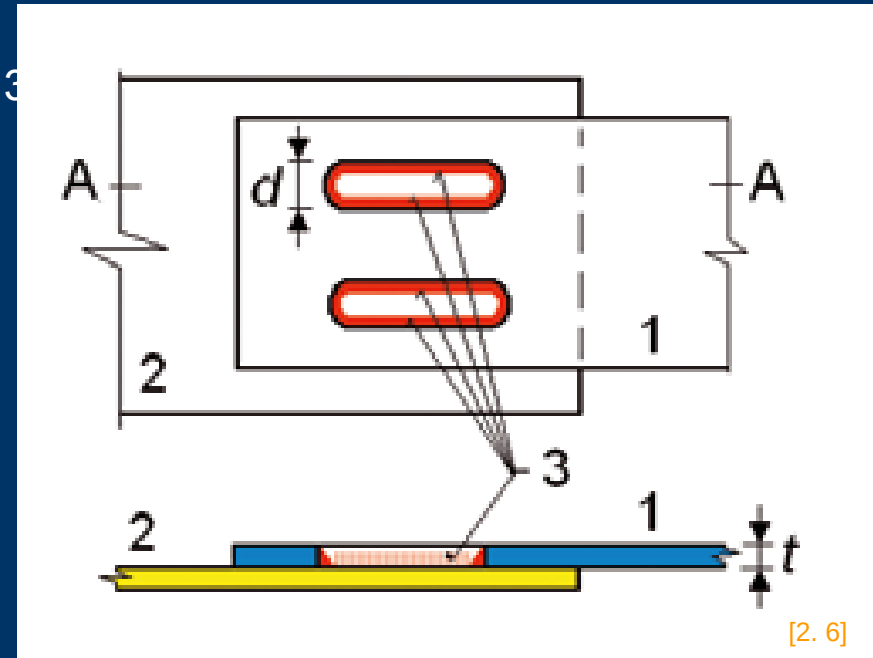


[2. 6]

Rodzaje spoin: a – pachwinowe, c – szerokobruzdowe (1, 2 – łączone elementy, 3 – spoina).



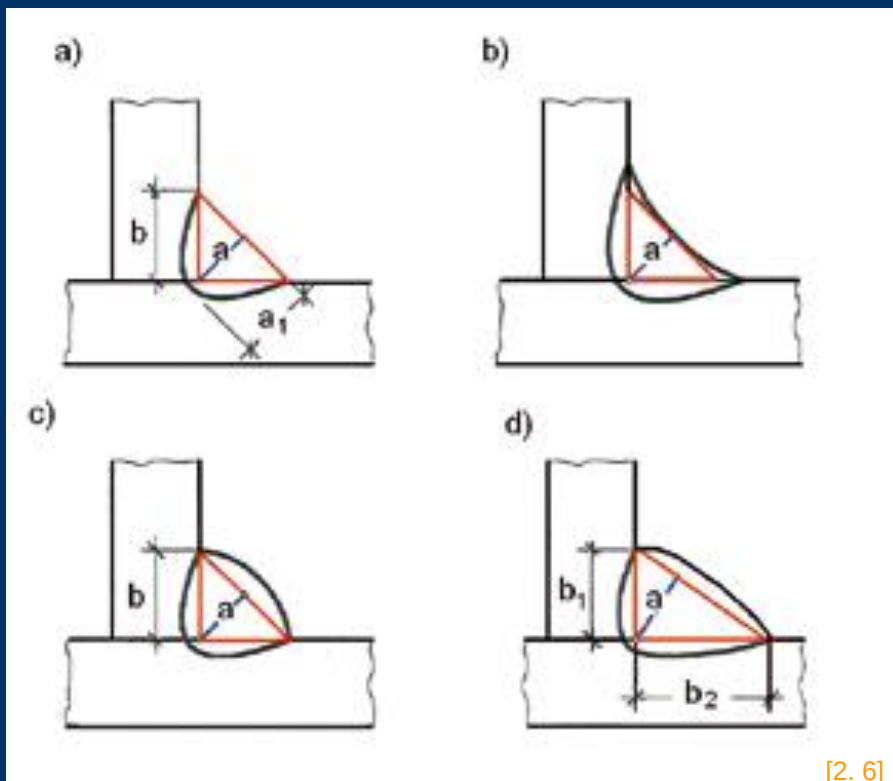
[2. 6]



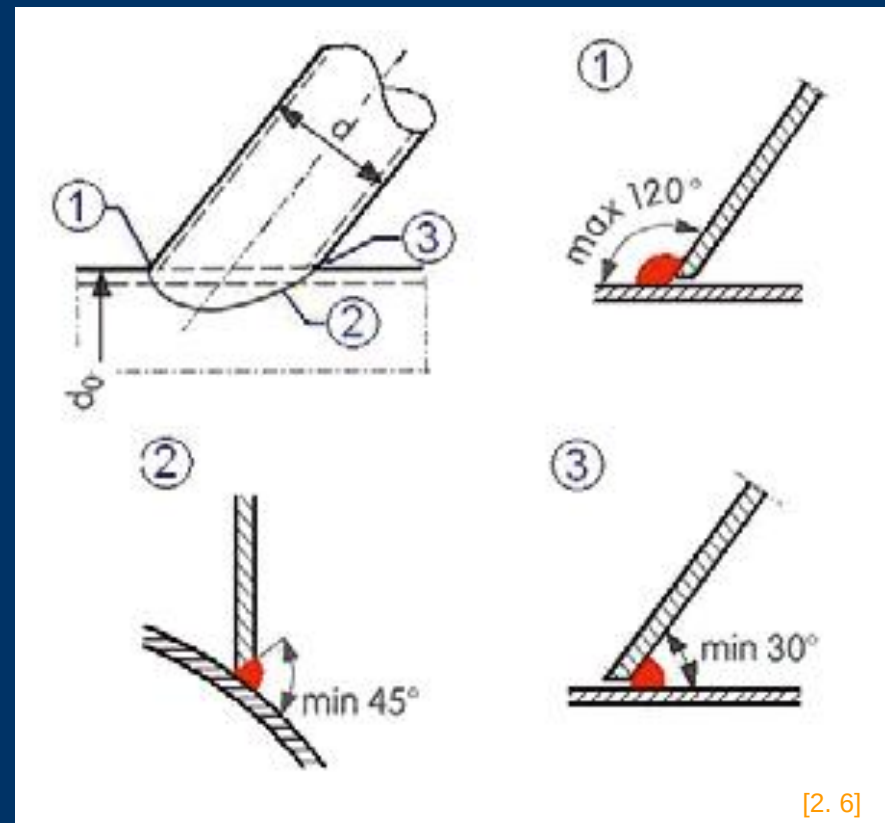
[2. 6]

Spoina czołowa z niepełnym przetopem.

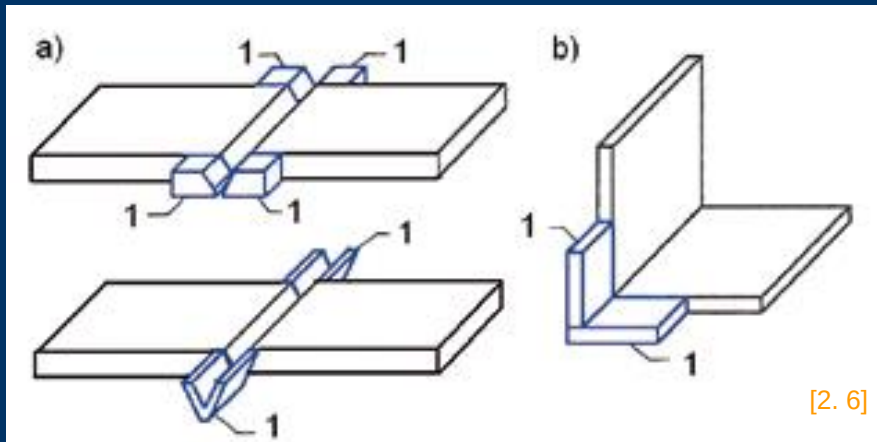
Spoiny otworowe: 1, 2 – łączone elementy, 3 – spoina pachwinowa.



Rodzaje spoin pachwinowych: a – płaska, b – wklęsła, c – wypukła, d – niesymetryczna.

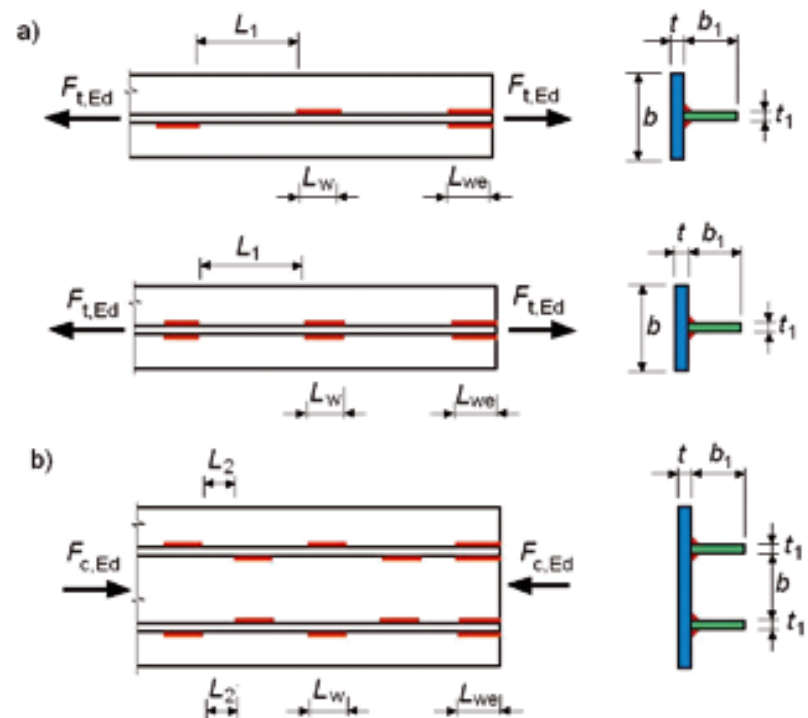


Połączenie spawane o zmiennej grubości spoiny



Sposoby zapobiegania kraterom spoin czołowych (a) i pachwinowych (b), 1 – element wybiegowy.

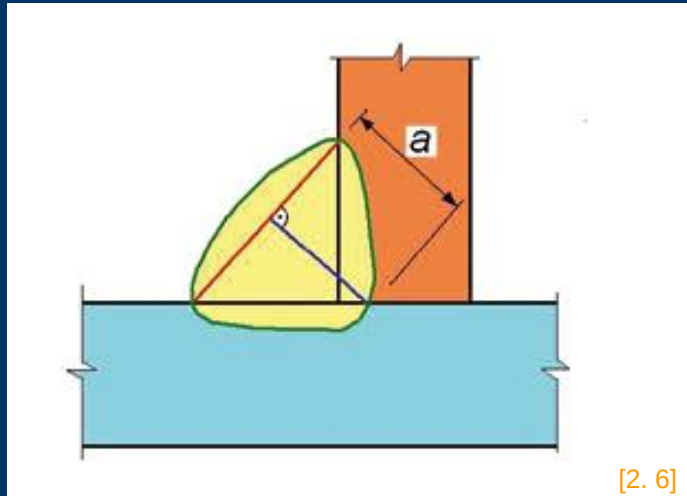
Rodzaje spoin pachwinowych: a – płaska, b - wklęsła, c – wypukła, d – niesymetryczna.



Elementy spawane rozciągane: $L_1 \leq \min(16t, 16t_1 \text{ i } 200 \text{ mm})$

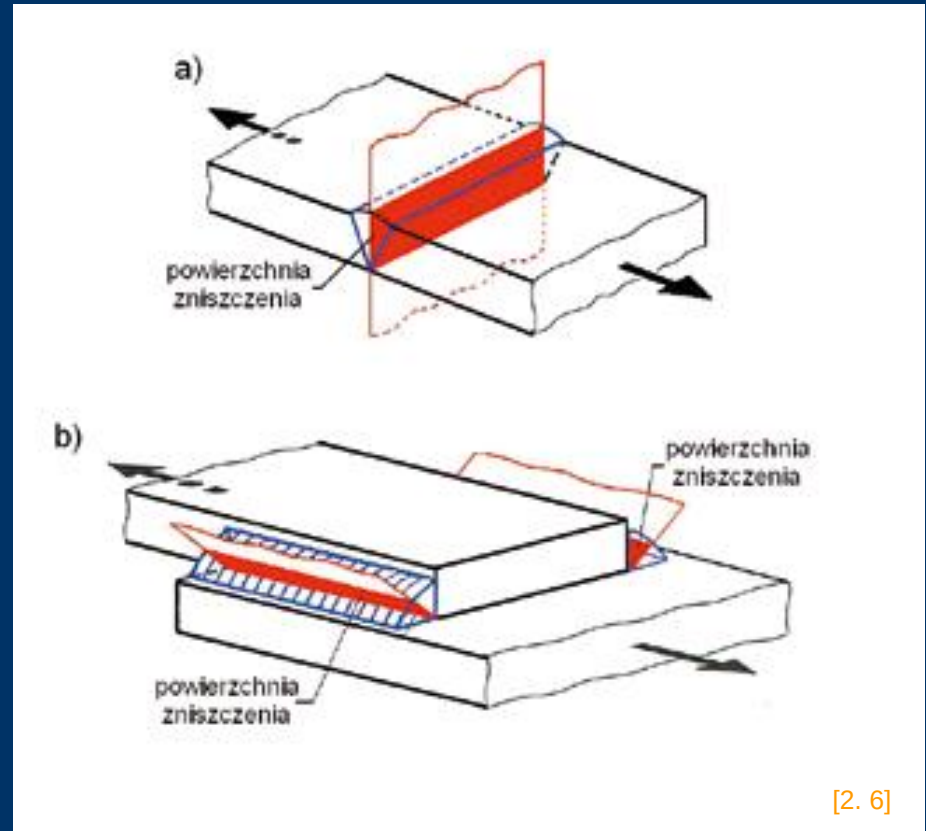
Elementy spawane ściskane lub ścinane: $L_2 \leq \min(12t, 12t_1, 0,25b \text{ i } 200 \text{ mm})$

Spoiny pachwinowe przerywane: a – rozciągane, b – ściskane.



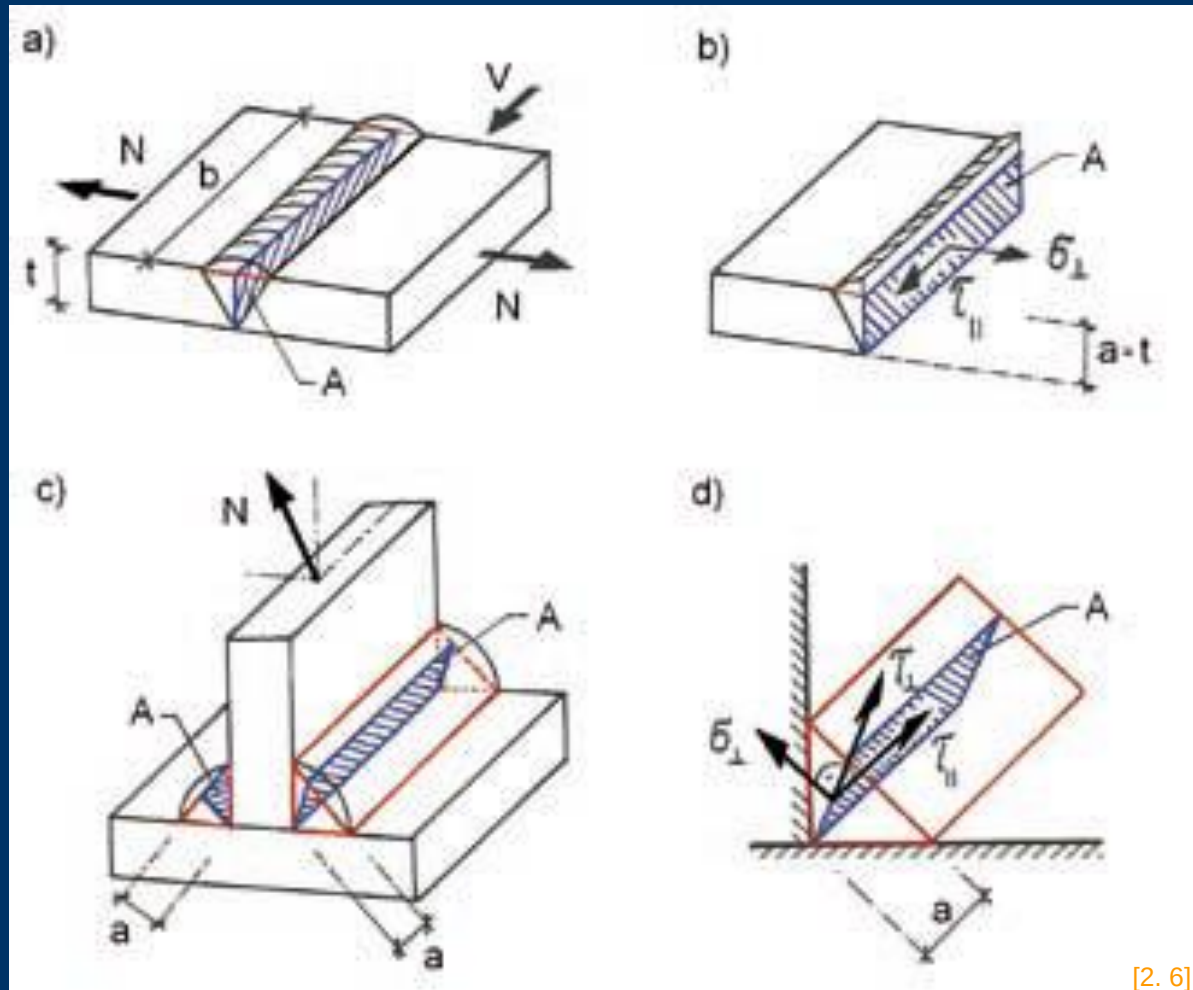
[2. 6]

Spoina pachwinowa z głębokim przetopem



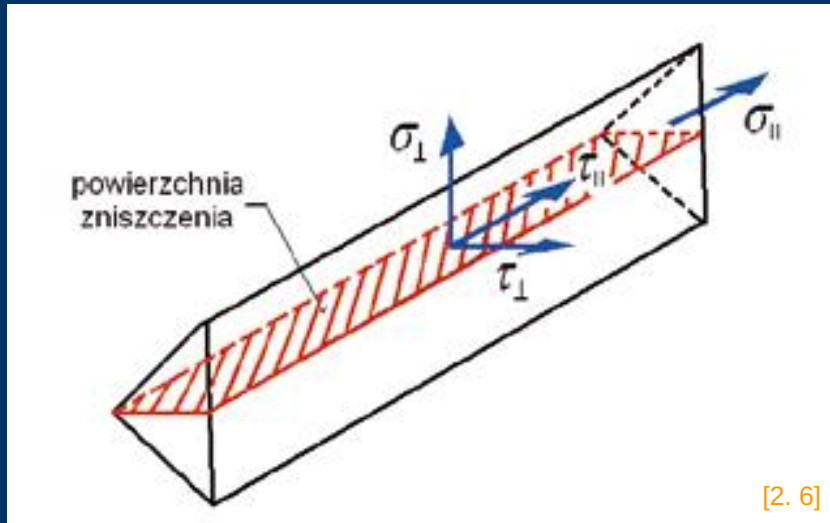
[2. 6]

Potencjalne powierzchnie zniszczenia spoin
czołowych (a)
i pachwinowych (b)



[2. 6]

Ogólny układ naprężeń w spoinie czołowej (a)
oraz pachwinowej (b).



[2. 6]

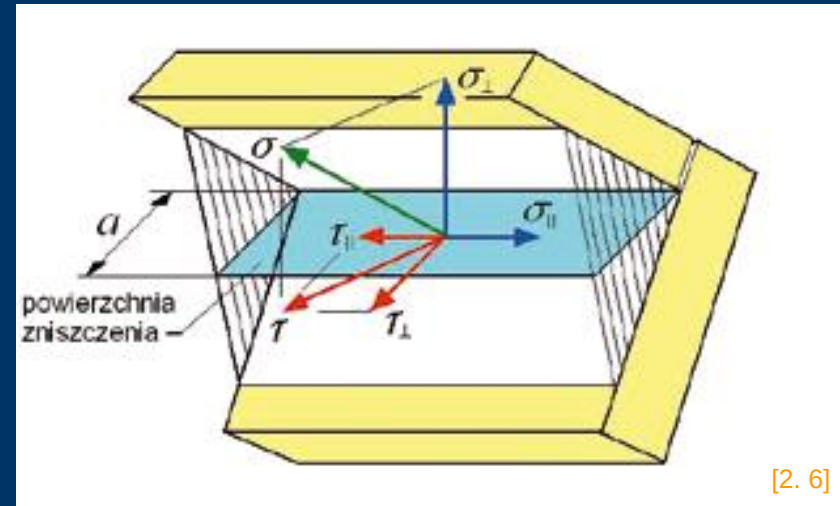
Składowe naprężeń w przekroju spoiny pachwinowej

- normalne prostopadłe do przekroju spoiny σ_1 ,
- normalne równoległe do przekroju spoiny $\sigma_{||}$,
- styczne (w płaszczyźnie przekroju) prostopadłe do osi spoiny τ_1 ,
- styczne (w płaszczyźnie przekroju) równoległe do osi spoiny $\tau_{||}$.

Według [3] nośność obliczeniowa spoiny pachwinowej (rys. 12) jest

gdzie: f_u – nominalna wytrzymałość na rozciąganie słabszej z łączonych części, β_w – współczynnik korekcyjny uwzględniający wyższe właściwości mechaniczne materiału spoiny w stosunku do materiału rodzimego; wartości współczynnika β_w podano w tabeli 1; γ_{M2} częściowy współczynnik bezpieczeństwa nośności spoin ($\gamma_{M2} = 1,25$).

Z analizy (1) wynika, że wg [3] obliczeniowa nośność spoiny jest określana na podstawie wytrzymałości materiału f_u , a nie jak w [6] jego granicy plastyczności f_y .

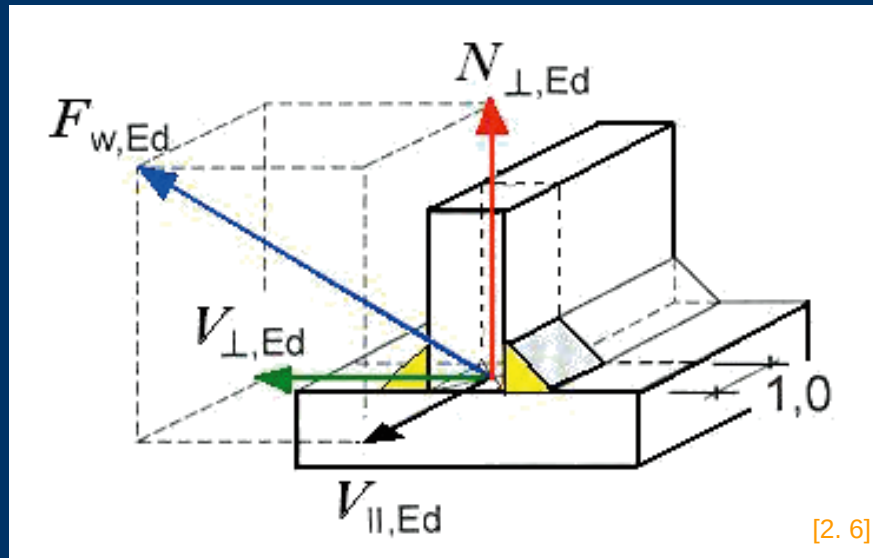


[2. 6]

Sprawdzenie nośności spoiny pachwinowej za pomocą metody kierunkowej.

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_{||}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

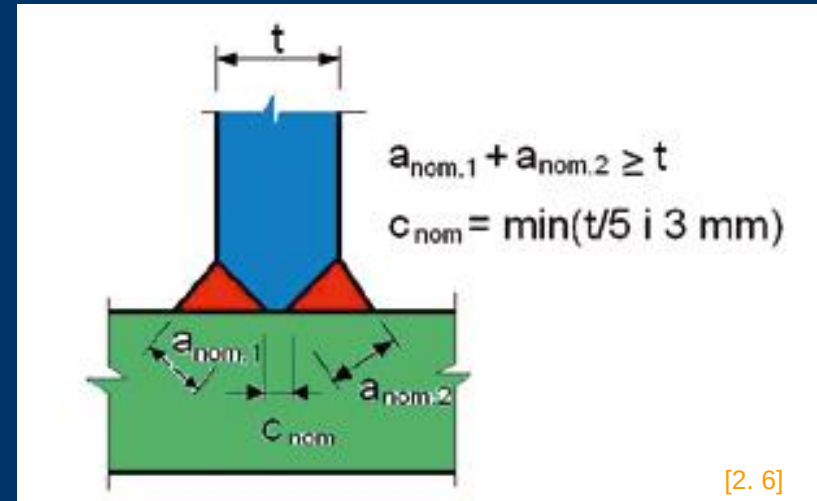
$$\text{oraz } \sigma_1 \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}}$$



Składowe sił w przekroju spoiny pachwinowej.

Według postanowień [3] alternatywną do metody kierunkowej jest metoda uproszczona obliczania nośności spoin pachwinowych. W tej metodzie, niezależnie od położenia płaszczyzny przekroju spoiny względem działającej siły, obliczeniową nośność spoiny na jednostkę długości $F_{w,Rd}$ określa się ze wzoru:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$$

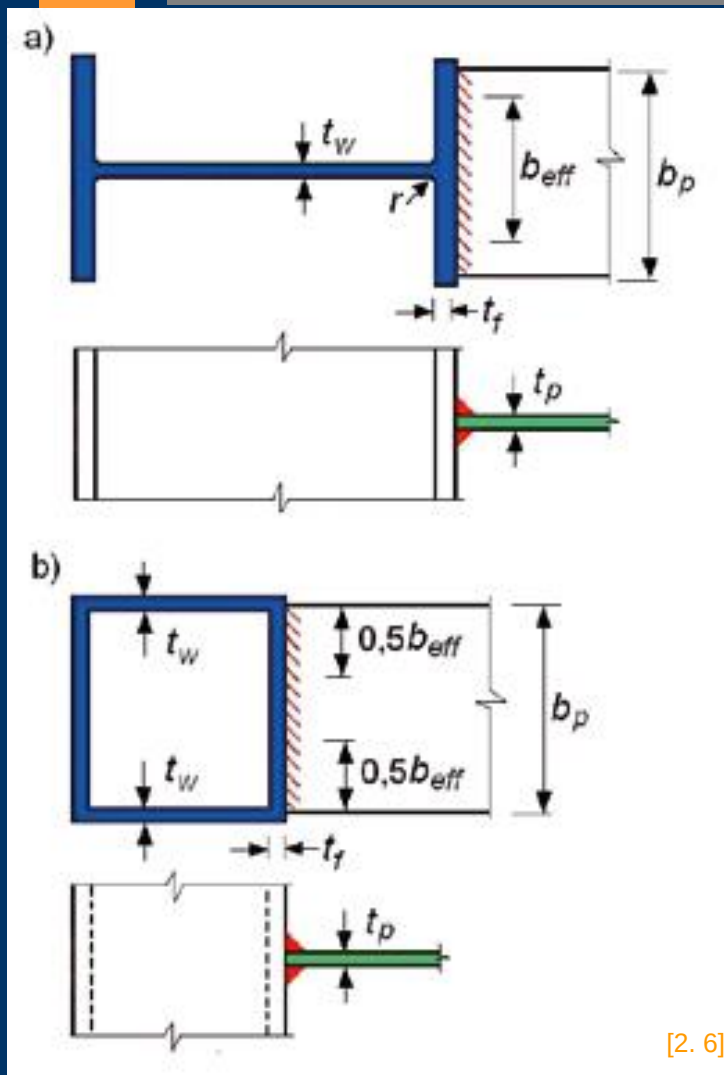


Efektywny pełny przetop w czołowym złączu teowym

$$F_{w,Rd} = f_{w,d} a$$

$$f_{w,d} = \frac{f_u \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

Spoiny pachwinowe {3}



Zredukowaną (współpracującą) szerokość efektywną nieuzębowanego kształtownika I lub H (oblicza się ze wzoru:

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7 k t_f$$

gdzie: $s=r$ w przypadku dwuteowników walcowanych na gorąco, a $s=2^{0,5}a$ w przypadku kształtowników spawanych (a – grubość spoiny łączącej pas ze środkiem).

Współczynnik k oblicza się ze wzoru

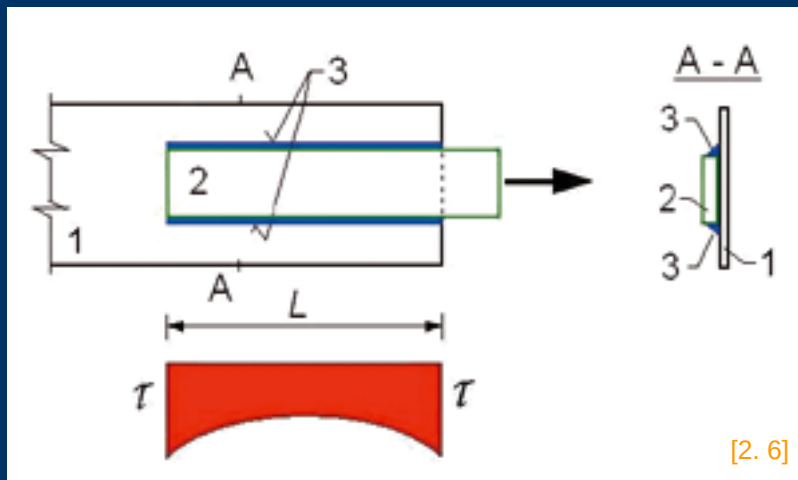
$$k = \frac{t_f f_{y,f}}{t_p f_{y,p}} \leq 1,0$$

Można nie stosować żeber w połączeniu (rys. 15), gdy spełniony jest warunek:

$$b_{eff} \geq \frac{f_{y,p}}{f_{u,p}} b_p$$

Efektywna szerokość w złączy teowym bez żeber

gdzie: f_u jest wytrzymałością na rozciąganie blachy przyspawanej do kształtownika, a b_p jest szerokością blachy przyspawanej do kształtownika,



[2. 6]

Współczynniki korekcyjne β_w spoin pachwinowych.

Gatunek stali	S 235	S 275	S 355	S 420, S460
Współczynnik korekcyjny β_w	0,80	0,85	0,90	1,00

Wyężenie w „długich” połączeniach zakładkowych; 1, 2 – łączone elementy, 3 – spoina.

Ze względu na nierównomierny rozkład naprężeń na długości w tzw.

„długich” połączeniach zakładkowych (rys. 16) nośność obliczeniową

spoin zmniejsza się stosując współczynnik redukcyjny

$$\beta_{Lw,1} = 1,2 - \frac{0,2L_j}{150a}$$

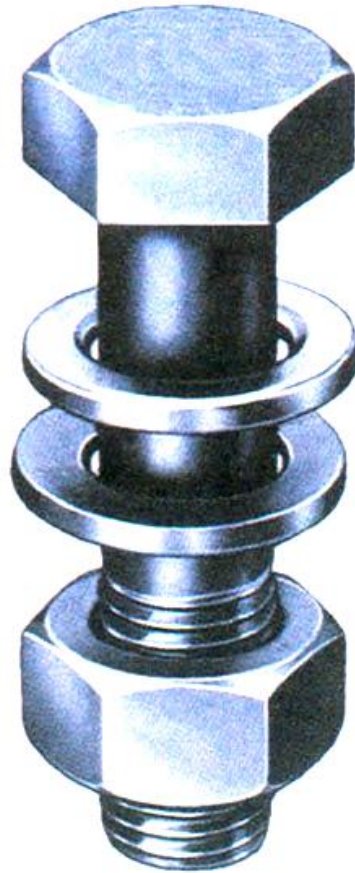
w przypadku spoin pachwinowych dłuższych niż 1,7 m łączących żebra poprzeczne w elementach spawanych z blach

$$\beta_{Lw,2} = 1,1 - \frac{L_w}{17} \quad \text{lecz} \quad 0,6 \leq \beta_{Lw,2} \leq 1,0$$

gdzie: L_j – całkowita długość zakładki w kierunku przekazywania siły, $L_{w,2}$ – długość spoiny (w metrach).

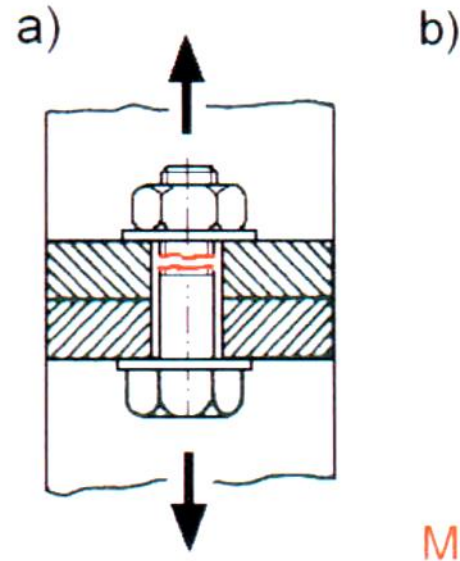
Nośność obliczeniową spoin z pełnym przetopem przyjmuje się równą nośności obliczeniowej słabszej z łączonych części, pod warunkiem, że będzie wykonana z odpowiedniego materiału wykazującego w próbie rozciągania spoiny minimalną granicę plastyczności i minimalną wytrzymałość

na rozciąganie nie mniejszą od wartości nominalnych tych parametrów materiału rodzimego.



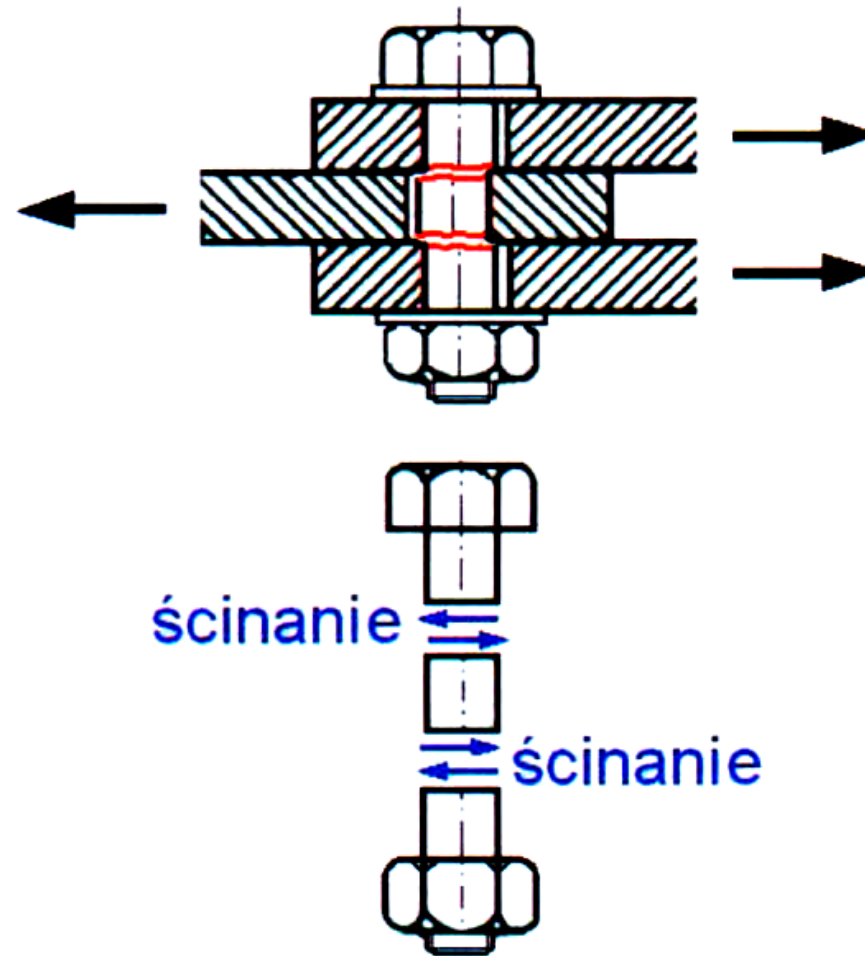
Rys. 1. Śruba z łbem sześciokątnym

[2. 6]



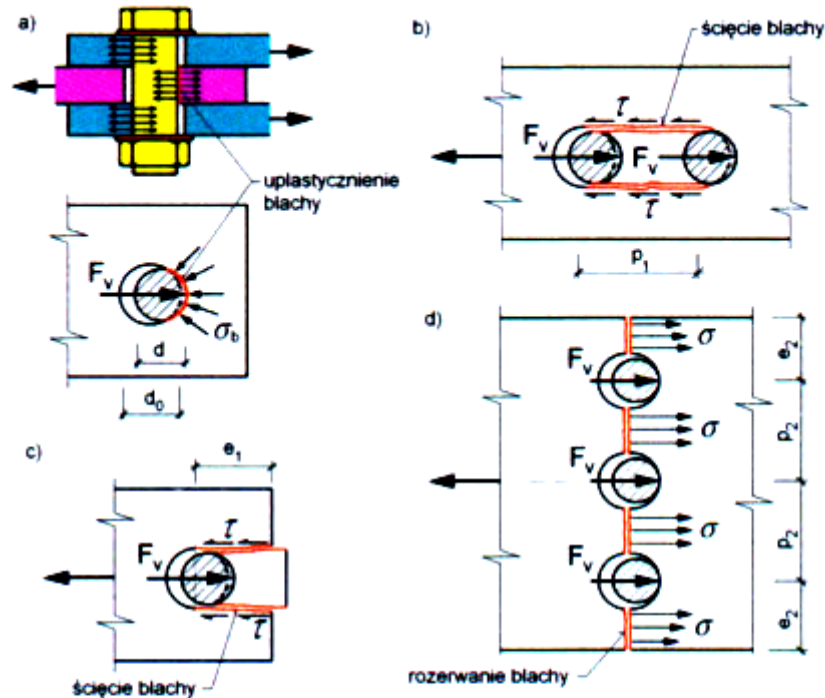
Rys. 2. Schemat wyężenia (a) i widok zerwania trzpienia (b) rozciąganej śruby

[2. 6]



Rys. 3. Schemat wyłączenia ścinanej śruby

[2. 6]



Rys. 4. 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 wytwężenia

[2. 6]

Połączenia śrubowe{4}

Tabela 1. Wartości granicy plastyczności f_{yb} i wytrzymałości na rozciąganie f_{ub} stali śrub oraz nośności obliczeniowe śrub (kN) z warunku ścicia trzpienia $F_{v,Rd}$ ścicia rdzenia $F_{vs,Rd}$ i rozciągania $F_{t,Rd}$ wyznaczone według [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

Wyznaczanie nośności śruby...

gdzie: C_i – charakterystyka geometryczna elementu (np.: A – pole przekroju trzpień śruby, A_s – pole przekroju rdzenia śruby, dt – powierzchnia docisku śruby do ścianki elementu itp.), a_i – współczyn-

nik korygujący (uwzględniający model wyężenia), f_i – parametr wytrzymałościowy (np.: f_y , f_{yb} – granica plastyczności stali łączzonego elementu lub śruby; f_u , f_{ub} – wytrzymałość stali na rozciąganie łączzonego elementu lub śruby); γ_{Mi} – częściowy współczynnik nośności.

$$F_{i,Rd} = \frac{a_i C_i f_i}{\gamma_{Mi}}$$

...ze względu na rozciąganie,

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

gdzie: f_{ub} – wytrzymałość na rozciąganie

stali śruby, A_s – pole przekroju czynnego rdzenia śruby przy rozciąganiu (tabela 1), $\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności.

ścinanie,

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

We wzorze (3), gdy ścinana jest gwintowana część śruby $A_i = A_s$ oraz $\alpha_v = 0,6$ – dla klas 4.6, 5.6, i 8.8; $\alpha_v = 0,5$ – dla klas 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9. Gdy zaś płaszczyna 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).

docisk,

$$F_{b,Rd,i} = \frac{k_{1,i} a_{b,i} f_u d t_{\Sigma}}{\gamma_{M2}}$$

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

$$a_{b,s} = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right) \quad (6)$$

– dla śrub pośrednich

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

$$a_{b,p} = \min \left[\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] \quad (8)$$

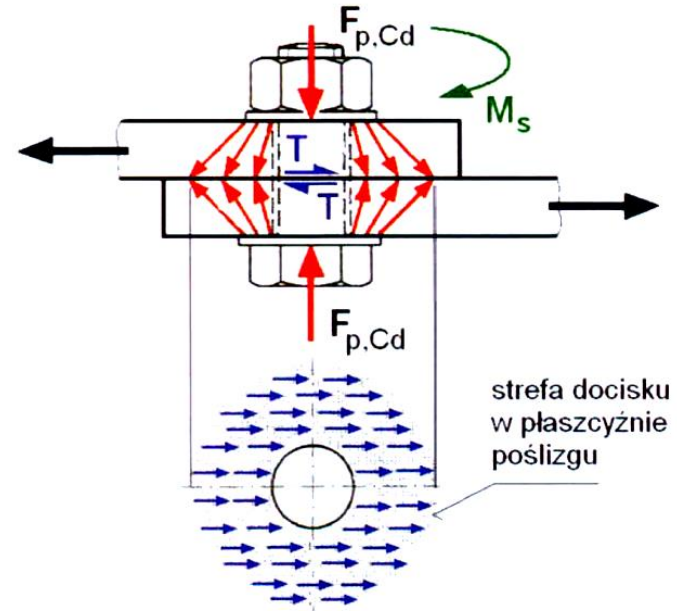
gdzie: f_u – wytrzymałość na rozciąganie stali łączonego elementu, d – średnica trzpienia śruby, t_{Σ} – sumaryczna grubość ścianki podlegającej dociskowi w złączeniu o tym samym kierunku przekazywania obciążenia, $\gamma_{M2} = 1,25$ – częściowy współczynnik nośności.

na przeciąganie oblicza,

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

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.

poślizg



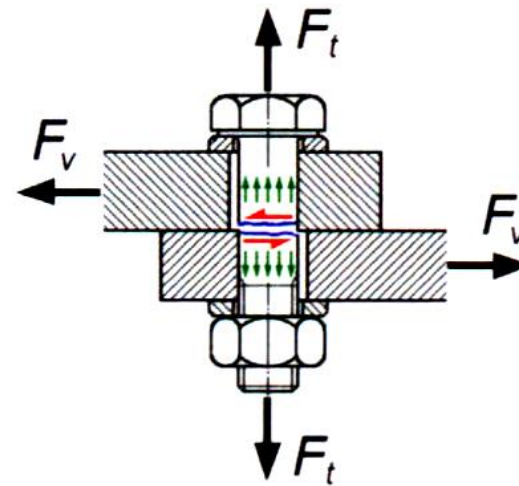
Rys. 9. Schemat wyłączenia sprężonego połączenia zakładkowego

[2. 6]

Interakcyjne Wytężenie

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

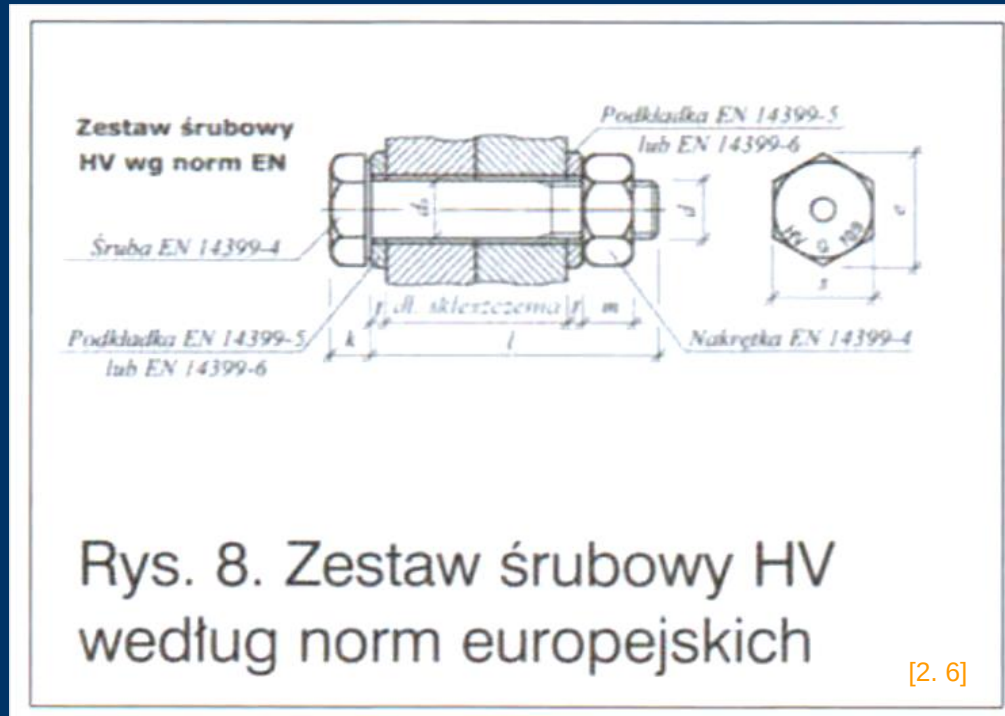
W połączeniach sprężanych stosuje się śruby wysokiej wytrzymałości. Od 2005 roku obowiązują w Polsce europejskie normy [10]÷[15] dotyczące zestawów śrubowych przeznaczonych do stosowania w budowlanych konstrukcjach stalowych w połączeniach sprężonych. Do tych połączeń należy stosować zestawy śruby i nakrętki systemu HR, klasy 8.8 i 10.9 według PN-EN 14399-3 [12] lub śruby i nakrętki systemu HV, klasy 10.9 według PN-EN 14399-4 [13], a także podkładki według PN-EN 14399-5 [14] i PN-EN 14399-6 [15] (rys. 8). Wymagania dotyczące zapewnienia jakości, znakowania, identyfikacji i badań przydatności wyrobów śrubowych określają normy PN-EN 14399-1 [10] i PN-EN 14399-2 [11].



Rys. 7. Interakcyjne wytężenie śruby rozciąganej i ścinanej

[2. 6]

W połączeniach sprężanych stosuje się śruby wysokiej wytrzymałości. Od 2005 roku obowiązują w Polsce europejskie normy [10]÷[15] dotyczące zestawów śrubowych przeznaczonych do stosowania w budowlanych konstrukcjach stalowych w połączeniach sprężonych. Do tych połączeń należy stosować zestawy śruby i nakrętki systemu HR, klasy 8.8 i 10.9 według PN-EN 14399-3 [12] lub śruby i nakrętki systemu HV, klasy 10.9 według PN-EN 14399-4 [13], a także podkładki według PN-EN 14399-5 [14] i PN-EN 14399-6 [15] (rys. 8). Wymagania dotyczące zapewnienia jakości, znakowania, identyfikacji i badań przydatności wyrobów śrubowych określają normy PN-EN 14399-1 [10] i PN-EN 14399-2 [11].

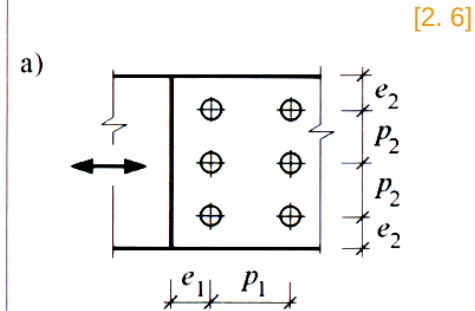


[2. 6]



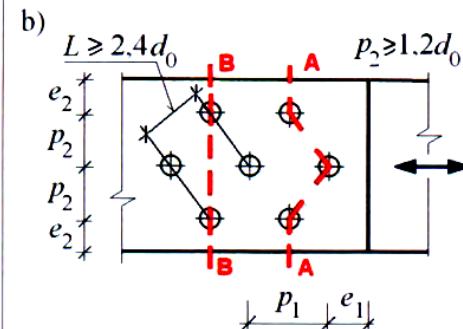
Rys. 6. Widok plastycznej deformacji podkładek rozciąganej śruby

[2. 6]



$$1,2d_0 \leq e_1 \leq 4t + 40 \text{ mm}$$

$$1,2d_0 \leq e_2 \leq 4t + 40 \text{ mm}$$

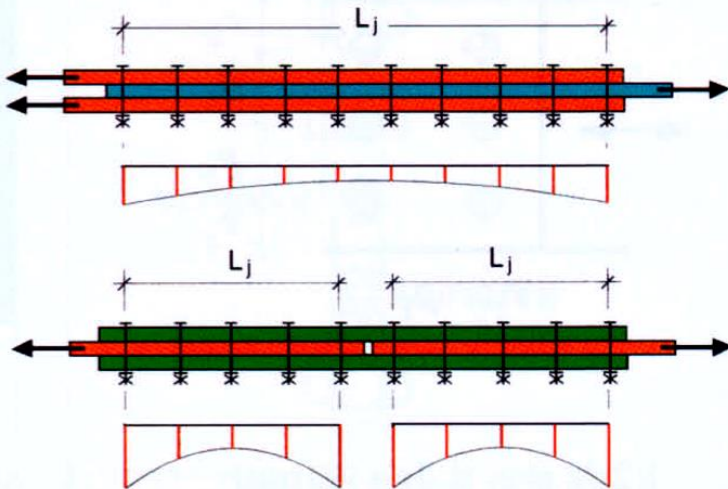


$$2,2d_0 \leq p_1 \leq \min(14t, 200 \text{ mm})$$

$$2,4d_0 \leq p_2 \leq \min(14t, 200 \text{ mm})$$

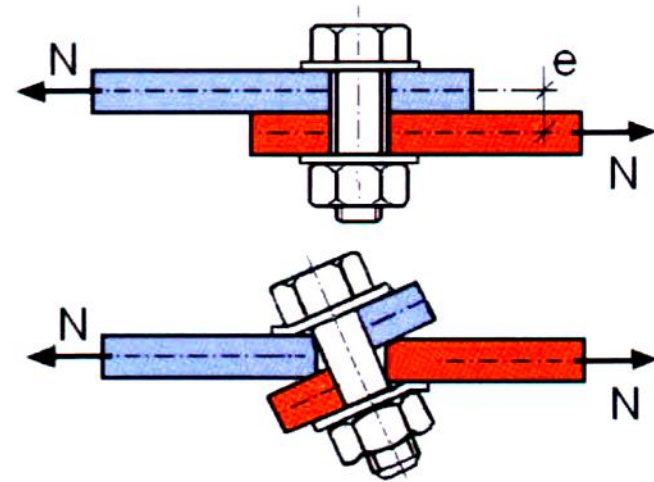
Rys. 5. Rozstaw śrub w połączeniu zakładkowym według [8] w układzie: a) prostokątnym, b) przestawionym

Złącze zakładkowe



Rys. 12. Schemat „długiego” połączenia zakładkowego

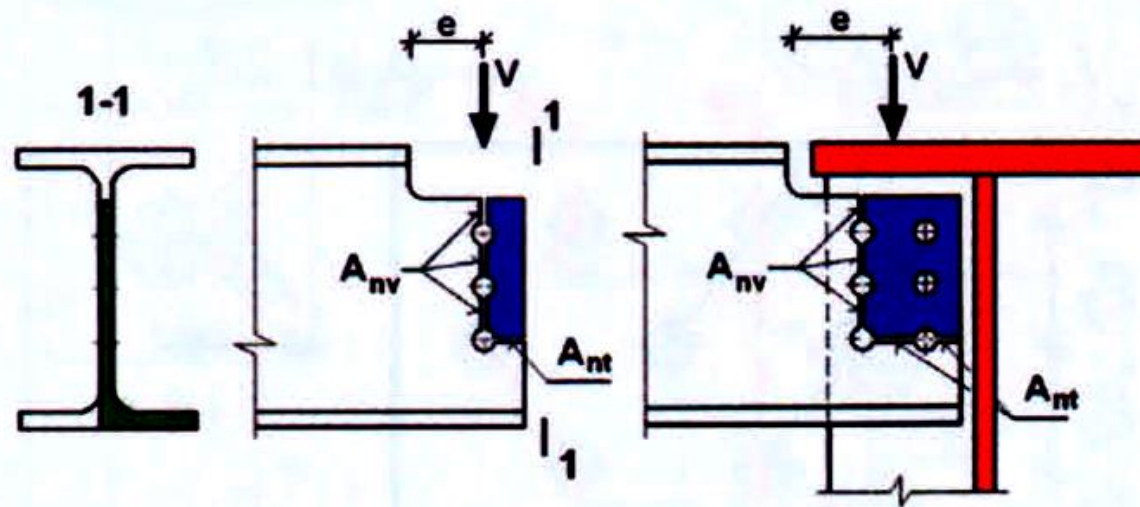
[2. 6]



Rys. 10. Schemat wyężenia połączenia na jedną śrubę

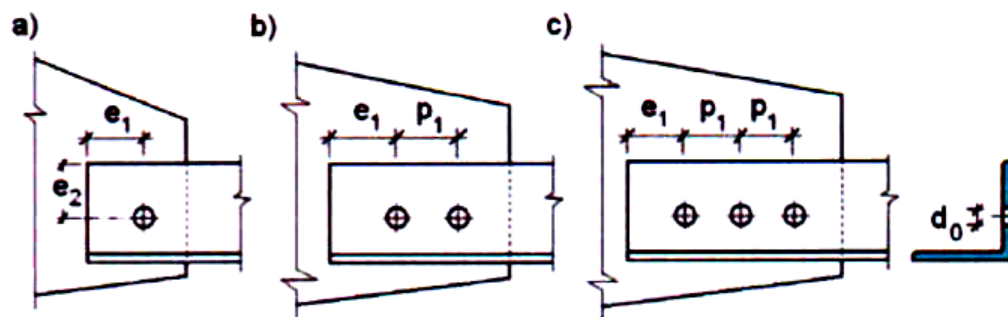
[2. 6]

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



Rys. 13. Schemat rozerwania blokowego połączenia belki z podciąganiem

[2. 6]



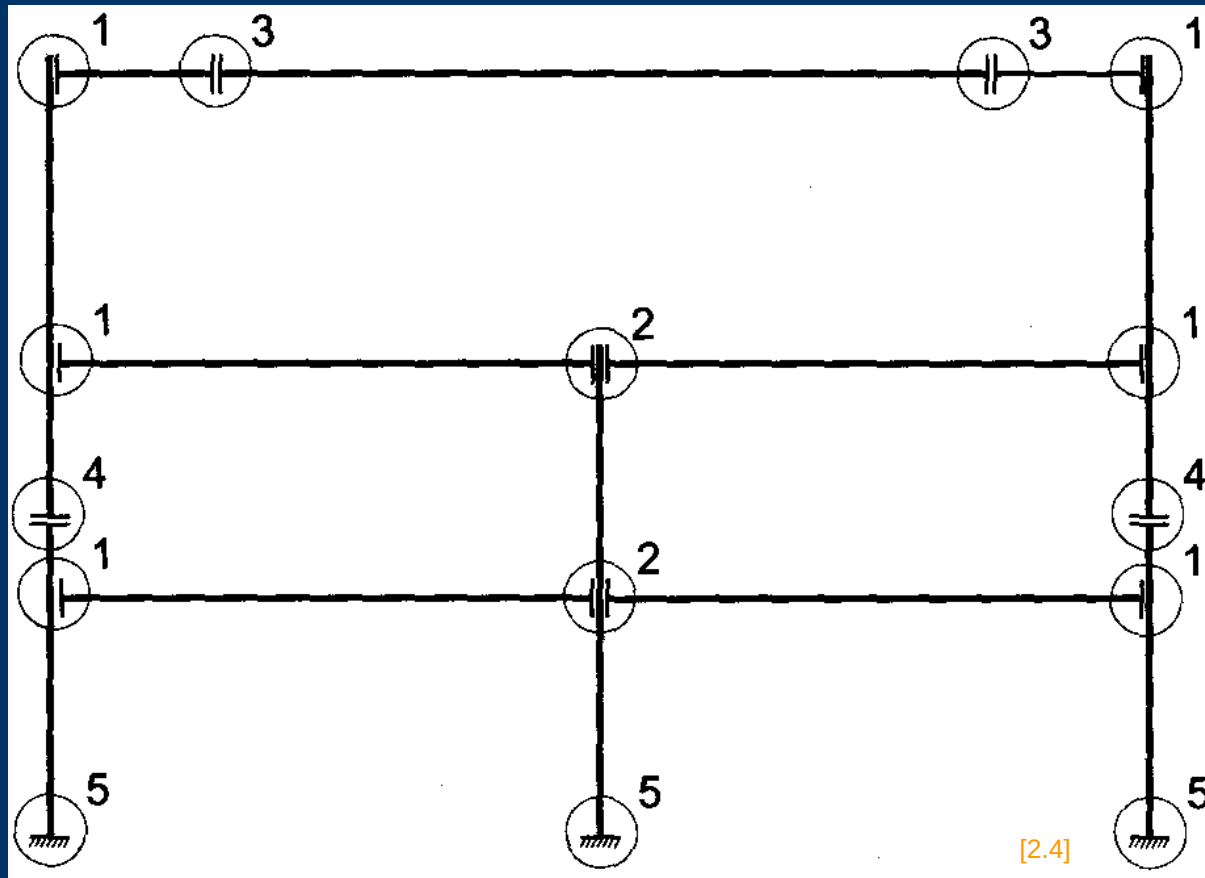
Rys. 14. Kątowniki połączone jednym ramieniem: a) na jedną śrubę, b) na dwie śruby, c) na trzy śruby

[2. 6]

Tabela 2. Współczynniki kształtu otworów na śruby k_s według [8]

[2. 6]

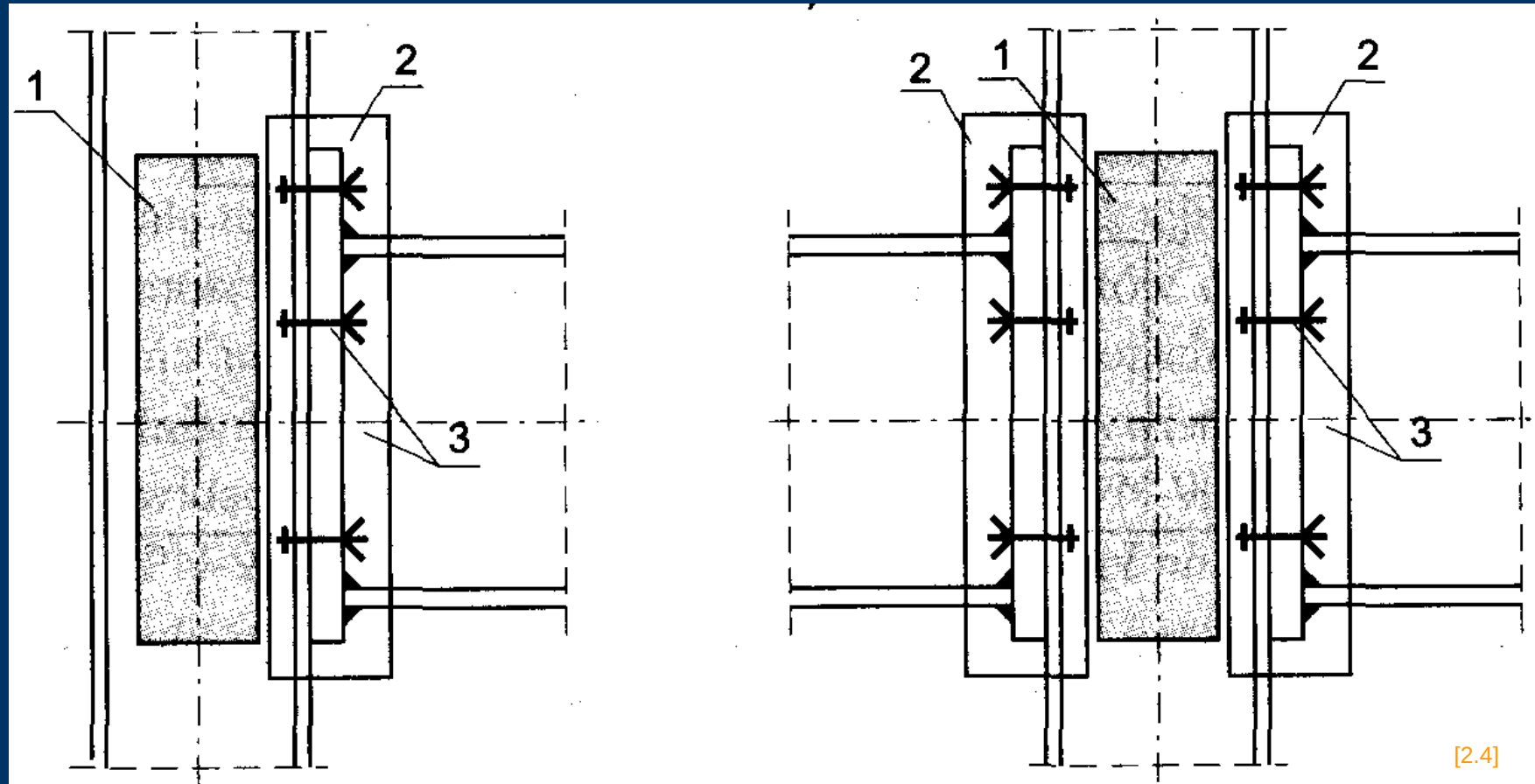
Opis	k_s
Śruby w otworach normalnych	1,00
Śruby w otworach powiększonych lub owalnych krótkich wydłużonych prostopadle do kierunku obciążenia	0,85
Śruby w otworach owalnych długich wydłużonych prostopadle do kierunku obciążenia	0,70
Śruby w otworach owalnych krótkich wydłużonych równolegle do kierunku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



[2.4]

Węzły występujące w szkieletowych konstrukcjach stalowych:

1- węzeł jednostronny (zewnątrzny) rygiel-słup ; 2- węzeł dwustronny (wewnętrzny) rygiel-słup;
 styk belki (rygli); 4- styk słupa; 5- zakotwienie słupa



[2.4]

Konfiguracja węzłów konstrukcji stalowych budynków szkieletowych: jednostronna i dwustronna:

1- ściany panel środkowy, 2- połączenie, 3- podstawowe części węzła

(śruby, blachy, czołowe, środkowy słup i belki)