

3. POŁĄCZENIA SPAWANE

3.1. Wprowadzenie

Połączenia spawane są najczęściej stosowanymi połączeniami nierozłącznymi. Zapewniają możliwość uzyskiwania wyrobów o złożonych kształtach przy niewielkich nakładach. Połączenie spawane otrzymuje się po zakrzepnięciu mieszaniny przetopionego materiału pręta dodatkowego (spoiwa) i nadtopionych brzegów łączonych części. Utworzona spoina jest połączeniem trwałym o wysokiej wytrzymałości.

W zależności od usytuowania względem siebie łączonych elementów, spoiny mogą być czołowe, pachwinowe i otworowe.

Spoinami czołowymi łączy się elementy dosunięte do siebie czołami, wypełniając spoiwem przestrzeń pomiędzy nimi. Zależnie od grubości elementów krawędzie ich odpowiednio kształtuje się, co w konsekwencji prowadzi do różnych przekrojów poprzecznych spoin (w literaturze rozróżnia się 15 różnych przekrojów [3.1]).

Spoinami pachwinowymi łączy się elementy nachylone względem siebie. Spoiwem wypełnia się kąty utworzone pomiędzy płaszczyznami elementów. Krawędzi w tym przypadku w zasadzie nie ukosuje się.

Spoinami otworowymi łączy się elementy nasunięte na siebie. W jednym elemencie wykonywane są otwory, które następnie wypełnia się spoiną.

Częściej spotykane przykłady połączeń spawanych zestawiono w tablicy 3.1.

3.2. Naprężenia dopuszczalne dla połączeń spawanych obciążonych statycznie

W obciążonych połączeniach spawanych występują duże spiętrzenia naprężeń spowodowane zmiennościami kształtu (karby i podtopienia) i struktury (spoina ma strukturę materiału lanego, podczas gdy materiał rodzimy z reguły jest przerobiony plastycznie) oraz wpływami cieplnymi (zmieniającymi dodatkowo strukturę materiału rodzimego oraz wywołującymi odkształcenia cieplne, co jest przyczyną znacznych naprężeń własnych w spoinie i w materiale rodzimym). Dlatego bardzo szybko dochodzi do miejscowego przekroczenia granicy plastyczności i miejscowego uplastycznienia, a w konsekwencji do wyrównania naprężeń w przekroju.

W obciążonych statycznie konstrukcjach spawanych z materiałów umacniających się dopuszcza się istnienie sprężysto-plastycznego stanu odkształceń. Stąd współczynniki bezpieczeństwa stosowane do wyznaczania naprężeń dopuszczalnych dla materiałów przeznaczonych na konstrukcje przyjmują niskie wartości $\gamma_s = 1,15 \div 1,2$. W tabeli 3.1 podano naprężenia dopuszczalne k dla materiałów przeznaczonych na konstrukcje spawane

obciążone statycznie. W konstrukcjach, w których sprężysto-plastyczny stan odkształceń nie może występować, stosowany jest współczynnik bezpieczeństwa do wyznaczania naprężeń dopuszczalnych materiału $\alpha_s = 1,6$.

Naprężenia dopuszczalne w samej spoinie lub w jej bezpośredniej bliskości przy obciążeniach statycznych określa się w zależności od materiału łączonych części, rodzaju złącza i rodzaju obciążenia

$$k_{st} = sk \quad (3.1)$$

gdzie s - współczynnik statycznej wytrzymałości spoiny, zależny od rodzaju i kierunku naprężenia.

Tablica 3.1

Rodzaje spoin

Rodzaj spoiny	Przykładowy kształt	Nazwa spoiny	Uwagi
Spoina czołowa		Spoina I	$g \leq 4 \text{ mm}$
		Spoina V	$g = 5 + 20 \text{ mm}$
		Spoina X	$g = 12 + 50 \text{ mm}$
		Spoina J	$g = 4 + 16 \text{ mm}$
		Spoina K	$g = 12 + 40 \text{ mm}$
Spoina pachwinowa		Spoina 2L	
		Spoina 2L	
Spoina otworowa			

Tabela 3.1

Dopuszczalne naprężenia k stali najczęściej stosowanych na konstrukcje stalowe

Znak stali	Rodzaj wyrobu	Grubość g [mm]	R_e [MPa]	k [MPa]	Uwagi
St0S	blachy kształtowniki	do 16 16 ÷ 40	195 185	175 165	
St3SX St3SY St3S St3V St3W	pręty rury	do 16 16 ÷ 40 40 ÷ 100	235 225 215	215 205 185	
St4VX St4VY St4V St4W		do 16 16 ÷ 40	255 245	235 225	
18G2 18G2A		do 16 16 ÷ 30 23 ÷ 50	355 345 335	305 295 285	
18G2AV		do 16 16 ÷ 30 23 ÷ 50	440 430 420	370 360 350	
10HA 10HAV 10HAVP 10HNAP			315 355	275 290	walcowane na zimno
10H 10HA 10HAV 10HHVP			345 390	290 310	walcowane na gorąco
R R35 R45 12X	rury		nie określa się 235 255 205	165	walcowane lub ciągnione zgrzewane
L400 L450 L500	odlewy		250 260 320	225 235 280	

Wartości współczynnika statycznej wytrzymałości spoiny s podano w tabeli 3.2 wg [3.2]. Przez s_n oznaczono współczynnik dla naprężeń normalnych oraz stycznych - prostopadłych do kierunku długości spoiny, a przez s_s dla naprężeń stycznych równoległych do kierunku długości spoiny.

Podane w tabeli 3.2 wartości współczynników należy zmniejszyć:

- o 10% - dla spoin montażowych wykonywanych na budowie,
- o 20% - w przypadku spoin pułapowych,
- o 30% - gdy zachodzą jednocześnie przypadki a) i b).

Tabela 3.2

Wartości współczynnika statycznej wytrzymałości spoiny

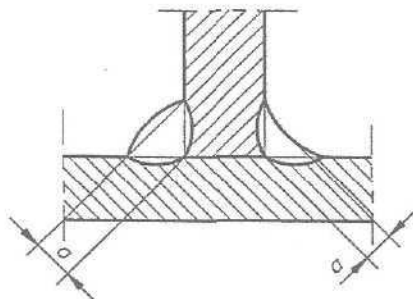
Rodzaj spoiny	Rodzaj naprężenia lub granica plastyczności R_e [MPa]	Współczynnik statycznej wytrzymałości spoiny	
		s_n	s_t
Spoiny czołowe	ściskanie lub zginanie	1	—
	rozciąganie równomierne $\mu = 1$ lub mimośrodowe $\mu < 1$	$1 - 0,15\mu^*)$	—
	ścinanie	—	0,6
Spoiny pachwinowe	$R_e \leq 255$	0,9	0,8
	$255 < R_e \leq 355$	0,8	0,7
	$355 < R_e \leq 460$	0,7	0,6

*) μ - stosunek naprężeń średnich do maksymalnych.
Zależność podana w tabeli dotyczy spoin normalnej jakości przy kontroli zgrubnej. W przypadku zapewnienia kontroli defektoskopowej całych spoin można przyjmować $s_n = 1$.

3.3. Obliczanie połączeń spawanych obciążonych statycznie

3.3.1. Zależności podstawowe

Przekrój obliczeniowy połączenia spoiną czołową przyjmuje się w zasadzie równy polu powierzchni przekroju cieńszego z łączonych elementów. W przypadku braku całkowitego wypełnienia przestrzeni pomiędzy czołami łączonych części należy to uwzględnić przy wyznaczaniu przekroju obliczeniowego.

Rys. 3.1. Wyznaczanie grubości obliczeniowej a spoiny pachwinowej

Określając przekrój obliczeniowy spoiny pachwinowej, grubość spoiny a przyjmuje się równą wyprowadzonej z grani wysokości trójkąta wpisanego w przekrój spoiny, jak to pokazano na rysunku 3.1. Długością obliczeniową spoiny jest suma długości spoin $\sum l$, pomniejszona o tzw. kratery, tj. miejsca początku i końca spoiny oraz załamania kierunku spoiny, gdzie jakość spoiny z powodu niewielkiego przetopienia jest znacznie gorsza. Długość kraterów przyjmuje się równą grubości spoiny a . Na rysunku 3.2 przedstawiono przykłady wyznaczania przekroju obliczeniowego spoiny pachwinowej F_{sp} . Dodatkowo, nie uwzględnia się przy wyznaczaniu przekroju spoiny pachwinowej tych odcinków

: dwóch symet-
rycz możemy na-
ia. Składowe te

Warunek wytrzymałości spoin jest określony wzorem (3.2)

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_r^2 + \left(\frac{s_n}{s_t} \tau_t\right)^2} \leq s_n k$$

a po podstawieniu wyrażań na σ_r i τ_t

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{P_n}{l_{sp} g}\right)^2 + \left(\frac{s_n}{s_t} \cdot \frac{P_t}{l_{sp} g}\right)^2} \leq s_n k$$

Po przekształceniu można wyznaczyć wymaganą grubość blachy na złącze (przyjmujemy z tabeli 3.2: $s_n = 0,85$, $s_t = 0,6$)

$$g \geq \frac{1}{l_{sp} s_n k} \sqrt{P_n^2 + \left(\frac{s_n P_t}{s_t}\right)^2} =$$

$$= \frac{1}{38,2 \cdot 0,85 \cdot 210} \cdot \sqrt{(17,7 \cdot 10^3)^2 + \left(\frac{0,85}{0,6} \cdot 17,7 \cdot 10^3\right)^2} = 4,5 \text{ mm}$$

Zastosujemy blachę o grubości $g = 10 \text{ mm}$.

Średnicę otworu na przegub (sworzeń) wyznaczamy z warunku na dopuszczalny nacisk powierzchniowy

$$p = \frac{P}{dg} \leq p_{dop}$$

Przyjmujemy $p_{dop} = 1,25 k$ (wg PN-90/B-03200 dla połączeń sworzniowych), więc

$$p_{dop} = 1,25 k = 1,25 \cdot 210 = 262,5 \text{ MPa}$$

Po przekształceniu podanego warunku otrzymujemy

$$d \geq \frac{P}{g p_{dop}} = \frac{50 \cdot 10^3}{10 \cdot 262,5} = 19,05 \text{ mm}$$

Przyjmujemy średnicę otworu $d = 20 \text{ mm}$.

P r z y k ł a d 3.10. Zaprojektować spawany węzeł kratownicy, z układem prętów przedstawionym na rysunku 3.23. Pręt 1 jest rozciągany siłą $S_1 = 100 \text{ kN}$, a pręt 2 ściskany siłą $S_2 = 50 \text{ kN}$. Siły w pozostałych dwóch prętach należy wyznaczyć. Długość ściskanego pręta 2 wynosi $l_2 = 1500 \text{ mm}$. Na pręty dobrać należy typowe kształtowniki walcowane. Kąt $\alpha = 45^\circ$.

Zakładamy, że pręty 3 i 4 są rozciągane siłami S_3 i S_4 . Na podstawie warunków równowagi sił w węźle można napisać:

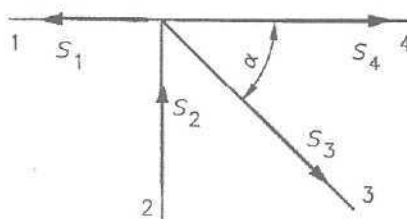
$$\begin{cases} -S_1 + S_3 \cos \alpha + S_4 = 0 \\ S_2 - S_3 \sin \alpha = 0 \end{cases}$$

Z drugiego z równań otrzymujemy

$$S_3 = \frac{S_2}{\sin \alpha} = \frac{50}{\sin 45^\circ} \approx 70,7 \text{ kN}$$

a po podstawieniu do pierwszego równania i przekształceniu

$$S_4 = S_1 - S_3 \cos \alpha = 100 - 70,7 \cdot \cos 45^\circ = 50 \text{ kN}$$



Rys. 3.23. Ustawienie prętów w węźle kratownicy oraz siły działające w prętach

Zatem siły w prętach 3 i 4 są, tak jak założono, rozciągające.

Zastosujmy jako materiał, z którego wykonane są elementy kratownicy, stal St3S, dla której $k = 215 \text{ MPa}$ oraz $k_r = 125 \text{ MPa}$. Pręty 1 i 4 można wykonać jako całość z jednego kształtownika. Wygodnie jest wybrać teownik, bowiem do jego środka można przyspawać blachę węzłową z użyciem spoiny czołowej, otrzymując połączenie o dużej wytrzymałości. Natomiast na pręty 3 i 4 zastosujemy po dwa symetrycznie względem siebie ustawione kątowniki.

Pręt 1 jest obciążony siłą $S_1 = 100 \text{ kN}$. Wymagany przekrój pręta wyznaczyć można z warunku wytrzymałości na rozciąganie

$$F_1 \geq \frac{S_1}{k_r} = \frac{100 \cdot 10^3}{125} = 800 \text{ mm}^2$$

Zastosujemy teownik $160 \times 60 \times 7$ o przekroju $F = 794 \text{ mm}^2$. Do środka przyspawana będzie blacha węzłowa o grubości 7 mm . Propozycję rozwiązania węzła przedstawiono na rysunku 3.24. Ściskająca siła S_2 jest przenoszona przez 2 symetrycznie położone kątowniki, każdy jest obciążony siłą $S_2/2$. Kątowniki pracują na wyboczenie, z warunku na wyboczenie wyznaczamy przekrój każdego z nich

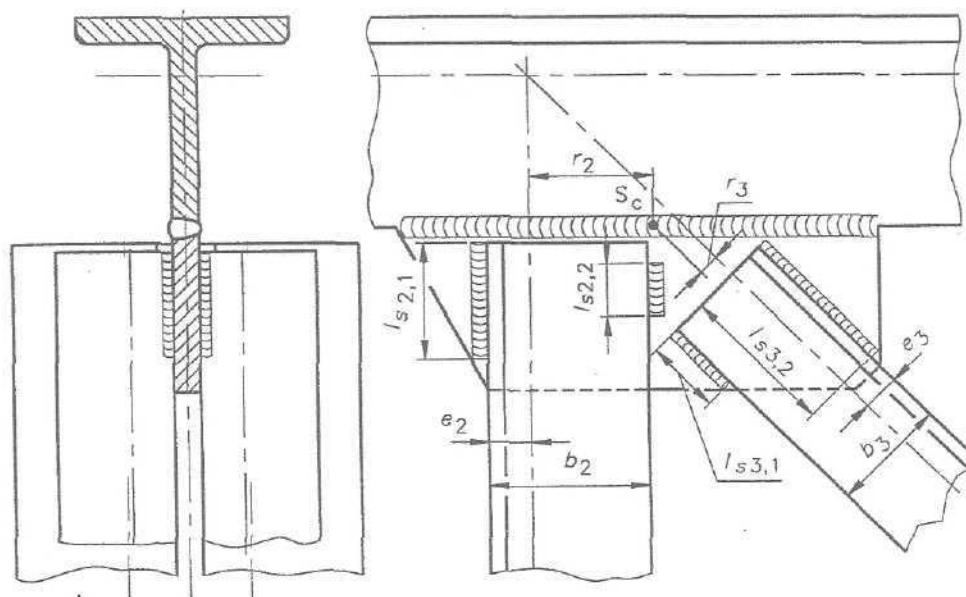
$$P_{kr} \geq x_w S$$

gdzie:

x_w - współczynnik bezpieczeństwa na wyboczenie,
 S - siła ściskająca pręt.

Zakładając, że smukłość kątownika jest większa od $\lambda_{gr} = 100$, siłę krytyczną wyznaczamy ze wzoru Eulera

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 E J_{\min}}{l_r^2}$$



Rys. 3.24. Propozycja rozwiązania konstrukcyjnego spawanego węzła kratownicy

Z podanych zależności wyznaczyć można wymagany najmniejszy moment bezwładności pojedynczego kątownika J_{\min}

$$J_{2\min} \geq \frac{x_w \frac{S_2}{2} l_{r2}^2}{\pi^2 E}$$

Ponieważ w kratownicy spawanej obydwie końce pręta są sztywno zamocowane, to długość zredukowana pręta l_{r2} równa jest długości rzeczywistej pręta l_2 . Tak więc moment bezwładności $J_{2\min}$, przy założeniu współczynnika bezpieczeństwa $x_w = 3$, powinien być

$$J_{2\min} \geq \frac{3 \cdot \frac{50 \cdot 10^3}{2} \cdot 1500^2}{\pi^2 \cdot 2,06 \cdot 10^5} = 8,3 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Na pręt 2 dobieramy kątowniki równoramienne L60×60×6 o najmniejszym momencie bezwładności $J_{\min} = 9,43 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ oraz $J_x = 22,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$, mimośrodkie $e = 16,9 \text{ mm}$ i polu przekroju $F = 691 \text{ mm}^2$. Smukłość pojedynczego kątownika wynosi

$$\lambda = \frac{l_{r2}}{\sqrt{\frac{J_{2\min}}{F_2}}} = \frac{1500}{\sqrt{\frac{9,43 \cdot 10^4}{691}}} = 128,4$$

a zatem jest spełnione założenie początkowe.

Rozciągająca siła S_3 jest również przenoszona przez dwa symetrycznie położone kątowniki, których wymagany przekrój ustalić można z warunku wytrzymałości na rozciąganie

$$F_3 \geq \frac{S_3}{k_r} = \frac{70,7 \cdot 10^3}{125} = 282,8 \text{ mm}^2$$

Przyjmujemy, że zastosowane będą kątowniki równoramienne L45×45×5 o przekroju $F = 430 \text{ mm}^2$ i mimośrodzie $e = 12,8 \text{ mm}$.

Pręt 2 będzie połączony z blachą węzłową spoiną pachwinową, pracującą na ścinanie. Jej grubość ustala się na podstawie grubości półki kątownika. W tym przypadku wynosi ona $g_2 = 6 \text{ mm}$, więc

$$a = 0,7g_2 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjmujemy $a = 4 \text{ mm}$. Łączną długość spoin łączących ustala się z warunku (3.5). Dla przyjętego materiału współczynnik wytrzymałości spoiny dotyczący naprężeń stycznych jest $s_s = 0,8$. Zatem łączna długość spoin powinna być

$$l_{s2} \geq \frac{S_2}{as_s k} = \frac{50 \cdot 10^3}{4 \cdot 0,8 \cdot 215} = 36,3 \text{ mm}$$

Aby uniknąć zginania spoin, ich długość powinna być odwrotnie proporcjonalna do ich odległości od osi obojętnej kątownika. Tak więc ustalamy:

$$l_{s2,1} = l_{s2} \frac{b_2 - e_2}{b_2} = 36,3 \cdot \frac{60 - 16,9}{60} = 26,1 \text{ mm}$$

$$l_{s2,2} = l_{s2} \frac{e_2}{b_2} = 36,3 \cdot \frac{16,9}{60} = 10,2 \text{ mm}$$

Uwzględniając, że w rzeczywistości spoiny są dłuższe, bo dochodzą jeszcze nie uwzględnione w przekroju obliczeniowym krater, przyjmujemy długość spoiny $l_{s2,2} = 18 \text{ mm}$ i proporcjonalnie większą spoinę $l_{s2,1} = 46 \text{ mm}$.

Tak samo obliczymy spoiny pachwinowe łączące pręt 3 z blachą węzłową. Tym razem grubość półki wynosi $g_3 = 5 \text{ mm}$, a więc grubość spoiny może wynosić

$$a = 0,7g_3 = 0,7 \cdot 5 = 3,5 \text{ mm}$$

Przyjmujemy $a = 3 \text{ mm}$. Łączna długość spoin musi być

$$l_{s3} \geq \frac{S_3}{as_s k} = \frac{70,7 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,8 \cdot 215} = 68,5 \text{ mm}$$

Długości pojedynczych spoin wynoszą:

$$l_{s3,1} = l_{s3} \frac{e_3}{b_3} = 68,5 \cdot \frac{12,8}{45} = 19,5 \text{ mm}$$

$$l_{s3,2} = l_{s3} \frac{b_3 - e_3}{b_3} = 68,5 \cdot \frac{45 - 12,8}{45} = 49,0 \text{ mm}$$

Przyjmijmy $l_{s3,1} = 25 \text{ mm}$ oraz $l_{s3,2} = 63 \text{ mm}$.

Po przyjęciu kształtu blachy węzłowej można ustalić długość spoiny czołowej łączącej blachę ze środkiem teownika. W przyjętym rozwiązaniu wynosi ona $l_s = 180 \text{ mm}$. Grubość spoiny równa jest grubości blachy węzłowej $g = 7 \text{ mm}$. Środek ciężkości spoiny czołowej jest położony w połowie długości spoiny i jest odległy od osi pręta 2 o $r_2 = 40 \text{ mm}$ (na podstawie rys. 3.24) i od osi pręta 3 o $r_3 = 12 \text{ mm}$. Spoina jest więc zginana momentem

$$M_g = S_2 r_2 + S_3 r_3 = 50 \cdot 10^3 \cdot 40 + 70,7 \cdot 10^3 \cdot 12 = 2,848 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Wskaźnik wytrzymałości spoiny na zginanie wynosi

$$W_x = \frac{g l_s^2}{6} = \frac{7 \cdot 180^2}{6} = 37,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Napężenia gnące w spoinie

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} = \frac{2,848 \cdot 10^6}{37,8 \cdot 10^3} = 75,34 \text{ MPa}$$

Ponadto spoina jest ścinana siłą

$$T = S_3 \cos \alpha = 70,7 \cdot 10^3 \cdot \cos 45^\circ = 50 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Pole powierzchni przekroju spoiny wynosi

$$F_{sp} = g l_s = 7 \cdot 180 = 1260 \text{ mm}^2$$

Napężenia tnące w spoinie są zatem

$$\tau_t = \frac{T}{F_{sp}} = \frac{50 \cdot 10^3}{1260} = 39,68 \text{ MPa}$$

Napężenia zastępcze wyznaczmy ze wzoru (3.2). Dla spoiny czołowej zginanej i ścinanej odpowiednie współczynniki mają wartość $s_n = 1$, $s_t = 0,6$. Zatem napężenia zastępcze wynoszą

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_g^2 + \left(\frac{s_n}{s_t} \tau_t\right)^2} = \sqrt{75,34^2 + \left(\frac{1}{0,6} \cdot 39,68\right)^2} = 100,25 \text{ MPa}$$

Napężenia dopuszczalne są większe, bowiem mają wartość

$$k_{st} = s_t k = 0,6 \cdot 215 = 129 \text{ MPa}$$

Zaprojektowany węzeł kratownicy przeniesie zadane obciążenia.