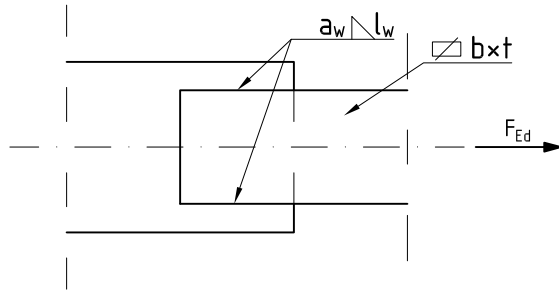


1. Połączenia spawane

Przykład 1a. Sprawdzić nośność spawanego połączenia pachwinowego zakładając osiową pracę spoiny.



Rysunek 1. Przykład zakładkowego połączenia pachwinowego

Dane: geometria połączenia $a_w = 6 \text{ mm}$,
 $l_w = 200 \text{ mm}$,
 $b = 250 \text{ mm}$,
 $t = 10 \text{ mm}$,
 $F_{Ed} = 500 \text{ kN}$,
stal gatunku S235
 $\rightarrow t \leq 40 \text{ mm}$ $f_y = 235 \text{ MPa}$,
 $f_u = 360 \text{ MPa}$.

Naprężenia w przekroju spoiny wynoszą:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 0, \quad \tau_{\parallel} = \frac{F_{Ed}}{\sum a_w l_w} = \frac{500 \cdot 10^3 \text{ N}}{2 \cdot 6 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm}} = 208,33 \text{ MPa}.$$

Warunek nośności obliczeniowej spoiny:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{0^2 + 3(0^2 + 208,33^2)} = 360,84 \text{ MPa} \not\leq \frac{f_u}{\beta \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{\perp} = 0 \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 360}{1,25} = 259,2 \text{ MPa}.$$

Warunek nośności połączenia **nie jest** zapewniony.

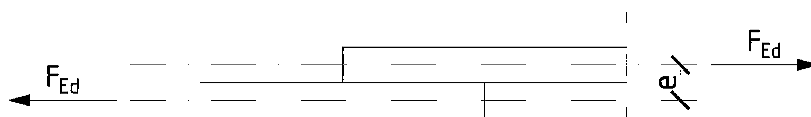
Warunek nośności przekroju:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{250 \cdot 10 \cdot 235}{1,0} = 587,5 \cdot 10^3 \text{ N} = 587,5 \text{ kN},$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{500}{587,5} = 0,85.$$

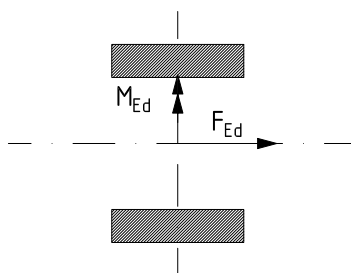
Warunek nośności połączenia jest zapewniony.

Przykład 1b. Sprawdzić nośność połączenia pokazanego w przykładzie 1a uwzględniając mimośród wynikający z nieosiowego przyłożenia obciążenia.



Rysunek 2. Mimośród powstały z nieosiowego przyłożenia obciążenia

Przyjęto, że oba płaskowniki są tej samej grubości $t = 10$ mm.



Rysunek 3. Schemat obciążenia zewnętrznego działającego na spoinę

Poza wyteżeniem spowodowanym naprężeniami stycznymi τ_{\parallel} na spoinę oddziałują również naprężenia σ powstałe w wyniku nieosiowego przyłożenia obciążenia. Wynoszą one:

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

Wskaźnik zginania kładu spoiny:

$$W = 2 \cdot \frac{a_w \cdot l_w^2}{6} = 2 \cdot \frac{6 \cdot 200^2}{6} = 80\,000 \text{ mm}^3.$$

Moment:

$$M = F_{Ed} \cdot e = 500 \cdot 10^3 \cdot 10 = 5 \cdot 10^6 \text{ Nmm.}$$

Naprężenia σ wynoszą więc:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{5 \cdot 10^6}{8 \cdot 10^4} = 62,5 \text{ MPa.}$$

Następnie naprężenia σ rozkładamy na składową σ_{\perp} i τ_{\perp} .

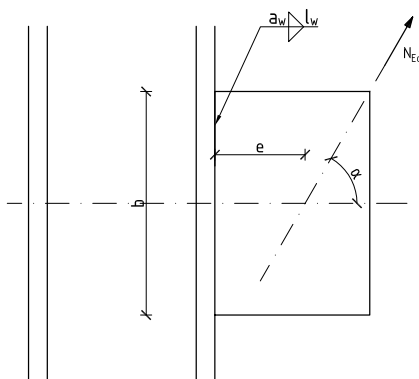
$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{62,5}{\sqrt{2}} = 44,19 \text{ MPa.}$$

Normowy warunek nośności obliczeniowej spoiny wygląda teraz następująco:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{44,19^2 + 3(44,19^2 + 208,33^2)} = 371,5 \text{ MPa.}$$

Porównując to z wartością uzyskaną bez uwzględniania mimośrodu uzyskano wartość o $\Delta = \frac{371,5 - 360,84}{360,84} \cdot 100\% = 3\%$ większą w stosunku do obliczeń uproszczonych.

Przykład 2. Sprawdzić nośność spawanego połączenia pachwinowego.



Rysunek 4. Przykład połączenia blachy ze słupem spoinami pachwinowymi

Dane: geometria połączenia $a_w = 3 \text{ mm}$,
 $l_w = 300 \text{ mm}$,
 $b = 300 \text{ mm}$,
 $\alpha = 30^\circ$,
 $e = 100 \text{ mm}$,
 $F_{Ed} = 150 \text{ kN}$,
 stal gatunku S235
 $\rightarrow t \leq 40 \text{ mm}$ $f_y = 235 \text{ MPa}$,
 $f_u = 360 \text{ MPa}$.

Sprawdzenie nośności połączenia metodą kierunkową:

1. Określenie charakterystyk spoiny:
 — pole przekroju spoin:

$$A_w = 2 \cdot a_w \cdot l_w = 2 \cdot 3 \cdot 300 = 1800 \text{ mm}^2,$$

- wskaźnik wytrzymałości na zginanie:

$$W_w = 2 \cdot \frac{a_w \cdot l_w^2}{6} = 2 \cdot \frac{3 \cdot 300^2}{6} = 90 \cdot 10^3 \text{ mm}^3.$$

2. Sprowadzenie siły zewnętrznej do środka ciężkości układu spoin:
 — składowa pozioma:

$$N_{Ed,H} = N_{Ed} \cdot \cos \alpha = 150 \cdot \cos 30^\circ = 129,9 \text{ kN},$$

- składowa pionowa:

$$N_{Ed,V} = N_{Ed} \cdot \sin \alpha = 150 \cdot \sin 30^\circ = 75 \text{ kN},$$

- moment:

$$M_{Ed} = N_{Ed,V} \cdot e = 75 \cdot 0,1 = 7,5 \text{ kNm}.$$

3. Określenie najbardziej wyjątkowego punktu w spoinie. Wyznaczenie naprężeń w tym punkcie:
 Naprężenia normalne pochodzące od rozciągania i zginania:

$$\sigma = \frac{N_{Ed,H}}{A_w} + \frac{M_{Ed}}{W_w} = \frac{129,9 \cdot 10^3}{1,8 \cdot 10^3} + \frac{7,5 \cdot 10^6}{90 \cdot 10^3} = 72,17 + 83,33 = 155,5 \text{ MPa},$$

Naprężenia normalne prostopadłe do pola przekroju spoiny i styczne prostopadłe do jej osi:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{155,5}{\sqrt{2}} \approx 110 \text{ MPa}.$$

Naprężenia styczne równoległe do osi spoiny:

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{Ed,V}}{A_w} = \frac{75 \cdot 10^3}{1,8 \cdot 10^3} = 41,67 \text{ MPa.}$$

4. Sprawdzenie warunku nośności:

Dla stali S235 współczynnik $\beta_w = 0,8$. Współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_{M2} = 1,25$. Warunek nośności wyznaczony metodą kierunkową:

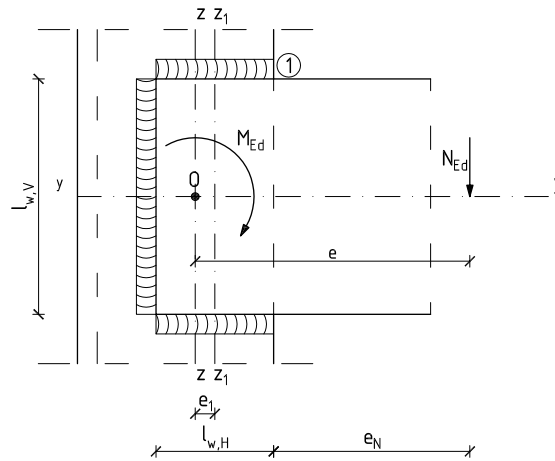
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{110^2 + 3(110^2 + 41,67^2)} = 231,54 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

oraz

$$\sigma_{\perp} = 110 \text{ MPa} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \frac{360}{1,25} = 259,9 \text{ MPa.}$$

Nośność zaprojektowanej spoiny pachwinowej jest wystarczająca.

Przykład 3. Sprawdzić nośność spoin pachwinowych łączących gałęzie słupa z przewiązkami.



Rysunek 5. Przykład zakładkowego połączenia pachwinowego zginanego w płaszczyźnie blachy

Dane: geometria połączenia $a_w = 10 \text{ mm}$,

$$l_{w,H} = 200 \text{ mm},$$

$$l_{w,V} = 300 \text{ mm},$$

$$e_N = 200 \text{ mm},$$

$$N_{Ed} = 300 \text{ kN},$$

stal gatunku S235

$$\rightarrow t \leq 40 \text{ mm}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa},$$

$$f_u = 360 \text{ MPa}.$$

Sprawdzenie nośności połączenia metodą kierunkową:

1. Określenie charakterystyk spoiny:

Poszczególne pola przekrojów poprzecznych spoin:

— spoiny pionowej:

$$A_{W,V} = a_w \cdot l_{w,V} = 10 \cdot 300 = 3000 \text{ mm}^2,$$

— spoiny poziomej:

$$A_{W,H} = 2 \cdot a_w \cdot l_{w,H} = 2 \cdot 10 \cdot 200 = 4000 \text{ mm}^2.$$

Pole przekroju poprzecznego spoin:

$$A_W = A_{W,V} + A_{W,H} = 3000 + 4000 = 7000 \text{ mm}^2.$$

Położenie środka ciężkości układu spoin:

$$e_1 = \frac{S_{z_1}}{A_W} = \frac{10 \cdot 300 \cdot 100}{7000} = 42,86 \text{ mm.}$$

Mimośrodek działania siły:

$$e = e_N + \frac{l_{w,H}}{2} + e_1 = 200 + 100 + 42,86 = 342,9 \text{ mm.}$$

Momenty bezwładności przekroju spoin:

$$I_y = 2 \cdot \left(\frac{200 \cdot 10^3}{12} + 10 \cdot 200 \cdot 150^2 \right) + \frac{10 \cdot 300^3}{12} = 11\,253 \cdot 10^4 \text{ mm}^4,$$

$$I_z = 2 \cdot \left(\frac{10 \cdot 200^3}{12} + 10 \cdot 200 \cdot 42,86^2 \right) + \frac{300 \cdot 10^3}{12} + 10 \cdot 300 \cdot (100 - 42,86)^2 = 3\,050 \cdot 10^4 \text{ mm}^4.$$

Biegunowy moment bezwładności układu spoiny:

$$I_0 = I_y + I_z = 11\,253 \cdot 10^4 + 3\,050 \cdot 10^4 = 14\,303 \cdot 10^4 \text{ mm}^4.$$

2. Sprowadzenie siły zewnętrznej do środka ciężkości układu spoin:

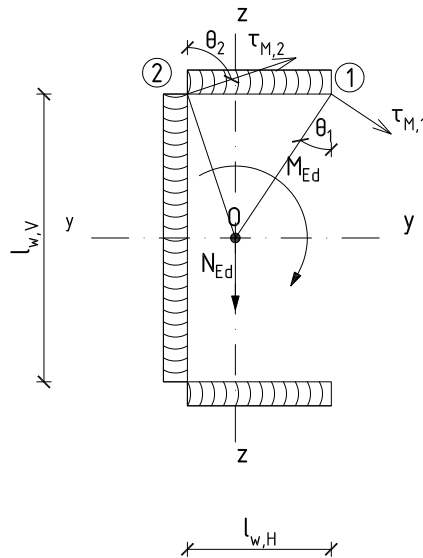
Moment obciążający złącze:

$$M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e = 300 \cdot 10^3 \cdot 342,9 = 102,87 \cdot 10^6 \text{ kNmm} = 102,87 \text{ kNm.}$$

3. Określenie najbardziej wyężonego punktu w spoinie. Wyznaczenie naprężeń w tym punkcie:

Naprężenia w spoinie pochodzą od składowej siły pionowej N_{Ed} oraz momentu skręcającego M_{Ed} . Spoina przenosi naprężenia powstałe w wyniku działania siły N_{Ed} proporcjonalnie do pól powierzchni pod wykresem naprężeń ścinających kład spoiny.

Można jednak założyć, że składową N_{Ed} przenosi jedynie spoina pionowa, a moment M_{Ed} rozkłada się proporcjonalnie do odległości od środka ciężkości układu.



Rysunek 6. Schemat obciążeń działających na spoinę

— Naprężenia w punkcie 1:

Odległość od rozpatrywanego punktu do środka ciężkości spoiny:

$$r_1 = \sqrt{(150)^2 + (100 + 42,86)^2} = 207,1 \text{ mm.}$$

Kąt θ_1 pomiędzy składową pionową a składową prostopadłą do r_1 :

$$\theta_1 = \arctan \frac{z_1}{y_1} = \arctan \frac{150}{142,86} = 46,4^\circ.$$

• Moment M_{Ed} :

$$\tau_{M,1} = \frac{M_{Ed} \cdot r_1}{I_0} = \frac{102,87 \cdot 10^6 \cdot 207,1}{14\,303 \cdot 10^4} = 149 \text{ MPa.}$$

Składowa pionowa naprężeń:

$$\sigma_{M,1} = \tau_M \cdot \cos \theta = 149 \cdot \cos 46,4^\circ = 103 \text{ MPa,}$$

naprężenia styczne równoległe do osi spoiny:

$$\tau_{\parallel} = \tau_M \cdot \sin \theta = 149 \cdot \sin 46,4^\circ = 108 \text{ MPa}$$

Następnie naprężenia σ_M rozłożono na składowe $\sigma_{\perp,M}$ i $\tau_{\perp,M}$:

$$\sigma_{\perp,M} = \tau_{\perp,M} = \frac{\sigma_M \cdot \sqrt{2}}{2} = 103 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 73 \text{ MPa.}$$

Normowa wytrzymałość spoiny w punkcie 1:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{73^2 + 3(73^2 + 108^2)} = 237,3 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa,}$$

oraz

$$\sigma_{\perp} = 73 \text{ MPa} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 360}{1,25} = 259 \text{ MPa.}$$

Nośność spoiny w punkcie 1 jest zapewniona.

— Naprężenia w punkcie 2: Odległość od rozpatrywanego punktu do środka ciężkości spoiny:

$$r_2 = \sqrt{(150)^2 + (100 - 42,86)^2} = 138,69 \text{ mm.}$$

Kąt θ_2 pomiędzy składową pionową a składową prostopadłą do r_2 :

$$\theta_2 = \arctan \frac{z_2}{y_2} = \arctan \frac{150}{57,14} = 69,14^\circ.$$

• Siła N_{Ed} :

$$\tau_{\parallel,N} = \frac{N_{Ed}}{A_{w,V}} = \frac{300 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^3} = 100 \text{ MPa.}$$

• Moment M_{Ed} :

$$\tau_{M,2} = M_{Ed} \frac{r_2}{I_0} = 102,87 \cdot 10^6 \frac{138,7}{14\,303 \cdot 10^4} = 99,73 \text{ MPa.}$$

Składowa pionowa naprężeń (uwaga – ze znakiem ujemnym):

$$\tau_{\parallel,2} = \tau_{M,2} \cdot \cos \theta_2 = 99,73 \cdot \cos 69,14^\circ = 35,5 \text{ MPa,}$$

Składowa pozioma naprężeń:

$$\sigma_{M,2} = \tau_{M,2} \cdot \sin \theta_2 = 99,73 \cdot \sin 69,14^\circ = 93,2 \text{ MPa.}$$

Następnie naprężenia $\sigma_{M,2}$ należy rozłożyć na składowe $\sigma_{\perp,M,2}$ i $\tau_{\perp,M,2}$:

$$\sigma_{\perp,M,2} = \tau_{\perp,M,2} = \frac{\sigma_{M,2}}{\sqrt{2}} = \frac{93,2}{\sqrt{2}} = 65,91 \text{ MPa.}$$

Normowy warunek nośności spoiny w punkcie 2:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{65,91^2 + 3 \cdot (65,91^2 + (100 - 35,5)^2)} = 172,8 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa.}$$

oraz

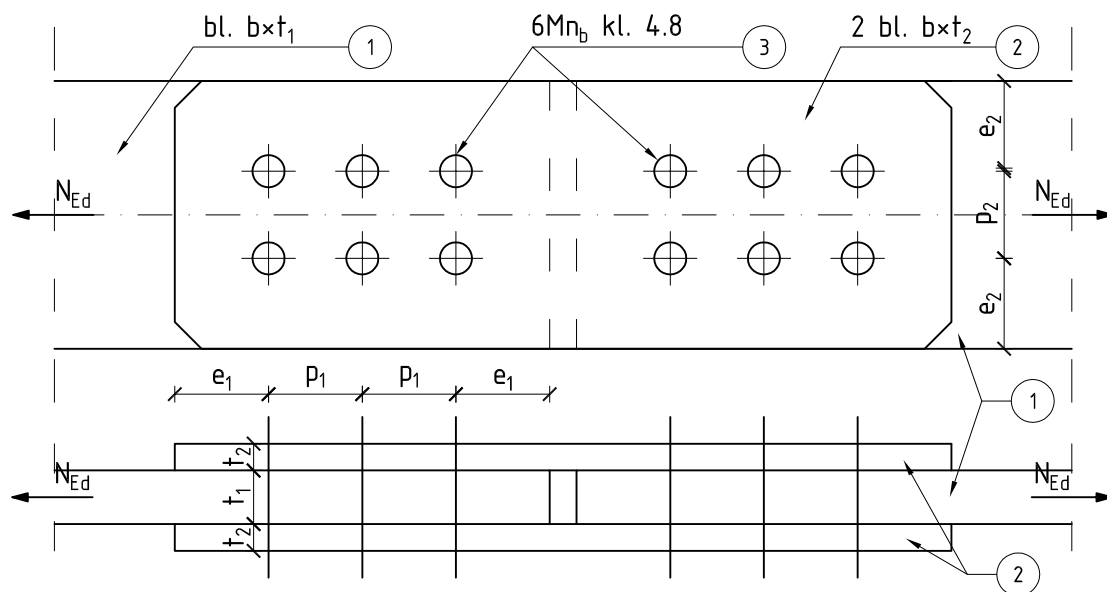
$$\sigma_{\perp} = 65,91 \text{ MPa} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 360}{1,25} = 259 \text{ MPa.}$$

Nośność spoiny w punkcie 2 jest zapewniona.

Ostatecznie nośność zaprojektowanej spoiny jest wystarczająca.

2. Połączenia śrubowe

Przykład 1. Sprawdzić nośność zakładkowego połączenia śrubowego blach.



Rysunek 7. Przykład zakładkowego połączenia pachwinowego zginanego w płaszczyźnie blachy

Dane: geometria połączenia $e_1 = 40 \text{ mm}$,
 $e_2 = 50 \text{ mm}$,
 $p_1 = 60 \text{ mm}$,
 $p_2 = 100 \text{ mm}$,
 $N_{Ed} = 600 \text{ kN}$,

stal gatunku S235

$\rightarrow t \leq 40 \text{ mm}$

$f_y = 235 \text{ MPa}$,

$f_u = 360 \text{ MPa}$,

$t_1 = 15 \text{ mm}$,

$t_2 = 10 \text{ mm}$,

$d_0 = d + \Delta = 20 + 2 = 22 \text{ mm}$,

śruby M20 kl. 4.8

$d = 20 \text{ mm}$,

$A_s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 20^2}{4} = 314,16 \text{ mm}^2$,

$f_{yb} = 320 \text{ MPa}$,

$f_{ub} = 400 \text{ MPa}$,

$\gamma_{M2} = 1,25$.

1. Sprawdzenie geometrii przyjętego połączenia:

$$e_1 = 40 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ mm},$$

$$e_2 = 50 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ mm},$$

$$p_1 = 60 \text{ mm} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4 \text{ mm},$$

$$p_2 = 100 \text{ mm} > 2,4d_0 = 2,4 \cdot 22 = 52,8 \text{ mm}.$$

$L_j = 2 \cdot p_1 = 2 \cdot 60 = 120 \text{ mm} \leq 15 \cdot d = 15 \cdot 20 = 300 \text{ mm} \rightarrow$ złącze nie należy do kategorii połączeń długich.

2. Sprawdzenie nośności poszczególnych łączników:

— Nośność śruby na ścinanie:

Założono, że płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby, zatem $\alpha_v = 0,6$. Nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie wynosi:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 400 \cdot 314,16}{1,25} = 60,32 \cdot 10^3 \text{ N} = 60,32 \text{ kN}.$$

Ponieważ w analizowanym przykładzie śruba jest dwucięta, jej nośność wynosi:

$$2 \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot 60,32 = 120,64 \text{ kN}.$$

Nośność śruby na ścięcie trzpienia wyznaczona w [2] wynosi $S_{Rv} = 118,6 \text{ kN}$.

— Nośność śruby na docisk wyraża się wzorem:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

- Śruby skrajne w kierunku obciążenia i skrajne prostopadłe do obciążenia:

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 22} = 0,61; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{400}{360} = 1,11; 1,0 \right] = 0,61$$

$$k_1 = 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{50}{22} - 1,7 = 4,66 \geq 2,5$$

zatem

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,61 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 15}{1,25} = 131\,760 \text{ N} = 131,76 \text{ kN}.$$

- Śruby pośrednie w kierunku obciążenia i skrajne prostopadłe do obciążenia:

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 22} = 0,66; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{400}{360} = 1,11; 1,0 \right] = 0,66$$

$$k_1 = 2,5,$$

zatem

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,66 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 15}{1,25} = 142\,560 \text{ N} = 142,56 \text{ kN}.$$

Nośność śruby na docisk wyznaczona w [2] wynosi $S_{Rb} = 129,0 \text{ kN}$.

3. Sprawdzenie nośności grupy łączników:

Najmniejszą otrzymaną wartością jest nośność śruby na ścinanie $F_{v,Rd} = 120,6 \text{ kN}$, dlatego nośność grupy łączników jest iloczynem liczby łączników n_b i nośności na ścinanie $F_{v,Rb}$.

$$F_{Rd} = n_b \cdot F_{v,Rd} = 6 \cdot 120,6 = 723,6 \text{ kN}.$$

Nośność połączenia wyznaczona w [2] wynosi $F_{Rj} = 711,6 \text{ kN}$.

4. Sprawdzenie nośności przekroju netto:

Pole przekroju osłabionego łącznikami wynosi:

$$A_{net} = (b - 2 \cdot d_0) \cdot t_2 = (2e_2 + p_2 - 2 \cdot d_0) \cdot t_2 = (2 \cdot 50 + 100 - 2 \cdot 22) \cdot 15 = 2\,340 \text{ mm}^2.$$

Nośność blachy:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 2\,340 \cdot 360}{1,25} = 606\,528 \text{ N} = 606,5 \text{ kN}.$$

Nośność przekroju osłabionego wyznaczona w [2] wynosi $N_{Rt} = 642,25 \text{ kN}$.

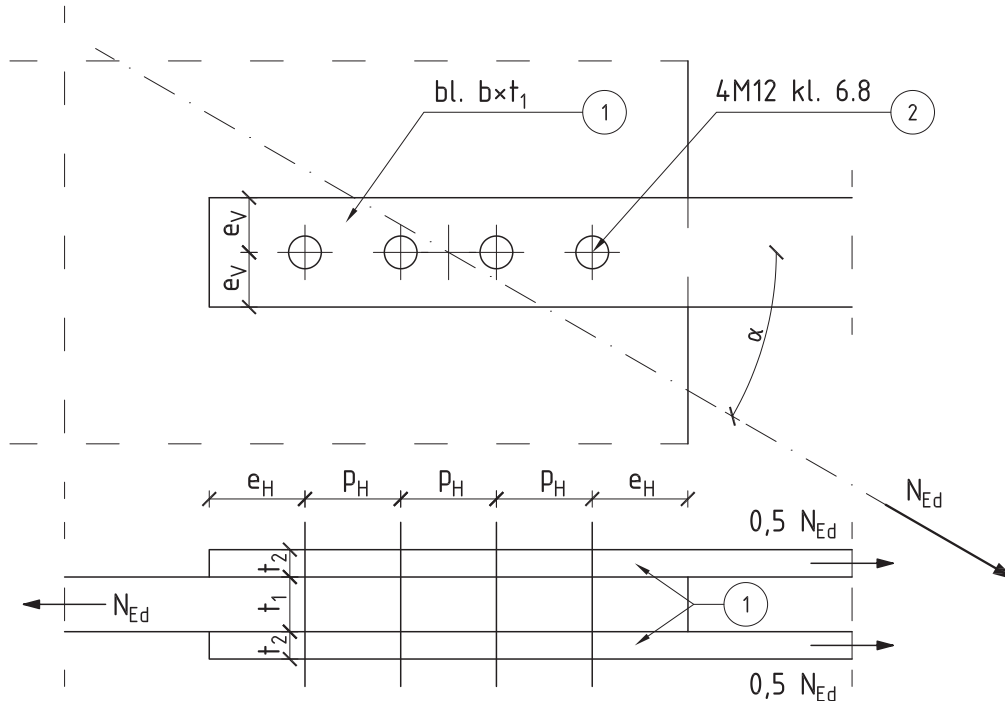
Zestawiając otrzymane wartości, uzyskujemy:

$$F_{Rd} = 723,6 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 600 \text{ kN},$$

$$N_{u,Rd} = 606,5 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 600 \text{ kN}.$$

Nośność pręta jest wystarczająca do przeniesienia założonego obciążenia.

Przykład 2. Sprawdzić nośność zakładkowego połączenia śrubowego blach.



Rysunek 8. Przykład śrubowego połączenia obciążonego w dwóch kierunkach

Połączenie jest obciążone w sposób bardziej złożony, lecz wypadkowa siła przechodzi przez środek ciężkości połączenia. W takim przypadku obciążenie zewnętrzne należy rozłożyć na kierunki prostopadłe i równoległe do krawędzi blach. Mamy zatem do rozpatrzenia dwa przypadki, kiedy to obciążenie należy rozłożyć na „poziome” i „pionowe”.

Dane: geometria połączenia $e_H = 20 \text{ mm}$,
 $e_V = 16 \text{ mm}$,
 $p_H = 30 \text{ mm}$,
 $\alpha = 30^\circ$,
 $N_{Ed} = 95 \text{ kN}$,

stal gatunku S235

$\rightarrow t \leq 40 \text{ mm}$

$f_y = 235 \text{ MPa}$,
 $f_u = 360 \text{ MPa}$,
 $t_1 = 15 \text{ mm}$,
 $t_2 = 7 \text{ mm}$,
 $d_0 = d + \Delta = 12 + 1 = 13 \text{ mm}$,

śruby M12 kl. 6.8

$d = 12 \text{ mm}$,
 $A_s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 12^2}{4} = 113,10 \text{ mm}^2$,
 $f_{yb} = 480 \text{ MPa}$,
 $f_{ub} = 600 \text{ MPa}$,
 $\gamma_{M2} = 1,25$.

1. Sprawdzenie geometrii przyjętego połączenia:

W takim przypadku należy sprawdzić przyjęte wymiary w dwóch kierunkach:

— kierunek „poziomy”:

$$e_H = e_1 = 20 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 13 = 15,6 \text{ mm},$$

$$e_V = e_2 = 16 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 13 = 15,6 \text{ mm},$$

$$p_H = p_1 = 32 \text{ mm} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 13 = 28,6 \text{ mm},$$

$$L_j = 2 \cdot p_H = 3 \cdot 32 = 96 \text{ mm} \leq 15 \cdot d = 15 \cdot 12 = 180 \text{ mm} \rightarrow \text{złącze nie należy do kategorii połączeń długich},$$

— kierunek „pionowy”:

$$e_V = e_1 = 16 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 13 = 15,6 \text{ mm},$$

$$e_H = e_2 = 16 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 13 = 15,6 \text{ mm},$$

$$p_H = p_2 = 32 \text{ mm} > 2,4d_0 = 2,2 \cdot 13 = 31,2 \text{ mm}.$$

2. Sprawdzenie nośności poszczególnych łączników:

— Nośność śruby na ścinanie:

Założono, że płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby, zatem $\alpha_v = 0,6$. Nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie wynosi:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 600 \cdot 113,10}{1,25} = 32,57 \cdot 10^3 \text{ N} = 32,57 \text{ kN}.$$

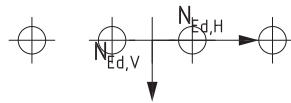
Ponieważ w analizowanym przykładzie śruba jest dwucięta, jej nośność wynosi:

$$2 \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot 32,57 = 65,14 \text{ kN}.$$

— Nośność śruby na docisk wyraża się wzorem:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

W przypadku tak rozłożonego obciążenia, w nośności śrub na dociski rozpatrywane są dwa przypadki:



Rysunek 9. Rozkład obciążenia na „pionowe” i „poziome”

- siła „pozioma” H :

\Rightarrow Śruba skrajna na kierunku obciążenia $N_{Ed,H}$ i skrajna na kierunku prostopadłym do obciążenia $N_{Ed,H}$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d = \frac{e_H}{3d_0} = \frac{20}{3 \cdot 13} = 0,51; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,67; 1,0 \right] = 0,51,$$

$$k_1 = 2,8 \frac{e_V}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{16}{13} - 1,7 = 1,75,$$

zatem

$$F_{b,Rd} = \frac{1,75 \cdot 0,51 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 14}{1,25} = 43,18 \cdot 10^3 \text{ N} = 43,18 \text{ kN}.$$

\Rightarrow Śruba pośrednia na kierunku obciążenia $N_{Ed,H}$ i skrajna na kierunku prostopadłym do obciążenia $N_{Ed,H}$

$$\alpha_d = \frac{p_H}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{32}{3 \cdot 13} - \frac{1}{4} = 0,57$$

$$k_1 = 1,75,$$

zatem

$$F_{b,Rd} = \frac{1,75 \cdot 0,57 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 14}{1,25} = 48,26 \cdot 10^3 \text{ N} = 48,26 \text{ kN}.$$

- siła „pionowa” V

⇒ Śruba skrajna na kierunku obciążenia $N_{Ed,V}$ i skrajna na kierunku prostopadłym do obciążenia $N_{Ed,V}$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d = \frac{e_V}{3d_0} = \frac{16}{3 \cdot 13} = 0,41; \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1,67; 1,0 \right] = 0,41,$$

$$k_1 = 2,8 \frac{e_H}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{20}{13} - 1,7 = 2,61 \geq k_1 = 2,5,$$

zatem

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,51 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 14}{1,25} = 61,69 \cdot 10^3 \text{ N} = 61,69 \text{ kN}.$$

⇒ Śruba skrajna na kierunku obciążenia $N_{Ed,V}$ i pośrednia na kierunku prostopadłym do obciążenia $N_{Ed,V}$

$$\alpha_d = 0,57$$

$$k_1 = 1,4 \frac{p_H}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{32}{13} - 1,7 = 1,75,$$

zatem

$$F_{b,Rd} = \frac{1,75 \cdot 0,57 \cdot 360 \cdot 12 \cdot 14}{1,25} = 48,26 \cdot 10^3 \text{ N} = 48,26 \text{ kN}.$$

3. Sprawdzenie nośności grupy łączników

Ponieważ nośność każdej śruby na docisk $F_{b,Rd}$ jest mniejsza od nośności na ścinanie $F_{v,Rd}$, zatem nośnością grupy łączników określamy sumy poszczególnych nośności na danych kierunkach „poziomym” i „pionowym”.

— Nośność na kierunku „poziomym” H :

$$F_{H,Rd} = \sum_{i=1}^{n_b} F_{b,Rd,i} = 43,18 \cdot 2 + 48,26 \cdot 2 = 182,88 \text{ kN} \geq N_{Ed,H} = N_{Ed} \cdot \cos 30^\circ = 95 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 82,27 \text{ kN},$$

— Nośność na kierunku „pionowym” V :

$$F_{H,Rd} = \sum_{i=1}^{n_b} F_{b,Rd,i} = 61,69 \cdot 2 + 48,26 \cdot 2 = 219,90 \text{ kN} \geq N_{Ed,V} = N_{Ed,V} \cdot \sin 30^\circ = 95 \cdot \frac{1}{2} = 47,5 \text{ kN}.$$

Nośność zaprojektowanego połączenia śrubowego jest wystarczająca.

4. Sprawdzenie nośności przekroju netto:

Pole przekroju osłabionego łącznikami wynosi:

$$A_{net} = (2e_V - d_0) \cdot 2t_2 = (2 \cdot 16 - 13) \cdot 2 \cdot 7 = 266 \text{ mm}^2.$$

Nośność blachy na kierunku „poziomym”:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 266 \cdot 360}{1,25} = 63 \, 245 \text{ N} = 63,25 \text{ kN} \leq F_{H,Rd} = 82,27 \text{ kN}.$$

Mimo, że połączenie zostało zaprojektowane prawidłowo, to okazuje się, że decydujące okazała się nośność przekroju osłabionego łącznikami, która jest mniejsza od przyłożonego obciążenia „poziomego”.

Literatura

- [1] Biegus A., *Obliczanie nośności śrub według PN-EN 1993-1-8*, Inżynieria i budownictwo, nr 3/2008.
- [2] Biegus A., *Połączenia śrubowe*, PWN, Warszawa-Wrocław 1997.
- [3] Kozłowski A., Pisarek Z., Wierzbiński S., *Projektowanie połączeń spawanych wg PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8*, Inżynieria i budownictwo, nr 3/2008.
- [4] Kozłowski A. pod red. *Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1. Część pierwsza: Wybrane elementy i połączenia*, Oficyna Wydawnicza PRZ, Rzeszów 2009.
- [5] PN-EN 1993-1-1:2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [6] PN-EN 1993-1-8:2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów.