

dr hab. inż. Mirosław Broniewicz, prof. PB^{1*)}

ORCID: 0000-0001-8267-6095

mgr inż. Szymon Lubas²⁾

mgr inż. Karolina Dec²⁾

ORCID: 0000-0002-5237-654X

dr hab. inż. Elżbieta Broniewicz, prof. PB¹⁾

ORCID: 0000-0002-9231-2225

Obliczanie połączeń spawanych kratownic wykonanych z ceowników i kształtowników zamkniętych RHS

Calculation of welding trusses overlap joints made of channels and RHS sections

DOI: 10.15199/33.2024.01.05

Streszczenie. Celem artykułu jest zaproponowanie metody oceny podatnych połączeń spawanych kratownic o pasach wykonanych z ceowników i krzyżulców z rur prostokątnych. W metodzie tej nośność spoin określa się w zależności od wielkości siły osiowej, uwzględniając długości współpracujące spoin pachwinowych. Jak wykazano w artykule, zastosowanie w takich połączeniach cienkich spoin pachwinowych, o grubości dobranej do wyteżenia pręta, jest dwukrotnie tańsze niż pełnościenne spoin czołowych. Ponadto przeprowadzona analiza cyklu życia wykazała, że zastosowanie cienkich spoin pachwinowych może zmniejszyć wpływ złącza spawanego na środowisko – o 73% pod względem emisji gazów cieplarnianych i o 70% pod względem zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej.

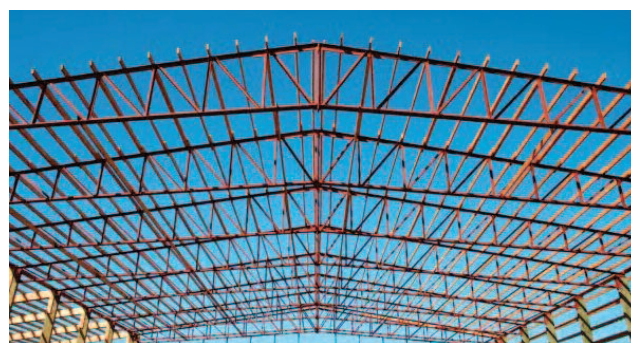
Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe; kształtowniki zamknięte; połączenia spawane; metoda obliczeniowa; analiza kosztów; LCA.

Abstract. The aim of the article is to propose a new method for assessing the flexible joints of welded trusses with chords made of C-sections and braces made of rectangular hollow sections. In this method, the capacity of the welds is determined depending on the value of the axial force, taking into account the effective lengths of the fillet welds. As shown in the article, in such connections, the use of thin fillet welds with a thickness matched to the member's load is twice cheaper than the use of solid butt welds. Additionally, the life cycle analysis performed showed that the use of thinner fillet welds could reduce the overall environmental impact of the welded joint by 73% in terms of greenhouse gas emissions and 70% in terms of non-renewable primary energy consumption.

Keywords: steel structures; hollow sections; welded joints; calculation methods; costs and LCA analysis.

W obiektach przemysłowych i halowych średnio i mało obciążonych można stosować lekkie dźwigary dachowe, w których pasy są wykonane z ceowników, natomiast pręty skratowania z kształtowników zamkniętych (fotografia). Takie rozwiązania projektowe można zwykle znaleźć w halach magazynowych, pawilonach, magazynach i innych budynkach przeznaczonych do świadczenia usług społecznych i komercyjnych [1].

Norma europejska EN 1993-1-8 [2] zawiera bardzo ogólne zalecenia dotyczące obliczania nośności połączeń spawanych w węzłach takich kratownic. Zalecono w niej projektowanie spoin czołowych pełnych lub spoin pachwinowych o takiej grubości, aby ich nośność była nie mniejsza niż nośność obliczeniowa przekroju łączonego pręta, niezależnie od stopnia jego wyteżenia. Powoduje to znaczne zawyżenie grubości wykonywanych spoin, w przypadkach kiedy pręty skratowania mają ujednolicony przekrój w części kratownicy, dobrany ze względu na maksymalną siłę. Zwiększa to znacznie koszt konstrukcji oraz wywołuje problemy technologiczne związane z prawidłowym wykonaniem grubych spoin. Norma [2] pozwala jednak na odstępianie od stosowania spoin pełnościenne



Dźwigary stalowe o pasach wykonanych z ceowników [1]
Roof trusses with chords made of channels [1]

nych w sytuacjach, gdy mniejszy wymiar spoiny jest udokumentowany obliczeniowo ze względu na wymaganą nośność, nie podając jednak szczegółowych wytycznych dotyczących projektowania takich złączy spawanych.

Koszt wykonania dźwigarów stalowych z kształtowników zamkniętych ulega znacznemu zwiększeniu w przypadku zaprojektowania grubych spoin o nośności równej nośności łączonego elementu. Sprzyja to także powstawaniu dużych naprężeń i odkształceń spawalniczych i powoduje przepalanie cienkich ścianek kształtowników rurowych oraz konieczność wstępnego nagrzewania przed spawaniem, a po spawaniu po-

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

²⁾ Politechnika Białostocka, Szkoła Doktorska PB

^{*} Adres do korespondencji: m.broniewicz@pb.edu.pl

wolnego schładzania łączonych części, aby zapobiec pęknięciom spawalniczym. W przypadku stosowania spoin czołowych należy przygotować krawędzie łączonych elementów tak, aby uzyskać niezbędną penetrację i ułatwić spawanie, co jest niezbędne do uzyskania spoiny o prawidłowym kształcie i jakości. Odkładanie się żużła, porowatość i pęknięcie to wady, które osłabiają grube spoiny doczołowe i pachwinowe.

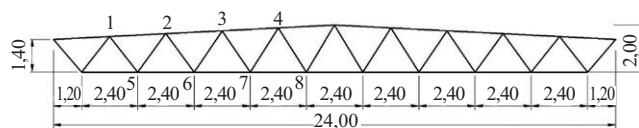
Celem artykułu jest zaproponowanie metody obliczania połączeń spawanych w węzłach kratownic z rur o pasach wykonanych z ceowników walcowanych. Jest to metoda długości efektywnych spoin dostosowana przez nas do tego typu węzłów. Wcześniejsze badania, które zrealizowaliśmy, dotyczyły układów kratowych z rur o węzłach typu T, N, K z odstępem lub nachodzeniem prętów skratowania, o krzyżulcach z kształtowników CHS i RHS oraz pasach wykonanych z kształtowników rurowych i dwuteowników [3, 4].

Obliczanie nośności spoin pachwinowych z uwzględnieniem długości efektywnej

Węzły układów kratowych z kształtowników zamkniętych są węzłami podatnymi. Siły z prętów skratowania przenoszone są na elementy pasa przez cienką ściankę, która odkształca się pod obciążeniem. Jak wykazały badania, jedynie zewnętrzne obszary ścianek znajdujące się przy zaokrąglonych narożach elementu są skuteczne w przyjmowaniu obciążenia, natomiast część środkowa, która ulega odkształceniu, nie współpracuje w przekazywaniu sił. Podobnie wyteżone są spoiny znajdujące się na obwodzie łączonych elementów rurowych. W zależności od kąta nachylenia pręta skratowania do pasa, cała spoina lub tylko jej część skutecznie przenosi siłę.

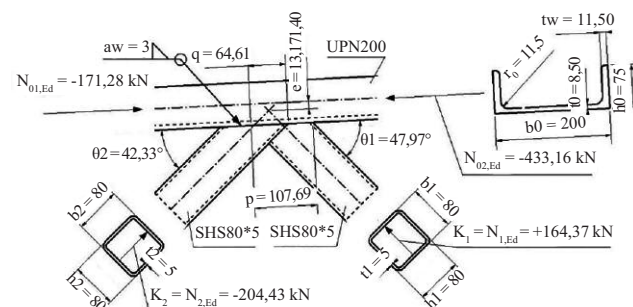
Z badań przeprowadzonych na Uniwersytecie w Toronto [5, 6] wynika, że spoiny pachwinowe w węzłach kratownic Warrena typu K, wykonanych z kształtowników RHS, są obciążane proporcjonalnie do wyteżenia ścianek prętów. Oznacza to, że nie cała długość spoin jest wykorzystywana do przeniesienia obciążenia, lecz tylko efektywna część tej długości. Stwarza to dodatkowe trudności obliczeniowe. Stwierdzono, że spoiny podłużne i poprzeczne na wszystkich czterech stronach łączonego pręta RHS są w pełni skuteczne, gdy kąt pomiędzy pasem a prętem skratowania wynosi 50° lub mniej. Natomiast spoina poprzeczna znajdująca się po stronie kąta ostrego jest całkowicie nieskuteczna, gdy pręt jest nachylony do pasa pod kątem 60° lub większym. W przypadku kątów nachylenia $50^\circ - 60^\circ$ zaleca się stosowanie interpolacji liniowej.

Kratownicę ze skratowaniem typu Warrena przedstawiono na rysunku 1. Pasy wykonane są z ceowników walcowanych, a krzyżulce z profili zamkniętych RHS. W celu porównania kosztów wykonania połączeń spawanych z pełnymi spoinami czołowymi oraz spoinami pachwinowymi o grubości dostosowanej do rzeczywistych sił występujących w prętach, obliczono przekroje spoin w przypadku węzłów 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8 (rysunek 1). Przyjęto grubość spoin pachwinowych 3 mm. Schemat projektowanego węzła nr 1 przedstawiono na rysunku 2, a przykłady poszczególnych odcinków spoin na rysunku 3. Rozkład długości efektywnych spoin oraz pól przekrojów tych spoin przyjęto zgodnie z wymaganiami wytycznych IIF [7]. Sposób wyznaczania długości efektywnych spoin jest następujący:



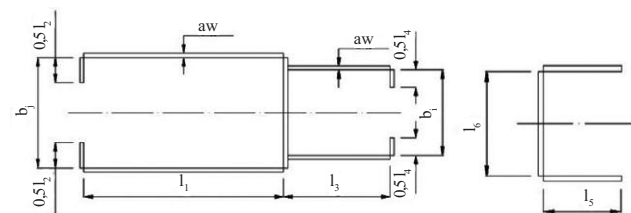
Rys. 1. Widok geometrii analizowanej kratownicy

Fig. 1. View of the analysed truss geometry



Rys. 2. Schemat węzła nr 1

Fig. 2. Scheme of joint number 1



Rys. 3. Układ spoin w analizowanym węźle

Fig. 3. Weld shape in the analysed joint

$$l_1 = \frac{h_2}{\sin\theta_2} = 118,8 \text{ mm} \quad (1)$$

$$l_2 = b_{2,\text{eff}} = 75,06 \text{ mm} \quad (2)$$

$$l_3 = \frac{(1 - \alpha)h_1}{\sin\theta_1} = 43,07 \text{ mm} \quad (3)$$

$$l_4 = b_{1,\text{eff}} = 75,06 \text{ mm} \quad (4)$$

$$l_5 = \frac{q}{(1 + \tan\theta_2/\tan\theta_1) \cos\theta_2} = 48 \text{ mm} \quad (5)$$

$$l_6 = b_{e,\text{ov}} = 50 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\sum l = 2 \cdot l_1 + l_2 + 2l_3 + l_4 = 473,88 \text{ mm} \quad (7)$$

gdzie:

α – wielkość nachodzenia prętów skratowania;

$$\alpha = q/p = 0,6 \quad (8)$$

q – długość zakładki prętów skratowania (rysunek 2),

$$q = \left(e_0 + \frac{h_0}{2} \right) \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin\theta_1 \sin\theta_2} - \frac{h_1}{2\sin\theta_1} - \frac{h_2}{2\sin\theta_2} = -64,61 \text{ mm} \quad (9)$$

gdzie:

$h_0 = 75 \text{ mm}$ – wysokość kształtownika pasa kratownicy;

$q < 0$ – wartość ujemna oznacza, że pręty skratowania nachodzą na siebie w węźle; do dalszych obliczeń przyjmowana jest wartość dodatnia;

$e_0 = -13,17 \text{ mm}$ – wielkość mimośrod;

p – długość styku pręta nachodzącego z pasem;

$$p = \frac{h_1}{\sin\theta_1} = 107,69 \text{ mm} \quad (10)$$

$h_1 = 80 \text{ mm}$ – wysokość kształtownika krzyżulca nachodzącego;

$h_2 = 80 \text{ mm}$ – wysokość kształtownika krzyżulca nachodzonego;

$b_1 = 80 \text{ mm}$ – szerokość kształtownika krzyżulca nachodzącego;

$b_s = 80$ mm – szerokość kształownika krzyżulca nachodzącego;
 $\theta_1 = 47,98^\circ$ – kąt pomiędzy krzyżulcem nachodzącym a pasem kratownicy;
 $\theta_2 = 42,33^\circ$ – kąt pomiędzy krzyżulcem nachodzonym a pasem kratownicy;
 $b_{1,eff}$ – szerokość efektywna krzyżulca nachodzącego (nr 1) w styku z pasem,

$$b_{1,eff} = \frac{10}{b_0^*/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} b_1 = 75,06 \text{ mm} < b_1 = 80 \text{ mm} \quad (11)$$

b_0^* – szerokość efektywna pasa,

$$b_0^* = b_0 - 2(t_w - r_0) = 154 \text{ mm} \quad (12)$$

$b_0 = 200$ mm – szerokość pasa;
 $t_w = 11,5$ mm – grubość półki ceownika zastosowanego na pas kratownicy;
 $r_0 = 11,5$ mm – promień zaokrąglenia ceownika pasa;
 $t_0 = 8,5$ mm – grubość środnika ceownika zastosowanego na pas kratownicy;
 $f_y = 355$ N/mm² – granica plastyczności kształownika pasa;
 $f_{y0} = 355$ N/mm² – granica plastyczności krzyżulca nachodzącego;
 $t_1 = 5$ mm – grubość ścianki kształownika krzyżulca nachodzącego;
 $b_1 = 80$ mm – szerokość ścianki krzyżulca nachodzącego;
 $b_{2,eff}$ – szerokość efektywna krzyżulca nachodzonego (nr 2) w styku z pasem:

$$b_{2,eff} = \frac{10}{b_2^*/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{y2} t_2} b_2 = 75,06 \text{ mm} < b_2 = 80 \text{ mm} \quad (13)$$

$f_{y2} = 355$ N/mm² – granica plastyczności krzyżulca nachodzonego;
 $t_2 = 5$ mm – grubość ścianki kształownika krzyżulca nachodzonego;
 $b_{e,ov}$ – szerokość efektywna krzyżulca nachodzącego w styku z krzyżulcem nachodzonym:

$$b_{e,ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \frac{f_{y2} t_2}{f_{y1} t_1} b_1 = 50 \text{ mm} < b_1 = 80 \text{ mm} \quad (14)$$

Określenie wielkości wzajemnego nachodzenia krzyżulców:

$$\lambda_{ov} = \left(\frac{q}{p}\right) \cdot 100\% = 60\% \quad (15)$$

Określenie nośności węzła $N_{i,Rd}$ zgodnie z tablicą 7.24 normy [2].

Przy wielkości wzajemnego nachodzenia prętów skratowania $25\% < \lambda_{ov} = 60\% < 100\%$ nośność węzła określa się ze wzoru:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y1} t_1 (b_{1,eff} + b_{e,ov} + 2h_1 - 4t_1)}{\lambda_{M5}} = 470,49 \text{ kN} > N_{i,Ed} = 204,43 \text{ kN} \quad (16)$$

$\gamma_{M5} = 1,0$ – częściowy współczynnik nośności węzłów w przypadku kratownic wykonanych z kształowników zamkniętych, zgodnie z tablicą 2.1 normy [2].

Siły składowe równoległe i prostopadłe do osi podłużnych poszczególnych spoin określa się, stosując wzory:

$$\Delta K_1 = \alpha K_1 \sin \theta_1 = 73,27 \text{ kN} \quad (17)$$

$$\text{red} \Delta K_2 = K_2 \sin \theta_2 - \alpha K_1 \sin \theta_1 = 64,4 \text{ kN} \quad (18)$$

$$P'_1 = \frac{(K_2 \cos \theta_2 + K_1 \cos \theta_1) l_1}{\sum l} = 65,47 \text{ kN} \quad (19)$$

$$P''_1 = \text{red} \Delta K_2 \cdot \frac{l_1}{(2l_1 + l_2)} = 24,47 \text{ kN} \quad (20)$$

$$P'_2 = \frac{(K_2 \cos \theta_2 + K_1 \cos \theta_1) l_2}{\sum l} = 41,37 \text{ kN} \quad (21)$$

$$P''_2 = \frac{\text{red} \Delta K_2 l_2}{(2l_1 + l_2)} = 15,46 \text{ kN} \quad (22)$$

$$P'_3 = \frac{(K_2 \cos \theta_2 + K_1 \cos \theta_1) l_3}{\sum l} = 23,47 \text{ kN} \quad (23)$$

$$P''_3 = \frac{\Delta K_1 l_3}{(2l_3 + l_4)} = 19,58 \text{ kN} \quad (24)$$

$$P'_4 = \frac{(K_2 \cos \theta_2 + K_1 \cos \theta_1) l_4}{\sum l} = 41,37 \text{ kN} \quad (25)$$

$$P''_4 = \frac{\Delta K_1 l_4}{(2l_3 + l_4)} = 34,11 \text{ kN} \quad (26)$$

$$P'_5 = \frac{\Delta K_1 \sin \theta_2 l_5}{(2l_5 + l_6)} = 16,22 \text{ kN} \quad (27)$$

$$P''_5 = \frac{\Delta K_1 \cos \theta_2 l_5}{(2l_5 + l_6)} = 17,81 \text{ kN} \quad (28)$$

$K_1 = N_{1,Ed} = 164,37$ kN – siła w krzyżulcu nachodzącym,
 $K_2 = N_{2,Ed} = 204,43$ kN – siła w krzyżulcu nachodzonym.

Sposób wyznaczenia naprężeń w spoinach węzła nr 1, od siły równoległej do pasa, z uwzględnieniem długości efektywnych spoin, określają wzory (przyjęto grubość spoin $\alpha_w = 3$ mm):

$$\sigma'_1 = 0 \quad (29)$$

$$\sigma'_2 = \frac{P'_2}{a_w l_2} = 183,7 \text{ MPa} \quad (30)$$

$$\sigma'_{1,\perp} = 0 \quad (31)$$

$$\sigma'_{2,\perp} = \sigma'_2 \sin(\theta_2/2) = 66,33 \text{ MPa} \quad (32)$$

$$\tau'_{1,\perp} = 0 \quad (33)$$

$$\tau'_{2,\perp} = \sigma'_2 \cos(\theta_2/2) = 171,31 \text{ MPa} \quad (34)$$

$$\tau'_{1,II} = \frac{P'_1}{a_w l_1} = 183,7 \text{ MPa} \quad (35)$$

$$\tau'_{2,II} = 0 \quad (36)$$

$$\sigma'_3 = 0 \quad (37)$$

$$\sigma'_4 = \frac{P'_4}{a_w l_4} = 183,7 \text{ MPa} \quad (38)$$

$$\sigma'_{3,\perp} = 0 \quad (39)$$

$$\sigma'_{4,\perp} = \sigma'_4 \sin(\theta_1/2) = 74,69 \text{ MPa} \quad (40)$$

$$\tau'_{3,\perp} = 0 \quad (41)$$

$$\tau'_{4,\perp} = \sigma'_4 \cos(\theta_1/2) = 167,83 \text{ MPa} \quad (42)$$

$$\tau'_{3,II} = \frac{P'_3}{a_w l_3} = 183,7 \text{ MPa} \quad (43)$$

$$\tau'_{4,II} = 0 \quad (44)$$

$$\sigma'_5 = 0 \quad (45)$$

$$\sigma'_6 = \frac{P'_6}{a_w l_6} = 112,64 \text{ MPa} \quad (46)$$

$$\sigma'_{5,\perp} = 0 \quad (47)$$

$$\sigma'_{6,\perp} = -\sigma'_6 \cos(\theta_1 + \theta_2)/2 = -74,43 \text{ MPa} \quad (48)$$

$$\tau'_{5,\perp} = 0 \quad (49)$$

$$\tau'_{6,\perp} = \sigma'_6 \sin(\theta_1 + \theta_2)/2 = 79,78 \text{ MPa} \quad (50)$$

$$\tau'_{5,II} = \frac{P'_5}{a_w l_5} = 112,64 \text{ MPa} \quad (51)$$

$$\tau'_{6,II} = 0 \quad (52)$$

Naprężenia w spoinach od siły prostopadłej do pasa można natomiast obliczyć z wzorów:

$$\sigma''_1 = \frac{P''_1}{a_w l_1} = 68,65 \text{ MPa} \quad (53)$$

$$\sigma''_2 = \frac{P''_2}{a_w l_2} = 68,65 \text{ MPa} \quad (54)$$

$$\sigma''_{1,\perp} = \frac{\sigma''_1}{\sqrt{2}} = 48,55 \text{ MPa} \quad (55)$$

$$\sigma''_{2,\perp} = -\sigma''_2 \cos(\theta_2/2) = -64,02 \text{ MPa} \quad (56)$$

$$\tau''_{1,\perp} = -\frac{\sigma''_1}{\sqrt{2}} = -48,55 \text{ MPa} \quad (57)$$

$$\tau''_{2,\perp} = \sigma''_2 \sin(\theta_2/2) = 24,79 \text{ MPa} \quad (58)$$

$$\tau''_{1,\parallel} = 0 \quad (59)$$

$$\tau''_{2,\parallel} = 0 \quad (60)$$

$$\sigma''_3 = \frac{P''_3}{a_w l_3} = 151,49 \text{ MPa} \quad (61)$$

$$\sigma''_4 = \frac{P''_4}{a_w l_4} = 151,49 \text{ MPa} \quad (62)$$

$$\sigma''_{3,\perp} = -\frac{\sigma''_3}{\sqrt{2}} = -107,12 \text{ MPa} \quad (63)$$

$$\sigma''_{4,\perp} = -\sigma''_4 \cos(\theta_1/2) = -138,4 \text{ MPa} \quad (64)$$

$$\tau''_{3,\perp} = \frac{\sigma''_3}{\sqrt{2}} = 107,12 \text{ MPa} \quad (65)$$

$$\tau''_{4,\perp} = \sigma''_4 \sin(\theta_1/2) = 61,59 \text{ MPa} \quad (66)$$

$$\tau''_{3,\parallel} = 0 \quad (67)$$

$$\tau''_{2,\parallel} = 0 \quad (68)$$

$$\sigma''_5 = \frac{P''_5}{a_w l_5} = 123,66 \text{ MPa} \quad (69)$$

$$\sigma''_6 = \frac{P''_6}{a_w l_6} = 123,66 \text{ MPa} \quad (70)$$

$$\sigma''_{5,\perp} = -\frac{\sigma''_5}{\sqrt{2}} = -87,44 \text{ MPa} \quad (71)$$

$$\sigma'_{6,\perp} = \sigma'_6 \cos(\theta_1 + \theta_2)/2 = 87,21 \text{ MPa} \quad (72)$$

$$\tau''_{5,\perp} = \frac{\sigma''_5}{\sqrt{2}} = 87,44 \text{ MPa} \quad (73)$$

$$\tau'_{6,\perp} = -\sigma'_6 \sin(\theta_1 + \theta_2)/2 = -87,68 \text{ MPa} \quad (74)$$

$$\tau''_{5,\parallel} = 0 \quad (75)$$

$$\tau''_{6,\parallel} = 0 \quad (76)$$

Sprawdzenie nośności spoin pachwinowych w węźle nr 1, zgodnie z wzorem (4.1) normy [2], przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Sprawdzenie nośności spoin pachwinowych w węźle nr 1
Table 1. Checking the design resistance of fillet welds of joint 1

Naprężenia [MPa]	Numer spoiny					
	1	2	3	4	5	6
$\tau_{\parallel} = \tau'_{\parallel} + \tau''_{\parallel}$	183,7	0	183,7	0	112,6	0
$\sigma_{\perp} = \sigma'_{\perp} + \sigma''_{\perp}$	48,55	2,3	-107,1	-63,7	-87,4	7,8
$\tau_{\perp} = \tau'_{\perp} + \tau''_{\perp}$	-48,55	196,1	107,1	229,4	87,4	-7,8
$\sigma = [\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5}$	332,7	339,7	383,6	402,5	262,0	15,6
$\sigma \leq f_u / \beta_w \gamma_{M2}$	$\sigma = 402,45 < 435,6$					
$\sigma_{\perp} \leq 0,9 f_u / \gamma_{M2}$	$\sigma_{\perp} = 107,12 < 352,8$					
Margines bezpieczeństwa [%]	$(435,6 - 402,45) / 435,6 \cdot 100\% = 7,61\%$					

Analiza porównawcza kosztów wykonania spoin

Koszt wykonania pełnych spoin czołowych o grubości 5 mm, przyjmowanych zgodnie z zaleceniami normy EN 1993-1-8 [2], porównano z kosztem wykonania spoin pachwinowych o grubości 3 mm, zaprojektowanych z uwzględnieniem procedury długości efektywnych przedstawionej w artykule, przy nośności spoin dostosowanej do siły osiowej występującej w danym przęcie (tabela 2). Z porównania wynika, że wykonanie spoin pachwinowych kosztuje o połowę mniej niż wykonanie spoin czołowych.

Tabela 2. Porównanie kosztu wykonania spoin pachwinowych z pełnymi spoinami czołowymi wg normy EN-1993-1-8 [2]

Table 2. Comparison of the costs of welds in the truss according to proposed procedure in accordance with the EN 1993-1-8 [2]

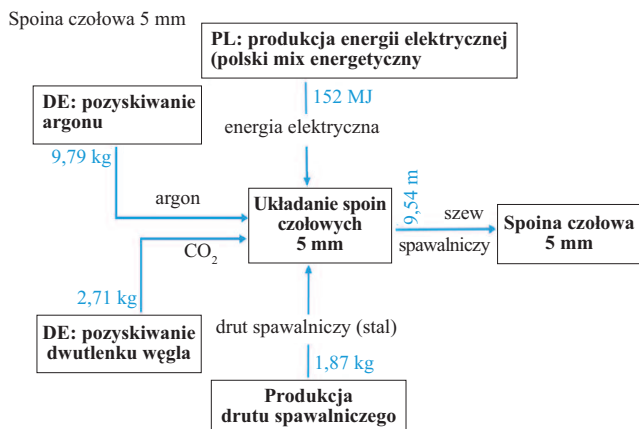
Numer węzła	Łączna długość spoin [mm]	Spoiny pachwinowe 3 mm		Spoiny czołowe 5 mm	
		czas spawania [min]	koszt spawania [EUR]	czas spawania [min]	koszt spawania [EUR]
1	619,9	12,40	7,4	24,80	14,8
2	604,7	12,09	7,2	24,19	14,4
3	593,7	11,87	7,1	23,75	14,2
4	585,8	11,72	7,0	23,43	14,0
5	604,5	12,09	7,2	24,18	14,4
6	595,6	11,91	7,1	23,82	14,2
7	586,2	11,72	7,0	23,45	14,0
8	580,9	11,62	6,9	23,24	13,8
Suma ¹⁾	9542,6	190,9	113,7	381,7	227,5

¹⁾ sumy w ostatnim wierszu tabeli uwzględniają symetryczność kratownicy. Wydajność spawania spoiną pachwinową grubości 3 mm wynosi 1 m – 20 min. Wydajność spawania spoiną czołową grubości 5 mm wynosi 1 m – 40 min (spawanie + przygotowanie elementu do spawania). Koszt robocizny 1 rbh – 145 zł (+10% zysku). Czas transportowania, obracania elementu podczas spawania został pominięty podczas analizy kosztów.

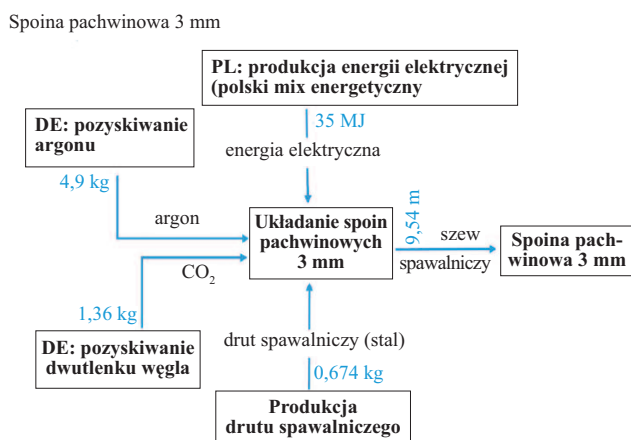
Analiza cyklu życia

Wytwarzanie produktów przemysłowych ma duży wpływ na środowisko naturalne, dlatego procesy produkcyjne należy badać pod kątem ich śladu ekologicznego. Procesy spawalnicze, jako istotny element technologii produkcyjnych w wielu gałęziach przemysłu budowlanego czy maszynowego, oddziałują niekorzystnie, ponieważ zużywają energię i wyczerpują zasoby naturalne. Wobec tego, wykorzystując metodę analizy cyklu życia, porównano oddziaływania środowiskowe związane z wykonaniem pełnościennych spoin czołowych o grubości 5 mm (rysunek 4) oraz spoin pachwinowych o grubości 3 mm (rysunek 5) w przypadku analizowanej kratownicy.

Do analiz wykorzystano oprogramowanie LCA for Experts (v. 10.7.0.183) [8]. Celem badania było ilościowe określenie różnicy w zużyciu nieodnawialnej energii pierwotnej i emisji gazów cieplarnianych w przypadku wykonywania spoin czołowych i pachwinowych, zaprojektowanych zaproponowaną w artykule metodą efektywnej długości spoin. Oceniono oddziaływanie środowiskowe fazy produkcji materiałów i fazy konstrukcyjnej (A1-A5), pomijając oddziaływanie transportu półproduktów. Rezultaty LCA określono metodą CML 2001,



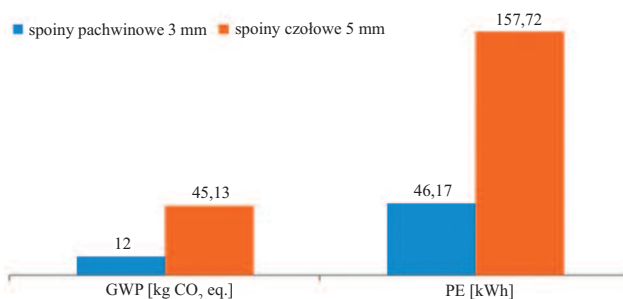
Rys. 4. Analiza LCA spoin czołowych o grubości 5 mm
Fig. 4. LCA analysis for full butt welds 5 mm



Rys. 5. Analiza LCA spoin pachwinowych o grubości 3 mm
Fig. 5. LCA analysis for fillet welds 3 mm

podając wartości wskaźników dwóch kategorii oddziaływań na środowisko: potencjału tworzenia efektu cieplarnianego GWP [kg CO₂ eq.] oraz zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej EP [kWh].

Za oddziaływanie na środowisko połączenia spawanego odpowiada w głównej mierze proces spawania, a mianowicie zużycie energii elektrycznej niezbędnej do wytworzenia napięcia i powstania łuku elektrycznego. Udział tego procesu w całkowitym oddziaływaniu na środowisko analizowanego połączenia spawanego stanowił 72% w kategorii potencjału tworzenia efektu cieplarnianego i 55% w kategorii zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej w przypadku spoiny pachwinowej i odpowiednio 83 i 71% – spoiny czołowej (stanowił ponad połowę wartości oddziaływań połączenia spawanego w obu analizowanych kategoriach). W wyniku zastosowania spoin pachwinowych wskaźnik globalnego ocieplenia GWP połączenia spawanego może zostać zredukowany z 45,13 kg CO₂ eq. do 12,00 kg CO₂ eq., a wskaźnik zużycia energii pierwotnej PE z 157,72 kWh do 46,17 kWh, co stanowi redukcję o odpowiednio 73% i 71% (rysunek 6). Wysokie oddziaływanie na środowisko spoiny czołowej jest spowodowane wysoką energochłonnością procesu wykonania tego typu spoiny, za sprawą wymaganej dużej mocy elektrycznej i niskiej wydajności spawania. Oddziaływania wynikające z wykorzysta-



GWP – wskaźnik globalnego ocieplenia; PE – zużycie energii pierwotnej
Rys. 6. Oddziaływania środowiskowe obu rodzajów spoin
Fig. 6. Environmental impact of both types of welds

nia gazu osłonowego i drutu spawalniczego w przypadku spoiny pachwinowej stanowiły 28% emisji gazów cieplarnianych i 45% zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej, natomiast przy spoinie czołowej jedynie 18% i 29%.

Wnioski

W artykule zaproponowano metodę obliczania połączeń spawanych węzłów stosowanych w układach kratowych z rur o pasach wykonanych z ceowników walcowanych. Stosowanie spoin o mniejszej grubości, dostosowanych do rzeczywistych sił działających w prętach kratownic, jest dopuszczone przez normy UE. Daje to znaczne korzyści finansowe, poprawia bezpieczeństwo konstrukcji spawanej oraz zmniejsza oddziaływanie środowiskowe. Wykazano, że wykonanie pełnych spoin czołowych, zgodnie z zaleceniami EN 1993-1-8 [2], jest dwukrotnie droższe niż spoin pachwinowych o mniejszej grubości, dostosowanych do rzeczywistych sił występujących w prętach. Ponadto, zastosowanie spoin pachwinowych o grubości mniejszej niż zalecane w EN 1993-1-8 [2] spowodowało zmniejszenie zużycia nieodnawialnej energii pierwotnej o 73% oraz emisji gazów cieplarnianych o 71% w fazie produkcji spoin.

Literatura

- [1] <https://www.alamy.com/steel-roof-trusses-metal-roof-frame-construction-with-steel-roof-trusses-details-image448942873.html>.
- [2] EN 1993-1-8:2006 Eurocode 3. Design of steel structures. Design of joints.
- [3] Broniewicz M. Weld design for hollow section trusses. Lambert Academic Publishing; London, United Kingdom; 2014.
- [4] Bródka J, Broniewicz M. Hollow section overlap joints with reinforcing rib plate. Lambert Academic Publishing; London, United Kingdom; 2016.
- [5] McFadden MR, Sun M, Packer JA. Weld Design and Fabrication for RHS Connections. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada 1992.
- [6] Packer JA, Henderson JE. Hollow Structural Section Connections and Truss – A Design Guide. 2nd ed. Publisher: Canadian Institute of Steel Construction: Toronto, Canada; 1997.
- [7] ISO 14346:2013 IIW Static design procedure for welded hollow section joints – Recommendations.2.
- [8] LCA for Experts (v. 10.7.0.183).

Praca finansowana z projektów badawczych MNiE: WI/WB-IIL/7/2022, WZ/WB-IIL/2/2023, WZ/WB-IIL/6/2023, WI/WB-IIS/9/2023.

Przyjęto do druku: 23.11.2023 r.