

ANALIZA TECHNICZNO-EKONOMICZNA POŁĄCZEŃ NIEROZŁĄCZNYCH

W artykule została przedstawiona analiza techniczno-ekonomiczna połączeń nierozłącznych. W oparciu o założone modele, wykonano obliczenia wytrzymałościowe dla dwóch rodzajów połączeń nierozłącznych: czolowych i zakładkowych wykonanych za pomocą spawania, zgrzewania, klejenia i lutowania. Obliczenia analityczne uzupełniono wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu technik numerycznych wykorzystujących metody elementów skończonych. Analizę otrzymanych wyników wytrzymałościowych dokonano w oparciu o wartości dopuszczalne naprężeń. Omówiono koszty wykonania przedmiotowych połączeń. Wskazano najkorzystniejszy rodzaj połączenia z punktu widzenia analizy techniczno-ekonomicznej.

WSTĘP

Zastosowanie połączeń nierozłącznych znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, okrętowym, a także w przemyśle kosmicznym. Połączenia nierozłączne służą nie tylko do wykonywania konstrukcji nośnych, lekko bądź silnie obciążonych, ale także do produkcji części maszyn pracujących w różnych warunkach. Aby dobrać odpowiednią metodę połączenia dla rozpatrywanego przez konstruktora stanu obciążenia, należy przeprowadzić analizę wytrzymałościową połączenia obciążonego statycznie. Analiza wytrzymałościowa w postaci obliczeń analitycznych pozwala wstępnie dobrać optymalną metodę połączenia spośród wielu istniejących tj. spawania, zgrzewania, lutowania oraz klejenia.

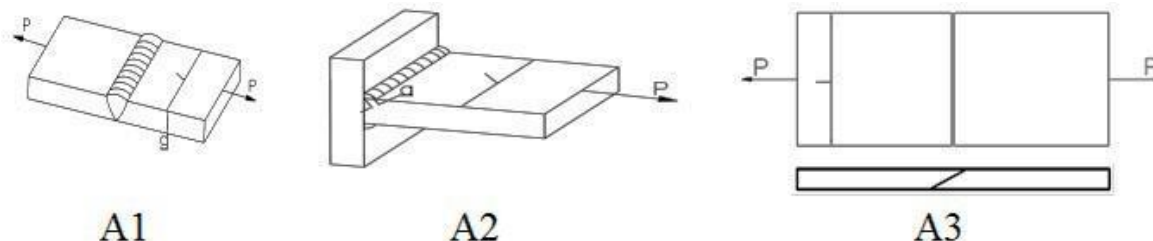
Ważnym elementem, na który należy zwrócić uwagę podczas procesu konstruowania jest aspekt ekonomiczny. Konstruktor ma wpływ na koszty wytwarzania danego produktu poprzez dobór: materiałów, metod obróbki cieplnej i mechanicznej, a także zastosowania odpowiedniej i uzasadnionej pod względem wytrzymałościowym i ekonomicznym metody połączenia materiałów.

Z tego powodu dokonano analizy techniczno-ekonomicznej połączeń nierozłącznych ze wskazaniem wpływu doboru metody połączenia na wytrzymałość złącza oraz uwzględnieniem aspektu ekonomicznego wybranego połączenia.

1. ZAŁOŻENIA

W celu przeprowadzenia analizy techniczno-ekonomicznej połączeń nierozłącznych założono trzy modele łączenia elementów różniące się stanem obciążenia oraz metodą łączenia elementów. Modele zostały posegregowane w zależności od kierunku zadanego obciążenia.

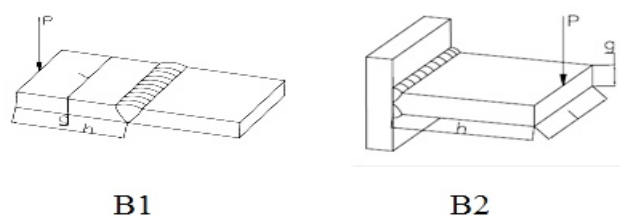
- Model A – połączenia doczołowe obciążone statycznie siłą rozciągającą (rysunek 1):
 - A1 - złącze spawane doczołowo,



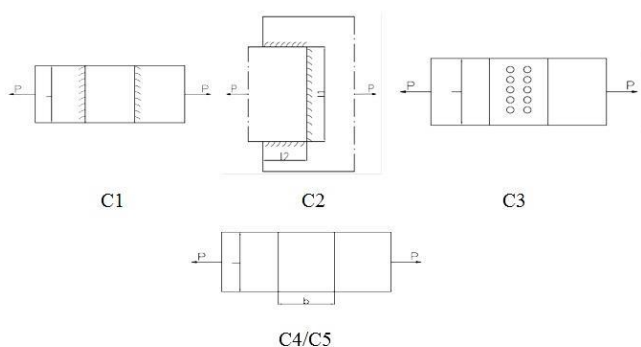
Rys. 1. Model A

- A2 - złącze kątowe spawane pachwinowo,
- A3 - złącze lutowane czolowo.
- Model B – połączenia doczołowe obciążone statycznie siłą zginającą (rysunek 2):
 - B1 - złącze spawane doczołowo,
 - B2 - złącze kątowe spawane spoinami pachwinowymi.
- Model C – połączenia „na zakładkę” obciążone statycznie siłą ścinającą (rysunek 3),
 - C1 - złącze spawane dwoma spoinami pachwinowymi ułożonymi poprzecznie do działania siły ścinającej,
 - C2 - złącze spawane trzema spoinami pachwinowymi ułożonymi poprzecznie i wzdłuż działania siły ścinającej,
 - C3 - złącze zgrzewane punktowo,
 - C4 - złącze lutowane,
 - C5 - złącze klejone.

Schematy modeli wykorzystanych do obliczeń analitycznych przedstawiono na rysunkach 1, 2, 3.



Rys. 2. Model B



Rys. 3. Model C

Do przeprowadzenia obliczeń przyjęto następujące założenia:

- modele połączeń obciążono statycznie,
- długość połączenia l (l_1) = 150 mm dla wszystkich modeli,
- odległość przyłożenia obciążenia zginającego od połączenia h = 100 [mm],
- grubość łączonych elementów g = 3 [mm],
- we wszystkich przypadkach zastosowany jest ten sam materiał łączonych elementów S235JR (St3s) zgodnie z [7],
- wymiary gabarytowe modeli zoptymalizowano w celu minimalizacji kosztów, przy zachowaniu zdolności do przeniesienia zadanego obciążenia.

2. OBLICZENIA ANALITYCZNE DLA ZDEFINIOWANYCH MODELI

2.1. Model A

A1

Złącze spawane doczołowo obliczane z warunku na rozciąganie – obliczenia wg [5], (rysunek 1):

$$\sigma' = \frac{P}{A} = \frac{P}{g * l} \leq \alpha_{\perp} * f_d \quad (1)$$

$$\sigma' = 111,11 < 182,75 \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- P = 50000 [N] – obciążenie połączenia,
- A – pole przekroju spoiny [mm²],
- $\alpha_{\perp} = 1 - 0,15v = 0,85$ - współczynnik wytrzymałości spoin czołowych przy rozciąganiu równomiernym (dla $v = 1$) [5 i 1],
- $f_d = 215$ [MPa] – wytrzymałość obliczeniowa stali na rozciąganie, ścinanie i zginanie [1].

A2

Złącze kątowe spawane pachwinowo obliczane z warunku na ścinanie – obliczenia wg [5] (rysunek 1):

$$\tau' = \frac{P}{A} = \frac{P}{\Sigma a * l} = \frac{P}{2 * a * l} \leq \alpha_{\perp} * f_d \quad (2)$$

$$\tau' = 185,19 < 193,5' \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- $a = 0,9$ [mm] – grubość nominalna spoiny,
- $\alpha_{\perp} = 0,9$ - współczynnik wytrzymałości spoin pachwinowych dla granicy plastyczności $Re \leq 255$ MPa [5 i 1],

- $f_d = 215$ [MPa] – wytrzymałość obliczeniowa stali na rozciąganie, ścinanie i zginanie [1].

A3

Złącze lutowane czołowo (rysunek 1).

Podczas projektowania połączeń lutowanych spoinę oblicza się z warunku na ścinanie zgodnie z [2]. Do obliczeń wytrzymałościowych wybrano lut mosiężny B-Cu48ZnNi(Si)-890/920 [8].

$$\tau' = \frac{P}{A} = \frac{P}{l * g} \leq k_t' \quad (3)$$

$$\tau' = 83,33 < 90 \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- $g = 4$ [mm] – grubość łączonych elementów,
- $k_t' = \frac{R_t}{X_R}$ - naprężenia dopuszczalne w połączeniu lutowanym,
- $R_t = 150 \div 300$ [MPa] – wytrzymałość doraźna lutu [7], (wartość przyjęta do dalszych obliczeń),
- $R_t = 270$ [MPa] – wartość przyjęta w obliczeniach,
- $X_R = 3$ – współczynnik bezpieczeństwa dla obliczeń statycznych [2].

2.2. Model B

B1

Złącze spawane doczołowo obciążone statycznie siłą zginającą – obliczenia wg [5], (rysunek 2):

$$\sigma' = \frac{M}{W_z} = \frac{6 * P * h}{l * g^2} \leq \alpha_{\perp} * f_d \quad (4)$$

$$\sigma' = 155,55 < 215 \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- $M = P * h$ – moment zginający obciążający połączenie [Nmm],
- $W_z = \frac{l * g^2}{6}$ – wskaźnik wytrzymałości dla przekroju prostokątnego [mm³],
- $P = 350$ [N] – obciążenie połączenia,
- $\alpha_{\perp} = 1$ - współczynnik wytrzymałości spoin czołowych przy rozciąganiu równomiernym [5 i 1],
- $f_d = 215$ [MPa] – wytrzymałość obliczeniowa stali na rozciąganie, ścinanie i zginanie [1].

B2

Złącze kątowe spawane spoinami pachwinowymi obciążone statycznie siłą zginającą [5] (rysunek.2):

$$\tau' = \frac{M}{W_z} = \frac{6 * P * h * (g + 2a)}{l * (g + 2a)^3 - l * g^3} \leq \alpha_{II} * f_d \quad (5)$$

$$\tau' = 31 < 172 \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- $M = P * h$ – moment zginający obciążający połączenie [Nmm],
- $P = 350$ [N] – obciążenie połączenia siłą zginającą,
- $a = 2$ [mm] – grubość obliczeniowa spoiny,

- $\alpha_{II} = 0,8$ - współczynnik wytrzymałości spoin pachwinowych dla granicy plastyczności $Re \leq 255$
- MPa [5,1],
- $f_d = 215$ [MPa] – wytrzymałość obliczeniowa stali na ścinanie [1].

2.3. Model C

C1

Złącze spawane dwoma spoinami pachwinowymi ułożonymi poprzecznie do działania siły ścinającej [5] (rysunek 3).

$$\tau' = \frac{P}{A} = \frac{P}{\Sigma a * l} \leq \alpha_{II} * f_d \quad (6)$$

$$\tau' = 216,66 > 172 \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- $P = 130000$ [N] – obciążenie połączenia siłą ścinającą,
- A – pole przekroju spoiny [mm²],
- $\Sigma a l$ – całkowite pole przekroju spoiny [mm²],
- $a = 2,1$ [mm] – maksymalna grubość spoiny ze względu na uniknięcie przepalenia łączonych elementów [5],
- $a = 2$ [mm] – grubość obliczeniowa spoiny,
- $\alpha_{II} = 0,8$ - współczynnik wytrzymałości spoin pachwinowych dla granicy plastyczności $Re \leq 255$ MPa [5,1],
- $f_d = 215$ [MPa] – wytrzymałość obliczeniowa stali na ścinanie [1].

C2

Złącze spawane trzema spoinami pachwinowymi ułożonymi poprzecznie i wzdłuż działania siły ścinającej [5] (rysunek 3):

$$\tau' = \frac{P}{A} = \frac{P}{\Sigma a * l} = \frac{P}{a_1 * l_1 + 2 * a_2 * l_2} \leq \alpha_{II} * f_d \quad (7)$$

$$\tau' = 247,62 > 172 \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- $a_1 = a_2 = 2,1$ [mm] – maksymalna grubość spoiny ze względu na uniknięcie przepalenia łączonych elementów [5],
- $a = 2$ [mm] – grubość obliczeniowa spoiny,
- $l_2 = 50$ [mm] – długość połączenia,
- $\alpha_{II} = 0,8$ - współczynnik wytrzymałości spoin pachwinowych dla granicy plastyczności $Re \leq 255$ [MPa] [5, 1],
- $f_d = 215$ [MPa] – wytrzymałość obliczeniowa stali na ścinanie [1].

C3

Złącze zgrzewane punktowo – obliczenia wg [4] (rysunek 3):

$$P \leq \frac{n * P_n}{X_R} \quad P = 130000 < 132545,45 \quad (8)$$

[N]

gdzie:

- n – liczba zgrzein punktowych (przyjęto $n = 12$),
- P_n – siła niszcząca jedną zgrzeinę - przyjęto $P_n = 24300$ [N] dla granicy doraźnej wytrzymałości,
- $R_m = 380$ [MPa], klasy jakości zgrzeiny „A” oraz grubości elementów zgrzewanych $g = 3$ [mm] [3],
- $X_r = 2,2 \div 2,5$ – współczynnik bezpieczeństwa [4] (przyjęto $X_r = 2,2$).

Naprężenia dopuszczalne przy rozciąganiu wynoszą:

$$k_r = \frac{R_e}{X_e} = 204,5 \text{ [MPa]} \quad (9)$$

gdzie:

- $Re = 235$ [MPa] granica plastyczności dla stali S235JR,
- $X_e = 1,15$ współczynnik bezpieczeństwa w konstrukcjach obliczanych wg granicznych stanów nośności przy $Re \leq 355$ [MPa].

C4

Złącze lutowane (rysunek 3):

Podczas projektowania połączeń lutowanych spoinę oblicza się z warunku na ścinanie zgodnie z [2]. Do obliczeń wytrzymałościowych wybrano lut mosiężny B-Cu48ZnNi(Si)-890/920 wg [8].

$$\tau' = \frac{P}{A} = \frac{P}{l * b} \leq k_t' \quad \tau = 86,66 < 90 \quad (10)$$

[MPa]

gdzie:

- $b = 10$ [mm] – szerokość zakładki,
- $k_t' = \frac{R_t}{X_R}$ - naprężenia dopuszczalne w połączeniu lutowanym,
- $R_t = 150 \div 300$ – wytrzymałość doraźna lutu wg [7] (wartość obliczeniowa $R_t = 270$ MPa),
- $X_R = 3$ – współczynnik bezpieczeństwa dla obliczeń statycznych wg [2].

C5

Złącze klejone (rysunek 3):

W projektowaniu połączeń klejonych skleinę oblicza się z warunku na ścinanie zgodnie z [9].

$$\tau' = \frac{P}{A} = \frac{P}{l * b} \leq k_t' \quad (11)$$

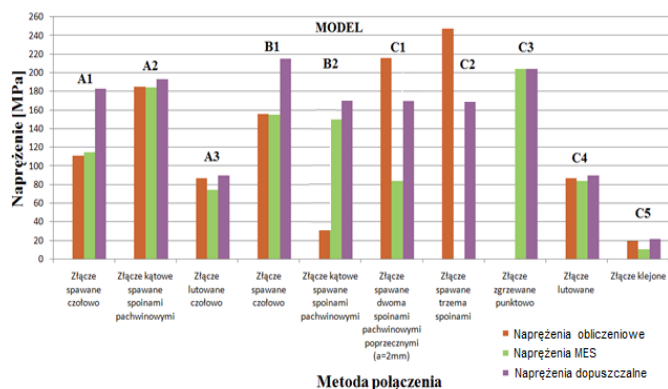
$$\tau' = 19,26 < 20 \text{ [MPa]}$$

gdzie:

- $b = 45$ [mm] – szerokość zakładki,
- $k_t' = 10 \div 30$ [MPa] dla nieznanego rodzaju kleju oraz sklein łączonych na zimno zgodnie z [9] (przyjęto $k_t' = 20$ [MPa])

3. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA

Wyniki obliczeń analitycznych zebrano w formie wykresu i przedstawiono na rysunku 4. Wykres uzupełniono o wartości naprężeń uzyskanych dla poszczególnych modeli, poprzez obliczenia numeryczne przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES). W celu analizy otrzymanych wyników dodatkowo naniesiono wartości naprężeń dopuszczalnych.



Rys. 4. Zestawienie wyników przeprowadzonych obliczeń dla zdefiniowanych modeli.

W grupie połączeń czołowych wykonanych przy pomocy spawania i lutowania, obciążonych siłą rozciągającą $P = 50$ [kN] (model A1, A2, A3), wszystkie trzy złącza przeniosły zakładane obciążenie. Za najbardziej korzystne do potencjalnego wykorzystania uznano złącze z modelu A1 – złącze spawane czołowo, gdzie wartości naprężeń obliczone zarówno analitycznie jak i numerycznie są zdecydowanie mniejsze od wartości naprężeń dopuszczalnych.

Analiza grupy połączeń spawanych obciążonych siłą zginającą $P = 350$ [N] (model B1 i B2), pozwala w oparciu o obliczenia analityczne oraz analizę numeryczną na stwierdzenie, że w złączach tych nie zostały przekroczone naprężenia dopuszczalne – zakładane obciążenie zostanie przeniesione.

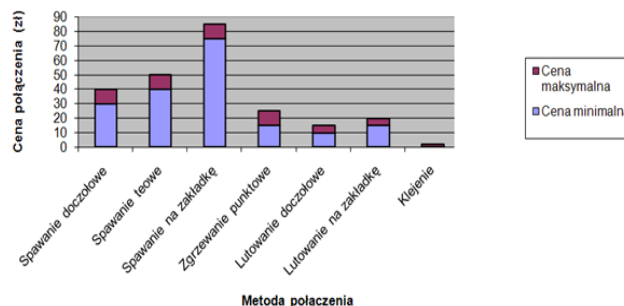
Za najbardziej bezpieczne uznano połączenie dla modelu B2 – złącze kątowe spawane spoinami pachwinowymi.

W grupie połączeń „na zakładkę” obciążonych siłą ścinającą $P = 130$ [kN] wykonanych przy pomocy spawania, zgrzewania, lutowania i klejenia (model C1, C2, C3, C4 i C5), przy założonych wymiarach złączy, tylko trzy połączenia są zdolne do przeniesienia zadanego obciążenia. Są to połączenia wykonane metodą lutowania, zgrzewania i klejenia.

4. ANALIZA EKONOMICZNA

Podczas ustalania kosztów pominięto koszty zakupu i przygotowania elementów niezbędnych do wykonania modeli, ponieważ w każdym z analizowanych przypadków jest on taki sam. Na cenę wytworzenia połączenia mają wpływ przede wszystkim koszty bezpośrednie, które można odnieść bezpośrednio do danego wyrobu. Zaliczono do nich: zużycie materiałów potrzebnych do spawania, zgrzewania, lutowania, klejenia oraz koszty robocizny, zużycia energii elektrycznej, jak również koszty związane z eksploatacją urządzeń niezbędnych do wykonania połączeń. Zestawienie kosztów wykonania analizowanych połączeń wraz z uzyskanymi wynikami obliczeń wytrzymałościowych przedstawiono w tabeli 1. Dodatkowo na rysunku 5 przedstawiono zestawienie kosztów wykonania analizowanych połączeń z uwzględnieniem technologii ich wykonania.

Uwzględniono zarówno cenę maksymalną, jak i minimalną wykonania połączenia. Koszty wykonania połączeń podano na podstawie ofert i katalogów producentów.



Rys.5. Zestawienie kosztów wykonania połączeń.

PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonej analizy wytrzymałościowej wskazują na możliwość zamiennego stosowania wyżej wymienionych metod połączeń. Dotyczy to zarówno złączy doczołowych, jak i złączy zakładkowych, gdyż zdecydowana większość konstrukcji opiera się na tych dwóch rodzajach rozwiązań.

Pomimo różnic cenowych pomiędzy wybranymi metodami połączeń, najbardziej uniwersalną metodą jest spawanie. Złącze spawane wykazuje „nadmiar” wytrzymałości względem naprężeń dopuszczalnych. W praktyce oznacza to powstanie dużego marginesu bezpieczeństwa w przypadkach wystąpienia wad w spoinie, czy też lokalnych odkształceń spowodowanych naprężeniami własnymi oraz eksploatacyjnymi.

Tab. 2. . Zestawienie kosztów wykonania analizowanych połączeń oraz wyników obliczeń wytrzymałościowych

Lp.	Analizowany model połączenia	Koszt połączenia [zł]	Siła obciążająca złącze [N]	Naprężenia dopuszczalne [MPa]	Naprężenia wynikające z obliczeń teoretycznych [MPa]	Naprężenia wynikające z obliczeń MES [MPa]
Połączenia doczołowe obciążone statycznie siłą rozciągającą (model A)						
1.	Złącze spawane doczołowo (model A1)	30 ÷ 40	50000	182,75	111,11	115,00
2.	Złącze kątowe spawane doczołowo spoinami pachwinowymi (model A2)	40 ÷ 50	50000	193,50	185,19	184,30
3.	Złącze lutowane doczołowo (model A3)	10 ÷ 15	50000	90,00	83,33	74,29
Połączenia doczołowe obciążone statycznie siłą zginającą (model B)						
4.	Złącze spawane doczołowo (model B1)	30 ÷ 40	350	215,00	155,55	155,10
5.	Złącze kątowe spawane doczołowo spoinami pachwinowymi (model B2)	40 ÷ 50	350	172,00	31,00	150,00
Połączenia „na zakładkę” obciążone statycznie siłą ścinającą (model C)						
6.	Złącze spawane dwoma spoinami pachwinowymi ułożonymi poprzecznie do działania siły ścinającej (model C1)	75 ÷ 85	130000	172,00	216,66	84,22
7.	Złącze spawane trzema spoinami pachwinowymi ułożonymi poprzecznie i wzdłuż działania siły ścinającej (model C2)	-	130000	172,00	247,62	-
8.	Złącze zgrzewane punktowo (model C3)	15 ÷ 25	130000	204,5	-	204,4
9.	Złącze lutowane (model C4)	15 ÷ 20	130000	90,00	86,66	83,93
10.	Złącze klejone (model C5)	1 ÷ 2	130000	20,00	19,26	10,68

BIBLIOGRAFIA

1. Ferenc K., Ferenc J., - „Konstrukcje spawane – Połączenia”, WNT, Warszawa 2000, 2006.
2. Pilarczyk J., - „Poradnik inżyniera – Spawalnictwo Tom I i II”, WNT, Warszawa 2003, 2005.
3. PN-74/M-69020 – Spawalnictwo. Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych.
4. PN-74/M-69021 – Wytyczne projektowania, wykonania i kontroli złączy zgrzewanych punktowo.
5. PN-90/B-03200 – Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowe.
6. PN-EN 10025-1:2005 – Wyroby walcowane na gorąco z niestopowych stali konstrukcyjnych – Warunki techniczne dostawy.
7. PN-EN 12797:2002 - Lutowanie twarde - Badania niszczące złączy lutowanych na twardo.
8. PN-EN ISO 3677:2001 - Spoiwa do lutowania miękkiego, twardego i lutospawania – Oznaczenie.
9. Porębska M., Skorupa A., - „Połączenia spójnościowe”, PWN, Warszawa 1993.

Technical and economic analysis of permanent joints

This article presents technical and economic analysis permanent joints. Based on established models, strength calculations were made for two types of permanent joints: butt and lap made by welding, welding, gluing and soldering. Analytical calculations supplemented by results obtained using numerical techniques using the finite element method. The analysis of the results of strength was based on allowable stress values. Discussed costs of performing these joints. Indicated most preferred type of connection from the point of view of technical-economic analysis.

Autorzy:

dr inż. **Paweł Piuciennik** – Politechnika Łódzka–Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn

dr inż. **Andrzej Maciejczyk** – Politechnika Łódzka–Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn