

# Analiza wariantów metody wyznaczania trwałości zmęczeniowej złączy spawanych na podstawie naprężeń nominalnych

Analysis on nominal stress approach variants in lifetime estimation of welded joints

## Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd czterech wariantów metody naprężeń nominalnych stosowanej do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej złączy spawanych. Przegląd ten dotyczył wariantów znanych z zaleceń IIW, ABS, JSSC oraz z normy Eurokod 3. Przeprowadzona analiza skoncentrowana była na sposobie klasyfikacji złączy, charakterystykach zmęczeniowych oraz współczynnikach korekcyjnych trwałości. Analiza została uzupełniona o wyniki obliczeń przeprowadzonych według opisywanych wariantów.

**Słowa kluczowe:** trwałość zmęczeniowa; metoda naprężeń nominalnych; analiza

## Abstract

The paper contains a review of four nominal stress approaches to fatigue analysis of welded joints. Analysis was undertaken on the differences between recommendations by IIW, ABS, JSSC and Eurocode 3 and was focused on classification of welded joints, formulation of S-N curves and fatigue strength correction factors. The analysis was backed-up by examples of fatigue life evaluation according to the different variants.

**Keywords:** fatigue life; nominal stress approach; analysis

## Wstęp

Złącza spawane są istotnym elementem wielu konstrukcji, których trwałość często rzutuje na trwałość eksploatowanego obiektu [1÷4]. Ze względu na niejednorodność mikrostrukturalną oraz geometrię złącza spawane narażone na oddziaływanie obciążeń zmiennych są szczególnie podatne na zniszczenie. Dzieje się tak ze względu na sam proces spawania któremu towarzyszy znaczny gradient temperatury w ograniczonej objętości materiału, którego występowanie połączone jest z wprowadzeniem materiału wypełniającego. Skutkiem takiego procesu jest koncentracja naprężeń będąca przyczyną obniżenia poziomu wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej.

Problem wyznaczania trwałości zmęczeniowej złączy spawanych jest opracowywany od wielu lat. Spośród różnych podejść do tej problematyki wyróżnić można grupę metod znajdujących szersze zastosowanie (zestawienie między innymi w [5,6]). Do tej grupy zaliczyć można między innymi metodę naprężeń nominalnych [7÷10], będącą również najmniej skomplikowaną w zastosowaniu. Jej zastosowanie jest preferowane, gdy analizowane złącze należy do sklasyfikowanych oraz gdy naprężenia te łatwo jest wyznaczyć. Do kolejnych metod z tej grupy zaliczyć można metody naprężeń „geometrycznych”; do metod tych przynależy

między innymi metoda „punktu krytycznego” (ang. *hot-spot*) [7,11] jak również metoda promienia fikcyjnego [7,12,13]. Obliczenia tymi metodami są jednak bardziej czasochłonne, gdyż zawsze wymagane jest przeprowadzenie obliczeń numerycznych na modelach uwzględniających geometrię złącza lub doświadczalne wyznaczenie odkształceń w jego pobliżu. Do grupy metod o węższym zastosowaniu przynależą między innymi metody wykorzystujące mechanikę pękania [12] i metody nielokalne [14].

Celem pracy było przybliżenie idei metody naprężeń nominalnych oraz porównanie jej wariantów znanych z różnych poradników i norm znajdujących zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Porównanie uzupełnione zostało o przykładowe obliczenia.

## Metody naprężeń nominalnych – założenia i metodologia

Metoda wyznaczania trwałości złączy spawanych na podstawie naprężeń nominalnych występuje w różnych wariantach, obecnych między innymi w zaleceniach Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa (IIW - International Institute

Dr inż. Łukasz Blacha – Politechnika Opolska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: l.blacha@po.opole.pl

of Welding: Recommendations for fatigue design of welded joint and components, dokument XIII-2151-07/XV-1254-07 [7]), amerykańskiego urzędu żeglugi (ABS- American Bureau of Shipping: Guide for fatigue assessment of offshore structures [8]), japońskiego stowarzyszenia przemysłu budowlanego (JSSC - Japanese Society of Steel Construction: Fatigue design recommendations for steel structures, JSSC Technical Report No. 32 [9]) oraz w normach europejskich (Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1÷9: Zmęczenie [10]).

Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej metodą naprężeń nominalnych sprowadza się do przypisania projektowanego złącza do jednej z klas. Klasy te zostały utworzone przez podział złączy według kryterium geometrii. W niektórych klasach zastosowano dalszy podział ze względu na przyjęte wymagania końcowe odnoszące się do jakości złącza. W tych przypadkach za kryterium przyjęto czynniki takie jak stopień przetopienia, przesunięcie spawanych płyt, przeprowadzone badania nieniszczące i inne. Każda z klas przypisana jest do charakterystyki zmęczeniowej. W każdym spośród wymienionych wariantów zastosowanie znajduje charakterystyka Wöhlera w układzie podwójnie logarytmicznym:

$$\log_{10}(N_f) = B - m \cdot \log_{10}(\Delta\sigma) \quad (1)$$

gdzie:

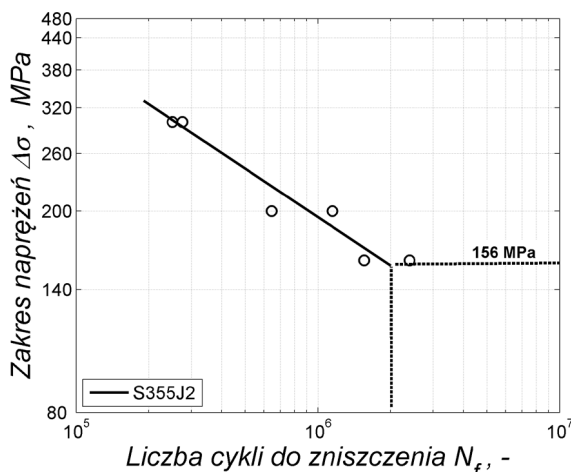
$N_f$  – liczba cykli do zniszczenia;  
 $B, m$  – stałe materiałowe;  
 $\Delta\sigma$  – zakres naprężenia, MPa.

Przykładową charakterystykę opisywaną zależnością (1) przedstawiono na rysunku 1. Trwałość zmęczeniową można w dogodny sposób wyznaczyć wykorzystując przekształconą zależność (1):

$$N_f = \frac{S}{\Delta\sigma^m} \quad (2)$$

gdzie:

$S$  – stała materiałowa;  $S = 10^B$ .

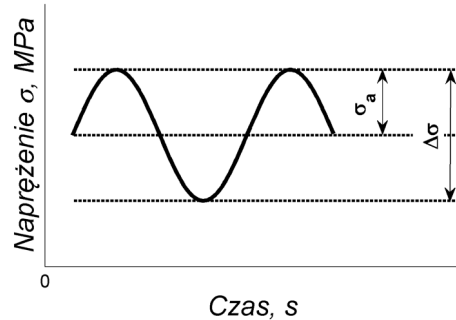


Rys. 1. Przykładowa charakterystyka Wöhlera w układzie podwójnie logarytmicznym

Fig. 1. An example of a Wöhler's S-N curve in a logarithmic scale

Metoda naprężeń nominalnych znajduje zastosowanie głównie w przypadku oddziaływania obciążeń sinusoidalnie zmiennych, rzadziej będących pod wpływem obciążeń losowych, przy czym jako naprężenie nominalne rozumieć należy wartość naprężenia w miejscu spoiny określoną bez uwzględnienia spiętrzenia wynikającego z obecności złącza. Z analizy zależności (2) wynika, że aby wyznaczyć

trwałość zmęczeniową należy znać wartość zakresu zmiany naprężenia  $\Delta\sigma$  oraz stałych  $m$  i  $S$ . Wartość  $\Delta\sigma$  przyjmuje się jak wartość zakresu naprężeń nominalnych, który interpretować należy według rysunku 2. W przypadku złożonego stanu naprężenia należy zastosować kryterium wieloosiowego zmęczenia. Zalecenia IIW i ABS wskazują na kryterium maksymalnego naprężenia normalnego. Stała  $m$  oznacza współczynnik kierunkowy (nachylenie) charakterystyki przedstawionej na rysunku 1. Stałą  $S$  zidentyfikować można po zaklasyfikowaniu złącza do jednej z klas zmęczeniowych.

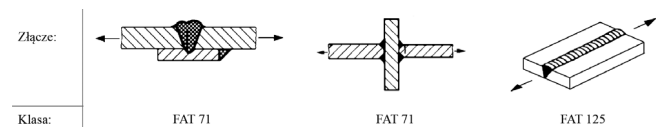


Rys. 2. Interpretacja zakresu naprężenia  $\Delta\sigma$ , gdzie:  $\sigma_a$  – amplituda naprężenia

Fig. 2. Interpretation of stress range  $\Delta\sigma$ , where:  $\sigma_a$  – stress amplitude

## Klasyfikacja złączy spawanych

Ideę klasyfikacji na przykładzie zaleceń IIW przedstawiono na rysunku 3. W zaleceniach IIW klasa zmęczeniowa oznaczona jest jako FAT  $\Delta\sigma_K$ , przy czym  $\Delta\sigma_K$  oznacza wartość zakresu naprężenia odpowiadającego trwałości  $2 \cdot 10^6$  liczby cykli zmiany obciążenia (np. klasa „FAT 80”).



Rys. 3. Przykład klasyfikacji zmęczeniowej (International Institute of Welding, XIII-2151-07/XV-1254-07 [7])

Fig. 3. An example of fatigue classification

W normie Eurokod 3 jako nazwę klasy przyjęto jedynie wartość  $\Delta\sigma_K$  (np. klasa „80”). W zaleceniach ABS i JSSC klasy zmęczeniowe oznaczono za pomocą pojedynczych liter, przy czym w przypadku zaleceń ABS oznaczenie klasy zmęczeniowej jest bezpośrednim odnośnikiem do wartości stałej  $S$ . Przyjęte definicje stałej  $S$  podsumowano w tabelicy I.

## Charakterystyki zmęczeniowe

Zalecenia IIW do obliczeń przewidują charakterystyki zmęczeniowe o nachyleniu  $m = 3,0$ , zarówno dla złączy

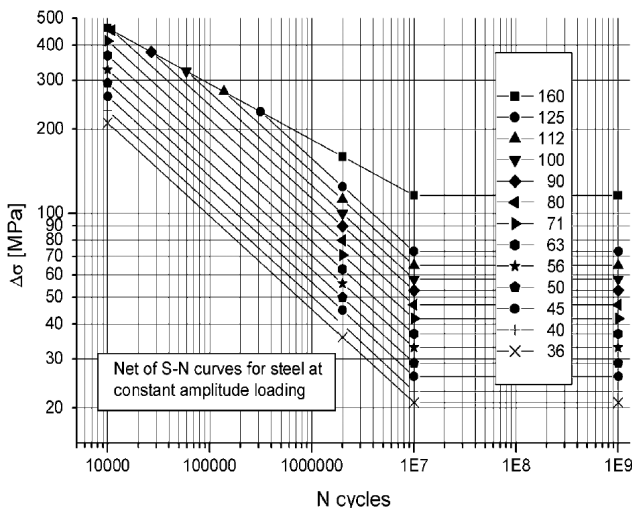
**Tabela I.** Definicje stałej  $S$  równania (2), gdzie:  $\Delta\sigma_K$  – wartość zakresu naprężenia przypisana do danej klasy zmęczeniowej; A, C – oznaczenia wewnętrzne w zaleceniach ABS [8]

**Table I.** Definitions of constant  $S$  in Eq. (2), where:  $\Delta\sigma_K$  – stress range corresponding to the given fatigue class; A, C – denotation used in the ABS Guide [8]

	Zalecenia lub norma			
	IIW	ABS	JSSC	Eurokod 3
$S =$	$2 \cdot 10^6 \cdot (\text{FAT})^m$	A lub C *	$2 \cdot 10^6 \cdot (\Delta\sigma_K)^m$	$2 \cdot 10^6 \cdot (\Delta\sigma_K) m$
* - w zależności od założeń projektowych				

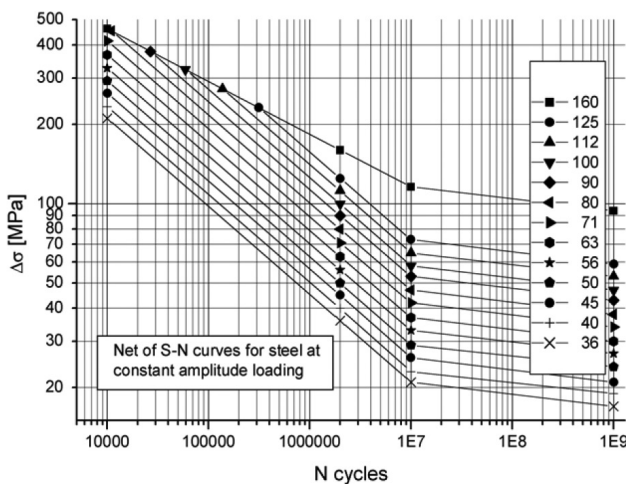
stalowych, jak i dla złączy ze stopów aluminium, poddanych rozciąganiu lub ścisaniu. Charakterystyki dla złączy ze stali przedstawiono na rysunku 4. W przypadku analizy trwałości na podstawie naprężeń stycznych mamy do czynienia z nachyleniem  $m = 5,0$ . Charakterystyki zawsze ograniczone są charakterystyką materiału rodzimego (na rysunku 4 oznaczoną przez charakterystykę dla klasy FAT 160).

W przypadku projektowania w zakresie wysokiej trwałości pamiętać należy o umownej granicy zmęczenia. Jeśli zakres naprężenia  $\Delta\sigma$  jest mniejszy niż jej wartość, to proces zniszczenia przebiega względnie wolniej (co potwierdzają liczne badania, między innymi [15]). Przypadek ten znajduje odzwierciedlenie w innym nachyleniu  $m$ , w tym przypadku  $m = 22,0$  (rysunek 5).



Rys. 4. Charakterystyki zmęczenia FAT dla złączy stalowych (International Institute of Welding, XIII-2151-07/XV-1254-07 [7])

Fig. 4. FAT S-N curves for steel welded joints (International Institute of Welding, XIII-2151-07/XV-1254-07 [7])



Rys. 5. Charakterystyki zmęzeniowe FAT dla złączy stalowych, rekomendowane do projektowania w zakresie wysokiej trwałości (International Institute of Welding, XIII-2151-07/XV-1254-07 [7])

Fig. 5. FAT S-N curves for steel welded joints, recommended in case of very high cycles applications (International Institute of Welding, XIII-2151-07/XV-1254-07 [7])

Zalecenia JSSC i ABS dotyczą jedynie złączy stalowych, w przypadku Eurokodu złącza ze stopów aluminium zostały opisane w części 9 (Eurokod 9: Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1÷3: Konstrukcje narażone na zmęczenie [16]).

Nachylenie charakterystyk JSSC oraz Eurokodu 3 ma taką samą wartość parametru  $m$ , tj.  $m = 3,0$  oraz  $m = 5,0$  w przypadku obciążeń naprężeniami stycznymi. W przypadku

zaleceń JSSC jedyną różnicą jest zmienne położenie umownej granicy zmęczenia (przesunięcie względem odpowiadającej liczbie cykli) oraz przyjęcie założenia o obszarze nieograniczonej trwałości poniżej poziomu umownej granicy zmęczenia.

W przypadku normy Eurokod 3 położenie umownej granicy zmęczenia jest stałe. Istotną różnicą jest dwustopniowość charakterystyki w zakresie trwałości większej niż ta odpowiadająca umownej granicy zmęczenia. Na pierwszym stopniu nachylenie charakterystyki wynosi  $m = 5,0$  aby potem przejść w obszar nieograniczonej trwałości. W przypadku charakterystyki dla naprężeń stycznych przyjęto założenie o obszarze nieograniczonej trwałości poniżej poziomu umownej granicy zmęczenia.

Nachylenie charakterystyk opublikowanych przez ABS różni się pomiędzy poszczególnymi klasami i przyjmuje wartości  $m = (3,0\div 4,0)$  oraz  $m = (5,0\div 6,0)$  w przypadku projektowania w zakresie wysokiej trwałości. Nie wyróżniono oddzielnych charakterystyk dla złączy będących pod wpływem obciążeń naprężeniami stycznymi.

Przedstawione charakterystyki odnoszą się do poziomu prawdopodobieństwa przetrwania równego 97,7%. Charakterystyki te znajdują zastosowanie przy założeniu, że projektowane złącza są o jakości złącza wytworzonego metodą spawania w osłonie gazowej. W przypadkach niestandardowych trwałości korygowana jest za pomocą współczynników korekcyjnych.

## Współczynniki korekcyjne

Do warunków niestandardowych wymagających zastosowania korekcy trwałości zalicza się: występowanie efektu skali (objętość materiału spoiny jest większa od przewidzianej), niekorzystne środowisko pracy, zastosowaną obróbkę cieplną, niestandardową asymetrię cyklu zmiany naprężenia i inne. Korekcję trwałości względem jej poziomu referencyjnego najczęściej realizuje się przez przeskalowanie charakterystyki w zakres wyższych lub niższych naprężeń, przy nachyleniu  $m$  pozostawionym bez zmian (wszystkie opisywane warianty) lub zmienionym (normy Eurokod). Innym z rozwiązań jest przeskalowanie zakresu naprężenia, na podstawie którego w kolejnym kroku wyznaczona zostanie trwałość (zalecenia ABS, normy Eurokod).

Przykład obliczeń wymagających zastosowania korekcy został uwzględniony w dalszej części pracy.

## Wyznaczanie trwałości – obliczenia przykładowe

Wykorzystując każdy z czterech opisywanych wariantów metody naprężeń nominalnych wyznaczono trwałość trzech rodzajów stalowych złączy spawanych o geometrii przedstawionej na rysunku 3. Przyjęto następujące założenia: (i) złącza wykonano metodą spawania łukiem elektrycznym w osłonie gazowej z pełnym przetopem w grani; (ii) po zakończeniu procesu spawania nie zastosowano obróbki cieplnej; (iii) nie występują wady materiałowe; (iv) złącza są zabezpieczone przed korozją oraz nie pracują w warunkach silnie korozyjnych; (v) złącza obciążone są przez cykliczne, tętniące, osiowe rozciąganie.


Przykład cyklicznego tętniącego przebiegu przedstawiono na rysunku 2. W niektórych wariantach metody naprężeń nominalnych wymagana jest znajomość asymetrii cyklu obciążenia, scharakteryzowanej przez wartość współczynnika asymetrii cyklu  $R$ .

Trwałość wyznaczono na podstawie zależności (2) przyjmując stałą materiałową  $S$  zgodnie z tablicą I oraz nachylenie

m zgodne z przypisaną charakterystyką zmęczeniową. Wyniki obliczeń trwałości zestawiono w tablicach II-V.

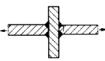
**Tablica II.** Wyniki obliczeń trwałości złącza doczołowego z dospawaną podkładką

**Table II.** Fatigue lives obtained for transverse butt weld welded on permanent backing bar

Złącze / kategoria:	IIW	ABS	JSSC	Eurokod 3
 Złącze / kategoria:	FAT 71	F	F	71
Charakterystyka zmęczeniowa:	FAT 71	ABS-(A) Klasa 'F' m = 3,0	D, $\Delta\sigma_k = 65$ MPa	71, $\Delta\sigma_k = 71$ MPa m = 3,0
Przebieg naprężenia:	$\Delta\sigma = 90$ MPa, R = 0,5			
Trwałość $N_r$ , l. cykli:	981923	864197	753429	981923
Odchylenie standardowe, l. cykli:	109699			

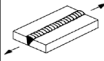
**Tablica III.** Wyniki obliczeń trwałości złącza krzyżowego

**Table III.** Fatigue lives obtained for cruciform joint

Złącze / kategoria:	IIW	ABS	JSSC	Eurokod 3
 Złącze / kategoria:	FAT 71	F	E	80
Charakterystyka zmęczeniowa:	FAT 71	ABS-(A) Klasa 'F' m = 3,0	E, $\Delta\sigma_k = 80$ MPa	80, $\Delta\sigma_k = 80$ MPa m = 5,0
Przebieg naprężenia:	$\Delta\sigma = 60$ MPa, R = 0,5			
Trwałość $N_r$ , l. cykli:	3313990	3786626	$\infty$	7069243
Odchylenie standardowe, l. cykli:	2045356*			
*bez uwzględnienia wyników z wariantu JSSC				

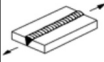
**Tablica IV.** Wyniki obliczeń trwałości złącza doczołowego ze spoiną ułożoną równolegle do kierunku obciążenia

**Table IV.** Fatigue lives obtained for longitudinal butt weld

Złącze / kategoria:	IIW	ABS	JSSC	Eurokod 3
 Złącze / kategoria: Bez miejsc start/stop Standardowa grubość płyt	FAT 125	C	C	112
Charakterystyka zmęczeniowa:	FAT 125	ABS-(A) Klasa 'C' m = 3,5	C, $\Delta\sigma_k = 125$ MPa	112, $\Delta\sigma_k = 112$ MPa m = 3,0
Przebieg naprężenia:	$\Delta\sigma = 200$ MPa, R = 0,5			
Trwałość $N_r$ , l. cykli:	488281	373882	488281	351232
Odchylenie standardowe, l. cykli:	73173			

**Tablica V.** Wyniki obliczeń trwałości złącza doczołowego ze spoiną ułożoną równolegle do kierunku obciążenia. Zwiększona grubość płyt - przypadek niestandardowy

**Table V.** Fatigue lives obtained for longitudinal butt weld. Fatigue strength modification due to the increased plate thickness

Złącze / kategoria:	IIW	ABS	JSSC	Eurokod 3
 Złącze / kategoria: Bez miejsc start/stop Grubość płyt t = 35 mm	FAT 125	C	C	112
Charakterystyka zmęczeniowa:	FAT (125*f(t))	ABS-(A) Klasa 'C' m = 3,5	$\Delta\sigma_k = 125 \cdot C_t$ , MPa	112, $\Delta\sigma_k = 112$ MPa m = 3,0
Zakres naprężenia $\Delta\sigma$ , MPa:	200	200*x	200	200
Współczynniki korekcyjne:	f(t) = 0,935	x = 0,890	$C_t = 0,919$	n/d
Trwałość, l. cykli:	488281	373882	488281	351232
Trwałość skorygowana $N_f$ , l. cykli:	399018	249055	379379	n/d
Odchylenie standardowe, l. cykli:	66693			

## Podsumowanie i wnioski

W pracy dokonano przeglądu czterech wariantów metody wyznaczania trwałości zmęczeniowej złączy spawanych na podstawie naprężeń nominalnych. Wszystkie z wariantów wykorzystują te same założenia, jednak różnią się parametrami: ich wartością oraz zdefiniowaniem. Przeprowadzone obliczenia trwałości pozwoliły na przybliżenie ich metodologii. W przypadkach typowych złączy pracujących w warunkach standardowych wyniki były do siebie przybliżone. Większe różnice były



zauważalne w przypadkach niestandardowych, tj. w tym przypadku w obliczeniach złączy w zakresie wysokiej trwałości oraz złączy o zwiększonej grubości spawanych płyt.

Największe różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami występują w parametrach charakterystyk zmęczeniowych oraz w ich przebiegu. Zastosowanie znajdują charakterystyki Wöhlera w układzie podwójnie logarytmicznym, o przebiegu trój etapowym lub dwuetapowym (w przypadku zaleceń Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa również w dwóch wariantach). W przypadku projektowania złączy w obszarze wysokiej trwałości (tj. poniżej poziomu umownej granicy zmęczenia) przewidziane do tego celu charakterystyki zamieszczono jedynie w zaleceniach ABS oraz Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa. Wyniki otrzymane z obu wariantów mogą być jednak bardzo rozbieżne. Należy pamiętać, że w zaleceniach Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa zapisano uwagę o konieczności konfrontacji przyjętych założeń z najnowszymi pozycjami literaturowymi.

Duże różnice występują również w podejściu do przypadków niestandardowych. Stosuje się różne definicje współczynników korekcyjnych, lub – jak w przypadku zaleceń ABS – również i różne charakterystyki zmęczeniowe, w tym przypadku w zależności od środowiska pracy. W tej grupie przypadków obliczeniowych wyniki były najbardziej rozbieżne.

Obliczenia prowadzone według każdego z wariantów zwracają wyniki zachowawcze – charakterystyki zmęczeniowe opracowane zostały na poziomie prawdopodobieństwa przetrwania 97,7%. Dokonując wyboru jednego z wariantów metody naprężeń nominalnych warto nadmienić, że niektóre złącza zostały sklasyfikowane tylko w jednym spośród nich. Z porównania przeprowadzonego dla stalowych złączy spawanych wynika, że najbardziej różnorodne zestawienia zamieszczono w zaleceniach Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa oraz w normie Eurokod 3.

## Literatura

- [1] Krentowski J.: Steel roofing disaster and the effect of the failure of butt joints. *Engineering Failure Analysis*, vol. 45, p. 245–251, 2015.
- [2] Klinger C., Michael T., Bettge D.: Fatigue cracks in railway bridge hangers due to wind induced vibrations – Failure analysis, measures and remaining service life estimation. *Engineering Failure Analysis*, vol. 43 (A Tribute to Prof. A. Martens), p. 232–252, 2014.
- [3] Bošnjak S. M., Arsić M. A., Zrnić N. D., Rakin M. P., Pantelić M. P.: Bucket wheel excavator: Integrity assessment of the bucket wheel boom tie-rod welded joint. *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, p. 212–222, 2011.
- [4] Das C. R., Bhaduri A. K., Ray S. K.: Fatigue failure of a fillet welded nozzle joint. *Engineering Failure Analysis*, vol. 10, p. 667–674, 2003.
- [5] Blacha Ł., Karolczuk A.: Porównanie energetycznego modelu wyznaczania trwałości zmęczeniowej złączy spawanych z zaleceniami międzynarodowymi. *Przegląd Spawalnictwa* 2011, 7, s. 39-45.
- [6] Doerk O., Fricke W., Weissenborn C.: Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints. *International Journal of Fatigue*, vol. 25, p. 359–369, 2003.
- [7] Hobbacher A.: Recommendations for fatigue design of welded joint and components. International Institute of Welding, IIW document XIII-2151-07/XV-1254-07, Paris, 2007.
- [8] American Bureau of Shipping (ABS): Guide for fatigue assessment of offshore structures. ABS, Houston, 2003.
- [9] Japanese Society of Steel Construction (JSSC): Fatigue design recommendations for steel structures English Version, JSSC Technical Report No. 32. JSSC, Tokyo, 1995.
- [10] PN-EN 1993-1-9 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie. CEN - Bruksela, PKN – Warszawa, 2010.
- [11] Niemi E.: Structural hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components, Final draft. International Institute of Welding, IIW document XIII-1819-00/XV-1090-01, Lappeenranta, 2003.
- [12] Radaj D., Sonsino C. M., Fricke W.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Second Edition. Woodhead Publishing, Cambridge, 2006.
- [13] Stasiuk P., Karolczuk A.: Analiza niejednorodnego rozkładu naprężeń ekwiwalentnych w spawanym złączu krzyżowym przy obciążeniach zmiennych. *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 86, s. 20-25, 2014.
- [14] Blacha Ł., Karolczuk A., Bański R., Stasiuk P.: Application of the weakest link analysis to the area of fatigue design of steel welded joints. *Engineering Failure Analysis*, vol. 35, p. 665–677, 2013.
- [15] Golański G., Słania J., Jasak J., Pietryka I., Urbańczyk P.: Mikrostruktura i właściwości mechaniczne złącza spawanego stali 12HMF po długotrwałej eksploatacji. *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 86, s. 49-53, 2014.
- [16] PN-EN 1999-1-3 Eurokod 9: Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-3: Konstrukcje narażone na zmęczenie. CEN - Bruksela, PKN – Warszawa, 2011.