

KONCEPCJA NAJSŁABSZEGO OGNIWA W MODELOWANIU TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ZŁĄCZY SPAWANYCH

Aleksander KAROLCZUK*, Łukasz BLACHA*

*Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole,

a.karolczuk@po.opole.pl, l.blacha@doktorant.po.opole.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono oryginalny model wyznaczania rozkładu prawdopodobieństwa zniszczenia złączy spawanych wykorzystujący koncepcję nejsłabszego ogniwa. Poprzez wprowadzenie charakterystyki zmęczeniowej materiału zastępczego uwzględniono niejednorodność strukturalną oraz naprężenia własne. Procedura identyfikacji właściwości materiału zastępczego wykorzystuje istniejące dane eksperymentalne uszeregowane w tzw. klasach FAT. Proponowany model uwzględnia również efekt skali poprzez jednoznaczne powiązanie parametru kształtu rozkładu z wielkością analizowanego elementu.

1. WPROWADZENIE

Spawanie jest często spotykaną metodą łączenia elementów konstrukcyjnych. Stosowanie złączy spawanych wiąże się z pewnymi niedogodnościami. W projektowaniu należy wziąć pod uwagę, że obecność nieobrobionego cieplnie złącza spawanego w danej konstrukcji jest źródłem: (i) koncentracji naprężeń wynikającej ze złożonego kształtu złącza i spoiny; (ii) charakterystycznej niejednorodności mikrostruktury materiału w spoinie i jej otoczeniu; (iii) naprężeń własnych. Złącza spawane bez dalszej obróbki cieplnej, zmniejszającej naprężenia własne, występują w wielu konstrukcjach (Markusik i Łukasik, 2001), fakt ten wynika z ograniczeń narzuconych przez procesy technologiczne. Z obserwacji eksperymentalnych dla tego typu złączy (Blacha i inni, 2011; Sonsino i inni, 1999) płyną następujące spostrzeżenia: (a) w wyniku łączenia elementów metodą spawania w złączu powstaje charakterystyczny obszar (materiał) o nieznanach właściwościach; (b) w złączu występują naprężenia własne, rosnące wraz z wymiarami połączenia; (c) gatunek stali (lub stopu aluminium) jako materiału rodzimego ma drugorzędne znaczenie pod względem wytrzymałości zmęczeniowej – w przypadku stalowego materiału rodzimego wykazują to badania zmęczeniowe opisane w pracach Sonsino i innych (1999) oraz Łagody (2005). Wymienione cechy wskazują na złącza spawane jako miejsce w którym wystąpi inicjacja procesu zniszczenia konstrukcji.

Spośród wielu metod obliczeniowych stosowanych do szacowania trwałości zmęczeniowej elementów spawanych można wyróżnić następujące grupy: (i) metody bazujące na naprężeniach nominalnych; (ii) metody bazujące na tzw. fikcyjnym promieniu zaokrąglenia linii wtopu; (iii) metody bazujące na tzw. naprężeniach strukturalnych „hot spot”, (iv) metody wykorzystujące elementy liniowej mechaniki pękania, (v) inne, np. metoda uwzględniająca objętość materiału zawierającą 90% największych naprężeń (Sonsino, 1995). Celem pracy nie jest ocena, czy też analiza wymienionych metod, ale przedstawienie nowego modelu

wyznaczania zarówno trwałości zmęczeniowej jak również rozkładu prawdopodobieństwa zniszczenia z uwzględnieniem efektu skali. Przy czym efekt skali dotyczy nie tylko wielkości elementu, ale również dużej koncentracji naprężeń w otoczeniu linii wtopu. W pewnym stopniu proponowana koncepcja wiąże się z koncepcją Sonsino (1995), jest jej rozszerzeniem na większy zakres liczby cykli poprzez wprowadzenie zastępczej charakterystyki zmęczeniowej.

2. ZAŁOŻENIA DO PROPONOWANEGO MODELU

Opierając się na wynikach badań zmęczeniowych stalowych złączy spawanych (Blacha i inni, 2011; Łagoda, 2005; Sonsino i inni, 1999) sformułowano następujące założenia do proponowanego modelu:

- ze względu na specyfikę łączenia elementów metodą spawania elektrodą topliwą w osłonie gazowej materiał powstały w otoczeniu spoiny ma cechy charakterystyczne takie jak: niejednorodność struktury, obecność stref przegrzania, naprężenia własne; są to właściwości dominujące nad właściwościami materiałów rodzimych, co pozwala założyć, że proponowana charakterystyka zmęczeniowa materiału zastępczego będzie miała uniwersalne zastosowanie w przypadku stalowych złączy spawanych,
- zakłada się, że materiał w miejscu łączenia można wyodrębnić i przypisać mu pewne właściwości zmęczeniowe; tak wyodrębniony materiał nazwano materiałem zastępczym,
- liczbę cykli do zniszczenia wyznacza się na podstawie dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa zniszczenia P_z o predefiniowanym kształcie wykorzystując koncepcję nejsłabszego ogniwa,
- na rozkład prawdopodobieństwa P_z wpływa niejednorodne pole naprężeń wokół linii wtopu, wielkość elementu, a także właściwości zmęczeniowe materiału zastępczego,

– pole naprężeń wyznacza się z wykorzystaniem metody elementów skończonych w zakresie liniowo-sprężystym.

Z obserwacji wyników badań eksperymentalnych wynika, że wraz ze wzrostem długości spoiny oraz wymiarów elementu spawanego zaobserwować można spadek wytrzymałości zmęczeniowej. Właściwość tą nazwano efektem skali. Wpływ wielkości elementu można opisać stosując koncepcję zniszczenia najslabszego ognia wzmiankowaną między innymi w pracach Kocańdy i Szali (1997) oraz opisaną przez Karolczuka (2009). Takie podejście wydaje się być obiecujące w odniesieniu do złączy spawanych. Stosując koncepcję najslabszego ognia w objętości materiału (Karolczuk, 2009) dla danego poziomu obciążenia, dystrybuanta zniszczenia P_z w funkcji liczby cykli do zniszczenia N jest następująca:

$$P_z(N) = 1 - P_s(N) = 1 - e^{-\frac{1}{V_0} \int \left(\frac{\log N}{H} \right)^p dV}, \quad (1)$$

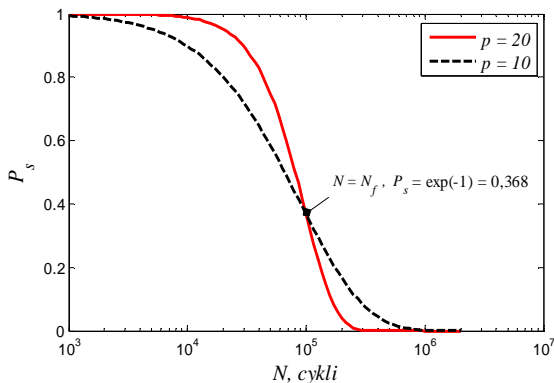
gdzie: $P_s(N)$ – prawdopodobieństwo przetrwania (*survival probability*) w funkcji liczby cykli N , V_0 – objętość referencyjna, H – współczynnik skali rozkładu, p – współczynnik kształtu rozkładu.

Rozkład prawdopodobieństwa przetrwania $P_s(N)$ dla elementu o referencyjnej objętości V_0 i jednorodnym polu naprężeń wyraża się jako

$$P_s(N) = e^{-\left(\frac{\log N}{H} \right)^p}. \quad (2)$$

Parametr skali rozkładu najwygodniej jest przedstawić w formie $H = \log N_f$, gdzie N_f to liczba cykli do zniszczenia materiału zastępczego (opis w następnym paragrafie) dla danej wartości P_s , czyli

$$P_s(N) = e^{-\left(\frac{\log N}{\log N_f} \right)^p}. \quad (3)$$



Rys. 1. Symulacja rozkładów P_s dla dwóch wartości parametru p oraz dla $N_f = 10^5$ cykli

Na Rys. 1 przedstawiono przykładowe rozkłady $P_s(N)$ dla różnych wartości parametru p .

Charakterystyka zmęczeniowa materiału zastępczego uwzględnia wszelkie niejednorodności strukturalne oraz

wpływ naprężeń własnych i będzie wyznaczona na podstawie danych eksperymentalnych. Dla uproszczenia zagadnienia przyjęto, że w pewnym zakresie liczby cykli do zniszczenia charakterystyka zmęczeniowa jest następującej postaci

$$\log N_f = \log C_f - m_f \log \Delta\sigma, \quad (4)$$

gdzie: N_f – liczba cykli do zniszczenia materiału zastępczego dla danego P_s , C_f , m_f – parametry materiałowe dla danego P_s , $\Delta\sigma$ – zakres naprężenia.

Po podstawieniu zależności (4) do (3) oraz przy założeniu, że parametr p nie zależy od zakresu naprężenia $\Delta\sigma$ to otrzymuje się rozkład $P_s\text{-}\Delta\sigma\text{-}N$

$$P_s(N, \Delta\sigma) = e^{-\left(\frac{\log N}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma} \right)^p}. \quad (5)$$

Stałość parametru p jest prawdziwa dla pewnego zakresu trwałości. Dla naprężeń poniżej klasycznej granicy zmęczenia rozrzuty trwałości wzrastają a w związku z tym parametr p przyjmuje mniejszą wartość (Rys. 1).

Ostatecznie, proponowany rozkład prawdopodobieństwa zniszczenia $P_z(N)$ w funkcji liczby cykli do zniszczenia N dla elementów o niejednorodnym polu naprężeń $\Delta\sigma(x,y,z)$ przyjmuje postać

$$P_z(N) = 1 - P_s(N) = 1 - e^{-\frac{1}{V_0} \int \left(\frac{\log N}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma(x,y,z)} \right)^p dV}. \quad (6)$$

Otrzymana postać charakteryzuje się czterema parametrami: V_0 , p , C_f , m_f , dla których poniżej przedstawiono procedury ich identyfikacji.

3. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW

3.1. Parametr kształtu rozkładu p

Prawdopodobieństwo przetrwania elementu o przypisanych właściwościach materiału zastępczego i objętości n -krotnie większej od elementu opisanego zależnością (5) zapisać można w postaci

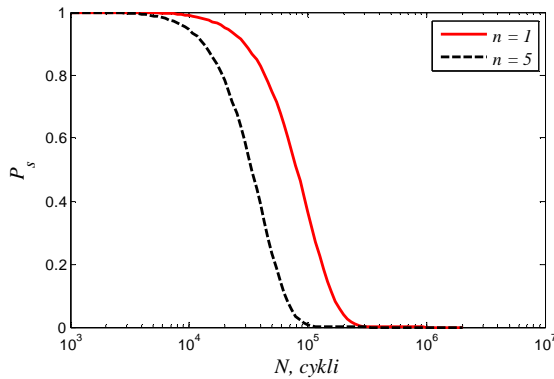
$$P_s(n \cdot V) = e^{-n \left(\frac{\log N}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma} \right)^p}. \quad (7)$$

Symulację rozkładów prawdopodobieństwa przetrwania dla różnych wartości n przedstawiono na Rys. 2.

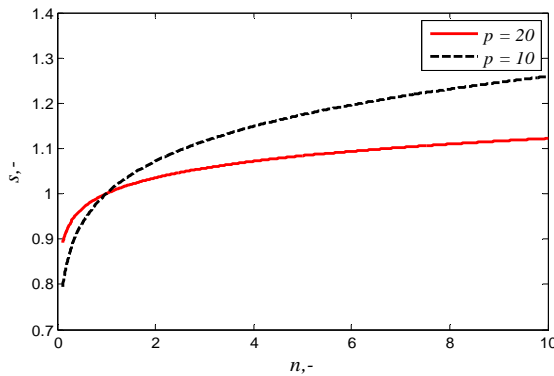
Dla tej samej wartości P_s , zakresu naprężeń $\Delta\sigma$ oraz takich samych wartości stałych C_f , m_f uzyskane trwałości N różnią się (efekt skali). Przyjmując oznaczenia

$$\log(N(V)) = s \cdot \log(N(n \cdot V)), \quad (8)$$

gdzie: $N(V)$, $N(n \cdot V)$ liczba cykli do zniszczenia uzyskana odpowiednio dla objętości V oraz n -krotnie większej, s – parametr opisujący efekt skali (współczynnik proporcjonalności w skali logarytmicznej).



Rys. 2. Symulacja rozkładów P_s dla dwóch wartości n przy $p = 20$ oraz $N_f = 10^5$ cykli



Rys. 3. Symulacja efektu skali dla dwóch wartości parametru kształtu p

Porównując prawdopodobieństwa P_s dla objętości V oraz n -krotnie większej

$$e^{-\left(\frac{\log N(V)}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma}\right)^p} = e^{-n\left(\frac{\log N(nV)}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma}\right)^p}, \quad (9)$$

podstawiając zależność (8) otrzymujemy

$$e^{-\left(\frac{s \cdot \log N(nV)}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma}\right)^p} = e^{-n\left(\frac{\log N(nV)}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma}\right)^p}. \quad (10)$$

Po przekształceniach

$$\left(\frac{s \cdot \log N(V)}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma}\right)^p = n\left(\frac{\log N(V)}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma}\right)^p, \quad (11)$$

wynika, że

$$s^p = n, \quad (12)$$

Ostatecznie

$$p = \frac{\log n}{\log s}, \quad (13)$$

Uzyskana zależności (13) umożliwia wyznaczenie wartości parametru p poprzez porównanie trwałości złączy spawanych różniących się wielkością, opisanych za pomocą parametrów n i s . Przykładową zależność (12) przedstawiono na Rys. 3. Z symulacji, np. dla $p = 20$ wynika, że 10-krotne zwiększenie objętości elementu powoduje spadek trwałości, w którym iloraz logarytmów liczby cykli wynosi około 1,26 (zgodnie z równaniem 8).

3.2. Parametry C_f i m_f

Identyfikowania parametrów C_f i m_f wymaga znajomości liczby cykli do zniszczenia złącza spawanego uzyskanej dla znanej wartości prawdopodobieństwa P_s oraz kształtu połączenia w celu jego zamodelowania w metodzie elementów skończonych. Idealnie do tego celu nadają się charakterystyki zmęczeniowe uszeregowane w tzw. klasach FAT, znane z zaleceń Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa (Hobbacher, 2007). Liczba FAT oznacza zakres naprężeń $\Delta\sigma = \text{FAT}$, przy których trwałość złącza wynosi $2 \cdot 10^6$ cykli. Według IIW (Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa (ang. *International Institute of Welding*)) trwałość złącza spawanego wyraża się zależnością

$$N_{FAT} = \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_{nom}}\right)^m \cdot 2 \cdot 10^6, \quad (14)$$

gdzie: m – współczynnik nachylenia charakterystyki Wöhlera (dla stali $m = 3$ dla $N_{FAT} < 10^7$), $\Delta\sigma_{nom}$ - zakres naprężenia nominalnego, N_{FAT} - liczba cykli do zniszczenia dla $P_s = 0,95$ według klasy FAT.

Dla wybranego typu złącza oraz klasy FAT należy wyznaczyć pole naprężeń odpowiadające zakresowi naprężenia nominalnego. Kształt złącza i gatunek łączonych stali według proponowanego modelu nie ma wpływu na charakterystykę materiału zastępczego. Według badań eksperymentalnych, wspomnianych we wprowadzeniu, gatunek stali ma drugorzędne znaczenie, a kształt złącza jest uwzględniany poprzez zamodelowanie elementu metodą elementów skończonych. W celu uniknięcia osobliwości pola naprężeń wokół linii wtopu należy zastosować odpowiedni promień zaokrąglenia ρ . Wielkość promienia ρ będzie miał wpływ na uzyskane wielkości C_f i m_f , ale należy pamiętać, że mamy do czynienia z materiałem zastępczym, którego parametry należy kojarzyć z zastosowanym promieniem zaokrąglenia. Sonsino w pracy Sonsino (1995) zastosował eksperymentalnie wyznaczone wielkości średnie promienia ρ , który dla złączy nie obrabionych mechanicznie wynosił 0,45 mm. Promień ρ charakteryzuje się pewnym rozrzutem, co wraz z niejednorodnym polem naprężeń własnych wpływa na rozkład prawdopodobieństwa trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych. Obydwie te cechy mają wpływ na efekt skali uwzględniony w proponowanym rozkładzie (6) poprzez parametr p . Parametry materiału zastępczego ujmują w sobie wpływ niejednorodności struktury materiału wokół spoiny na trwałość zmęczeniową. Należy tutaj zwrócić uwagę, że w tzw. metodzie promienia fikcyjnego sformułowanej przez Radaja (Berto i inni, 2008; Hobbacher, 2007; Morgenstern, 2006; Radaj i inni, 2006), promień zaokrąglenia zależy od współczynnika wieloosiowości oraz od przyjętego kryterium uszkodzenia, co w proponowanym modelu nie ma miejsca. Promień zaokrąglenia nie zależy od rodzaju obciążenia lub przyjętego kryterium uszkodzenia, jest uśrednionym reprezentantem rzeczywistych warunków oraz będzie przypisany do konkretnej charakterystyki materiału zastępczego.

Obliczone składowe zakresów pól naprężeń $\Delta\sigma_{ij}(x,y,z)$ wokół spoiny należy zredukować stosując wybrane kryterium wieloosiowości zmęczenia. Dla połączeń stalowych nie obrabionych cieplnie proponuje się zastosować kryte-

rium maksymalnego naprężenia normalnego, co w przypadku obciążeń cyklicznych i jednoosiowych sprowadza się do obliczenia maksymalnego naprężenia głównego $\Delta\sigma_{eq}(x,y,z) = 2\sigma_1(x,y,z)$. Wyznaczone pole naprężeń zredukowanych $\Delta\sigma_{eq}(x,y,z)$ należy całkować stosując wyrażenie

$$P_s(N) = e^{-\frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\log N_{FAT}}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma_{eq}(x,y,z)} \right)^p dV}, \quad (15)$$

przyjmując iteracyjnie różne wartości parametrów C_f i m_f . Wielkość V_0 to wielkość referencyjna materiału zastępczego, którą należy przyjąć za równą 1 mm^3 ze względu na zgodność jednostek. Stosując klasę FAT do identyfikacji otrzymujemy

$$0,95 - e^{-(\log N_{FAT})^p \int_V \left(\frac{1}{\log C_f - m_f \log \Delta\sigma} \right)^p dV} = E(C_f, m_f) \quad (16)$$

gdzie: $E(C_f, m_f)$ jest estymatorem identyfikacji parametrów materiału zastępczego, którego wartość powinna dążyć do zera.

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono model wykorzystujący koncepcję najsłabszego ogniwa zastosowaną dla połączeń spawanych. Zaproponowany model umożliwia obliczanie rozkładu trwałości zmęczeniowej dla dowolnego połączenia spawanego. Możliwość tą uzyskano poprzez: (i) zastosowanie metody elementów skończonych-dowolny kształt połączenia, (ii) wprowadzenie zastępczej charakterystyki zmęczeniowej materiału występującego wokół spoiny, (iii) symulację efektu skali.

Kluczowym elementem w proponowanym modelu jest identyfikacja parametrów materiału zastępczego oraz efektu skali. Procedura identyfikacji parametrów materiału zastępczego wykorzystuje istniejące dane dotyczące klas FAT zawarte w zaleceniach IIW (Hobbacher, 2007). Natomiast wyznaczenie parametru odpowiadającego za efekt skali wymaga porównania trwałości zmęczeniowej uzyskanej dla tego samego typu złącza, ale o różnych wielkościach. W tym celu rozpoczęto badania eksperymentalne opisane w pracy Blachy i innych (2011).

Proponowany model wymaga weryfikacji przeprowadzonej dla różnych typów złączy spawanych, co będzie przedmiotem dalszych prac.

LITERATURA

1. **Berto F., Lazzarin P., Radaj D.** (2008), Fictitious notch rounding concept applied to sharp V-notches: Evaluation of the microstructural support factor for different failure hypotheses. Part I: Basic stress equations, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, 3060-3072.
2. **Blacha Ł., Karolczuk A., Bański R., Stasiuk P.** (2011), Eksperymentalna analiza trwałości zmęczeniowej krzyżowych złączy spawanych w odniesieniu do wielkości elementu, *VI Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Materiałów i Konstrukcji*, Augustów 2011.
3. **Hobbacher A.** (2007), *Recomendations for fatigue design of welded joint and components*, IIW document XIII-2151-07/XV-1254-07, Paris.
4. **Karolczuk A.** (2009), *Nielokalne metody obliczeń zmęczeniowych*, Studia i monografie Politechniki Opolskiej, 239.
5. **Kocańda S., Szala J.** (1997), *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
6. **Łagoda T.** (2005), *Trwałość zmęczeniowa wybranych złączy spawanych*, Studia i monografie Politechniki Opolskiej, z.173.
7. **Markusik S., Łukasik T.** (2001), Naprężenia zmęczeniowe w złączach spawanych konstrukcji stalowych dźwignic obciążonych dynamicznie, *Transport Przemysłowy*, No 4 (6), 5-8.
8. **Morgenstern C., Sonsino C. M., Hobbacher A., Sorbo F.** (2006), Fatigue design of aluminium welded joints by the local stress concept with the fictitious notch radius of $r_f=1 \text{ mm}$, *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, 881-990.
9. **Radaj D., Sonsino C.M., Fricke W.** (2006), *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*, second edition, Woodhead Publishing and CRC Press, Cambridge and Boca Raton.
10. **Sonsino C. M., Kaufmann H., Demofonti G., Rifisculi S., Sedlacek G., Müller C., Hanus F., Wegmann H. G.** (1999), *High-Strength steels in welded state for light-weight constructions under high and variable stress peaks*, ESCC Steel Research Programme, CSM – Roma, LBF – Darmstadt, Published by the European Commission, Brussels.
11. **Sonsino C.M.** (1995), Multiaxial-fatigue of welded joints under in-phase and out-of-phase local strains and stresses, *International Journal of Fatigue*, Vol. 17(1), 55-70.

APPLICATION OF THE WEAKEST LINK CONCEPT TO FATIGUE ANALYSIS OF WELDED JOINTS

Abstract: The present paper presents an original model for evaluation of failure probability of welded joints. The S-N curve for substitute (equivalent) material is being introduced in order to govern the issue of material inhomogeneity and post-weld stress. Extraction of characteristics for this material is based on existing experimental data, categorized into FAT classes. Among that, the proposed model takes into account also the volume effect.

Praca współfinansowana ze środków
Europejskiego Funduszu Społecznego



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

