

PAWEŁ BIŁOUS, DARIUSZ ROZUMEK, TADEUSZ ŁADOGA*

TRWAŁOŚĆ PRÓBEK Z KARBEM GEOMETRYCZNYM WYKONANYCH ZE STALI S355N

LIFETIME OF THE GEOMETRICAL NOTCHED SPECIMENS MADE OF S355N STEEL

Streszczenie

W artykule zaprezentowano porównanie trwałości zmęczeniowej elementów spawanych posiadających geometrię spoiny typu X z zaprojektowanymi, próbkami płaskimi z naciętym obustronnym karbem geometrycznym typu V. Praca ponadto zawiera charakterystyki zmęczeniowe wyznaczone dla stali konstrukcyjnej S355N, płaskich próbek wykonanych z tego samego materiału z naciętym ostrym karbem obustronnym typu V oraz próbek spawanych wykonanych ze stalowych blach łączonych spoiną typu X. Na podstawie przebadanych elementów i ich charakterystyk zmęczeniowych wykreślono wykresy zmęczeniowych współczynników działania karbu K_f .

Słowa kluczowe: trwałość zmęczeniowa, połączenia spawane, zmęczeniowy współczynnik działania karbu K_f , karb

Abstract

The paper presents comparison of experimental fatigue lives of double-V butt welded joints and plane V-notched specimens. The tested elements were made of constructional steel S355N, and they had the same fatigue stress concentration factors K_f . The paper presents fatigue characteristics of the tested elements and their analysis.

Keywords: life time, notch, welded joint, fatigue stress concentration factor

* Mgr inż. Paweł Biłous, dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. dr hab. inż. Tadeusz Ładoga, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska.

Oznaczenia

K_t – teoretyczny współczynnik działania karbu,
 K_f – zmęczeniowy współczynnik działania karbu,
 N_f – liczba cykli.

1. Wstęp

Koncentratorami naprężeń (karbami) nazywamy wszelkiego rodzaju nieciągłości materiałowe występujące w poprzecznym przekroju badanego elementu. Karby (mikrokarby) występują praktycznie we wszystkich elementach konstrukcyjnych typu: mosty, rurociągi, itp. lub częściach maszyn różnych konstrukcji. Ze względów konstrukcyjnych nieciągłości te możemy podzielić na dwie grupy: karby geometryczne oraz karby strukturalne.

Do pierwszej grupy możemy zaliczyć wszystkie nieciągłości geometryczne powstałe na skutek wytwarzania elementu lub na skutek przewidzianego, dobrze przemyślanego problemu konstrukcyjnego. Karbami w tym przypadku są gwinty, podcięcia, otwory, itp.

Do drugiej grupy zaliczamy wszystkie nieciągłości związane ze zmianą struktury materiału rodzimego. W tym przypadku do takich nieciągłości możemy zaliczyć różnego rodzaju wtrącenia metaliczne, niemetaliczne osłabiające (umacniające) materiał lub obszary, w których występuje zmiana wielkości ziarna i ich struktury. Przykładami takich karbów są połączenia spawane, zgrzewane, lutowane, elementy stalowe posiadające miejsca po obróbce cieplnej, chemicznej lub ciepłno-chemicznej.

Karby geometryczne charakteryzują się tym, że w przypadku prostych stanów obciążenia (rozciągania, zginanie) na powierzchni elementu w dnie karbu występuje złożony stan naprężeń oraz naprężenia te przekraczają zdecydowanie naprężenia nominalne. W przypadku karbów strukturalnych, np. połączeń spawanych, pojawia się wpływ naprężeń własnych oraz wpływ zmiany struktury na trwałość zmęczeniową.

Ze względu na występowanie naprężeń często przekraczających granicę plastyczności, karby stają się najbardziej niebezpiecznymi miejscami w elementach maszyn. To właśnie w tych miejscach dochodzi do pęknięć zmęczeniowych, co w rezultacie doprowadza do zniszczenia elementu i awarii maszyny (urządzenia). Dlatego bardzo ważne jest, aby podczas konstruowania elementów maszyn, konstruktor dobrze poznał zagadnienia dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej (umiejętnie korzystał z twierdzeń opierających się na doświadczeniach wielu badaczy, którzy zajmowali się danym zagadnieniem zmęczenia). Umożliwia to odpowiednie dobranie współczynników bezpieczeństwa i przewidzenie najbardziej niewralgicznych obszarów zniszczeń w elementach maszyn wywołanych na skutek zmiennych obciążeń.

Typowe znane modele oceny trwałości zmęczeniowej złączy spawanych oparte są na naprężeniach nominalnych, które ponadto zakładają, że rodzaj materiału spawanego nie wpływa na trwałość zmęczeniową [6–9]. Niniejsza praca ma na celu porównanie trwałości zmęczeniowej próbek spawanych z elementami mającymi w swej budowie karb geometryczny typu 2V. Cechą wspólną obu elementów jest występowanie identycznego teoretycznego współczynnika działania karbu K_t , który wynosi 2,82. Końcowym efektem pracy jest przedstawienie zmian zmęczeniowych współczynników działania karbu K_f w funkcji liczby cykli dla badanego materiału.

2. Zmęczeniowy współczynnik działania karbu K_f

Jedną z metod oszacowania trwałości zmęczeniowej zarówno w elementach zawierających karby geometryczne, jak i karby strukturalne, jest metoda opierająca się na wykorzystaniu zmęczeniowego współczynnika działania karbu K_f . Zastosowanie tego współczynnika pozwala wyznaczyć rzeczywiste naprężenia lokalnie inicjujące w obszarach pęknięć. Tego typu działanie w kolejnym etapie pozwala oszacować lub wyznaczyć trwałość zmęczeniową elementu (konstrukcji) na podstawie wykreślonych z badań eksperymentalnych charakterystyk $K_f = f(N_f)$.

Współczynnik K_f interpretuje się za pomocą porównania naprężeń występujących w elementach gładkich z naprężeniami w elementach z karbem.

Zmęczeniowy współczynnik działania karbu K_f jest zależny od liczby cykli i najczęściej wyznacza się dla 10^6 liczby cykli

$$K_f(N_f) = \frac{\sigma_{sm}(N_f)}{\sigma_{not}(N_f)}, \quad (1)$$

gdzie:

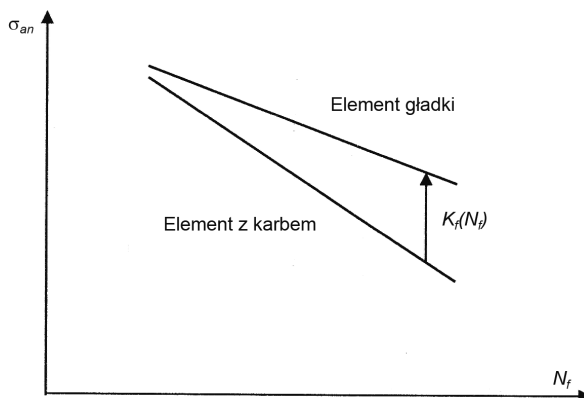
$\sigma_{sm}(N_f)$ – naprężenia w elemencie gładkim,

$\sigma_{not}(N_f)$ – naprężenia nominalne w elemencie z karbem [2].

Najczęściej zmęczeniowy współczynnik działania karbu określany jest dla trwałości 10^6 cykli, w związku z czym wygodnie jest wprowadzić zależność [1]

$$K_f(N_f) = K_f(10^6) \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{\frac{\log[K_f(10^6)]}{3}}. \quad (2)$$

Interpretację graficzną na podstawie definicji zmęczeniowego współczynnika działania karbu K_f przedstawia rys. 1.



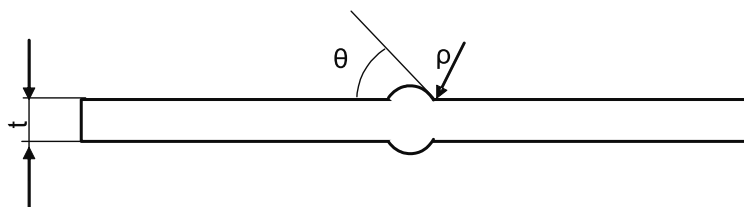
Rys. 1. Interpretacja graficzna współczynnika K_f [1]
Fig. 1. Graphical interpretation of the coefficient K_f [1]

3. Materiał i geometria próbek

Do badań zmęczeniowych zastosowano dwa rodzaje próbek stalowych wykonanych ze stali konstrukcyjnej S355N. Pierwsze próbki zmęczeniowe (spawane), wykonano i przebadano w Darmstadt przez Fraunhofer-Institute, których wyniki badań były przedstawione w pracach [2–4]. Próbki spawane wykonane zostały z blachy walcowanej o grubości 30 mm ze spoiną czołową typu X. Teoretyczny współczynnik działania karbu wyznaczony dla tych próbek wynosi $K_t = 2,82$. W przypadku spoiny czołowej typu X pokazanej na rys. 2. Teoretyczny współczynnik działania karbu można wyznaczyć ze wzoru

$$K_t = \left[1 + b_1 \left(\frac{t}{\rho} \right)^{b_2} \right] \left[1 + (a_0 + a_1 \sin \theta + a_2 \sin^2 \theta + a_3 \sin^3 \theta) \left(\frac{t}{\rho} \right)^{l_1 + l_2 \sin(\theta + l_3)} \right], \quad (3)$$

gdzie stałe we wzorze (3) zestawione są w tabeli 1.



Rys. 2. Schemat geometrii spoiny czołowej typu X dla wyznaczenia teoretycznego współczynnika działania karbu

Fig. 2. Geometry of the butt welds joint for determination of the theoretical notch coefficient

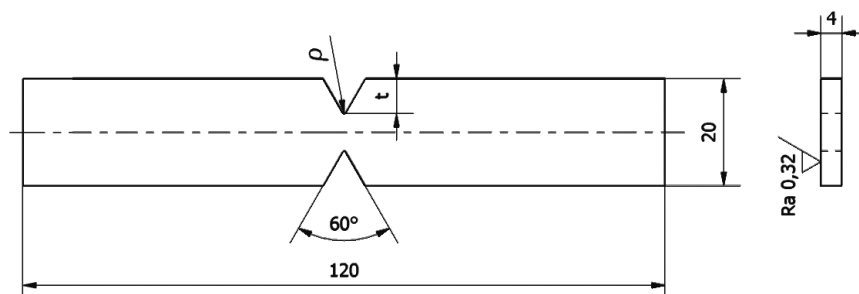
Tabela 1

Wartości współczynników w równaniu (3) w zależności od obciążenia [10]

Współczynnik obciążenia	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	l_1	l_2	l_3
Zginanie	0,181	1,207	-1,737	0,689	-0,156	0,207	0,292	0,349	3,283

Na podstawie teoretycznego współczynnika K_t próbek spawanych zaprojektowano nową geometrię płaskiej próbki zmęczeniowej z karbem dwustronnym ostrym, geometrycznym typu V. Próbki posiadające nową geometrię wycięte zostały z blachy walcowanej o grubości 8 mm, następnie za pomocą freza tarczowego nacięto karb dwustronny typu V o kącie rozwarcia wierzchołków karbu wynoszącym 60° i promieniu w dnie karbu $\rho = 0,31$ mm. Po czym powierzchnie boczne próbki poddano obróbce frezowania i szlifowania na grubość 4 mm. W rezultacie otrzymano próbkę gotową do badań zmęczeniowych, pokazaną na rys. 3. Badania wykonano przy zginaniu wahadłowym w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni bocznych przedstawionych na rys. 3.

Skład chemiczny oraz niektóre własności mechaniczne badanej stali przedstawiono w tabelach 2 i 3.



Rys. 3. Geometria próbki z naciętym obustronnym karbem geometrycznym typu V
Fig. 3. Geometry of the specimen with two-sided V-notch

Tabela 2

Właściwości mechaniczne stali S355N

$R_{0,2}$, MPa	R_m , MPa	E , GPa	ν
378	560	206	0,3

Tabela 3

Skład chemiczny stali S355N (reszta Fe)

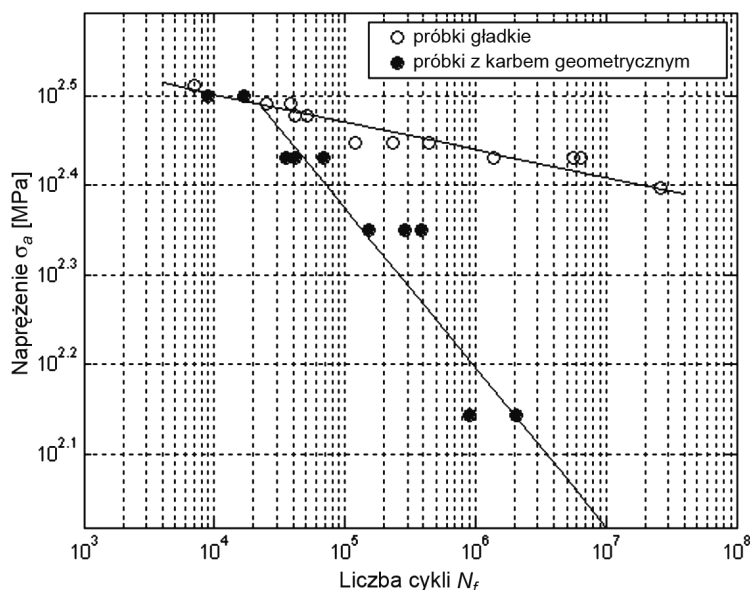
Pierwiastek	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Mo	Ni	Cr	Ti
Zawartość [%]	0,17	0,2	1,4	0,013	0,002	0,0045	0,03	0,015	0,005	0,025	0,036	0,012

4. Badania eksperymentalne i prezentacja wyników

Próbki z karbem geometrycznym poddano badaniom zmęczeniowym. Badania przeprowadzono w warunkach cyklicznego zginania wahadłowego wynoszącego $M_a = 10,178; 8,690; 7,204; 4,484$ N·m, co odpowiada naprężeniom nominalnym $\sigma_a = 316,07; 269,86; 223,81; 139,5$ MPa przy zadanym współczynniku asymetrii cyklu $R = -1$. W dalszym kroku na podstawie wyników badań doświadczalnych wykreślono charakterystykę zmęczeniową w funkcji liczby cykli. Dodatkowo wykreślono charakterystykę zmęczeniową dla próbek gładkich przebadanych w Darmstadt przez Fraunhofer-Institute wykonanych z tego samego materiału (stal S355N). Wyniki porównania trwałości zmęczeniowej próbek gładkich z próbkami z karbem geometrycznym zaprezentowano na rys. 4. Na podstawie analizy tego rysunku można stwierdzić, że linia aproksymująca wykreślona dla próbek gładkich posiada inne nachylenie niż linia aproksymująca wyniki badań próbek z naciętym podwójnym karbem geometrycznym. Wykresy te spotykają się dla liczby cykli równej $2 \cdot 10^4$ cykli. Linie aproksymujące zostały wykreślone według normy [5]. W normie tej zawarto zalecenia odnośnie wykreślania funkcji regresji na podstawie wyników badań zmęczeniowych dla wykresów Wöhlera. Wykresy wykreślono w układzie podwójnie logarytmicznym naprężenie w funkcji liczby cykli S-N w postaci [5]:

$$\log N_f = A - m \cdot \log \sigma_a \quad (4)$$

Współczynniki wykresu regresji dla próbek z karbem geometrycznym 2V wynoszą $A = 42,18$, $m = 5,61$ zaś dla próbek gładkich $A = 195,07$ i $m = 32,26$, gdzie m jest współczynnikiem pochylenia krzywej regresji.



Rys. 4. Porównanie charakterystyk zmęczeniowych próbek gładkich z próbkami z karbem geometrycznym typu 2V wykonanych ze stali S355N

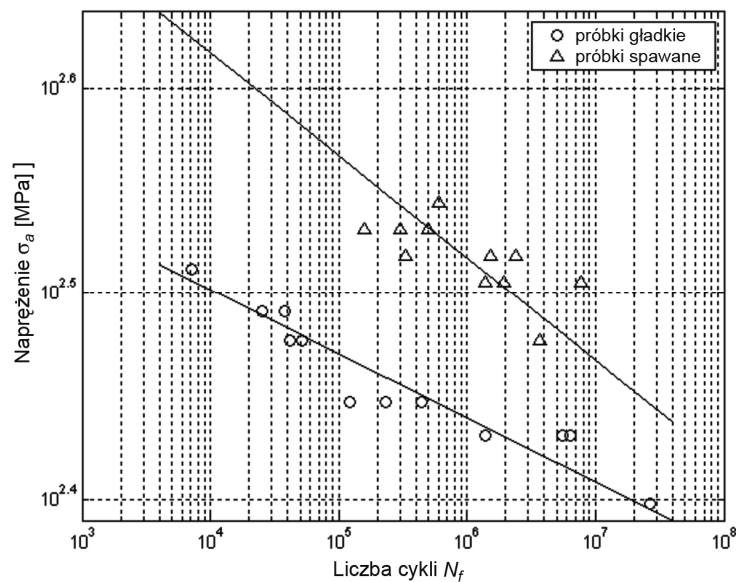
Fig. 4. Comparison of fatigue curves of smooth specimens and 2V-notched specimens made of S355N steel

Następnie wykreślono charakterystyki zmęczeniowe, przedstawiające wyniki badań próbek gładkich z próbkami spawanymi, które przedstawiono na rys. 5. Charakterystyki te wykreślono na podstawie badań eksperymentalnych próbek spawanych. Próbki spawane wykonano z blachy o grubości 30 mm, którą to blachę poddano operacji spawania, a następnie wycinano z niej próbki. W rezultacie otrzymano próbki do badań zmęczeniowych ze złączem spawanym, czołowym typu X. Badania zmęczeniowe przeprowadzono w warunkach stałompiltudowego obciążenia zginającego przy zadanej amplitudzie naprężenia nominalnego $\sigma_a = 350; 340; 330; 320; 300$ MPa i współczynnika asymetrii cyklu wynoszącym $R = -1$.

Wykresy regresji aproksymujące wyniki badań zmęczeniowych próbek spawanych i próbek gładkich pokazano na rys. 5. Współczynniki krzywej regresji dla próbek gładkich nie zmieniają się, zaś dla próbek spawanych wynoszą $A = 65,38$ i $m = -8,90$.

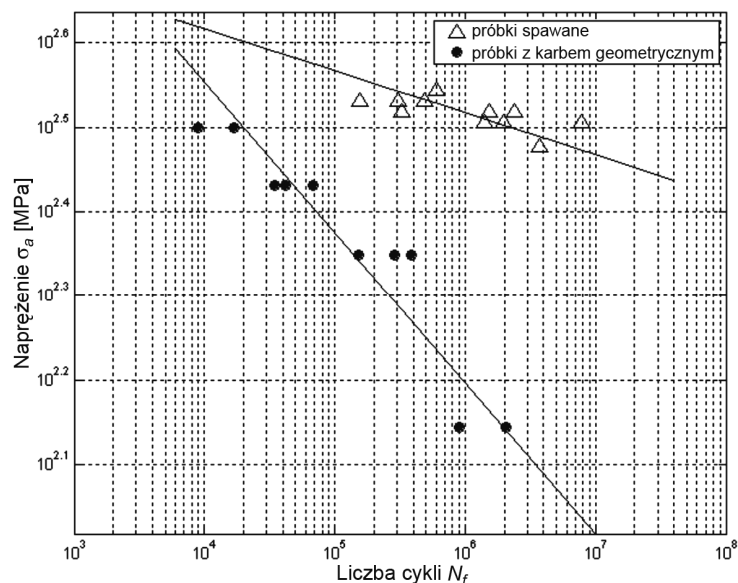
Wykresy Wöhlera na rys. 4, 5 i 6 przedstawiają wyniki badań zmęczeniowych próbek przy stałej amplitudzie naprężenia σ_a w funkcji liczby cykli N_f .

W kolejnym kroku, korzystając z definicji zmęczeniowego współczynnika działania karbu K_f , zaprezentowano, jak zmieniają się przebiegi funkcji K_f dla różnych wartości liczby cykli, opisanego równaniem (1). Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki funkcji K_f dla elementów z ostrym karbem geometrycznym 2V, jak i elementów posiadających spoinę czołową typu X.



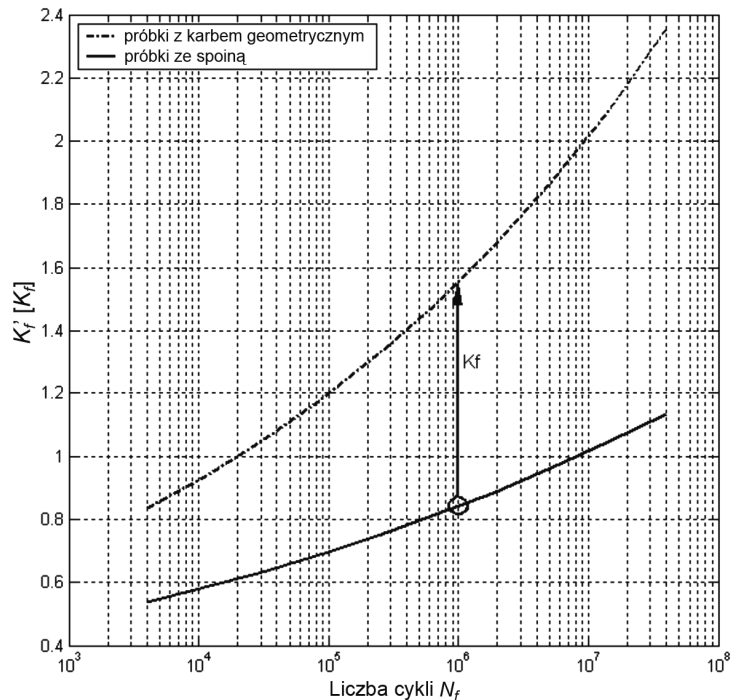
Rys. 5. Porównanie charakterystyk zmęczeniowych próbek gładkich z próbkami spawanymi ze spoiną czołową typu X wykonanych ze stali S355N

Fig. 5. Comparison of fatigue curves for smooth specimens with welded specimens with double-V butt welds made of S355N steel



Rys. 6. Porównanie charakterystyk zmęczeniowych próbek spawanych ze spoiną czołową typu X z próbkami z karbem geometrycznym typu 2V wykonanych ze stali S355N

Fig. 6. Comparison of fatigue curves for welded specimens with double-V butt weld and specimens with geometrical 2V-notches made of S355N steel



Rys. 7. Przebiegi funkcji K_f' dla elementów z karbem geometrycznym i elementów ze spoiną czołową

Fig. 7. Histories of the function K_f' for elements with geometrical notches and elements with butt welds

Charakterystyki funkcji K_f' zaprezentowane na rys. 7, posiadają również zaznaczony współczynnik zmęczenia K_f . Charakterystyka funkcji K_f' dla próbek z karbem geometrycznym 2V wykreślona została linią przerywaną, zaś funkcji K_f' dla próbek spawanych linią ciągłą. Jak widać z rys. 7, obie funkcje K_f' rosną w całej swej dziedzinie (liczbie cykli). Na prezentowanym rys. 7 można również zauważyć, że funkcja K_f' dla próbek z karbem geometrycznym 2V posiada wyższe wartości niż funkcja K_f' dla próbek spawanych. Wartości współczynnika K_f są również wyższe dla próbek z karbem geometrycznym 2V.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych próbek z karbem geometrycznym i strukturalnym oraz otrzymanych wyników przy obciążeniach (naprężeniach) zmęczeniowych stwierdzono, że:

1. Próbkę z karbem strukturalnym (spawane) miały wyższą trwałość zmęczeniową niż próbkę z karbem geometrycznym na tym samym poziomie obciążenia.
2. Dla takich samych teoretycznych współczynników działania karbu K_f , zauważono, że zmęczeniowe współczynniki działania karbu K_f posiadają różne wartości tych współ-

czynników dla karbu geometrycznego i strukturalnego. Zmęczeniowy współczynnik działania karbu silnie zależy od trwałości zmęczeniowej.

Literatura

- [1] Łagoda T., *Trwałość zmęczeniowa wybranych złączy spawanych*, Studia i Monografie, z. 173, Politechnika Opolska, Opole 2005.
- [2] Sonsino C.M., *High-Strength Steels in Welded State for Light-Weight Constructions under High and Variable Stress Peaks*, Fraunhofer-Institute for Structural Durability LBF, Darmstadt 1999.
- [3] Łagoda T., *Lifetime estimation of welded joint*, Springer Verlag, 2008.
- [4] Biłous P., Łagoda T., *Przegląd spawalnictwa*, Nr 12/2008, s. 9-12.
- [5] ASTM E 739-91 (1998), *Standard Practice for Statistical Analysis of Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ - N) Fatigue Data*, [in:] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, Philadelphia 1999, 614-620.
- [6] Hobbacher A., *Recommendations for fatigue design of welded joint and components*, IIW document XIII-2151-07/XV-1254-07, May 2007.
- [7] BS 7608:1993, *Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures*, BSI, London.
- [8] *Fatigue Design Recommendations for Steel Structures by Japanese Society of Steel Construction (JSSC)*, 1995.
- [9] AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*, Second Edition 1998.
- [10] Anthes R.J., Kottgen V.B., Seeger T., *Kerbformzahlen von Stumpfstossen und Doppel-T-Stossen Mitteilung aus dem Fachgebiet Werkstoffmechanik der Techn, Hochschule Darmstadt Schewissen und Schneiden 45*, 1993, Heft 12, s. 685-688.