



Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa połączeń spawanych ze stali X5CrNi18-8

CZESŁAW GOSS, BARBARA NASIŁOWSKA, LUCJAN ŚNIEŻEK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Budowy Maszyn,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, cgoss@wat.edu.pl, lsniezek@wat.edu.pl,
nasiłowska.barbara@gmail.com

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i teoretycznych niskocyklowej trwałości zmęczeniowej elementów spawanych wykonanych ze stali austenitycznej X5CrNi18-8. Badano próbki płaskie spawane metodą TIG i wiązką lasera. Uzyskane podczas doświadczeń wyniki trwałości zmęczeniowej porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonych w oparciu o model wykorzystujący kryterium maksymalnego odkształcenia w strefie karbu spawalniczego. Przedstawiony w pracy zakres badań stanowi uzupełnienie szerszego obszaru badań zmierzających do oceny możliwości zastosowania techniki laserowej do spawania odcinków rur przemysłowych instalacji chemicznych.

Słowa kluczowe: budowa i eksploatacja maszyn, połączenia spawane, stale austenityczne, trwałość zmęczeniowa

1. Wprowadzenie

Konstruowanie przemysłowych instalacji chemicznych wymaga stosowania materiałów konstrukcyjnych spełniających odpowiednie normy. W praktyce najczęściej do tego celu wykorzystywane są stale austenityczne typu 18/8 (stosunek procentowej zawartości chromu do niklu), do których zaliczana jest stal X5CrNi18-8. W procesie wytwarzania instalacji odpowiednio ukształtowane odcinki rur, związane wzdłuż kierunku walcowania blach, łączy się za pomocą spoin wzdłużnych i obwodowych, wykorzystując metodę TIG oraz stosując gaz ochronny w postaci argonu. Po jednostronnym ułożeniu spoin czołowych dokonuje się wycięcia grani, a następnie podpawania. Połączenia spawane wykonane za pomocą nietopliwych elektrod wolframowych mogą cechować się znaczącą wadliwością złącza [1-3]. Z tego

względu odpowiedzialne konstrukcje spawane wykonane ze stali austenitycznych przed dopuszczeniem do eksploatacji są wnikliwie badane. Niewłaściwie dobrane parametry spawania oraz czynniki zewnętrzne, takie jak wilgotność atmosfery, zanieczyszczenia materiału w postaci tłuszczu, kurzu itp. mogą wpłynąć na wykluczenie badanego odcinka rury z procesu eksploatacji. Awaryjność eksploatowanych w zakładach chemicznych rurociągów uzasadnia poszukiwanie innych, bardziej przewidywalnych metod spawania ukształtowanych odcinków rur ze stali austenitycznych. Jedną z takich metod jest spawanie za pomocą wiązki laserowej [4].

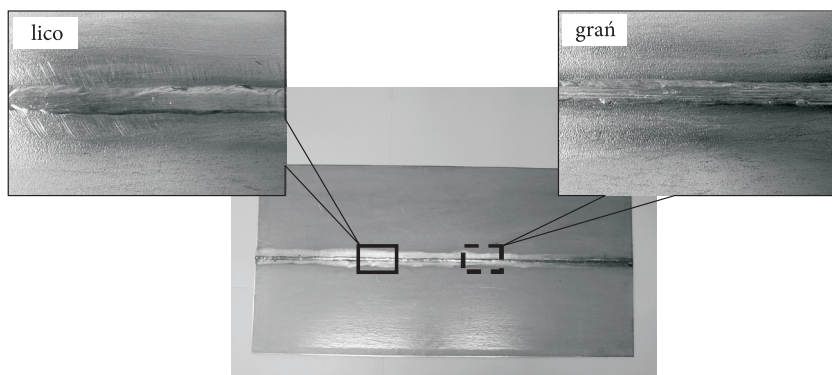
Spawanie laserowe jest nowoczesną technologią zapewniającą dużą precyzję, wydajność oraz dobrą jakość spoiny o wąskiej strefie wpływu ciepła (SWC). Technologia ta polega na łączeniu elementów za pomocą skoncentrowanej, monochromatycznej wiązki światła spójnego o znacznej gęstości mocy. Zastosowanie wiązki laserowej do spawania materiałów jest coraz częściej wykorzystywane tam, gdzie wymagane są wyroby spełniające wysokie wymagania jakości [5].

Spawanie laserowe jest rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do spawania innymi metodami. Zastosowanie lasera zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania wysokiej jakości spoiny bez wad i wykazującej ograniczoną plastyczność. Poza tym spawanie może się odbywać bez konieczności stosowania materiałów wypełniających oraz w dowolnej atmosferze: w powietrzu, w osłonie gazu obojętnego lub chemicznie aktywnego, ale także w próżni, dzięki czemu wykonane spoiny wolne są od śladów utlenienia. Spoiny te są wąskie i głębokie, przez co można wykonywać precyzyjne spawanie z dużą prędkością, uzyskując szybki start i zatrzymanie tego procesu.

Celem prezentowanej pracy jest doświadczalne wyznaczenie niskocyklowej trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych elementów ze stali X5CrNi18-8 i analityczny opis tej trwałości za pomocą modelu obliczeniowego wykorzystującego kryterium maksymalnego odkształcenia w strefie karbu spawalniczego.

2. Przedmiot badań

W pracy badaniom niskocyklowej trwałości zmęczeniowej poddano elementy modelowe ze spoinami wykonanymi metodami: TIG i laserową. Badania doświadczalne przeprowadzono na elementach wyciętych z arkuszy blach o grubości 5 mm, wykonanych ze stali X5CrNi18-8 (C — 0,04%, Si — 0,80%, Mo — 0,40%, Ti — 0,40%, Cr — 17,88%, Mn — 1,80%, Ni — 8,89%), dla której: $R_e = 284$ MPa, $R_m = 600$ MPa, $E = 193900$ MPa, $A = 63,6\%$, $Z = 45,3\%$, spawanych w Zakładach Budowy Aparatury Chemicznej w Tarnowie (rys. 1), w których wytwarzane są przemysłowe instalacje rurociągowe między innymi dla Zakładów Azotowych w Tarnowie [6-7]. Podczas spawania metodą TIG zastosowano drut spawalniczy TIG 19/9Nc o średnicy 2,5 mm.



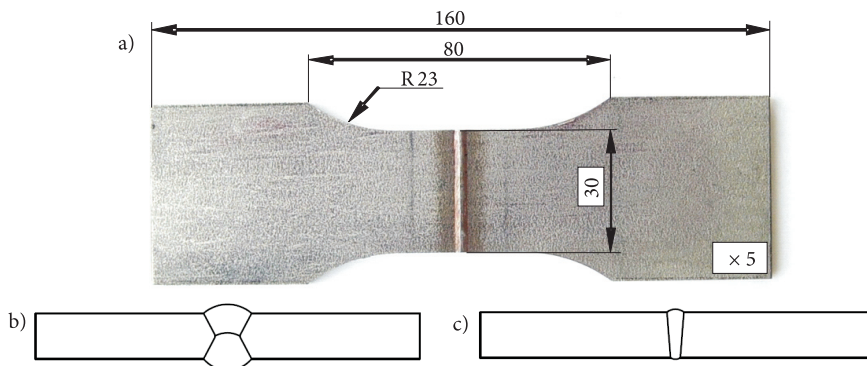
Rys. 1. Arkusz blachy ze stali X5CrNi18-8 z dwustronną spoiną czołową

Część badań doświadczalnych przeprowadzono na próbkach wyciętych z arkuszy blachy ze spoiną czołową wykonaną za pomocą lasera CO₂, stosując wiązkę o mocy $P = 3,8-4,0$ kW, prędkość spawania $v = 1,3-1,5$ m/min i średnicę plamki wiązki 2 mm. Na podstawie analizy literaturowej położenie ogniska wiązki zlokalizowano na powierzchni łączonych elementów [8-9]. Proces spawania został zrealizowany za pomocą lasera CO₂ TRUMPF LASERCELL 1005 znajdującego się w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. W celu poprawy jakości złącza użyto gazu ochronnego — helu. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań zmęczeniowych tych elementów należy traktować jako wstępne, uzupełniające wyniki badań struktury, mikrotwardości i naprężeń własnych, służące doborowi optymalnych parametrów laserowego spawania. Szerzej tematyka laserowego spawania stali X5CrNi18-8 będzie opisana w artykule, który w najbliższym czasie zostanie złożony przez autorów niniejszej publikacji do druku w „Biuletynie Wojskowej Akademii Technicznej”.

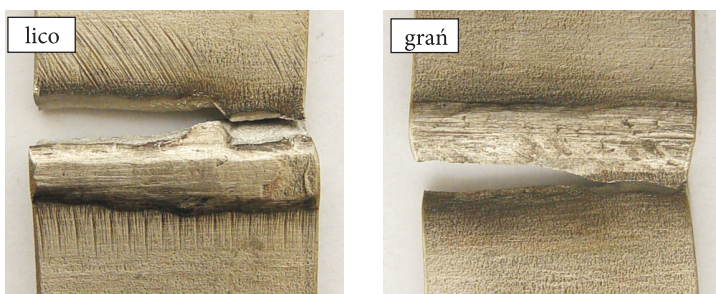
3. Wyniki badań doświadczalnych

Badania niskocyklowej trwałości zmęczeniowej próbek o wymiarach przedstawionych na rysunku 2a, spawanych metodą TIG (rys. 2b) i wiązką lasera (rys. 2c), zostały wykonane w warunkach osiowego rozciągania na pulsatorze hydraulicznym INSTRON 8802. Badania przeprowadzono dla amplitud naprężenia nominalnego w przekroju poprzecznym próbek $\sigma_{an} = 150, 175$ i 200 MPa przy cyklach jednostronnych dodatnich o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,01$.

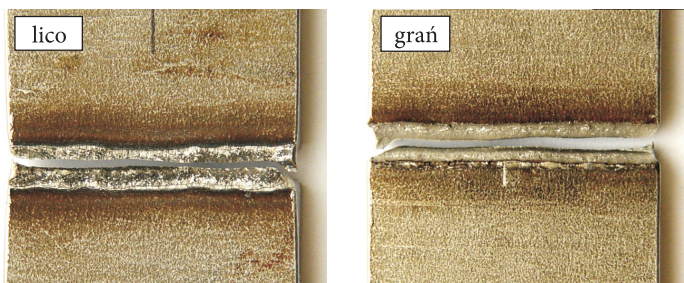
Na rysunkach 3 i 4 zamieszczono fotografie złomów próbek po badaniach trwałości zmęczeniowej przy $\sigma_{an} = 175$ MPa. W próbkach spawanych metodą TIG inicjacja pęknięcia występowała najczęściej w strefie wpływu ciepła, natomiast w próbkach spawanych wiązką lasera CO₂ — na krawędzi próbki lub w obrębie wtrąceń w postaci azotków tytanu.



Rys. 2. Wymiary próbek do badań trwałości zmęczeniowej (a) oraz zarys spoiny wykonanej metodą TIG (b) i wiązką lasera (c)



Rys. 3. Złom próbki spawanej metodą TIG badanej przy $\sigma_{an} = 175$ MPa



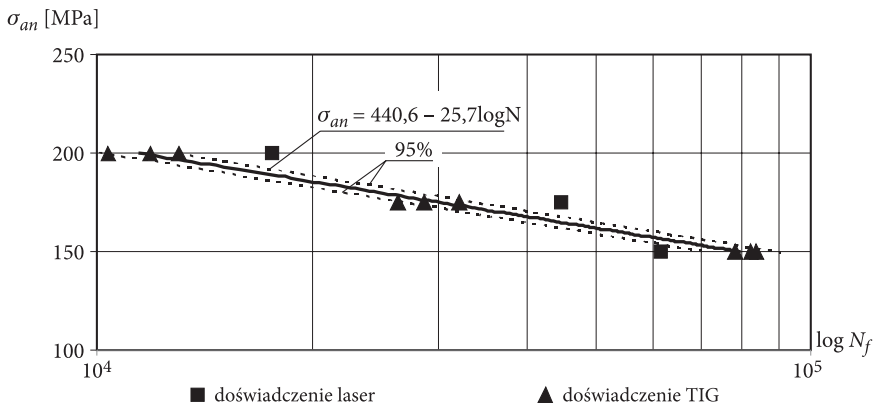
Rys. 4. Złom próbki spawanej wiązką lasera o mocy $P = 3,8$ kW z prędkością $v = 1,5$ m/min badanej przy $\sigma_{an} = 175$ MPa

Wyniki badań niskocyklowej trwałości zmęczeniowej przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1
Wyniki badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej

	σ_{an} [MPa]	N_f (liczba cykli)
Próbki spawane metodą TIG	150	82 239
		78 354
		83 765
	175	28 689
		32 123
		26 375
	200	11 842
		12 987
		10 376
Próbki spawane laserem	150	61 543
	175	44 701
	200	17 609

Rezultaty pomiarów opracowano statystycznie zgodnie z zaleceniami normy [10]. Opracowane wyniki badań trwałości zmęczeniowej posłużyły do zbudowania wykresu zmęczeniowego w układzie współrzędnych $\sigma_{an} = f(\log N_f)$, gdzie: σ_{an} — amplituda naprężenia nominalnego, N_f — liczba cykli do zniszczenia próbki (rys. 5).



Rys. 5. Wyniki badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej elementów spawanych metodą TIG i wiązką lasera

4. Wyniki analizy teoretycznej

Wytrzymałość zmęczeniowa konstrukcji jest ograniczona wytrzymałością najbardziej narażonego na uszkodzenie elementu. Na trwałość zmęczeniową konstrukcji negatywny wpływ wywiera obecność wszelkich rys powierzchniowych, wtrąceń niemetalicznych, karbów konstrukcyjnych oraz niekorzystny rozkład naprężeń własnych [11].

Projektowanie konstrukcji spawanych poddanych zmiennym obciążeniom w zakresie niskocyklowym sprowadza się przede wszystkim do określenia wyężenia materiału w strefie karbu spawalniczego. Stan odkształcenia i naprężenia w dnie karbu spawalniczego, miejscu inicjacji pęknięcia zmęczeniowego, określa się, uwzględniając fakt, że może tu wystąpić uplastycznienie materiału nawet wówczas, gdy naprężenia nominalne (poza karbem) są mniejsze od granicy plastyczności stali [12].

Warunkiem określenia współczynnika koncentracji odkształcenia w karbie jest znajomość współczynnika kształtu α_k , który w niniejszej pracy został obliczony metodami: Jewdokimowa [13], Lawrence'a [14] oraz Ushirokawy i Nakayamy [15].

Metoda Jewdokimowa dotyczy podstawowych rodzajów złączy spawanych. Stanowi ona uogólnienie badań przeprowadzonych metodą elastoplastyczną w zakresie sprężysto-plastycznym na złączach spawanych pokrytych warstwą optycznie aktywną. W metodzie tej uwzględniono również imperfekcję złącza w postaci obrotu, uskoku i podtopienia.

Podstawowa zależność metody, opisująca współczynnik kształtu dla spoiny czołowej, przybiera postać:

$$\alpha_k = \alpha_{kc} \cdot \alpha_p, \quad (1)$$

gdzie: α_k — całkowity współczynnik kształtu;
 α_{kc} — współczynnik kształtu przy rozciąganiu i zginaniu spoiny czołowej o obrysie lica zbliżonym do okręgu, o szerokości równej grubości łączonych elementów;
 α_p — współczynnik poprawkowy uwzględniający rzeczywistą szerokość spoiny.

Pomiary geometrii złączy spawanych pozwoliły wyłonić wartości charakterystycznych wymiarów spoiny, niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń współczynników kształtu spoin wykonanych za pomocą metody TIG i wiązki lasera.

Drugą z wymienionych metod jest metoda Lawrence'a. Polega ona na obliczeniu wielkości zależnych od rodzaju złącza spawanego, sposobu obciążenia i geometrii spoiny według zależności (2)

$$\alpha_k = B \cdot \left[1 + A \cdot \left(\frac{t}{\rho} \right)^C \right], \quad (2)$$

gdzie: θ i ρ to odpowiednio kąt wzniosu lica i promień przejścia spoiny, natomiast współczynniki A, B i C dla połączenia doczołowego przyjmują wartości: $A = 0,27(\text{tg}\theta)^{0,25}$; $B = 1$; $C = 0,5$.

Metoda Ushirokawy-Nakajamy dotyczy obciążonych i nieobciążonych złączy spawanych czołowych, krzyżowych i teowych. Obciążenia mogą mieć charakter rozciągający lub zginający. Podstawowa zależność wykorzystywana w tej metodzie, służąca do obliczenia współczynnika kształtu α_k , jest ujęta wzorem:

$$\alpha_k = \{1 + f(\theta)[g(\rho) - 1]\} \cdot C \left(\frac{a}{t} \right), \quad (3)$$

gdzie: $f(\theta)$ — funkcja korekcyjna ujmująca wpływ kąta wzniosu θ ;

$g(\rho)$ — funkcja ujmująca wpływ promienia przejścia ρ ;

$C \left(\frac{a}{t} \right)$ — funkcja korekcyjna ujmująca wpływ braku przetopu w grani spoiny.

W tabeli 2 zostały przedstawione wyniki obliczeń współczynnika kształtu α_k spoin badanych połączeń.

TABELA 2

Wartości obliczonych współczynników kształtu α_k dla badanych próbek

Metoda spawania	α_k		
	wg Jewdokimowa	wg Lawrence'a	wg Ushirokawy i Nakayamy
TIG	1,40	1,37	1,34
Laser	1,24	1,31	1,29

Do analizy teoretycznej trwałości wykorzystano kryterium odkształceniowe, które zakłada, że zakres odkształcenia w dnie karbu spawalniczego $\Delta\varepsilon_k$ nie przekroczy pewnej obliczeniowej wartości tych odkształceń $\Delta\varepsilon_o$.

$$\Delta\varepsilon_k \leq \Delta\varepsilon_o. \quad (4)$$

Obliczeniowy zakres odkształcenia sprężysto-plastycznego dla założonej liczby zmian obciążenia można wyliczyć ze wzoru:

$$\Delta\varepsilon_0 = \frac{1}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}} \left[\frac{2}{2(N_f)^m + \frac{1+R}{2(1-R)}} \cdot \ln \left(\frac{100}{100-Z} \right) + \frac{1,1R_m}{E} \right], \quad (5)$$

gdzie: γ_{Ff} , γ_{Mf} — częściowe współczynniki bezpieczeństwa. Pierwszy z nich γ_{Ff} uwzględnia stopień dokładności wzorów określających wartości odkształceń oraz niepewność modelu teoretycznego w zakresie obliczeniowej trwałości konstrukcji aż do inicjacji pęknięcia. Drugi γ_{Mf} uwzględnia kontrolę i dostępność głównych węzłów konstrukcji oraz sposób konserwacji;
 N_f — liczba cykli zmian obciążenia odpowiadająca początkowej fazie pęknięcia zmęczeniowego;
 R — współczynnik asymetrii cyklu;
 R_m — granica wytrzymałości stali;
 m — wykładnik materiałowy (dla stali X5CrNi18-8 $m = 0,6$).

Z zależności (5) można określić liczbę cykli N_f :

$$N_f = \left(\frac{\ln \frac{100}{100-Z}}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Nf} \cdot \Delta\varepsilon_0 - \frac{1,1R_m}{E}} - \frac{1+R}{4(1-R)} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (6)$$

Przeprowadzone badania właściwości wytrzymałościowych stali X5CrNi18-8 i analiza geometrii otrzymanych złączy pozwalają na uproszczenie zapisu powyższej zależności. Przyjmując: $\Delta\varepsilon_k = \Delta\varepsilon_0$, $\gamma_{Ff} = 1,5$ i $\gamma_{Nf} = 1,35$ [12], można zapisać zależność (6) w końcowej postaci:

$$N_f = \left[\frac{0,6035}{2,025 \cdot \Delta\varepsilon_k - 3,15 \cdot 10^{-3}} - \frac{1+R}{4(1-R)} \right]^{1,66}, \quad (7)$$

gdzie: $\Delta\varepsilon_k = \frac{\alpha_k^{2/(1+n')}}{E} \cdot \left[\frac{\Delta\sigma_n}{(1-R) \cdot R_e} \right]^{(1-n')/(1+n')} \cdot \Delta\sigma_n$ — zakres odkształcenia

w strefie karbu spawalniczego;

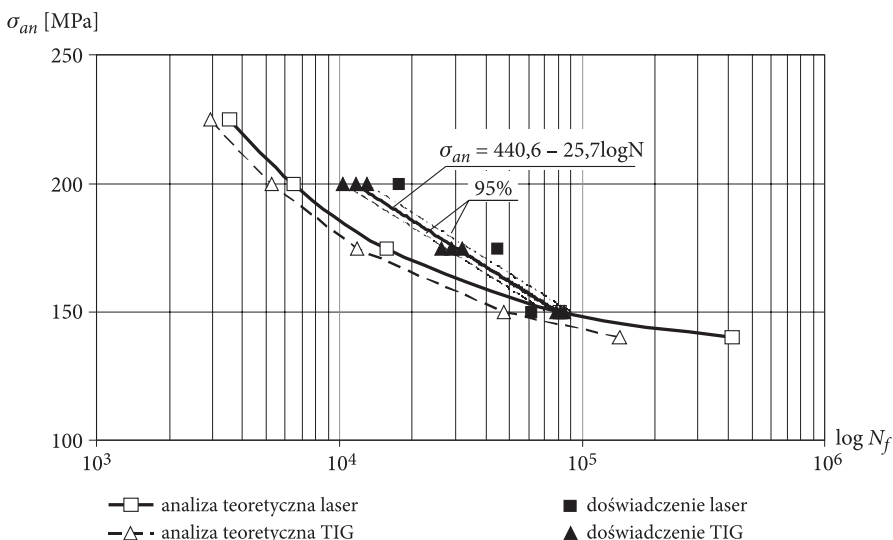
α_k — współczynnik kształtu karbu spawalniczego;

R_e — granica plastyczności;

n' — wykładnik cyklicznego umocnienia ($n' = 0,2723$ [16]);

$\Delta\sigma_N$ — zakres naprężeń nominalnych poza karbem.

Porównanie wyników badań doświadczalnych i analizy teoretycznej trwałości zmęczeniowej badanych elementów modelowych ze spoinami wykonanymi metodą TIG i za pomocą wiązki laserowej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Porównanie wyników trwałości zmęczeniowej uzyskanych z obliczeń i doświadczeń

Zależności zmian odkształcenia plastycznego i sprężystego od liczby cykli do zniszczenia, w układzie logarytmicznym, jako zbliżone do prostych, zostały opracowane za pomocą korelacji liniowej. W tym celu użyto wzoru Morrowa:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_s}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{pl}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (8)$$

gdzie: $\Delta\varepsilon$, $\Delta\varepsilon_{pb}$, $\Delta\varepsilon_s$ są zakresami zmian odkształceń całkowitych ($\Delta\varepsilon = 2\varepsilon_c$), plastycznych ($\Delta\varepsilon_{pl} = 2\varepsilon_{pl}$) i sprężystych ($\Delta\varepsilon_s = 2\varepsilon_s$), c jest wykładnikiem, ε'_f — współczynnikiem cyklicznego odkształcenia plastycznego, b — wykładnikiem wytrzymałości zmęczeniowej.

Korzystając ze wzoru Mansona-Coffina (9), obliczono odkształcenie plastyczne.

$$N_f^k \Delta\varepsilon_{pl} = C_1, \quad (9)$$

gdzie: k i C_1 są stałymi materiałowymi.

Wartość k przyjmuje się wstępnie równą 0,5, a C_1 można w przybliżeniu określić ze statycznej próby rozciągania:

$$C_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{F_0}{F_u},$$

gdzie: F_0 oznacza pole przekroju początkowego próbki, a F_u oznacza pole przekroju próbki po zerwaniu.

Zakres odkształceń całkowitych $\Delta\varepsilon_{ac}$ określono ze zmodyfikowanego wzoru Langer'a, który ujmuje wielkości uzyskane z próby statycznego rozciągania [17]:

$$\Delta\varepsilon_{ac} = \frac{2}{2(N_f)^c + \frac{1+R}{(1-R)}} \cdot \ln\left(\frac{100}{100-Z}\right) + \frac{1,1R_m}{E}. \quad (10)$$

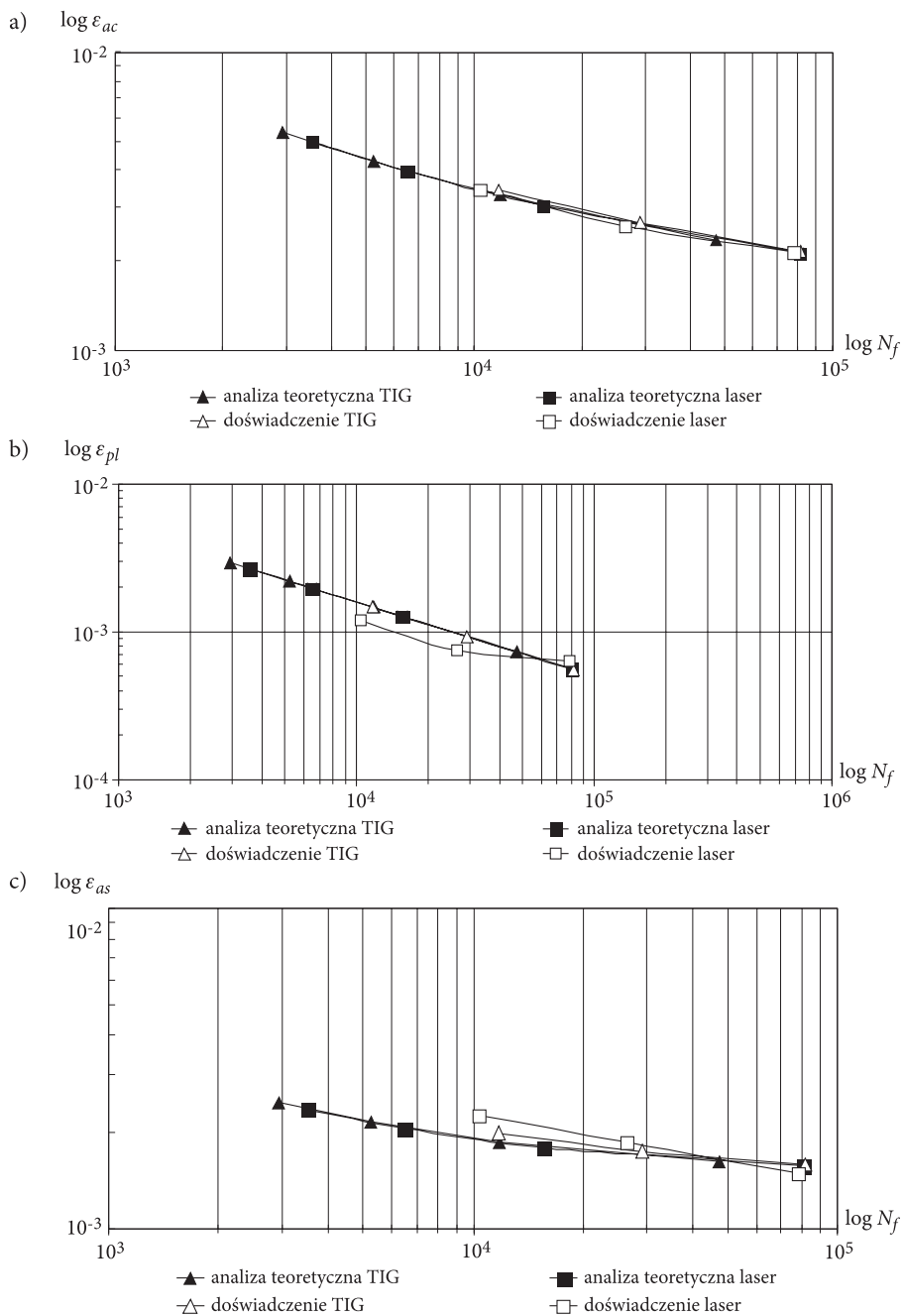
Na podstawie zależności (1)-(5) określono wartości odkształceń plastycznych, sprężystych i całkowitych dla próbek spawanych metodą TIG i wiązką lasera. Wyniki analizy trwałości zmęczeniowej przeprowadzonej na podstawie eksperymentu i obliczeń przedstawiono w postaci wykresów odkształceń całkowitych $\Delta\varepsilon_{ac}$ (rys. 7a), odkształceń sprężystych $\Delta\varepsilon_s$ (rys. 7b) i odkształceń plastycznych $\Delta\varepsilon_{pl}$ (rys. 7c) w dnie karbu spawalniczego w funkcji liczby cykli do zniszczenia próbek spawanych metodą TIG i wiązką lasera.

Przebiegi wykresów świadczą o zadowalającej zgodności wyników obliczeń i badań doświadczalnych.

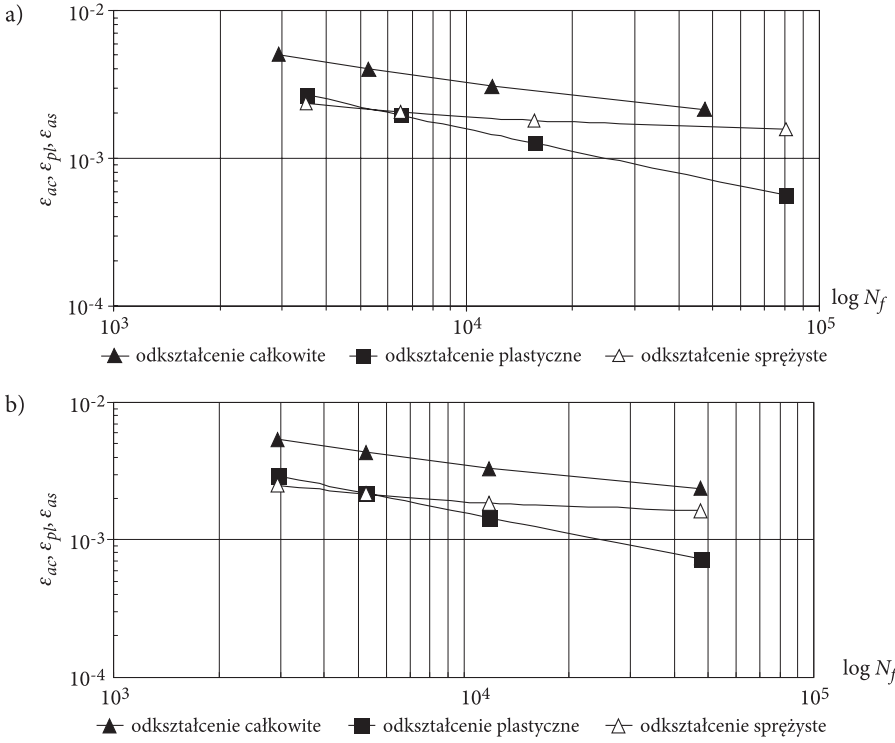
Porównanie wykresów odkształcenia całkowitego $\Delta\varepsilon_{ac}$, sprężystego $\Delta\varepsilon_s$ i plastycznego $\Delta\varepsilon_{pl}$ otrzymanych z obliczeń przeprowadzonych dla próbek spawanych wiązką lasera i metodą TIG przedstawiono na rysunkach 8a i b.

Przedstawione na wykresach 9a i b przebiegi zmian odkształcenia całkowitego $\Delta\varepsilon_{ac}$, sprężystego $\Delta\varepsilon_s$ i plastycznego $\Delta\varepsilon_{pl}$ w funkcji liczby cykli uzyskane na podstawie wyników badań doświadczalnych próbek spawanych wiązką lasera i metodą TIG również wykazują zauważalne podobieństwo.

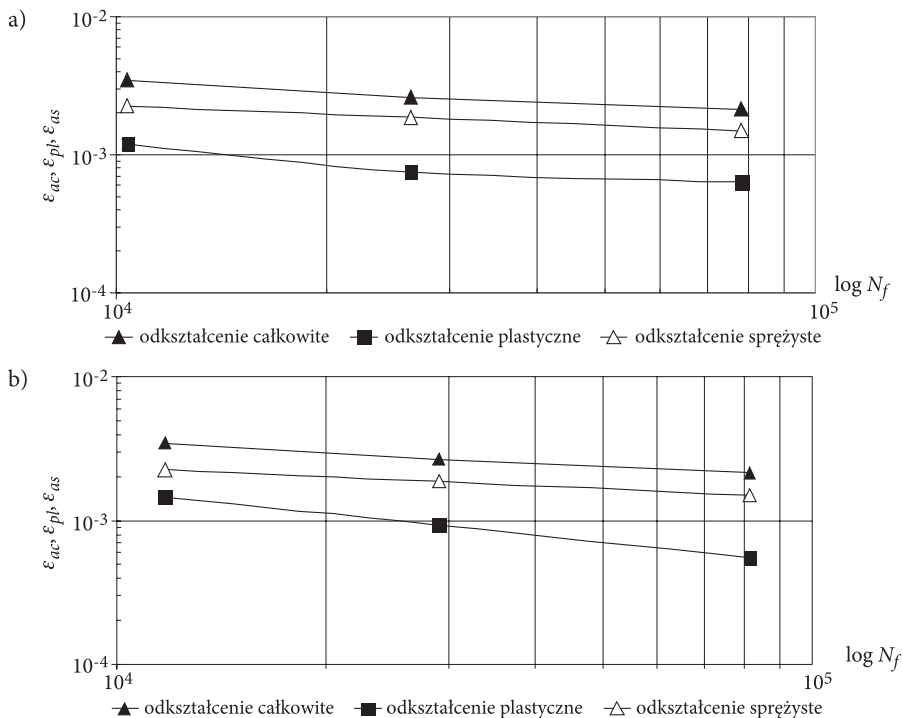
Uzyskane przebiegi zmian odkształceń z obliczeń i eksperymentu wykazują dużą zgodność, zarówno przy spawaniu metodą TIG, jak i wiązką lasera. Charakter zmian odkształceń całkowitych, plastycznych i sprężystych dla obu metod spawania jest podobny.



Rys. 7. Wykresy odkształceń całkowitych (a), plastycznych (b) i sprężystych (c) uzyskanych doświadczalnie i z obliczeń dla próbek spawanych metodą TIG i wiązką lasera



Rys. 8. Przebiegi odkształceń całkowitych, sprężystych i plastycznych w funkcji liczby cykli uzyskane z obliczeń dla próbek spawanych wiązką lasera (a) i metodą TIG (b)



Rys. 9. Przebiegi odkształceń całkowitych, sprężystych i plastycznych w funkcji liczby cykli uzyskane z badań dla próbek spawanych wiązką lasera (a) i metodą TIG (b)

5. Podsumowanie

Przedstawiona w pracy metoda obliczeniowa może być wykorzystana do obliczeń trwałości zmęczeniowej przy projektowaniu elementów maszyn. Uzyskane wyniki nie odbiegają w znacznej mierze od badań doświadczalnych.

Wyniki obliczeń wskazują na wzrost trwałości zmęczeniowej w zakresie niskocyklowym próbek spawanych laserowo w stosunku do próbek spawanych metodą TIG. Przykładowo przy amplitudzie $\sigma_{an} = 150$ MPa uzyskano wzrost o 41,25% przy $\sigma_{an} = 175$ MPa o 24,24% i przy $\sigma_{an} = 200$ MPa o 18,93%.

Najbardziej wygodna w obliczeniach współczynnika kształtu α_k jest metoda Jewdokimowa, natomiast największą zgodność wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych uzyskano, wykorzystując metodę Ushirokawy i Nakayamy.

Wyniki wstępnych badań doświadczalnych wskazują na większą trwałość zmęczeniową w zakresie niskocyklowym próbek spawanych laserowo w porównaniu z trwałością próbek spawanych metodą TIG. Z uwagi na ograniczoną ilość przebadanych elementów zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych badań, obejmujących większą populację próbek.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.02.2012 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2012 r.

LITERATURA

- [1] B. NASIŁOWSKA, L. ŚNIEŻEK, *Badania trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych stali austenitycznej X5CrNi18-8*, Podstawy Konstrukcji Maszyn — kierunki badań i rozwoju, t. 2/3, Politechnika Gdańska, 2011, 197-206.
- [2] K. FERENC, *Spawalnictwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
- [3] E. TASAK, A. ZIEWIEC, *Spawalność materiałów konstrukcyjnych*, t. 1: *Spawalność stali*, Wydawnictwo JAK, Kraków, 2009.
- [4] Z. SZYMAŃSKI, J. HOFFMAN, *Fizyka spawania laserowego*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, 2004.
- [5] J. KUSIŃSKI, *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków, 2000.
- [6] L. ŚNIEŻEK, S. STĘPIEŃ, *Trwałość zmęczeniowa rurociągu chemicznego z propagującym pęknięciem półeliptycznym*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2007.
- [7] L. ŚNIEŻEK, Cz. GOSS, A. MAZUR, *Experimental and Theoretical Investigations of Fatigue Life of Chemical Pipelines*, Archives of Civil Engineering, 52, 1, 2007, 75-84.
- [8] JUN YAN, MING GAO, XIAOYAN ZENG, *Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding*, Optics and Laser in Engineering, 48, 4, April 2010, 512-517.
- [9] G. SIKORSKI, S. NOWAK, K. ŻABA, *Laserowe spawanie rur — problemy technologiczne i sterowanie*, Rudy i Metale Nieżelazne, 11, 2006.
- [10] ASTM E739-91, *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (s-N) Fatigue Data*.
- [11] J. OKRAJNI, K. MUTWIL, M. CIEŚLA, *Chemical pipelines material fatigue*, Journal of Materials Processing Technology, 164-165, 2005, 897-904.
- [12] Cz. GOSS, S. KŁYSZ, W. WOJNOWSKI, *Problemy niskocyklowej trwałości zmęczeniowej wybranych stali i połączeń spawanych*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2004.
- [13] N.A. MACHUTOW, *Deformacionnye kriterii rozrušeníâ i rasčët èlementov konstrukcij napročnost*, Mašinostroenie, Moskwa, 1981.
- [14] N.A. MACHUTOW i in., *Upravneniâ sostoâniâ pri malocyklovom nagruženii*, Wydawnictwo Nauka, Moskwa, 1981.
- [15] N.A. MACHUTOW i in., *Upravneniâ sostoâniâ pri malocyklovom nagruženii*, Wydawnictwo Nauka, Moskwa, 1983.
- [16] L. ŚNIEŻEK, *Analiza trwałości zmęczeniowej rurociągu przemysłowego*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2010.
- [17] M. ŁUBIŃSKI, W. WOJNOWSKI, Cz. GOSS, *Load capacity of steel structures taking into account low cycle fatigue*, Archives of Civil Engineering, 48, 2, 2002, 184-204.

CZ. GOSS, B. NASIŁOWSKA, L. ŚNIEŻEK

Low-cycle fatigue life of welded joints made of X5CrNi18-8 steel

Abstract. The study presents the results of experimental and theoretical research on the low-cycle fatigue life of welded components made of X5CrNi18-8 austenitic steel. Flat specimens that had been welded with the use of the TIG method and a laser beam were the subject to tests. Fatigue life results obtained in the tests were compared with the results of calculations conducted on the basis of a model that made use of the criterion of maximum strain in the weld notch zone. The scope of research presented in the study constitutes a completion of a broader area of research that aims at assessing the possibility of applying the laser technology for welding pipe sections of industrial chemical systems.

Keywords: structure and operation of machines, welded joints, austenitic steels, fatigue life

