



Badanie wzrostu pęknięć zmęczeniowych w spawanych próbkach poddanych zginaniu

JANUSZ LEWANDOWSKI, DARIUSZ ROZUMEK, MARIA HEPNER

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn,
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, janusz210@wp.pl, d.rozumek@po.opole.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wzrostu pęknięć zmęczeniowych próbek poddanych cyklicznemu zginaniu przy stałej amplitudzie momentu, wykonanych ze stali S355 z pachwinowymi spoinami. Badane próbki posiadały koncentratory naprężenia w postaci zewnętrznych, dwustronnych łagodnych karbów. Badania przeprowadzono przy stałej wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$ bez obróbki cieplnej i po takiej obróbce. W artykule zaprezentowano również wyniki badań mikrostruktury złączy spawanych z uwzględnieniem zmian zachodzących w materiale po obróbce cieplnej oraz wpływ tych zmian na trwałości zmęczeniowe próbek.

Słowa kluczowe: złącza spawane, długości pęknięć zmęczeniowych, liczba cykli, zginanie, mikrostruktura

DOI: 10.5604/01.3001.0011.8061

1. Wprowadzenie

Połączenia spawane, jako metoda łączenia nierozłącznego konstrukcji technicznych, są powszechnie stosowane w wielu obszarach działalności człowieka. Mimo że tematyka ta od wielu lat poruszana była w publikacjach na całym świecie, z powodu wciąż rosnących wymagań dotyczących poprawy bezpieczeństwa konstrukcji spawanych i aby zwiększyć trwałość zmęczeniową, nadal cieszy się popularnością. Obecnie naukowcy skupiają się na badaniach wpływu różnych czynników na trwałość połączeń spawanych, tj.: rodzaju obciążenia, rodzaju obróbki cieplnej, wpływu warunków środowiskowych, wpływu geometrii lica oraz grani spoin, itp. Jak duże znaczenie w przemyśle odgrywają połączenia spawane, obrazuje liczba opracowanych norm i przepisów regulujących pracę technologów, inżynierów oraz spawaczy.

Autorzy niniejszej pracy zajmują się problematyką trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych poddanych zginaniu oraz zginaniu ze skręcaniem z uwzględnieniem karbów geometrycznych oraz strukturalnych [1, 2]. Zainteresowanie połączeniami spawanymi, a zwłaszcza teowymi połączeniami spawanymi ze spoinami pachwinowymi, ma swoje źródło w prowadzonych pracach badawczych oraz remontowych wirników wentylatorów promieniowych o średnicy wirnika dochodzącej do 5,6 m i masie do 20 ton, eksploatowanych w zakładach górniczych. W wirnikach wentylatorów, w obszarach połączeń łopat z tarczą podstawową (spoiny pachwinowe), często występują pęknięcia dochodzące nawet do 150 mm długości, które wpływają na osłabienie konstrukcji, co może w konsekwencji doprowadzić do niebezpiecznych awarii. W połączeniach spawanych, o których mowa, występują proste i złożone stany obciążenia, tj.: rozciąganie, zginanie, zginanie ze skręcaniem. Rozwiązania konstrukcyjne, dane techniczne oraz parametry pracy wentylatorów, a także sposoby wykonania obliczeń wytrzymałościowych całego wirnika, w tym interesujących autorów artykułu spoin pachwinowych, opisuje literatura [3, 4, 5]. Podstawowa i niezbędna wiedza pomocna w obliczeniach z zakresu wytrzymałości zmęczeniowej połączeń spawanych zawarta została w publikacji International Institute of Welding (IIW) pod redakcją A. Hobbachera [6], gdzie znając parametry geometryczne, rodzaj i wielkość obciążenia, można oszacować odporność elementu (próbki) na pęknięcie. Nie bez znaczenia w badaniach doświadczalnych trwałości oraz wzrostu pęknięć zmęczeniowych w próbkach spawanych jest jakość ich wykonania. Dlatego po wykonaniu próbek (elementów) przeprowadza się badania nieniszczące, aby wyeliminować elementy wadliwe. Szczególnie ważne jest, aby badane próbki były wolne od wad takich jak: pęknięcia, podtopienia, brak przetopu, pęcherze, pory, przyklejenia czy wtrącenia (np. wolframu przy spawaniu TIG). Wahab i Alam w pracy [7] opisują wymienione wady spawalnicze oraz ich wpływ na trwałość zmęczeniową. W pracy [8] autorzy zaproponowali metodę liniowo sprężystej mechaniki pęknięcia (LEFM), która okazała się skuteczną metodą oceny wytrzymałości zmęczeniowej spoin, w tym spoin pachwinowych, a dokładność obliczeń uzależniona jest od dokładności wyznaczonej wartości współczynnika intensywności naprężenia K . Współczynniki intensywności naprężenia można wyznaczyć z użyciem metody elementów skończonych (MES) lub za pomocą wytycznych zawartych w IIW. W pracy [9] autorzy zaprezentowali i porównali dla próbek spawanych ze spoinami pachwinowymi wyniki obliczeń współczynników intensywności naprężenia uzyskane z MES oraz za pomocą wzorów analitycznych. Udowodnili, że w zakresie długości pęknięć do 2 mm wyniki są powtarzalne, natomiast w większym zakresie długości pęknięć występują różnice wyników, a ich błąd nie przekracza 13%.

W pracy przedstawiono wyniki badań inicjacji oraz wzrostu pęknięć zmęczeniowych próbek ze stali S355 z pachwinowymi spoinami poddanych zginaniu. Badania przeprowadzono przy stałej wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$ [10] bez obróbki cieplnej i po niej.

2. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali S355. Podstawowe właściwości chemiczne i wytrzymałościowe użytego materiału próbek przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Podstawowe właściwości chemiczne i wytrzymałościowe stali S355

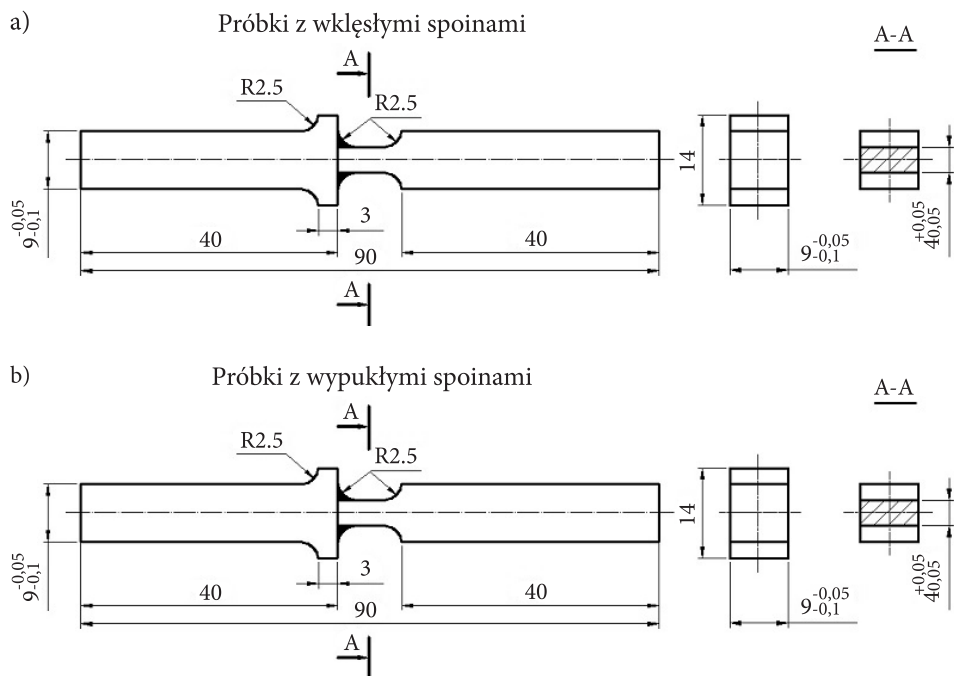
Skład chemiczny stali w [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
0,2	1,49	0,33	0,023	0,024	0,01	0,01	0,035	reszta
Własności wytrzymałościowe								
R_e MPa	R_m MPa	A_{10} %	Z %	E GPa	ν			
357	535	21	50	210	0,30			

Próbki do badań wykonane zostały z pręta ciągnionego o średnicy \varnothing 30 mm. Następnie, w wyniku przeprowadzonej obróbki mechanicznej oraz procesu spawania metodą TIG w osłonie argonu, otrzymano ostateczny kształt próbek z teowymi złączami spawanymi. Złącza spawane, z pachwinowymi spoinami, wykonane zostały w dwóch wariantach lica spoin, tzn. spoiny wklęsłe oraz wypukłe. Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach spawanych bez obróbki cieplnej (surowych — po spawaniu) oraz na próbkach po dwóch różnych obróbkach cieplnych. Pierwsza obróbka cieplna wykonana została poprzez poddanie próbek wyżarzaniu odprężającemu w temperaturze 630°C przez 2 godziny. Druga obróbka cieplna polegała na wyżarzaniu normalizującym w temperaturze 940°C przez 1,1 godziny. Kształty i wymiary próbek spawanych (z wklęsłymi oraz wypukłymi spoinami) pokazano na rysunku 1.

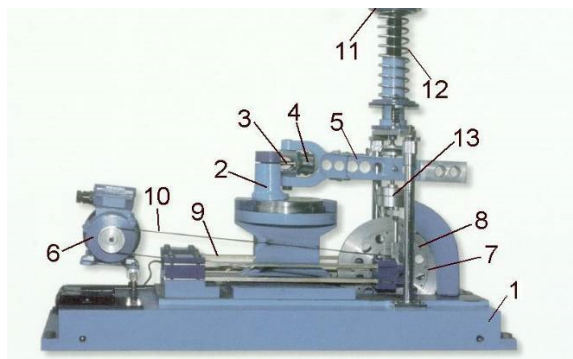
Przed przystąpieniem do badań doświadczalnych wszystkie próbki zostały poddane testom nieniszczącym metodą magnetyczno-proszkową (MT) w świetle UV oraz pomiarom twardości [11]. Czynności te pozwoliły wyeliminować próbki, na powierzchni których ujawniono wady (głównie pęknięcia) mogące wpłynąć na końcowy wynik badań doświadczalnych.

Do przeprowadzenia zmęczeniowych badań doświadczalnych zastosowano maszynę typu MZGS-100 [12] (rys. 2).

Maszyna ta pozwoliła na wykonanie badań ze stałą amplitudą momentu $M_a = 9,20 \text{ N}\times\text{m}$, przy współczynniku asymetrii cyklu $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$, z częstotliwością obciążenia 28,4 Hz. Sposób zamocowania oraz obciążania próbek pokazano na rysunku 3.

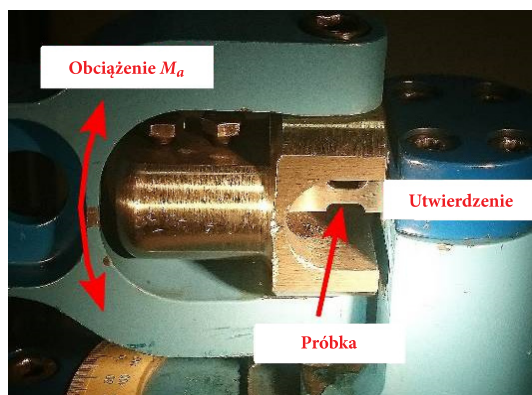


Rys. 1. Próbki z pachwinowymi spoinami: a) wklęsłymi; b) wypukłymi



Rys. 2 Maszyna zmęczeniowa MZGS-100 gdzie: 1) podstawa; 2) i 4) uchwyty; 3) próbka; 5) ruchoma dźwignia; 6) silnik; 7) tarcza wirująca; 8) ciężarki; 9) płaskie sprężyny; 10) pas napędowy; 11) siłownik sprężynowy; 12) sprężyna siłownika; 13) tłumik

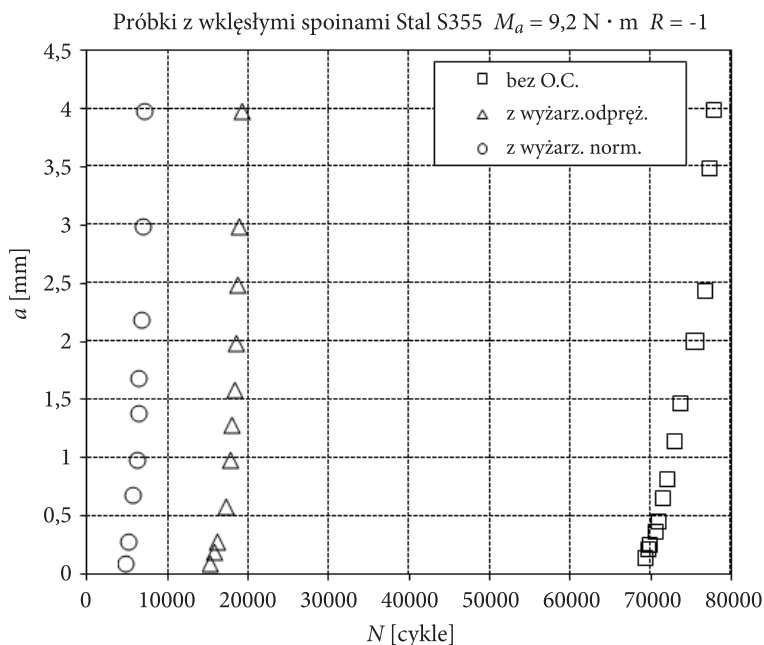
Przyrosty długości pęknięć obserwowano metodą optyczną na bocznych powierzchniach próbek. Mierzono je za pomocą mikrometru cyfrowego umieszczonego na stoliku mikroskopu przenośnego o powiększeniu $25 \times$ z dokładnością $0,01$ mm, notując jednocześnie liczbę cykli obciążenia N .



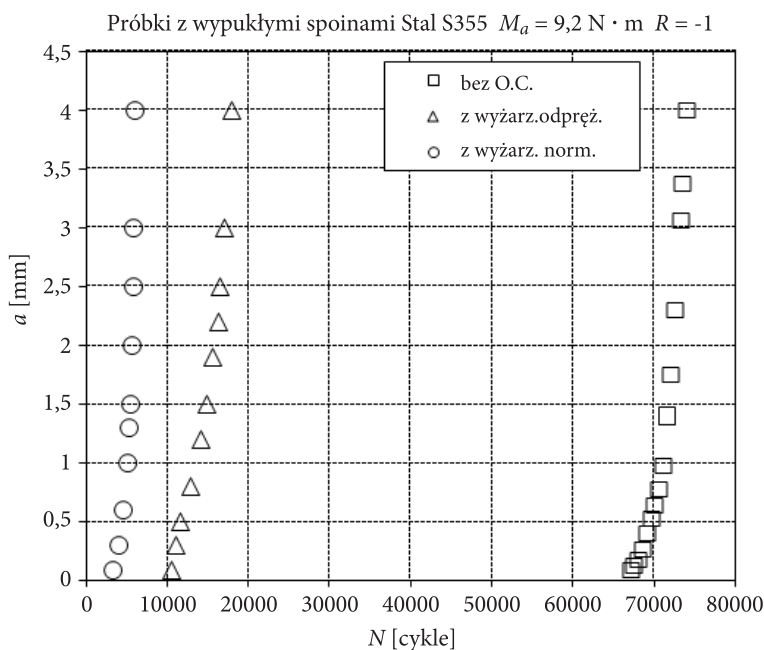
Rys. 3. Sposób zamocowania oraz obciążania badanych próbek

3. Wyniki badań i ich opis

Na rysunku 4 i 5 przedstawiono przyrosty długości pęknięć zmęczeniowych w funkcji liczby cykli dla badanych próbek, odpowiednio ze spoinami wklęsłymi i wypukłymi bez obróbki cieplnej oraz po wyżarzaniu odpężającym i normalizującym.



Rys. 4. Długości pęknięć zmęczeniowych w funkcji liczby cykli dla badanych próbek ze spoinami wklęsłymi poddanych zginaniu



Rys. 5. Długości pęknięć zmęczeniowych w funkcji liczby cykli dla badanych próbek ze spoinami wypukłymi poddanych zginaniu

Na podstawie rysunku 4 można zauważyć, że dla próbek ze spoinami wklęsłymi najmniejsze trwałości zmęczeniowe wykazały próbki po wyżarzeniu normalizującym. Inicjacja pęknięć (0,10 mm) następowała przy 4 700 cyklach. Dalszy rozwój pęknięcia następował dość szybko i przy liczbie 7 000 cykli próbki ulegały zniszczeniu. W próbkach poddanych wyżarzeniu odprężającemu inicjacja pęknięć zmęczeniowych następowała przy liczbie cykli 15 100, a zniszczenie próbek następowało przy liczbie cykli 19 000. Próbki bez obróbki cieplnej wykazywały największe trwałości zmęczeniowe, w których inicjacja pęknięć następowała przy liczbie cykli 69 000, a ich zniszczenie przy liczbie cykli 77 500.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych dla próbek ze spoinami wypukłymi, gdzie widać, że i w tym przypadku najmniejsze trwałości zmęczeniowe wykazały próbki po wyżarzeniu normalizującym. Inicjacja pęknięć (0,10 mm) następowała przy 3 200 cyklach. Dalsze przyrosty pęknięć następowały w szybkim tempie i przy liczbie 5 900 cykli próbki ulegały zniszczeniu. W próbkach poddanych wyżarzeniu odprężającemu inicjacja pęknięć zmęczeniowych następowała przy liczbie cykli 10 500, a zniszczenie próbek przy liczbie cykli 18 000. Próbki bez obróbki cieplnej, tak jak w przypadku próbek ze spoinami wklęsłymi, wykazywały największą trwałość zmęczeniową, gdzie inicjacja pęknięć następowała przy liczbie cykli 67 000, a ich zniszczenie przy liczbie cykli 74 000.

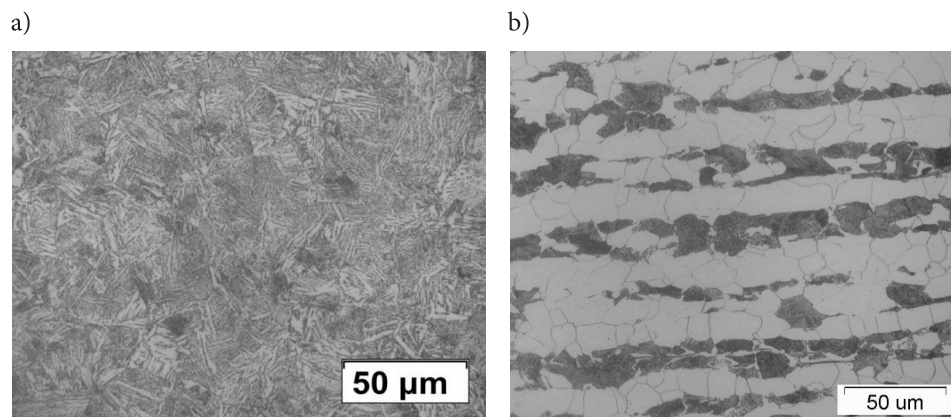
Różnice w trwałościach zmęczeniowych badanych próbek ze spoinami wklęsłymi oraz wypukłymi są znaczne. W przypadku próbek ze spoinami wklęsłymi spadek trwałości zmęczeniowej próbek wyżarzonych odprężająco wyniósł 75%, a próbek wyżarzonych normalizująco 90% w porównaniu do próbek bez obróbki cieplnej. Podobnie jak w przypadku próbek ze spoinami wklęsłymi, dla próbek ze spoinami wypukłymi zaobserwowano spadek trwałości zmęczeniowej próbek wyżarzonych odprężająco wynoszący 76%, a próbek wyżarzonych normalizująco 92% w porównaniu do próbek bez obróbki cieplnej. Porównując trwałości próbek z wklęsłymi i wypukłymi licami spoin, dla tych samych stanów próbek (bez obróbki cieplnej i po przeprowadzonej obróbce cieplnej) można zauważyć, że dla próbek ze spoinami wklęsłymi trwałości były zawsze wyższe w porównaniu do próbek ze spoinami wypukłymi. Spadek trwałości zmęczeniowych próbek z wypukłymi spoinami bez obróbki cieplnej oraz wyżarzonych odprężająco wynosił 6%, a dla próbek wyżarzonych normalizująco wynosił 15% w porównaniu do próbek ze spoinami wklęsłymi. Znaczące spadki trwałości zmęczeniowych w próbkach poddanych obróbce cieplnej zdaniem autorów były spowodowane zmianami strukturalnymi zachodzącymi w badanym materiale. Natomiast wyższe trwałości próbek z wklęsłymi spoinami w porównaniu do próbek z wypukłymi spoinami spowodowane są występowaniem ostrych korbów w próbkach z wypukłymi spoinami, które inicjowały pęknięcia. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie wyników badań doświadczalnych z uwzględnieniem kształtu spoin oraz obróbki cieplnej.

TABELA 2

Podsumowanie wyników badań zmęczeniowych

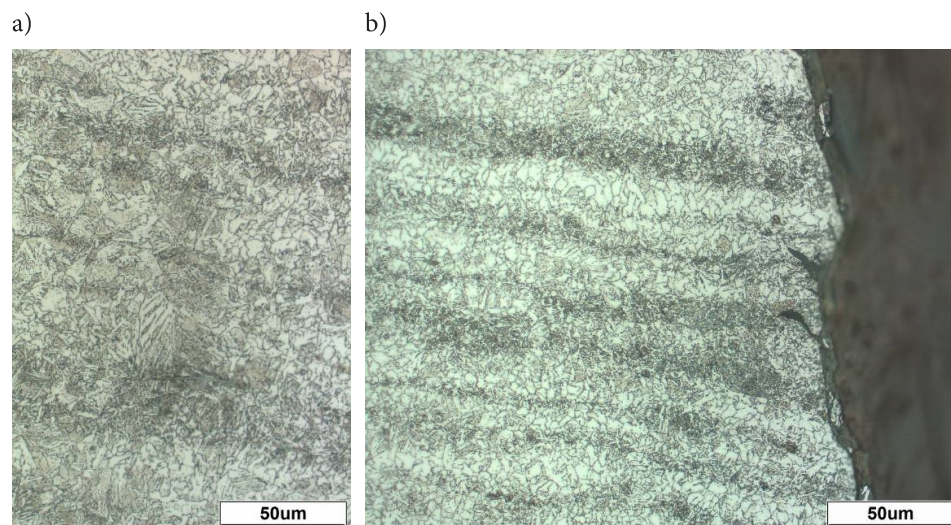
Rodzaj próbki		Liczba cykli obciążenia do inicjacji pęknięcia	Liczba cykli obciążenia do zniszczenia próbki
Próbki ze spoinami wklęsłymi	Bez obróbki cieplnej	69 000	77 500
	Po wyż. odprężającym	15 100	19 000
	Po wyż. normalizującym	4 700	7 000
Próbki ze spoinami wypukłymi	Bez obróbki cieplnej	67 000	74 000
	Po wyż. odprężającym	10 500	18 000
	Po wyż. normalizującym	3 200	5 900

Na rysunku 6 przedstawiono strukturę materiału próbki spawanej bez obróbki cieplnej (spoina i strefa wpływu ciepła — SWC). W SWC występuje gruboigłasta struktura martenzytu i bainitu górnego w układzie Widmanstättena (rys. 6a), zaobserwowano również strukturę bainitu dolnego, drobnoziarnistą strefę normalizowaną. Materiał rodzimy pokazany na rysunku 6b charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą ferrytyczno-perlityczną wykazującą drobne równoosiowe ziarna ferrytu oraz bardzo drobny perlit w układzie pasmowym.



Rys. 6. Struktura materiału próbki ze złączeniem spawanym bez obróbki cieplnej (powiększenie 500 ×):
 a) struktura martenzytu i bainitu górnego w układzie Widmanstatta; b) struktura materiału rodzimego

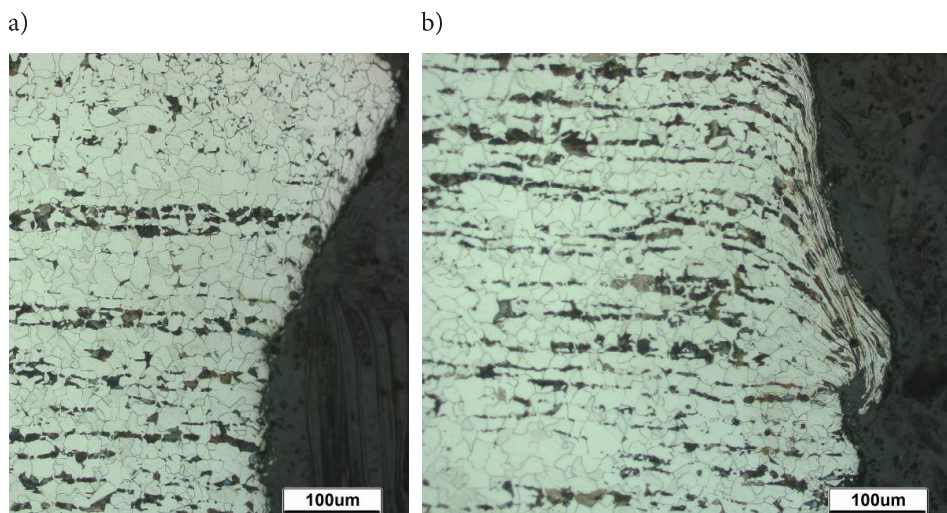
Na rysunku 7 przedstawiono strukturę materiału próbki spawanej poddanej wyżarzaniu odprężającemu. W strefie wpływu ciepła (SWC) występuje gruboziarnista struktura bainitu oraz sorbitu. Główne pęknięcie przebiega poza spoiną oraz pierwotną SWC w obszarze próbki o strukturze sorbitu, pasmowo wzbogaconego w cementyt (węgliki) o postaci drobnoziarnistej. Od pęknięcia głównego rozwiły się liczne pęknięcia boczne inicjowane w obszarach bogatych w wydzielenia



Rys. 7. Struktura materiału próbki spawanej po wyżarzaniu odprężającym (powiększenie 500 ×):
 a) gruboziarnista struktura bainitu oraz sorbitu; b) rozwój pęknięcia

węglików. Z uwagi na przebieg pęknięcia głównego oraz licznych pęknięć bocznych przebiegających w obszarach wzbogaconych o węgliki można stwierdzić, że w wyniku cyklicznych obciążeń w tych obszarach nastąpiły wykruszenia węglików, następnie przyspieszony rozwój pęknięć i w rezultacie spadek trwałości zmęczeniowych.

Strukturę materiału próbki spawanej poddanej wyżarzaniu normalizującemu pokazano na rysunku 8. Podczas wyżarzania w temperaturze 940°C w spoinie wytworzyła się struktura ferrytu z niewielką ilością perlitu.



Rys. 8. Struktura materiału próbki spawanej po wyżarzaniu normalizującym (powiększenie 200 ×):
a) struktura ferrytu z niewielką ilością perlitu; b) struktura z wyraźnym odkształceniem plastycznym

Pojawienie się w spoinie i SWC struktury ferrytu z niewielką ilością perlitu jest główną przyczyną obniżenia trwałości próbek. Propagacja pęknięcia głównego przebiegała poza spoiną w strukturze ferrytyczno-perlitycznej o wyraźnym pasmowym ułożeniu ziaren perlitu. Występują również nieliczne pęknięcia boczne propagujące po granicach ziaren. W obrębie złomu obserwuje się efekt silnych odkształceń plastycznych (rys. 8b).

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych rozwoju pęknięć zmęczeniowych poddanych cyklicznemu zginaniu sformułowano następujące wnioski:

1. Trwałość próbek spawanych bez obróbki cieplnej była wyższa od próbek, dla których zastosowano obróbki cieplne.

2. Najmniejszą trwałość zmęczeniową wykazywały próbki ze spoinami wypukłymi poddane wyżarzaniu normalizującemu, w których ostre karby i zmiana struktury spoiny powodują znaczne obniżenie tych trwałości.
3. Największą trwałość wykazały próbki ze spoinami wklęsłymi bez obróbki cieplnej.
4. Próbkę po wyżarzaniu odpężającym charakteryzują się większą kruchością (węgliki), natomiast po wyżarzaniu normalizującym większą podatnością na odkształcenia plastyczne.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Politechniki Opolskiej.

Artykuł opracowano na podstawie referatu wygłoszonego na XVI Krajowej Konferencji Mechaniki Pęknięcia w Pułtusku, 12-15.09.2017 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 26.06.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 20.11.2017 r.

LITERATURA

- [1] LEWANDOWSKI J., ROZUMEK D., *Cracks growth in S355 steel under cyclic bending with fillet welded joint*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 86, 2016, 342-350.
- [2] LEWANDOWSKI J., ROZUMEK D., *Influence of fillet welded joints subjected to cyclic bending on fatigue crack growth in S355 steel*, Solid State Phenomena, 258, 2016, 615-618.
- [3] BLEIER F., *Fan Handbook, Selection, Application and Design*, The McGraw-Hill Companies, 1998.
- [4] CORY W.T.W. (Bill), *Fans & Ventilation: A Practical Guide*, The McGraw-Hill Companies, Published by Elsevier in association with Roles & Associates, 2005.
- [5] LIPKA J., *Wytrzymałość maszyn wirnikowych*, WNT, Warszawa, 1967, s. 538.
- [6] HOBACHER A., *IIV Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, WRC Bulletin 520, Welding Research Council, New York, 2009, p. 144.
- [7] WAHAB M.A., ALAM M.S., *The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints*, J. Mater. Process. Technol., 153-154, 2004, 931-937.
- [8] XIAO ZHI-GANG, CHEN TAO, ZHAO XIAO-LING, *Fatigue strength evaluation of transverse fillet welded joints subjected to bending loads*, Int. J. Fatigue, 38, 2012, 57-64.
- [9] LEWANDOWSKI J., ROZUMEK D., *Numerical analysis of stress intensity factor in specimens with different fillet geometry subjected to bending*, 9th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures, June 4-8, 2017, Augustów, Poland.
- [10] KOCANIŁA S., *Zmęczeniowe pękanie metali*, WNT, Warszawa, 1985, s. 492.
- [11] PN-EN 1043-1:2000 *Spawalnictwo — Badania niszczące metalowych złączy spawanych — Próba twardości — Próba twardości złączy spawanych łukowo*.
- [12] ROZUMEK D., MACHA E., *Opis rozwoju pęknięć zmęczeniowych w materiałach sprężysto-plastycznych przy proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem*, Politechnika Opolska, Opole, 2006, s. 196.

J. LEWANDOWSKI, D. ROZUMEK, M. HEPNER

Test of fatigue crack growth in welded specimens subjected to bending

Abstract. The paper presents the test results on the fatigue crack growth under cyclic bending specimens at constant moment amplitude made of S355 steel with fillet welds. Plane specimens with stress

concentrators in form of the external two-sided blunt notches were tested. The tests were performed under constant value of the stress ratio $R = -1$ without and after heat treatment. The article also presents the test results of the microstructure of welded joints taking into account changes in the material after heat treatment and the impact of these changes on the fatigue life of specimens.

Keywords: welded joints, fatigue cracks length, number of cycle, bending, microstructure

DOI: 10.5604/01.3001.0011.8061

