

Rozwój pęknięć zmęczeniowych w cyklicznie zginanych próbkach z pachwinowym złączem spawanym

Development of fatigue cracks in specimens with fillet welded joint under cyclic bending

JANUSZ LEWANDOWSKI
DARIUSZ ROZUMEK*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.3.18

Przedstawiono wyniki badań wzrostu pęknięć zmęczeniowych próbek ze stali S355 z pachwinowym złączem spawanym, podanych cyklicznemu zginaniu momentem o stałej amplitudzie. Badania przeprowadzono przy stałej wartości współczynnika asymetrii cyklu $R = -1$ i częstotliwości obciążenia 28,4 Hz. Badane próbki miały koncentrador naprężeń w postaci zewnętrznego, dwustronnego wycięcia i pachwinowych złączy spawanych.

SŁOWA KLUCZOWE: prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych, zakres współczynnika intensywności naprężenia, liczba cykli, zginanie, pęknięcia, złącza spawane

The paper presents the results of tests on the fatigue crack growth for a constant moment amplitude under cyclic bending in the S355 steel grade. The tests were performed under constant stress ratio R at load frequency 28.4 Hz. Plane specimens with stress concentrators in form of the external two-sided blunt notches and fillet welded joint were tested.

KEYWORDS: fatigue crack growth rate, stress intensity factor range, number of cycles, bending, cracks, welded joints

Konstruktorzy i użytkownicy urządzeń przemysłowych koncentrują swą uwagę na problemach związanych z trwałością i niezawodnością. Obecnie czynnikami determinującymi wszelką działalność wytwórczą są bezpieczeństwo i ekonomia. Budowane obiekty techniczne są więc poddawane optymalizacji polegającej na maksymalnym obniżaniu kosztów wytwarzania i eksploatacji bez negatywnego wpływu na własności wytrzymałościowe.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji ważnym zagadnieniem jest m.in. inicjacja i propagacja pęknięć zmęczeniowych [1], często występujących w pachwinowych złączach spawanych wirników górniczych wentylatorów [2] typu WPK (w miejscach połączenia łopat wirnika z bębniem). Wpływ różnych spoin oraz występujących defektów na wzrost pęknięć zmęczeniowych analizowano w pracy [3]. Badania prowadzono przy cyklicznym rozciąganiu ze skręcaniem. Współczynniki intensywności naprężenia (WIN) dla różnych spoin obliczono metodą elementów skończonych. Stwierdzono, że wady obecne w spoinach istotnie zmniejszają ich trwałość zmęczeniową i zwiększają prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych.

W pracy [4] przeanalizowano trzy metody oceny wytrzymałości zmęczeniowej, korzystając z liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (LSMP). Badano pachwinowe złącza spawane poddane cyklicznemu zginaniu. Stwierdzono, że LSMP sprawdza się w ocenie wytrzymałości złączy spawanych, przy czym jej zastosowanie jest uzależnione od dokładności, z jaką określono WIN na czole pęknięcia.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie opisu rozwoju pęknięć zmęczeniowych w próbkach wykonanych ze stali S355 z pachwinowym złączem spawanym, podanych cyklicznemu zginaniu.

* Mgr inż. Janusz Lewandowski (janusz210@wp.pl), dr hab. inż. Dariusz Rozumek prof. PO (d.rozumek@po.opole.pl) – Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Opolskiej

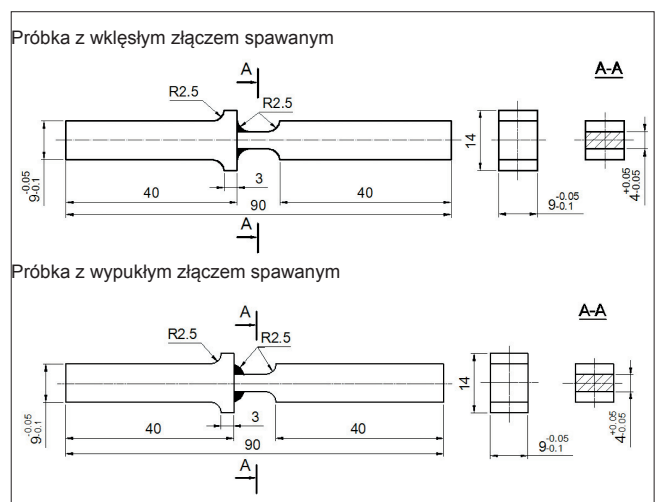
Badania zmęczeniowe

Do badań doświadczalnych zastosowano próbki ze stali S355 o właściwościach podanych w tabl. I. Kształt i wybrane wymiary badanych próbek pokazano na rys. 1.

Materiałem wyjściowym był pręt ciągniony o średnicy $\varnothing 30$ mm, z którego wykonano dwa rodzaje elementów składowych próbek, połączonych następnie dwustronnym, pachwinowym złączem spawanym (uzyskano odpowiednio spoinę wklęsłą i wypukłą). Złącza spawane wykonano ręcznie metodą TIG w osłonie gazów obojętnych (argonu).

TABLICA I. Skład chemiczny oraz wybrane właściwości wytrzymałościowe stali S355

Skład chemiczny, %	C	0,2
	Mn	1,49
	Si	0,33
	P	0,023
	S	0,024
	Cr	0,01
	Ni	0,01
	Cu	0,035
	Fe	reszta
Granica plastyczności R_e , MPa		357
Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa		535
Wydłużenie względne A_{10} , %		21
Przewężenie względne Z , %		50
Moduł Younga E , GPa		210
Współczynnik Poissona ν		0,30



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek z pachwinowym złączem spawanym

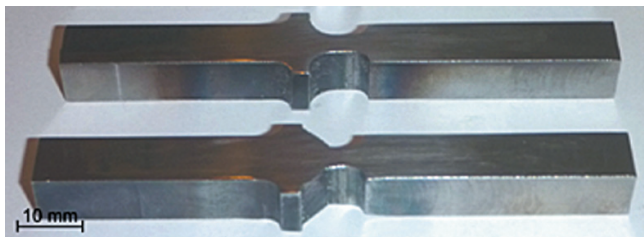
Dodatkowo w czasie spawania podawano drut spawalniczy o oznaczeniu W-42-2-W2Sił zgodnie z PN-EN 1668 [5]. Teoretyczny współczynnik kształtu karbu α_K wyznaczono dla próbki litej, zgodnie z równaniem podanym w pracy [6] – ten współczynnik dla obciążeń zginających wyniósł $\alpha_K = 1,38$. Gotowe próbki przedstawiono na rys. 2.

Przed przystąpieniem do badań zmęczeniowych dokonano wstępnej selekcji wykonanych próbek. Poddano je badaniom nieniszczącym metodą magnetyczno-proszkową (MT) w świetle UV – nie stwierdzono niedopuszczalnych nieciągłości na powierzchni próbek (rys. 3).

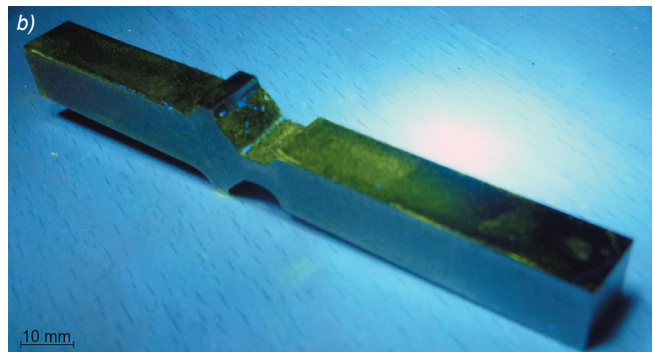
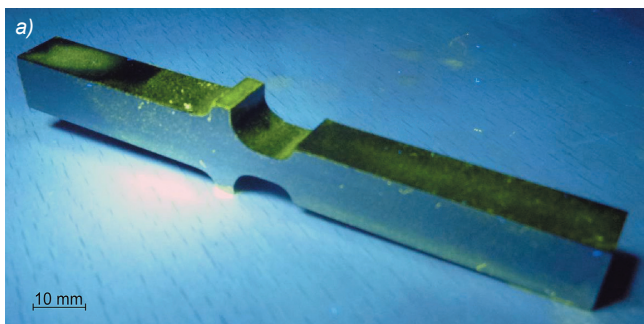
Następnie wybrane losowo próbki poddano badaniu twardości metodą Vickersa (diamentowym ostrosłupem) przy obciążeniu 49 N, zgodnie z normą PN-EN 1043-1 [7]. Kryterium akceptacji była różnica pomiędzy twardością złącza i materiału rodzimego, która nie może przekraczać 100 HV. Wyniki pomiaru twardości pokazano na rys. 4 i 5.

Badania doświadczalne, polegające na cyklicznym zginaniu próbek, przeprowadzono na maszynie zmęczeniowej MZGS-100 (rys. 6). Jednostronnie utwardzone próbki zginano momentem o stałej amplitudzie $M_a = 9,2$ Nm, co odpowiadało nominalnej amplitudzie naprężenia normalnego $\sigma_a = 383$ MPa przed pojawieniem się pęknięcia. Współczynnik asymetrii cyklu $R = -1$.

Rozwój pęknięć obserwowano metodą optyczną na powierzchni próbek. Przyrosty pęknięć zmęczeniowych mierząco za pomocą mikrometru cyfrowego umieszczonego w mikroskopie przenośnym o powiększeniu 25 \times , z dokładnością 0,01 mm. Jednocześnie notowano liczbę cykli obciążenia N . Badania na zginanie prowadzono z częstotliwością obciążenia 28,4 Hz. Moment zginający wywoływano siłą na ramieniu o długości 0,2 m.



Rys. 2. Próbkę do badań zmęczeniowych ze złączami spawanymi (od góry): z wklęsłym i wypukłym



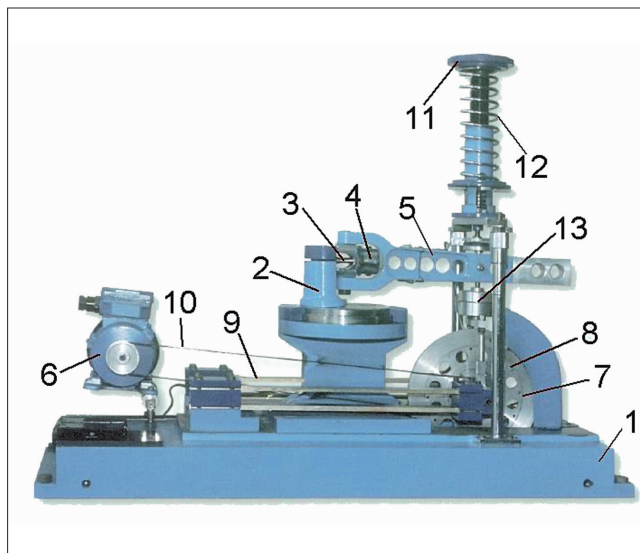
Rys. 3. Próbkę podczas badania MT w świetle UV: a) próbkę z wklęsłym złączem spawanym, b) próbkę z wypukłym złączem spawanym

Punkt	HV	Punkt	HV
1	200	9	213
2	207	10	235
3	201	11	274
4	197	12	254
5	189	13	282
6	226	14	246
7	228	15	265
8	209	16	280

Rys. 4. Wyniki pomiaru twardości próbek z wklęsłym złączem spawanym

Punkt	HV	Punkt	HV
1	186	9	207
2	194	10	197
3	240	11	252
4	197	12	228
5	198	13	219
6	204	14	266
7	194	15	196
8	217	16	207

Rys. 5. Wyniki pomiaru twardości próbek z wypukłym złączem spawanym

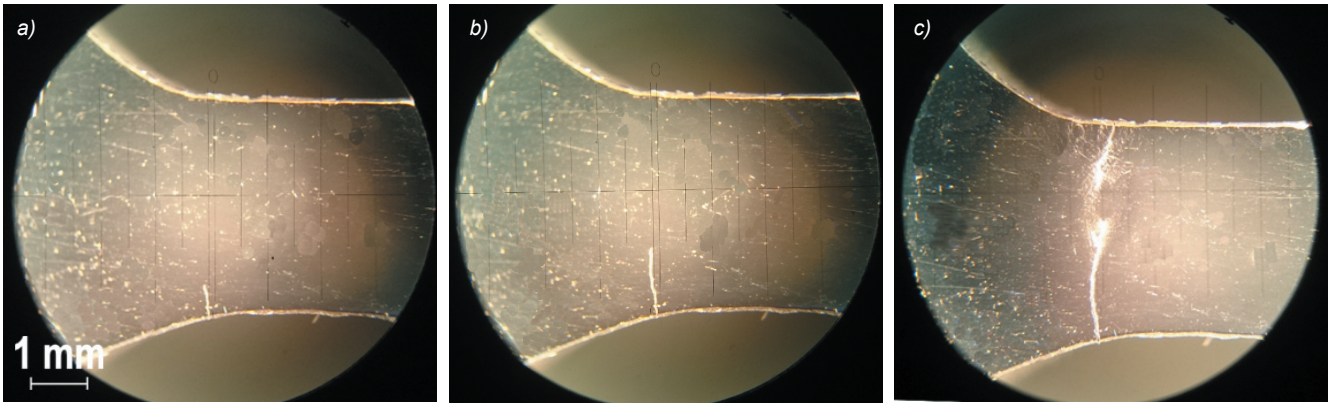


Rys. 6. Maszyna zmęczeniowa MZGS-100. Próbkę 3 jest mocowana w uchwytach 2 i 4. Obciążenie uzyskuje się wskutek ruchu dźwigni 5 w płaszczyźnie pionowej, wywołanego siłą bezwładności niewyrównoważonych ciężarków 8 na tarczy wirującej 7 osadzonej na płaskich sprężynach 9. Do podstawy 1 jest przymocowany siłownik sprężynowy 11, który umożliwia zadawanie średniej wartości obciążenia poprzez odpowiednie ugięcie sprężyny 12 siłownika. Pozostałe elementy widoczne na rysunku: silnik 6, pasek 10 i tłumik 13 [8, 9]

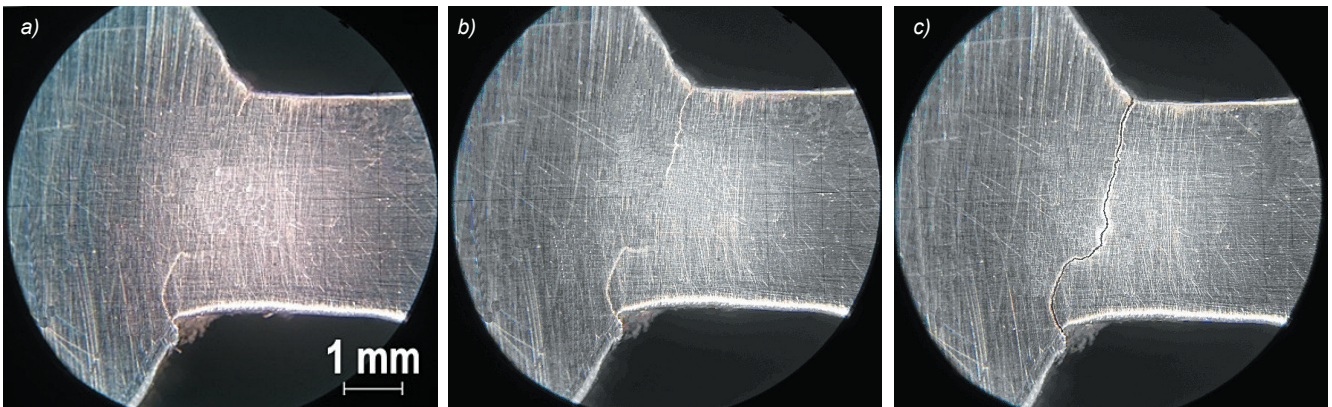
Wyniki badań

Na rys. 7 przedstawiono wybrane etapy rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki z wklęsłym złączem spawanym. Przy liczbie cykli 45 000 następowała inicjacja pęknięcia (rys. 7a) z jednej strony próbki. Dalej obserwowano rozwój tego pęknięcia oraz inicjację pęknięcia z drugiej strony próbki (rys. 7b) i wreszcie obustronny rozwój pęknięcia i zniszczenie próbki przy liczbie cykli 78 000 (rys. 7c).

Na rys. 8 przedstawiono z kolei wybrane etapy rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki z wypukłym złączem spawanym. W tym przypadku inicjacja jednostronnego pęknięcia następowała przy liczbie cykli 67 000 (rys. 8a). Prawie w tym samym czasie pojawiało się pęknięcie z drugiej strony próbki. Rozwój dwustronnych pęknięć pokazano na rys. 8b. Próbkę uległą zniszczeniu przy liczbie cykli 75 000 (rys. 8c).



Rys. 7. Wybrane etapy rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbek z wklęsłym złączem spawanym, poddanej cyklicznemu zginaniu: a) inicjacja pęknięcia, b) inicjacja i propagacja pęknięcia, c) obustronna propagacja pęknięcia



Rys. 8. Wybrane etapy rozwoju pęknięć zmęczeniowych próbki z wypukłym złączem spawanym, poddanej cyklicznemu zginaniu: a) inicjacja pęknięcia, b) obustronna propagacja pęknięcia, c) zniszczenie próbki

Krzywe rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w funkcji liczby cykli, otrzymane na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych, pokazano na rys. 9.

Można zauważyć, że największą trwałość zmęczeniową mają próbki z wklęsłym złączem spawanym. Inicjacja pęknięć (0,15 mm) następowała przy 44 500 cykli. Dalszy rozwój pęknięcia postępował z małą prędkością. Próbki ulegały zniszczeniu przy 77 500 cykli. Próbki ze złączem wypukłym wykazywały nieznacznie niższą trwałość zmęczeniową. W tym przypadku inicjacja pęknięcia (0,1 mm) występowała po 67 000 cykli, a więc była wyższa w porównaniu z próbkami ze złączem wklęsłym. Rozwój pęknięcia przebiegał w szybszym tempie, a zniszczenie próbek następowało przy 74 000 cykli.

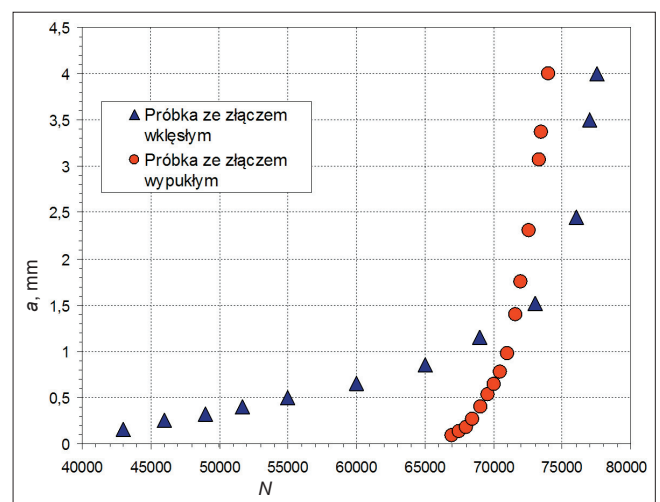
Dla porównania: w próbkach litych o podobnej geometrii, poddanych identycznemu obciążeniu, inicjacja pęknięć (0,1 mm) następowała po 31 000 cykli, dalszy rozwój pęknięć był dość szybki i przy liczbie 44 500 cykli próbki ulegały zniszczeniu. Trwałość próbek z wklęsłym złączem spawanym była zatem większa o 33 000 cykli (74%), a próbek ze złączem wypukłym – o 29 500 cykli (66%) w porównaniu z trwałością próbek litych. Te różnice są więc wyraźne, podczas gdy trwałość próbek z wklęsłym złączem spawanym w porównaniu z próbkami ze złączem wypukłym była większa zaledwie o 3500 cykli (5%). Może to wynikać z różnych twardości próbek. Próbki lite w miejscu pęknięcia miały twardość 189 HV, próbki z wklęsłym złączem spawanym – 213÷265 HV, natomiast próbki ze złączem wypukłym – 207÷266 HV.

Na rys. 10 pokazano przykładowe wyniki numeryczne – mapy naprężeń – uzyskane w programie FRANC3D [10]. Program ten pozwala na obliczenie wartości: rozwarcia wierzchołka pęknięcia, naprężeń oraz współczynnika intensywności naprężenia K .

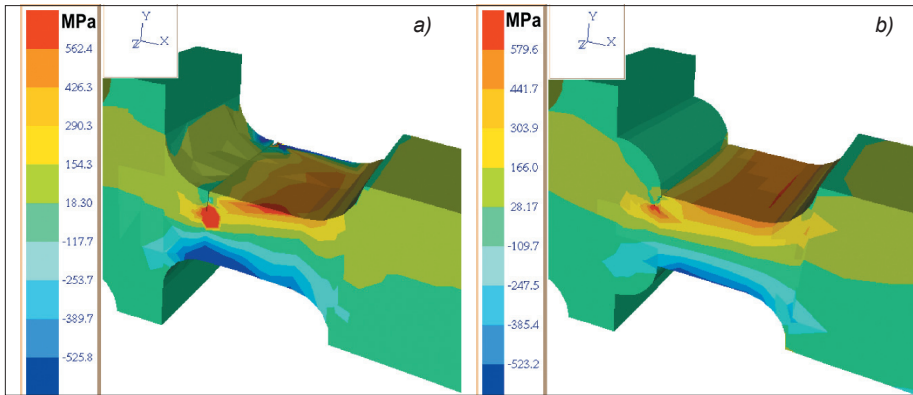
Za pomocą programu FRANC3D obliczono współczynniki intensywności naprężenia K dla kolejnych etapów rozwoju pęknięcia, w okolicy czoła pęknięcia, a następnie wyznaczono zakres współczynnika intensywności naprężenia ΔK . Krzywą prędkości pęknięcia zmęczeniowego otrzymano z równania Parisa [11]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

gdzie: ΔK – zakres współczynnika intensywności naprężenia, C i m – współczynniki wyznaczone doświadczalnie.



Rys. 9. Długości pęknięć zmęczeniowych a w funkcji liczby cykli N dla badanych próbek poddanych zginaniu ($M_a = 9,2 \text{ Nm}$, $R = -1$)



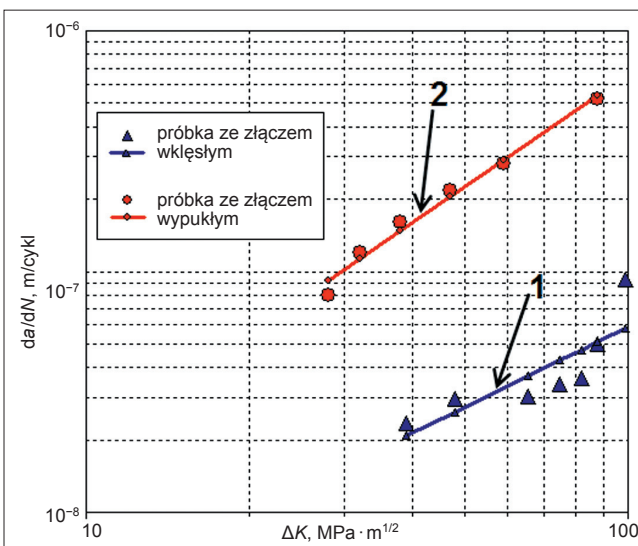
Rys. 10. Wartości składowej σ_{xx} tensora naprężenia w próbce zginanej, obciążonej momentem $M_a = 9,2 \text{ Nm}$ ($R = -1$): a) z wklęsłym złączem spawanym (długość pęknięcia zmęczeniowego $a = 1,52 \text{ mm}$), b) z wypukłym złączem spawanym ($a = 0,98 \text{ mm}$)

Na rys. 11 przedstawiono otrzymane doświadczalnie wykresy prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych da/dN w funkcji zakresu zmian współczynnika intensywności naprężenia ΔK . Jak widać, w przypadku próbek z wypukłym złączem spawanym wartość tej prędkości osiąga $9,033 \cdot 10^{-8} \div 5,374 \cdot 10^{-7} \text{ m/cykl}$. Mniejsze prędkości zaobserwowano natomiast podczas badań próbek z wklęsłym złączem spawanym. Przykładowo: przy stałej wartości zakresu współczynnika intensywności naprężenia $\Delta K = 47 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ prędkość da/dN wzrasta do $2,606 \cdot 10^{-8} \text{ m/cykl}$ dla próbek z wklęsłym złączem spawanym oraz do $2,04 \cdot 10^{-7} \text{ m/cykl}$ dla próbek z wypukłym złączem spawanym (następuje 7,8-krotny wzrost prędkości).

Współczynniki C i m (występujące w podanym wcześniej wzorze) wyznaczono na podstawie danych uzyskanych doświadczalnie, a do ich obliczenia zastosowano metodę najmniejszych kwadratów. Wartości współczynników C i m oraz współczynnika korelacji r zestawiono w tabl. II. Wyniki badań dotyczące zginania są obarczone błędem względnym nieprzekraczającym 12% (tylko w jednym przypadku wartość błędu wynosi 28%) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Współczynnik korelacji r w każdym przypadku przyjmuje duże wartości, co świadczy o dużej zgodności wyników badań doświadczalnych z równaniem Parisa.

TABLICA II. Współczynniki C i m z równania Parisa oraz współczynnik korelacji r

Rys./wykres	$C, m(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})^{-m}/\text{cykl}$	m	r
11/1	$3,715 \cdot 10^{-10}$	1,099	0,818
11/2	$5,346 \cdot 10^{-10}$	1,544	0,992



Rys. 11. Prędkości wzrostu pęknięć da/dN w funkcji ΔK dla próbki poddanej cyklicznemu zginaniu ($M_a = 9,2 \text{ Nm}$, $R = -1$): z wypukłym złączem spawanym - 1, z wklęsłym złączem spawanym - 2 (linia ciągła - równanie Parisa)

Podczas badań eksperymentalnych stwierdzono, że w porównaniu z próbkami z wypukłym złączem spawanym próbki ze złączem wklęsłym mają nieznacznie wyższą trwałość i dużo mniejszą prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych, co można tłumaczyć brakiem fikcyjnego promienia zaokrąglenia karbu. Ponadto w próbkach ze złączem wypukłym występuje silna koncentracja naprężenia w przejściu z najmniejszego przekroju poprzecznego materiału rodzimego (który uległ przegrzaniu) w spoinę. W tym miejscu następowała inicjacja, a potem propagacja pęknięcia. Zaobserwowano większą prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych w porównaniu z próbkami ze złączem wklęsłym.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz obliczeń numerycznych dotyczących próbek poddanych cyklicznemu zginaniu sformułowano następujące wnioski:

- rozwój pęknięć zmęczeniowych w każdym przypadku rozpoczął się z jednej strony badanej próbki – w miejscu największej koncentracji naprężeń,
- największą trwałość wykazały próbki z wklęsłym złączem spawanym – ich trwałość w porównaniu z próbkami ze złączem wypukłym była wyższa o 5%,
- najmniejsze prędkości rozwoju pęknięć zmęczeniowych zanotowano w przypadku próbek z wklęsłym złączem spawanym.

LITERATURA

1. Kocańda S. „Zmęczeniowe pękanie metali”. Warszawa: WNT, 1985: s. 492.
2. Lipka J. „Wytrzymałość maszyn wirnikowych”. Warszawa: WNT, 1967: s. 538.
3. Wahab M.A., Alam M.S. “The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints”. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 153–154 (2004): pp. 931÷937.
4. Zhi-Gang Xiao, Tao Chen, Xiao-Ling Zhao. “Fatigue strength evaluation of transverse fillet welded joints subjected to bending loads”. *International Journal of Fatigue*. Vol. 38 (2012): pp. 57÷64.
5. PN-EN 1668:2000 Materiały dodatkowe do spawania -- Pręty, druty do spawania łukowego w osłonach gazów elektrodą wolframową stali niestopowych i drobnziarnistych oraz ich stopiwa – Klasyfikacja.
6. Kocańda S., Szala J., „Podstawy obliczeń zmęczeniowych”. Warszawa: PWN, 1985: s. 276.
7. PN-EN 1043-1:2000 Spawalnictwo. Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Próba twardości. Próba twardości złączy spawanych łukowo.
8. Rozumek D., Macha E. „Opis rozwoju pęknięć zmęczeniowych w materiałach sprężysto-plastycznych przy proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem”. Opole: Politechnika Opolska, 2006: s. 196.
9. Rozumek D., Lewandowski J. „Stan naprężeń i odkształceń w próbkach o przekroju kwadratowym poddanych zginaniu i kombinacji zginania ze skręcaniem dla stali 18G2A. Raport nr 5/04”. Opole: Politechnika Opolska, 2004.
10. www.cfg.cornell.edu/software.html
11. Paris P.C., Erdogan F. “A critical analysis of crack propagation laws”. *Journal of Basic Engineering*. Vol. 85, No 4 (1963): pp. 528÷534.