



## Opis rozwoju pęknięć zmęczeniowych w stalowych złączach spawanych doczołowo

Krzysztof Werner<sup>1</sup>

### STRESZCZENIE:

W artykule przedstawiono wyniki badań rozwoju pęknięć zmęczeniowych w różnych strefach złączy spawanych doczołowo wykonanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości S355J2. Rozwój pęknięć zmęczeniowych badano na płaskich próbkach w trzech strefach złącza: w spoinie, w linii wtopienia spoiny i w materiale rodzimym blachy stalowej. Badania były prowadzone z zastosowaniem cyklicznie zmiennego obciążenia rozciągającego o stałej amplitudzie. Na podstawie wyników badań wyznaczono prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych w rozpatrywanych strefach złączy i opisano ją jako funkcję współczynnika intensywności naprężenia za pomocą równania Parisa. W opisie prędkości pęknięcia uwzględniono zarówno naprężenia od obciążenia zewnętrznego, jak i naprężenia własne w złączu spawanym. Własne naprężenia spawalnicze spowodowały bardzo szybki przyrost prędkości pęknięcia w spoinie i w linii wtopienia spoiny w początkowej fazie zasadniczego etapu rozwoju pęknięcia.

### SŁOWA KLUCZOWE:

złącza spawane; prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych; spawalnicze naprężenia własne

## 1. Wprowadzenie

Elementy maszyn, urządzeń oraz konstrukcji budowlanych pracujących pod obciążeniem zmiennym narażone są na rozwój pęknięć zmęczeniowych, inicjowanych z różnych karbów – miejsc koncentracji naprężenia. Szczególnie narażone na zainicjowanie pęknięć zmęczeniowych są stalowe złącza spawane. Występują w nich zarówno karby geometryczne, np. linia wtopienia lica spoiny, wady spoin, jak i strukturalne (różne struktury stref złączy i liczne wtrącenia niemetaliczne) oraz naprężenia własne. Na rozwój pęknięć zmęczeniowych w złączach spawanych wpływają różne czynniki, takie jak: typy wad spoin, poziom obciążenia i jego relacja do właściwości mechanicznych materiału, a także mikrostruktura oraz naprężenia własne w spoinie i w strefie wpływu ciepła (SWC) [1, 2]. Własne naprężenie rozciągające w spoinie współdziała z naprężeniem rozciągającym pochodzącym od obciążenia zewnętrznego. Podnosi to poziom naprężenia średniego, co powoduje wzrost prędkości pęknięcia [1, 3, 4].

Na podstawie przeglądowej pracy [1] można stwierdzić, że wiele publikacji dotyczących tej tematyki (np. praca [5]) wskazuje na związek rozwoju pęknięć zmęczeniowych w złączach z istniejącymi w nich naprężeniami własnymi. Natomiast inne publikacje nie wskazują na istnienie takiego związku. Ta rozbieżność wynikać może między innymi ze sposobu przygotowania złączy do badań zmęczeniowych. Na ogół rozwój pęknięć bada się na próbkach złączy po ich obróbce mechanicznej, która usuwa nadlew spoiny i zewnętrzne warstwy materiału. Naprężenia własne dodatnie (rozciągające) w tych warstwach złącza są największe, natomiast w warstwach głębszych są niewielkie, a w środku jego grubości są nawet ujemne [6]. W elementach konstrukcji spawanych powierzchnie złączy najczęściej nie są obrabiane mechanicznie.

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42–218 Częstochowa, e-mail: krzysztofwerner@tlen.pl

W pracy przedstawiono wyniki badań rozwoju pęknięć zmęczeniowych w trzech strefach stalowego złącza spawanego: w materiale rodzimym (MR), w spoinie (SP) oraz w linii wtopienia spoiny (LWS) – tj. częściowo w SWC w pobliżu powierzchni złącza i w MR w głębi złącza.

## 2. Materiał, próbki i metodyka badań

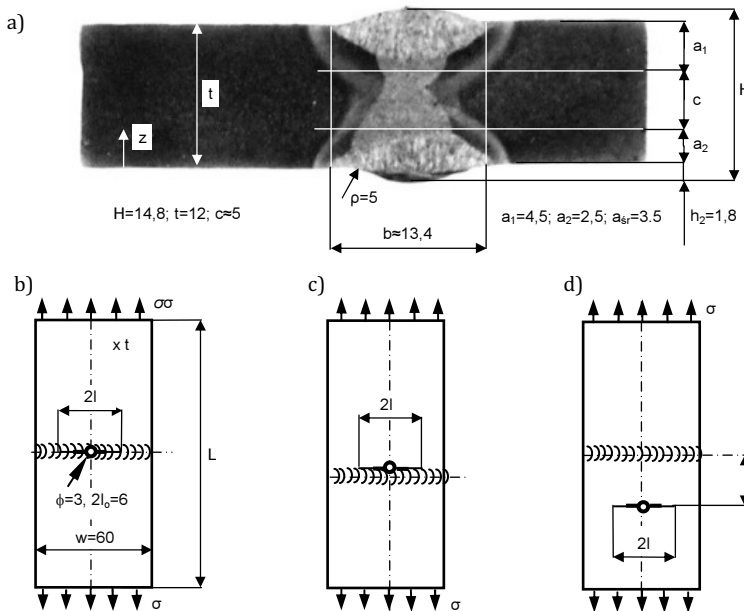
Badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych przeprowadzono na próbkach płaskich – złączach spawanych doczołowo typu "X" (rys. 1) z nieobrobionymi mechanicznie powierzchniami. Próbki z blach o grubości  $t = 12$  mm wykonano ze stali o podwyższonej wytrzymałości S355J2 z zastosowaniem elektrycznego spawania ręcznego elektrodami EB1.50. Właściwości mechaniczne MR i SP przedstawiono w tabeli 1. Granicę plastyczności  $R_e$  materiału w LWS przyjęto jak w SP.

**Tabela 1**

Właściwości mechaniczne MR i SP badanych złączy spawanych

Strefa złącza	$R_e, R_{0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_5$ [%]	KVC (20°C) [J/cm <sup>2</sup> ]
MR – Mat. rodzimy	364	571	26	180
SP – Spoina	420	549	–	145

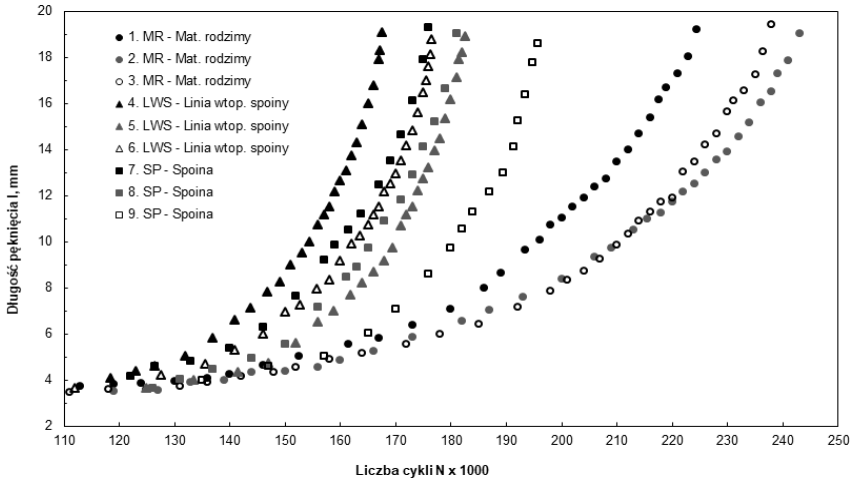
Próbki o wymiarach  $t \times w \times L = 12 \times 60 \times 500$  mm (rys. 1b) zawierały środkowy koncentrador naprężenia (otwór  $\Phi = 3$  mm i dwa nacięcia) o łącznej długości  $2l_0 = 6$  mm. Badania prowadzono na pulsatorze hydraulicznym z sinusoidalnym obciążeniem rozciągającym o częstotliwości 4,5 Hz. Badano wzrost pęknięć centralnych  $2l$  przy naprężeniu o stałej amplitudzie  $\sigma_a$  i wartości średniej  $\sigma_m$ . Poziom naprężenia od obciążenia zewnętrznego w badanych próbkach  $\sigma_z$  o współczynniku asymetrii cyklu  $R = (\sigma_{min}/\sigma_{max}) = 0,2$  wynosił  $\sigma_z = \sigma_m \pm \sigma_a = 111 \pm 74$  MPa ( $\sigma_{z max} = 185$  MPa). Wzrost długości pęknięć środkowych –  $2l$  mierzono optycznie w trakcie działania obciążenia na obu powierzchniach próbki z dokładnością do 0,01 mm za pomocą 2 mikroskopów.



**Rys. 1.** Złącze spawane doczołowo – zgląd makro (a) oraz inicjator pęknięcia: w SP (b), w LWS (c) i w MR (d)

### 3. Wyniki badań

Wyniki badań dla trzech próbek w każdej strefie złącza, odniesione do liczby cykli obciążenia  $N$ , wskazują, że w strefach SP i LWS trwałość próbek związana ze wzrostem pęknięcia w zakresie ich rozwoju (ok. 4–19 mm) jest znacznie mniejsza niż w MR (rys. 2).

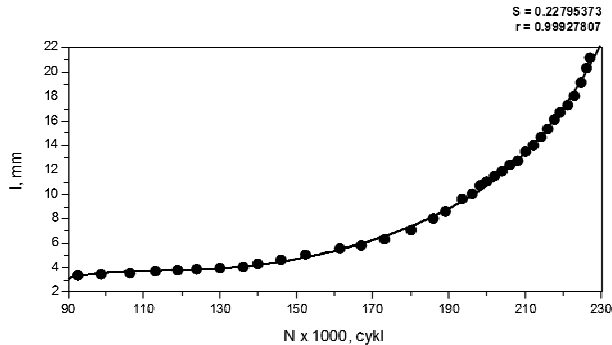


Rys. 2. Wzrost pęknięć zmęczeniowych w trzech strefach złączy spawanych doczołowo

Wyniki wzrostu pęknięć  $l$  w funkcji liczby cykli obciążenia  $N$ , tj.  $l = f(N)$ , aproksymowano wielomianami stopnia  $n = 5-10$  o współczynnikach  $A_0 \div A_n$  wg wzoru (1) za pomocą standardowego programu komputerowego (rys. 3). Prędkości pęknięcia  $dl/dN$  określają ich pochodne (wzór (2)). Stopień  $n$  dobierano tak, aby współczynnik korelacji  $r$  był wysoki, a odchylenie standardowe  $S$  wartości średniej było małe oraz by spełniony był warunek wzrostu pęknięcia w przyjętym jego zakresie ( $dl/dN > 0$ ). Uzyskano dobre korelacje krzywych z wynikami badań (rys. 3).

$$l = A_0 + A_1 \cdot N + A_2 \cdot N^2 + \dots + A_n \cdot N^n \quad (1)$$

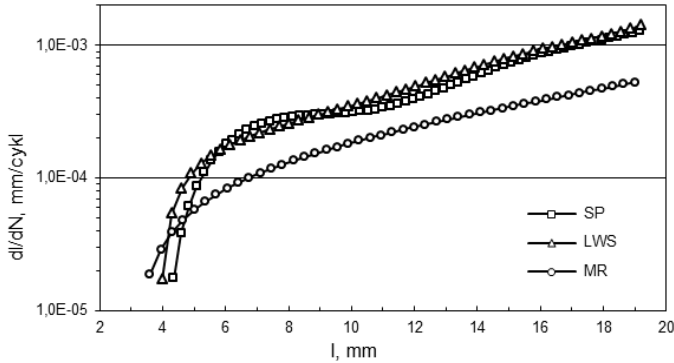
$$dl/dN = A_1 + 2 \cdot A_2 \cdot N + \dots + n \cdot A_n \cdot N^{n-1} \quad (2)$$



Rys. 3. Aproksymacja wyników wzrostu pęknięcia w strefie MR złącza spawanego wielomianem stopnia  $n = 5$

Wykresy zbiorcze prędkości pęknięcia w funkcji długości pęknięcia  $dl/dN = f(l)$ , uzyskane jako aproksymacje wyników prędkości  $dl/dN$  dla trzech próbek w każdej strefie złącza, przedstawiono na rysunku 4. Wskazują one na szybszy przyrost prędkości  $dl/dN$  w strefie SP i LWS

niż w MR w początkowej fazie wzrostu pęknięcia (dla  $l < 6$  mm), a następnie na większą prędkość pęknięcia w tych strefach.



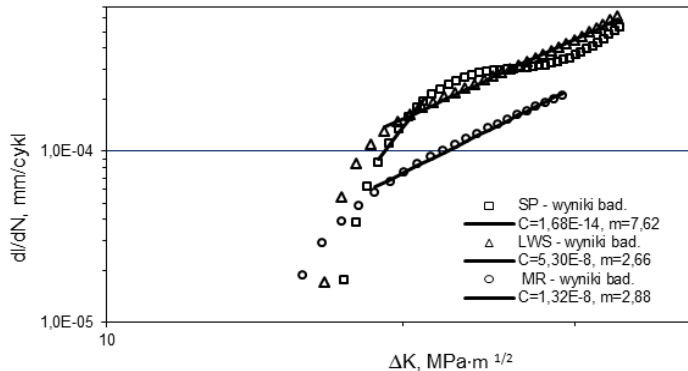
Rys. 4. Krzywe prędkości pęknięć zmęczeniowych w badanych strefach złącza

Opis rozwoju pęknięcia rozpatrzono w zakresie liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (LSMP), która bazuje na współczynniku intensywności naprężenia –  $K$  lub jego zakresie  $\Delta K$ . Dlatego zgodnie z LSMP przyjęto wyniki pomiarów wzrostu pęknięć tylko do długości granicznej, tj. do uzyskania w niepękniętej części przekroju próbki naprężenia  $\sigma_{netto} = 0,8 \cdot Re$ . Graniczna długość pęknięcia dla danego obciążenia próbek wynosiła:  $l = 11$  mm w MR oraz  $l = 13,5$  mm w SP i w LWS. Zakres współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K$  na czole pęknięcia wyznaczono wg wzoru (3) ze współczynnikiem korekcyjnym  $Y$  [1] opisanym wzorem (4):

$$\Delta K = (1 - R) \cdot K_{max} = (1 - R) \cdot \sigma_{max} Y \sqrt{\pi \cdot l} \quad (3)$$

$$Y = \sqrt{\frac{b}{\pi \cdot l} \operatorname{tg} \frac{\pi \cdot l}{b}} \quad (4)$$

$$dl/dN = C \cdot \Delta K^m \quad (5)$$



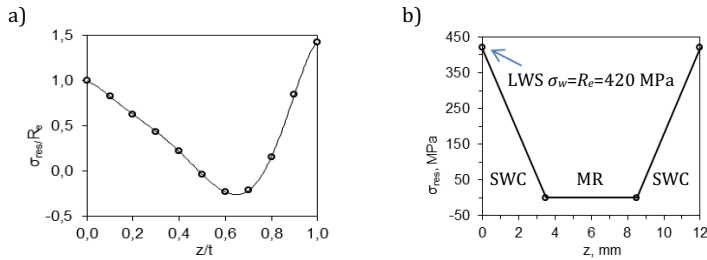
Rys. 5. Opis prędkości rozwoju pęknięć zmęczeniowych wzorem Parisa dla  $\sigma_z = \sigma_m \pm \sigma_a = 111 \pm 74$  MPa ( $R = 0,2$ )

Wyniki badań wykazały, że prędkość pęknięcia w II etapie wzrostu pęknięcia dla zakresu LSMP (poniżej długości granicznej) można opisać jako funkcję  $\Delta K$  zależnością Parisa (wzór (5)) tylko w strefach MR i LWS, gdzie przyrost prędkości pęknięcia w logarytmicznym układzie osi  $\lg(\Delta K) - \lg(dl/dN)$  jest zbliżony do liniowego (rys. 5). Natomiast w SP wzór (5) można stosować tylko dla wybranych fragmentów wykresu prędkości pęknięcia ze względu na jego nieliniowość.

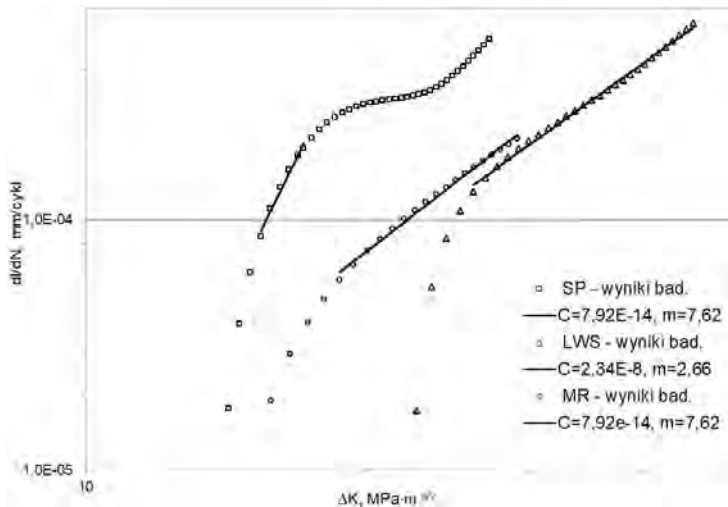
Uwzględnienie obniżenia naprężenia wynikającego z większej grubości nieobrobionego mechanicznie złącza w spoinie i naprężeń własnych w złączu spawanym oraz spiętrzenia naprężenia w karbie (w LWS) może zmienić relacje prędkościami pęknięcia [7] badanych stref.

W spoinie rozkład własnego naprężenia poprzecznego  $\sigma_w$  określono zgodnie z modelem opracowanym według europejskiej procedury FITNET [6] (rys. 6a). Według tego modelu, naprężenie własne na powierzchni spoiny jest równe jej granicy plastyczności ( $R_e = 420$  MPa) i maleje w kierunku głębokości złącza, osiągając wewnątrz spoiny nawet wartości ujemne. Dlatego założono jako skuteczny poziom naprężenia własnego jego wartość średnią  $\sigma_w = 0,46 \cdot R_e = 193$  MPa. Przy obniżonym poziomie naprężenia w SP –  $\sigma_{z \max} = 151$  MPa,  $R = 0,2$  ze względu na większą grubość próbki naprężenie w tej strefie wynosiło  $\sigma_{\max} = 344$  MPa,  $R = 0,65$  ( $\sigma_m = 284$  MPa).

W LWS założono naprężenie własne zmieniające się liniowo na dwóch odcinkach grubości złącza (2·3,5 mm) od  $R_e = 364$  MPa na jego powierzchni do 0 na granicy SWC z MR i 0 w MR (rys. 1a i 6b). Średnia ważona naprężenia wynosiła  $\sigma_w = (2 \cdot 0,5 \cdot 364 \cdot 3,5 + 0 \cdot 5) / 12 = 106$  MPa. Współczynnik kształtu karbu (w LWS)  $\alpha_k = 1,36$ , wyznaczony wg metody Jewdokimowa [8] na podstawie wymiarów spoiny, jak w pracy [9], spowodował wzrost naprężenia od obciążenia ( $\sigma_{zk \max} = \alpha_k \sigma_{z \max} = 251,6$  MPa). Po uwzględnieniu naprężenia własnego w LWS naprężenie rzeczywiste w tej strefie wynosiło  $\sigma_{z \max} = 358$  MPa,  $R = 0,44$  ( $\sigma_m = 257$  MPa).



Rys. 6. Zmiana naprężeń własnych  $\sigma_w$  na grubości przekroju złącza: a) w SP wg [6], b) w LWS



Rys. 7. Opis prędkości rozwoju pęknięć zmęczeniowych wzorem Parisa dla naprężeń rzeczywistych

Uwzględnienie rzeczywistych naprężeń w SP i LWS spowodowało przesunięcie wykresów prędkości pęknięcia w SP ku mniejszym wartościom  $\Delta K$ , a w LWS ku większym wartościom  $\Delta K$  (rys. 7). Przesunięcie to mogło wynikać ze wzrostu współczynnika asymetrii cyklu, który w SP  $R = 0,65$  powoduje wzrost  $dl/dN$  względem MR (dla danej wartości  $\Delta K$ ). W LWS pomimo wzrostu

współczynnika  $R$  ( $R = 0,44$ ) prędkości pęknięcia uległa obniżeniu względem MR. Wynikać to może z hamującego działania odkształceń plastycznych na czole pęknięcia, ponieważ czoło to w LWS przechodzi przez obszar MR o znacznie niższej granicy plastyczności niż w SWC. Ponadto struktura tej strefy jest bardziej podatna do odkształceń plastycznych niż struktura spoiny. Prędkości pęknięcia w II etapie można opisać wzorem Parisa analogicznie jak dla naprężenia  $\sigma_z$ .

#### 4. Wnioski

- Przeprowadzone badania pozwoliły sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski:
- Trwałość badanych złączy spawanych, tj. liczba cykli obciążenia zmęczeniowego związana z rozwojem pęknięcia wzrastającego w SP i w LWS jest znacznie większa niż w MR.
  - Wzrost pęknięć zmęczeniowych w strefie SP oraz wzdłuż LWS badanych złączy spawanych przebiega szybciej niż w MR. Prędkość pęknięcia w znacznym zakresie II etapu można opisać wzorem Parisa tylko dla wzrostu pęknięcia w MR i w LWS.
  - W wyniku działania własnych naprężeń spawalniczych oraz zmniejszenia naprężenia w SP ze względu na jej nadlew oraz przez spiętrzenie naprężenia w LWS wzrosły wartości parametrów obciążenia ( $R$ ,  $\sigma_m$ ), a wykresy prędkości pęknięcia uległy przesunięciu: w spoinie ku mniejszym wartościom  $\Delta K$ , natomiast w linii wtopienia spoiny ku wyższym wartościom  $\Delta K$ .

#### Literatura

- [1] Kocańda S., Zmęczeniowe pęknięcie metali, WNT, Warszawa 1985.
- [2] 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* 2004, 153–154, 931–937.
- [3] Glinka G., Oddziaływanie formy widma obciążeń na prędkość propagacji pęknięcia zmęczeniowego w spawalniczych stalach konstrukcyjnych o wysokiej wytrzymałości i ich połączeniach spawanych, [Praca doktorska], Politechnika Warszawska, Warszawa 1976.
- [4] Adams J.J., Crack growth in the vicinity of welds, *Welding Journal* 1973, 11.
- [5] Elber W., Effects of shot-peening residual stresses on the fracture and crack growth properties of D6.AC steel, *Fracture Toughness and Slow-Stable Cracking*, ASTM STP 559, 1974.
- [6] Kocak M. et al., FITNET, Fitness-for-service, GKSS Research Centre Geesthacht GmbH, (2008).
- [7] Lewandowski J., Rozumek D., Rozwój pęknięć zmęczeniowych w cyklicznie zginanych próbkach z pachwinowym złączem spawanym, *Mechanik* 2016, 3, 160–164.
- [8] Goss C., Kłysz S., Wojnowski W., Problemy niskocyklowej trwałości zmęczeniowej wybranych stali i połączeń spawanych, ITWL, Warszawa 2004.
- [9] Goss C., Marecki P., Problemy trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych wykonanych ze stali S890QL, *Biuletyn WAT* 2012, LXI, 2, 377–390.

### Description of fatigue crack growth in steel butt-welded joints

#### ABSTRACT:

The paper is to presents the test results of fatigue crack growth in various zones of butt-welded joints made of high-strength S355J2-steel. The fatigue crack growth was tested on flat samples in three zones of the joint: in weld material, in fusion line and in original material of steel-plate. The studies were performed with application variable cyclic tensile loading of constant amplitude. Based on the test results determined crack growth rate of fatigue cracking in the joint zones concerned, were described by the Paris-formula as function of stress intensity factor. The description takes into account both the fatigue crack growth rate of the external load stresses and residual stresses in the welded joint. The welding stresses resulted in a very rapid increase of crack growth rate in the weld material and in the fusion line in the initial phase of principal stage of fatigue crack growth rate.

#### KEYWORDS:

welded joints; fatigue crack growth rate; welding residual stress