

Dopuszczalna wielkość szczeliny w złączu spawanym ze względu na możliwość jego pęknięcia

The permissible size of the fissure in welded joint because of the possibility of his cracking

Streszczenie

Praca przedstawia ocenę złącza spawanego zawierającego niezgodność w postaci szczeliny ze względu na możliwość jego pęknięcia. Obliczono dopuszczalną wielkość szczeliny wskrośnej w złączu spawanym oraz określono stan bezpieczeństwa dla złącza zawierającego niezgodność odkrytą – szczelinę półeliptyczną o założonych wymiarach. Obliczenia wykonano na podstawie krytycznych właściwości materiału złącza dla dwóch poziomów obciążenia rozciągającego z uwzględnieniem przyjętego modelu rozkładu naprężeń własnych w złączu. Krytyczne właściwości materiału, tj. krytyczne rozwarście czoła pęknięcia i odporność na pęknięcie, wyznaczono na podstawie wyników badań uderzeniowych dla każdej strefy złącza.

Słowa kluczowe: złącza spawane; kruche pęknięcie; niezgodności złączy spawanych

Abstract

The work presents the opinion of welded joint with the defect, i.e. fissure, because of the possibility of his cracking. The permissible size of the fissure thoroughly in welded joint was calculation and the state of the safety was qualified for welded joint including the open defect – semielliptical fissure for put her dimensions. The calculations were made on the basis of the critical material properties of welded joint for two levels of tensile loading with the regard put model of the residual stress distribution. The critical material properties, i.e.: fracture toughness and the critical crack tip opening displacement, were estimated on basis of the test results of impact resistance for every zone of the welded joints.

Keywords: welded joints; fragile cracking; welded joints' incompatibilities

Wstęp

Ocena złącza spawanego zawierającego niezgodności spawalnicze (wady) w postaci szczelin sprowadza się do wyznaczania krytycznej lub dopuszczalnej ich wielkości lub do określenia stanu bezpieczeństwa złącza zawierającego szczelinę o znanej wielkości. Taka ocena złącza jest niezbędna ze względu na możliwość jego nagłego pęknięcia. Oparta ona jest na zasadach liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (LSMP), według której kruche pęknięcie elementu ze szczeliną wystąpi gdy się współczynnik intensywności naprężenia K_I na czole szczeliny osiągnie wartość krytyczną K_{Ic} ($K_I = K_{Ic}$) [1,2]. Kruche pęknięcie, występuje zwykle w płaskim stanie odkształcenia w elementach grubych przy niskim poziomie obciążenia, tj. gdy naprężenie nominalne względem granicy plastyczności jest niewielkie ($\sigma/Re \leq 0,5$). Strefa plastyczna na czole szczeliny jest wtedy bardzo mała i można ją pominąć [2,3]. Jednak kryterium LSMP można też stosować

przy wyższym poziomie naprężenia, tzn. dla $0,5 < \sigma/Re \leq 0,8$, gdzie rozpatruje się efektywną wielkość szczeliny a_{ef} . Jest ona sumą rzeczywistej wielkości szczeliny a i strefy plastycznej na jej czole – r_p ($a_{ef} = a + r_p$) [2,3].

W elementach o małej grubości przy wyższych poziomach obciążenia ($\sigma/Re > 0,5$) na czole szczeliny tworzy się większa strefa plastyczna. O możliwości pęknięcia materiału w tym stanie decyduje wielkość rozwarścia czoła szczeliny δ_a , która po osiągnięciu krytycznej wartości δ_c ($\delta_a = \delta_c$) powoduje quasi-kruche pęknięcie materiału, zgodnie z założeniami sprężysto-plastycznej mechaniki pęknięcia (SPMP) [1÷4]. Obecność szczelin nawet o bardzo małych wymiarach w elementach konstrukcyjnych poddanych działaniu obciążeń zmiennych może zainicjować rozwój pęknięcia zmęczeniowego, którego wzrost do wartości krytycznej (po pewnej liczbie cykli obciążenia) prowadzi także do zniszczenia elementu. W takim przy-

Dr hab. inż. Krzysztof Werner, prof. PCz; dr inż. Kwiryn Wojsyk – Politechnika Częstochowska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: krzysztofwerner@tlen.pl

padku można określić trwałość zmęczeniową elementu na podstawie wyników badania rozwoju pęknięć w złączach spawanych [5,6].

Współczynnik intensywności naprężenia w złączu spawanym zależy od wielkości naprężeń nominalnych spowodowanych obciążeniem zewnętrznym oraz naprężeń własnych, których rozkład i wartość można określić za pomocą analiz numerycznych (np. metodą elementów skończonych [7]) albo za pomocą różnych metod pomiaru lub modeli obliczeniowych [3].

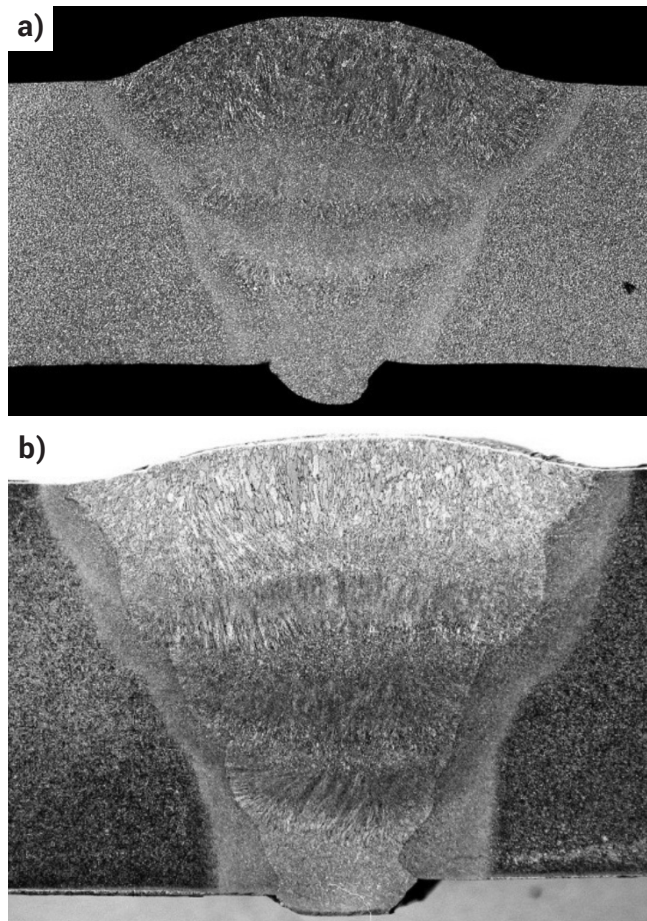
Wielkości i kształty niezgodności spawalniczych, widoczne na przełomach próbek łamanych udarowo [8], można wykryć i zmierzyć za pomocą badań nieniszczących, np. badań ultradźwiękowych lub radiograficznych.

Obliczenia wytrzymałościowe złączy spawanych dla obciążeń statycznych i zmiennych wg Eurokodu 3 omówione są np. w pracach [9,10]. Jednak możliwość zastosowania tej metodyki obliczeń przez inżynierów spawalników jest mało rozpoznana. Dlatego niniejsza praca przedstawia metodykę i wyniki obliczeń dla najczęściej spotykanych szczelin w złączach spawanych z uwzględnieniem własnych naprężeń spawalniczych. zilustrowano to na przykładzie wyznaczenia długości dopuszczalnej niezgodności wzdłużnej, tj. szczeliny wskrośnej oraz określenia stanu bezpieczeństwa złącza zawierającego odkrytą wadę wzdłużną, tj. szczelinę półeliptyczną o znanych wymiarach. Tematyka pracy jest szczegółowym omówieniem ogólnego zagadnienia związanego z oceną zagrożenia pękaniem złączy spawanych, prezentowanego przez autorów tej publikacji w pracach [11,12].

Ocena możliwości pęknięcia złącza spawanego zawierającego szczelinę

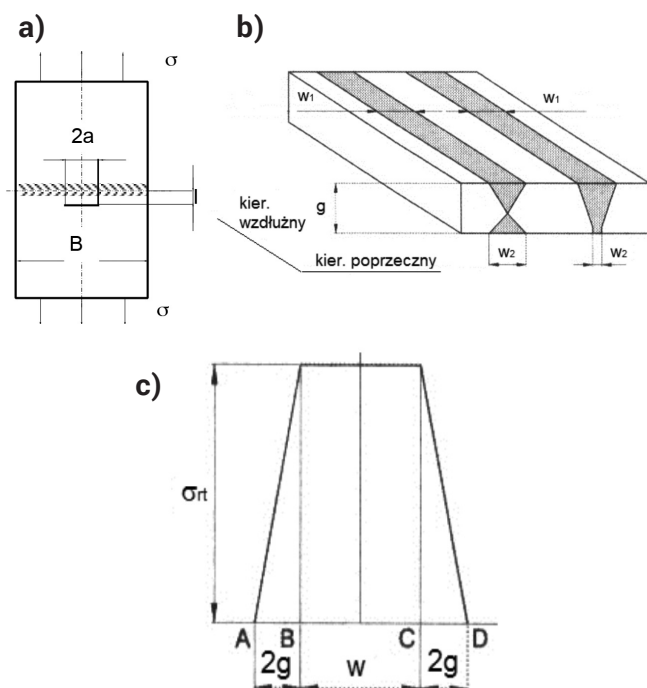
Dopuszczalny wymiar a wzdłużnej symetrycznej szczeliny wskrośnej o łącznej długości $2a$ oraz stan bezpieczeństwa złącza z wzdłużną szczeliną odkrytą – półeliptyczną o głębokości a i długości $2c$ na jego powierzchni określono dla doczołowo spawanych złączy ze spoiną „V” o kącie rozwarcia rowka 60° . Złącza wykonano z blach stali o podwyższonej wytrzymałości S355J2+N w stanie po normalizowaniu [13,14]. Blachy o grubości $g = 12$ mm spawano w pozycji pionowej PF (arkusz blachy o granicy plastyczności $R_e = 384$ MPa, i wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 574$ MPa) oraz w pozycji podolnej PA (arkusz blachy o właściwościach mechanicznych: $R_e = 435$ MPa i $R_m = 525$ MPa). Spoiny wykonano metodą MAG (135). Do spawania zastosowano materiał dodatkowy G3Si1 – drut o średnicy $d=1,2$ mm, którego właściwości mechaniczne wynosiły: $R_e(s) = 450$ MPa i $R_m(s) = 545$ MPa. Ścieg graniowy wykonano z podpawaniem (bez podkładki). Zgłady makroskopowe złączy spawanych w podanych pozycjach przedstawia rysunek 1.

Rozkład naprężeń własnych i ich wielkości w spoinie i poza nią oszacowano według europejskiej procedury FITNET, zgodnie z modelem podanym w pracy [3]. Według tego modelu własne naprężenia poprzeczne σ_{rt} na powierzchni złącza w spoinie są równe granicy plastyczności R_e materiału rodzimego, a w strefie wpływu ciepła (SWC) i dalej w materiale rodzimym maleją liniowo do zera na odcinku równym podwójnej grubości blachy. Na rysunku 2 przedstawiono schemat złącza spawanego ze szczeliną wskrośną o długości $2a$, oznaczenie szerokości lica i grani spoiny oraz rozkład własnych naprężeń poprzecznych na powierzchni złącza.



Rys. 1. Zgład makroskopowy złącza spawanego: a) w pozycji PA b) w pozycji PF

Fig. 1. The macroscopic section of welded joint: a) in the fix PA b) in the fix PF



Rys. 2. Złącze spawane – schemat: a) usytuowanie szczeliny, b) model spoiny ($w=w_1$ – lico; $w=w_2$ – grań), c) model rozkładu naprężeń własnych na powierzchni złącza [3]

Fig. 2. The scheme of welding joint: a) location of the fissure, b) model of welded joint ($w=w_1$ – face; $w=w_2$ – edge), c) model of residual stress distribution on surface of welded joint [3]

Właściwości charakteryzujące odporność materiału na pękanie wyznaczono dla różnych stref złącza na podstawie wyników badań udarności zawartych w pracach [13,14]. Wartości krytyczne: rozwarcia pęknięcia δ_c (w mm) i odporności na pękanie K_{Ic} wyznaczono na podstawie pracy KV udarowego łamania próbek (wyrażonej w J) dla każdej strefy złącza w temperaturze 20° C zgodnie z następującymi zależnościami [2,3,11]:

$$\delta_c = 0,0024 \cdot (KV) \quad (1)$$

$$K_{Ic} = \sqrt{R_e \cdot \delta_c \cdot E} \quad (2)$$

Wyniki badań KV (J) oraz obliczeń wartości krytycznych δ_c i K_{Ic} dla różnych stref złącza ze spoiną spawaną w pozycji PF podano w tabelcy I, w pracy [11] oraz w pracy [13]. Wartości średnie pracy udarowego łamania złącza ze spoiną wykonaną w pozycji PA, wyznaczone na podstawie wyników badań zawartych w pracy [14], podano przykładowo w tabelcy I.

Tablica I. Praca udarowego łamania – wartości średnie z 3 próbek o przekroju w karbie 10×8 mm

Table I. The work of stroke break – average values of tree samples on cross-section in notch 10×8 mm

Strefa złącza	Lico	Grań	SWC	Mat. Rodz.
KV, J	158	149	152	149

Do określenia możliwości pęknięcia złącza spawanego zawierającego szczelinę zastosowano kryterium LSMP. Wyznaczono wielkość dopuszczalnej szczeliny a_d , z zastosowaniem współczynnika bezpieczeństwa $b=2$ [2]. Na podstawie pierwszego wariantu (poziomu) oceny wstępnej, definiuje się maksymalną wartość parametru odporności materiału na pękanie K_r , jako kryterium pęknięcia:

$$K_r = K_I / K_{Ic} = \sqrt{2} / 2 \quad (3)$$

Ten poziom oceny obowiązuje dla obciążenia zewnętrznego rozciągającego $S_r = \sigma_r / \sigma_f \leq S_{rf} = 0,8$. Naprężenie końcowe σ_f określa się jako: $\sigma_f = 0,5 (R_e + R_m) \leq 1,2 R_e$ [3]. Ocenę możliwości pęknięcia złącza spawanych badanej stali, zawierających niezgodność w postaci szczeliny przeprowadzono dla dwóch poziomów obciążenia zewnętrznego $\sigma_r = 0,5R_e$ oraz $\sigma_r = 0,8R_e$ w każdej strefie złącza. W obliczeniach uwzględniono naprężenie rozciągające od obciążenia nominalnego wraz z naprężeniami własnymi wg założonego modelu, tj. w spoinie na poziomie granicy plastyczności materiału rodzimego, a poza spoiną – średnie naprężenie własne z obu powierzchni złącza. Uwzględniono także różne wartości granicy plastyczności R_e materiału rodzimego i spoiny, a w SWC wartość wynikającą z liniowej zmiany R_e .

Dopuszczalna wielkość wzdłużnej szczeliny wskrośnej

Długości dopuszczalnej szczeliny wskrośnej $a=a_d$ w złączu o szerokości B wyznaczono z równania (3) dla naprężenia σ i założonego stosunku B/a we współczynniku korekcyjnym Y. Współczynnik intensywności naprężenia określono jako:

$$K_I = \sigma \cdot Y \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4)$$

gdzie:

$$Y = \sqrt{\frac{B}{\pi \cdot a} \operatorname{tg} \frac{\pi \cdot a}{B}}$$

Stąd po przekształceniu równania (3) dopuszczalna długość szczeliny wskrośnej wynosi:

$$a_d = \frac{K_{Ic}^2}{2 \cdot (\sigma \cdot Y)^2 \cdot \pi} \quad (5)$$

Dodatkowo, zgodnie z innym kryterium LSMP uwzględniającym odkształcenie plastyczne na czole pęknięcia [2], wyznaczono też długość centralnej, równoważnej szczeliny wskrośnej a_m :

$$a_m = C (K_{Ic} / R_e)^2 \quad (6)$$

gdzie współczynnik C obowiązujący dla $\sigma/R_e \geq 0,5$ jest równy:

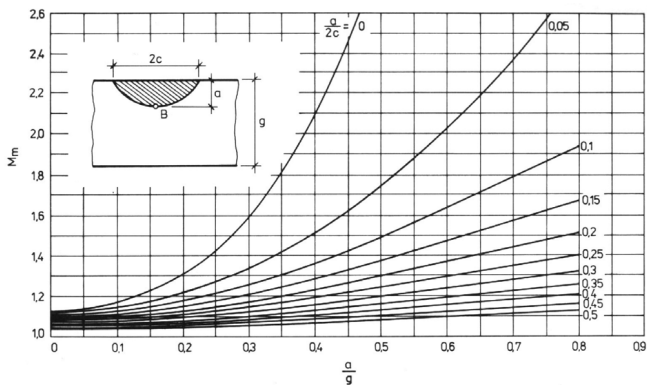
$$C = \frac{1}{2\pi \left[(\sigma / R_e) - 0,25 \right]}$$

Ocena możliwości pęknięcia złącza z wzdłużną szczeliną odkrytą półeliptyczną

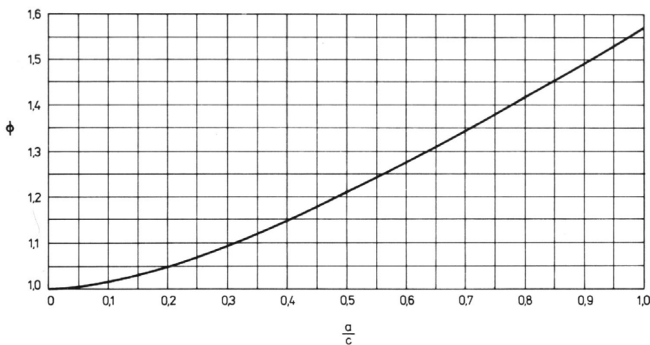
Do oceny możliwości pęknięcia złącza z wzdłużną szczeliną odkrytą - półeliptyczną o założonych wymiarach a i $2c$ zastosowano bezpośrednio kryterium stanu bezpieczeństwa wg wzoru (3) obowiązującego dla poziomego obciążenia zewnętrznego $S_r \leq 0,8$.

Złącze ze szczeliną poddane działaniu stałego obciążenia nie jest narażone na pęknięcie gdy jego parametr odporności na pękanie K_r i poziom stanu obciążenia S_r nie przekroczy wartości granicznych ($K_r = \sqrt{2}/2$ i $S_r = 0,8$). Obliczenia parametru K_r wykonano wg wzoru (3) dla współczynnika intensywności naprężenia K_I określonego jako:

$$K_I = \sigma \frac{M_m}{\phi} \sqrt{\pi \cdot a} \quad (7)$$



Rys. 3. Współczynnik M_m w punkcie B szczeliny półeliptycznej [2]
Fig. 3. The coefficient M_m in point B of the semielliptical fissure [2]

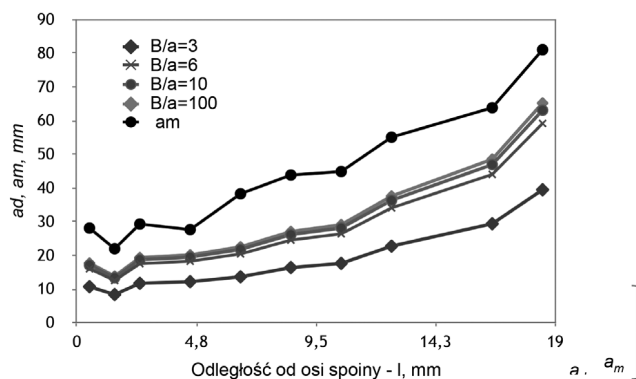


Rys. 4. Wartość całki eliptycznej dla szczeliny półeliptycznej i eliptycznej
Fig. 4. Value of the elliptic integral for semielliptical and elliptical fissure [2]

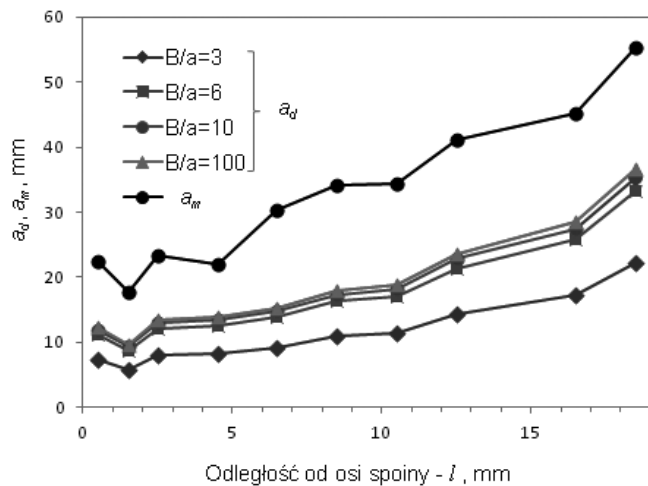
Współczynnik korekcyjny M_m w punkcie B szczeliny półeliptycznej można określić z wykresu przedstawionego na rysunku 3, w zależności od stosunków wymiarów: a/g i $a/2c$. Natomiast wartość całki eliptycznej ϕ zależnej od stosunku wymiarów a/c można określić z wykresu przedstawionego na rysunku 4 [2].

Wyznaczone, bezpieczne długości szczelin wskrośnych w rozpatrywanych złączach

Obliczone dopuszczalne i równoważne długości szczeliny wskrośnej w funkcji jej położenia w złączu spawanym przedstawiono na rysunkach 5 i 6 dla złączy ze spoiną wykonaną w pozycji PF oraz na rysunkach 7 i 8 dla złączy ze spoiną wykonaną w pozycji PA.



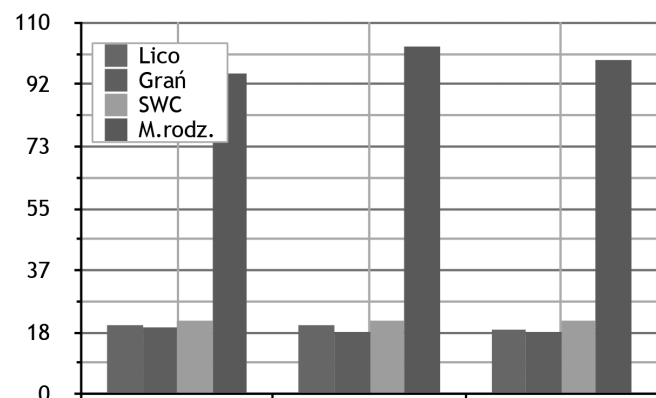
Rys. 5. Długość szczeliny: dopuszczalna a_d (wz. 5) oraz równoważna a_m (wz. 6). Spoina wykonana w pozycji PF, $\sigma_r = 0,5R_e$
Fig. 5. The length of fissure: permissible a_d (formula 5) and equivalent a_m (formula 6). The joint welded in the fix PF, $\sigma_r = 0,5R_e$



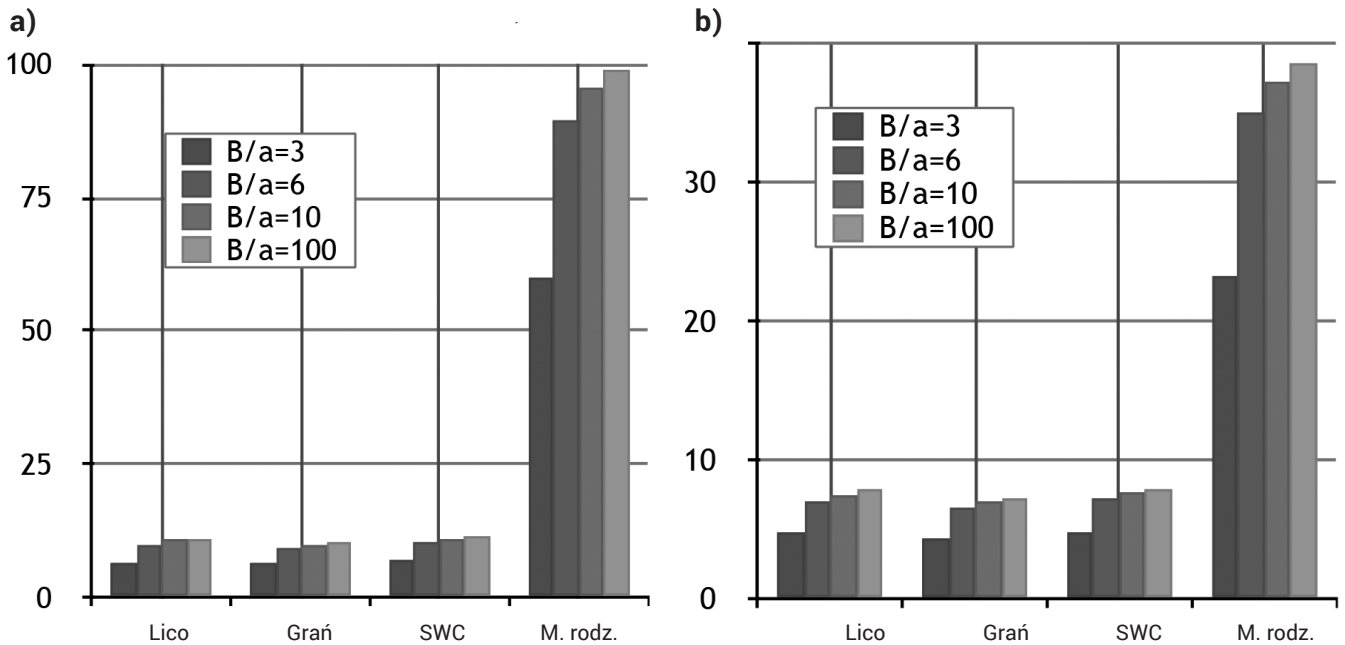
Rys. 6. Długość szczeliny: dopuszczalna a_d (wz. 5) oraz równoważna a_m (wz. 6). Spoina wykonana w pozycji PF, $\sigma_r = 0,8R_e$
Fig. 6. The length of fissure: permissible a_d (formula 5) and equivalent a_m (formula 6). The joint welded in the fix PF, $\sigma_r = 0,8R_e$

Wyznaczone długości dopuszczalne a_d szczeliny wskrośnej wg wzoru (5) na podstawie badania udarności 10 złączy o różnym położeniu szczeliny względem spoiny wykonanej w pozycji PF są najniższe w spoinie i wraz ze wzrostem odległości l od niej wzrastają, początkowo nieznacznie w SWC, a następnie coraz szybciej osiągając ponad trzykrotnie większe wartości przy większej odległościach l . Tendencja ta dotyczy zarówno niskiego poziomu obciążenia (rys. 3), jak i wysokiego (rys. 4). Jednak przy wyższym poziomie obciążenia długości szczeliny dopuszczalnej są znacząco mniejsze. Podobne tendencje zmiany dotyczą długości szczeliny równoważnej a_m dla obu poziomów obciążenia. Jednak wyznaczone wartości a_m są wyraźnie większe niż odpowiadające im wartości a_d .

Istotny wpływ na wartość długości szczeliny dopuszczalnej ma stosunek szerokości złącza do długości szczeliny B/a . Przy małej wartości $B/a=3$ długości szczeliny dopuszczalnej a_d dla złącza o wartości $B/a=10$. Wraz ze wzrostem względnej szerokości złącza wpływ ten maleje i np. dla $B/a=100$ wartości a_d są tylko nieznacznie większe niż dla $B/a=10$.



Rys. 7. Długość szczeliny równoważnej a_m , mm (wz. 6) przy $\sigma_r = 0,5R_e$ dla trzech serii próbek pobranych w różnych strefach złącza ze spoiną spawaną w pozycji PA
Fig. 7. The length of equivalent fissure a_m , mm (formula 6) at $\sigma_r = 0,5R_e$ for three series of samples in the fix PA taken in various zones of welded joint

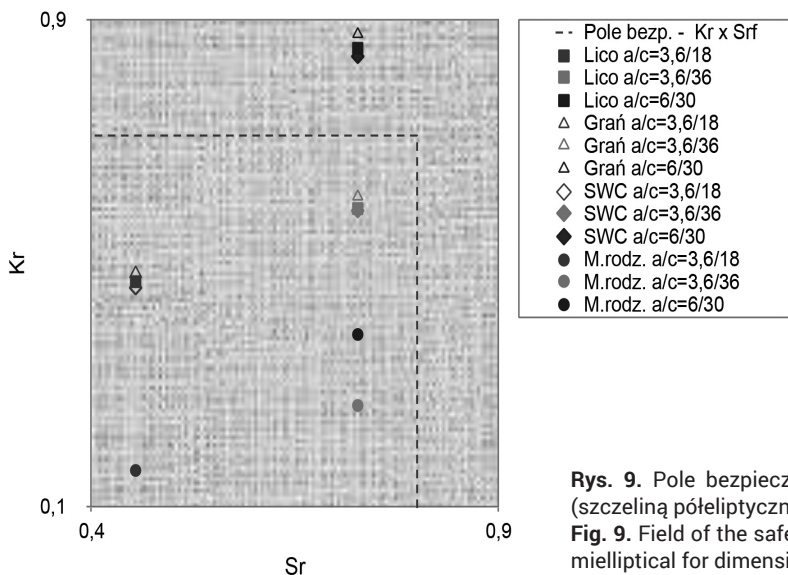


Rys. 8. Długość szczeliny dopuszczalnej a_d , mm (wz. 5 – wartości średnie) dla $\sigma_r = 0,5R_e$ (a) i $\sigma_r = 0,8R_e$ (b). Złącza ze spoiną spawaną w pozycji PA o różnej szerokości względnej (B/a)
Fig. 8. The length of permissible fissure a_d (formula 5 – average values) for $\sigma_r = 0,5R_e$ (a) and $\sigma_r = 0,8R_e$ (b). The welded joints with joint in the fix PA for the various relative width

Obliczone długości szczelin a_m (rys. 7) na podstawie wyników badań udarności trzech próbek w każdej strefie złącza ze spoiną spawaną w pozycji PA wykazywały bardzo małe różnice (podobnie jak długości a_d). Ich wartości były małe i zbliżone do siebie w strefie lica i grani spoiny oraz w SWC. Natomiast w materiale rodzimym były około cztery razy większe niż w wymienionych strefach spoiny. Wartości średnie długości dopuszczalnego pęknięcia a_d dla strefy grani oraz SWC (rys. 8a) są o około połowę mniejsze niż długości równoważnego pęknięcia a_m w tych strefach (rys. 7). W strefie lica spoiny (rys. 8) wartości a_d są najmniejsze, co może wskazywać na większą skłonność do kruchego pęknięcia spoiny spawanej w pozycji PA niż w pozycji PF. Wynikać to może z większego wpływu samoczynnej obróbki cieplnej spoiny wykonanej w pozycji PF na rozdrobnienie ziarna (większa liczba ściegów) niż w pozycji PA. Natomiast w materiale rodzimym wartości a_m oraz a_d

dla szerokich złączy ($B/a \geq 10$) są prawie jednakowe, co można zaobserwować porównując odpowiednie wykresy na rysunkach 7 i 8. Przy wysokim poziomie obciążenia ($\sigma_r = 0,8R_e$) długości a_d dopuszczalnego pęknięcia dla każdej strefy złącza są mniejsze niż przy niskim ($\sigma_r = 0,5R_e$), co wynika z analizy ich wartości przedstawionych na rysunkach: 8a i 8b.

Istnienie niezgodności spawalniczej odkrytej w postaci szczeliny półeliptycznej w złączy spawanym jest mniej niebezpieczne niż szczeliny wszkrośnej. Zagrożenie możliwością pęknięcia (rys. 9) pojawia się przy większych wymiarach szczeliny ($a/c = 6/30$ mm) i stosunkowo wysokim poziomie obciążenia ($\sigma_r = 0,8R_e$, tzn. $S_r = 727$) w licu spoiny, w grani i w SWC. Natomiast szczelina tej wielkości w materiale rodzimym przy tym samym poziomie obciążenia mieści się w polu bezpieczeństwa $K_r \times S_{rI} = 0,71 \times 0,8$ (rys. 9).



Rys. 9. Pole bezpieczeństwa ($K_r \times S_{rI}$) dla złączy spawanych z wadą odkrytą (szczeliną półeliptyczną o wymiarach a/c w mm). Spoina spawana w pozycji PA
Fig. 9. Field of the safety ($K_r \times S_{rI}$) for welded joints with the open defect (the semielliptical for dimensions a/c in mm). The joint welded in the fix PA

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyznaczonych dopuszczalnych wielkości wzdłużnej szczeliny wskrośnej oraz stanu bezpieczeństwa dla szczeliny półeliptycznej w doczołowym złączu spawanym sformułowano następujące spostrzeżenia i wnioski:

Wyznaczone dla różnych stref złącza spawanego długości szczeliny dopuszczalnej ad wg wzoru (5) uwzględniającego naprężenia rzeczywiste (czyli naprężenia nominalne i własne) wskazują, że największe zagrożenie pękaniem występuje w strefie spoiny i w SWC, gdzie długości ad są najmniejsze. Wraz z oddalaniem się położenia szczeliny od osi spoiny jej dopuszczalna długość wzrasta osiągając największą wartość w materiale rodzimym (ok. 4 razy większą niż w spoinie – dla złącza ze spoiną wykonaną w pozycji PA).

Istotny wpływ na wartość długości szczeliny dopuszczalnej a_d ma stosunek szerokości złącza do długości szczeliny B/a . Przy małej wartości $B/a=3$ długości a_d szczeliny dopuszczalnej wynoszą ok. 60% odpowiednich wartości a_d dla $B/a=10$. Ogólnie, ze wzrostem względnej szerokości złącza wpływ ten szybko maleje.

Zastosowanie zależności (6) do wyznaczania długości a_m wskrośnej szczeliny równoważnej, przy naprężeniu rzeczywistym (z uwzględnieniem naprężeń własnych), pozwala uzyskać dobrą korelację wyników długości szczeliny równoważnej i dopuszczalnej określanej wg formuły (5) ale na wyrażnie wyższym poziomie bezpiecznych długości szczeliny. Wyraźne zmiany wyznaczanych wielkości wg obu formuł występują w pobliżu granicy spoiny i SWC.

Zagrożenie możliwością pęknięcia złącza ze szczeliną odkrytą półeliptyczną pojawia się przy większych wymiarach szczeliny ($a/c=6/30$ mm) i stosunkowo wysokim poziomie obciążenia ($\sigma_r = 0,8R_e$, tzn. $S_r=727$) w licu spoiny, w grani i w SWC. Natomiast szczelina tej wielkości w materiale rodzimym przy tym samym poziomie obciążenia mieści się w polu bezpieczeństwa $K_r \times S_{r_f} = 0,71 \times 0,8$.

Literatura

- [1] Kocańda S.: Zmęczeniowe pęknięcie metali, WNT Warszawa 198.
- [2] Rykaluk K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne Wrocław 2000.
- [3] Neimitz A.: Mechanika pęknięcia, PWN Warszawa 1998.
- [4] Brózda J.: Wprowadzenie do mechaniki pęknięcia, Instytut Spawalnictwa Gliwice 2008.
- [5] Prażmowski M., Rozumek D.: Rozwój pęknięć przy cyklicznym zginaniu w złączu cyrkon-stal powstałych w wyniku zgrzewania wybuchowego. Przegląd Spawalnictwa 4/2014 s. 45-50.
- [6] Bański R., Rozumek D.: Rozwój pęknięć zmęczeniowych w bimetalach stal-tytan wykonanych metodą zgrzewania wybuchowego (platerowania). Przegląd Spawalnictwa 4/2012 s. 9.
- [7] Stasiuk P., Karolczuk A., Kuczko W.: Rozkład naprężeń w krzyżowym złączu spawanym z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu spoiny. Przegląd Spawalnictwa 1/2014 s. 29-33.
- [8] Słania J., Stanisławski K., Hyc K.: Ocena przełomów złącza spawanego po próbie łamania. Przegląd Spawalnictwa 12/2013 s. 142-151.
- [9] Wichtowski B.: Obliczenia złącza spawanego poddanych obciążeniom statycznym i zmęczeniowym według Eurokodu 3. Przegląd Spawalnictwa 1/2011 s. 15.
- [10] Wichtowski B., Wichtowski M.: Wytrzymałość zmęczeniowa spoin czółowych z nakładkami wg Eurokodu 3. Przegląd Spawalnictwa 3/2011 s. 36.
- [11] Werner K., Wojsyk K.: Analiza możliwości kruchości pęknięcia spawanych elementów konstrukcji stalowych. Przegląd Spawalnictwa 5/2015 s. 91-93.
- [12] Werner K., Wojsyk K.: Wyznaczanie dopuszczalnej wielkości szczeliny w złączu spawanym ze względu na możliwość jego pęknięcia. Przegląd Spawalnictwa 10/2015 s. 45-48.
- [13] Miśta J.: Ocena dopuszczalności niezgodności spawalniczych dokonywana na podstawie mechaniki pęknięcia w złączach ze stali typu S355 w różnych temperaturach. Praca magisterska pod kier. K. Wojsyka, Częstochowa 2013.
- [14] Pietrzak E.: Wyznaczanie maksymalnych niezgodności spawalniczych na podstawie zbadanych właściwości fizycznych materiału oraz mechaniki pęknięcia. Praca magisterska pod kier. K. Wojsyka, Częstochowa 2012.