

Wyznaczanie wielkości krytycznych odporności na pękanie stali i złączy spawanych

Determination of the critical values of toughness on crack of steels and welded joints

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań różnych gatunków stali i ich złączy spawanych oraz wzory (równania), które zastosowano do wyznaczenia wielkości krytycznych dla kryteriów odporności na pękanie. Dotyczą one zarówno zakresu liniowo-sprężystej, jak i sprężysto-plastycznej mechaniki pęknięcia. Ponadto porównano eksperymentalnie wyznaczone rozwarcie czoła pęknięcia (CTOD) z wartościami obliczonymi według proponowanej w literaturze zależności, określającej jego korelację z wynikami badań udarności stali i złączy spawanych. Oceniono zgodność odporności na pękanie z użyciem dostępnych i znanych równań.

Słowa kluczowe: pękanie; złącze spawane; wielkości krytyczne odporności na pękanie; CTOD

Abstract

The paper presents the results of tests on various steel grades and their welded joints as well as the formulas used to determine the critical values for toughness on crack criteria. They concern both the linear-elastic and the elastic-plastic range fracture mechanics. In addition, experimental and calculated crack tip opening displacement (CTOD) was compared based on their correlation with the results of standard impact tests of steel and welded joints. The compatibility of toughness on crack using different patterns was also evaluated.

Keywords: crack; welded joint; critical values of toughness on crack; CTOD

Wstęp

Wyznaczanie krytycznej wielkości szczeliny w złączu spawanym (elemente konstrukcyjnym) ze względu na możliwość nagłego pęknięcia w jednoosiowym stanie naprężenia rozciągającego oparte jest, zgodnie z zasadami liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (LSMP), na wartości współczynnika intensywności naprężenia K_I na czole centralnej szczeliny o długości $2a$ przechodzącej na wskroś. Kruche – nagłe pękanie elementu (złącza) wystąpi wtedy, gdy współczynnik K_I osiągnie wartość krytyczną K_{Ic} [1,2]:

$$K_I = K_{Ic}. \quad (1)$$

Ten rodzaj pęknięcia jest charakterystyczny dla materiałów kruchych, ale występuje również w materiałach sprężysto-plastycznych np. w stalach przy dominacji płaskiego stanu odkształcenia. Stan taki istnieje w elementach o dużych grubościach przy niskim poziomie naprężenia nominalnego σ względem granicy plastyczności R_e , tj. przy $S_r = \sigma/R_e \leq 0,5$. W wyniku spiętrzenia naprężenia na czole karbu tworzy się strefa plastyczna jako pewne uszkodzenie struktury materiału, ale w tym stanie jest ona bardzo mała (nieco większa jest tylko w warstwie wierzchniej elementu)

i dlatego można ją pominąć [2÷4]. Kryterium LSMP stosuje się też przy wyższym poziomie naprężenia ($0,5 < S_r \leq 0,8$), tj. przy quasi-kruchym pękaniu materiału. W tym przypadku operuje się efektywną wielkością szczeliny a_{ef} [1÷3], tj. sumą rzeczywistej długości szczeliny a i zasięgu strefy plastycznej na jej czole r_p , – czyli $a_{ef} = a + r_p$.

W złączach spawanych niezgodności spawalnicze mogą wystąpić w postaci szczelin odkrytych i zakrytych. Szczeliny odkryte (np. przechodzące na wskroś) wykrywa się i określa ich wielkość optycznie, mierząc ich długość na powierzchni złącza. Natomiast szczeliny zakryte (wewnątrz materiału), widoczne np. na powierzchni przełomów próbek łamanych udarowo [5], można wykrywać i mierzyć za pomocą badań nieniszczących – np. badań ultradźwiękowych lub radiograficznych.

Wartość współczynnika intensywności naprężenia w złączu spawanym wynika zarówno z naprężeń nominalnych pochodzących od obciążeń zewnętrznych, jak i z naprężeń własnych. Wielkość i rozkład naprężeń własnych określa się za pomocą różnych modeli obliczeniowych [2] lub za pomocą analiz numerycznych, bazujących zwykle na metodzie

Dr hab. inż. Krzysztof Werner, prof. PCz; dr inż. Kwiryn Wojsyk – Politechnika Częstochowska; **dr hab. inż. Dariusz Rozumek, prof. PO** – Politechnika Opolska; **mgr inż. Jacek Zajązkowski** – Norsk Sweiseteknikk AS – Filia w Polsce.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: kwerner@bud.pcz.pl

elementów skończonych, jak opisano to dla złącza krzyżowego w pracy [6].

W przypadku elementów stalowych o małej grubości (mniejszych od ok. 10 mm) przy wyższym poziomie naprężenia ($S_r > 0,5$) na czole szczeliny pojawia się duża strefa odkształcenia plastycznego. Zgodnie z założeniami sprężysto-plastycznej mechaniki pęknięcia (SPMP) [1÷4] kryterium pęknięcia powinno uwzględniać w tych warunkach odkształcenie plastyczne na czole szczeliny. O możliwości nagłego pęknięcia decyduje wielkość rozwarcia czola szczeliny δ [2÷4], która po osiągnięciu wartości krytycznej δ_c powoduje nagłe pęknięcie elementu. Wyraża się to następującą zależnością:

$$\delta = \delta_c. \quad (2)$$

Innym kryterium w zakresie SPMP jest całka J wyznaczana jako wielkość energii wymaganej do rozwoju pęknięcia. Według tego kryterium nagły rozwój pęknięcia w materiale wystąpi wtedy gdy całka J osiągnie wartość krytyczną J_c (3):

$$(J = J_c). \quad (3)$$

Jednak w niskich temperaturach, zwykle w temperaturach poniżej -20 °C, znacznie wzrasta kruchość stali. Sygnalizuje ją prawie w 100% krystaliczny przelom próbek przeznaczonych do pomiaru udarności. Można wtedy stosować kryterium LSMP (również przy wyższym zakresie naprężenia $0,5 < S_r \leq 0,8$) zamiast kryteriów SPMP.

Wyznaczanie wielkości krytycznych: odporności na pęknięcie K_{Ic} , rozwarcia czola pęknięcia δ_{Ic} (ang. *crack tip opening displacement – CTOD*) albo całki J_{Ic} wg I modelu wzrostu pęknięcia zgodnie z normami [7÷10] jest trudne i uciążliwe oraz wymaga odpowiedniego wyposażenia laboratorium. Trudności te wynikają ze sposobu wykonania i przygotowania próbek do badań oraz konieczności zachowania odpowiednich warunków i procedury badań [10]. Z tego powodu ciągle poszukuje się zależności, wiążących wyniki standardowych badań właściwości mechanicznych materiału z wartościami krytycznymi parametrów odporności na pęknięcie. Są to najczęściej zależności łączące wyniki pracy udarowego zginania próbek z karbem ostrym Charpy V – KV (wyrażonej w J) z wartościami krytycznymi K_{Ic} i δ_{Ic} , co przedstawiono w pracy [4]. Można spotkać także prace omawiające inne metody określania tych wielkości, np. wyznaczenie wartości K_{Ic} dla powłok natryskiwanych plazmowo na podstawie pomiaru długości spękań wokół odcisku powstałego przy pomiarze twardości metodą Vickersa [11]. Takie alternatywne podejścia do określenia parametrów odporności materiału na pęknięcie są z reguły możliwe do zastosowania w warunkach laboratoriów jakimi dysponuje przemysł.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne spoin złączy wykonanych przy użyciu drutu SF-3AM, $t = -60$ °C

Table 1. Mechanical properties of weld material of joints made using the wire SF-3AM, $t = -60$ °C

R_e [MPa]	R_m [MPa]	R_e/R_m [-]	KV [J]	CTOD _{exp.} [mm]	CTOD _{wz.(8)} [mm]	Błąd B [%]	$W = \frac{CTOD_{wz.(8)}}{CTOD_{exp.}}$
545	601	0,907	130	0,48	0,31	-35	0,65
545	601	0,907	62	0,45	0,15	-67	0,33
601	646	0,930	102	1,02	0,25	-76	0,24
601	646	0,930	77	0,95	0,18	-81	0,19
665	699	0,951	93	1,34	0,22	-83	0,17
665	699	0,951	107	1,39	0,26	-81	0,19

Krytyczne parametry odporności materiału na pęknięcie

Zależności korelacyjne określające parametry krytyczne mechaniki pęknięcia

Na podstawie pracy udarowego łamania KV próbek typu „Charpy V” (wyznaczonej w J) można określić odporność na pęknięcie K_{Ic} (wyrażoną w $MPa\sqrt{m}$) z następujących zależności korelacyjnych [4]:

$$K_{Ic} = \sqrt{0,00022 \cdot E \cdot (KV)^{3/2}}, \quad (4)$$

$$K_{Ic} = \sqrt{0,00137 \cdot E \cdot (KV)}, \quad (5)$$

$$K_{Ic} = 14,5\sqrt{(KV)}, \quad (6)$$

$$K_{Ic} = 0,53(KV) + 57,9. \quad (7)$$

Natomiast krytyczną wartość rozwarcia czola pęknięcia – CTOD (wyrażoną w mm) można określić wzorem korelacyjnym (8), jak wykazano to w pracy [12]:

$$CTOD = \delta_c = 0,0024 \cdot KV \quad (8)$$

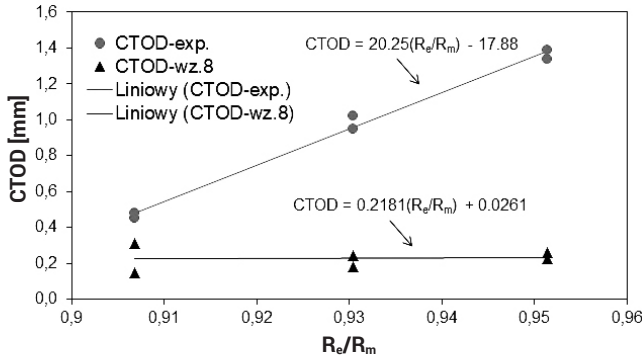
Wyniki badań i obliczeń wartości krytycznych K_{Ic} i CTOD

Badania podstawowych właściwości mechanicznych, tj. granicy plastyczności R_e , wytrzymałości na rozciąganie R_m i pracy udarowego zginania KV przeprowadzono dla spoin złączy spawanych wykonanych z blachy o grubości 40 mm ze stali YP355. Zastosowano materiał dodatkowy w formie drutu proszkowego do spawania łukowego o średnicy 1,2 mm zgodnego z normą EN ISO 17632-A: T 46 4 Z P M 2 H5 o nazwie handlowej SF-3AM ($R_e = 550$ MPa, $R_m = 590$ MPa, $R_e/R_m = 0,932$, $A_5 = 29\%$, KV -40 °C = 128 J). Spoiny złączy spawanych dwustronnie (ukosowanie X) wykonano metodą MAG w osłonie mieszanki gazowej M21 (Ar+CO₂) wg PN-EN ISO 14175. Wyznaczono eksperymentalnie na próbkach zginanych, zgodnie z normą [9], krytyczne wartości rozwarcia czola pęknięcia δ_c (CTOD) w spoinie. Badania krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia CTOD i pracy udarowego zginania KV oraz podstawowych właściwości mechanicznych materiału spoiny przeprowadzono w temperaturze $t = -60$ °C. Wartości średnie wyników badań w tej temperaturze oraz obliczeń CTOD wg wzoru (8) zestawiono w tabelicy 1.

Na podstawie wyników badań i obliczeń określono błąd względny B – czyli różnicę między wartością CTOD obliczoną ze wzoru (8) a jej wynikiem wyznaczonym eksperymentalnie, odniesioną do tego wyniku (tabl. 1):

$$B = \frac{CTOD_{wz.(8)} - CTOD_{exp.}}{CTOD_{exp.}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Przedstawione w tabelicy I wyniki CTOD obliczone wg wzoru (8) różnią się dość znacznie od wyników wyznaczonych eksperymentalnie, zwłaszcza przy wysokich wartościach granicy plastyczności – bliskich wytrzymałości na rozciąganie (np. dla $R_e/R_m = 0,951$ |B| > 80%). Należy też zauważyć, że wielkość rozwarcia pęknięcia wyznaczona doświadczalnie rośnie szybko i prawie liniowo wraz ze wzrostem wartości R_e/R_m (rys. 1), podczas gdy wartość tego parametru obliczona ze wzoru (8) na podstawie pracy udarowego zginania KV jest w przybliżeniu niemal stała.



Rys. 1. Krytyczna wartość rozwarcia czoła pęknięcia w spoinie złączy wykonanych przy użyciu drutu SF-3AM
Fig. 1. Critical value of crack tip opening displacement in weld material of joints made using the wire SF-3AM

Według liniowych zależności określających zmianę wielkości CTOD (rys. 1) zbliżone wartości wyników obliczeniowych i eksperymentalnych rozwarcia czoła pęknięcia uzyskano by po ekstrapolacji tych zależności do wartości R_e/R_m równej ok. 0,9 (dla $R_e/R_m = 0,894$ $CTOD_{wz.(8)} = CDOD_{exp.} = 0,22$).

Aby uzyskać zbliżone wartości CTOD ze wzoru (8) do wyników eksperymentu należałoby wprowadzić do niego współczynnik poprawkowy (korekcyjny) W, dla badanego zakresu wartości R_e/R_m , który określono jako:

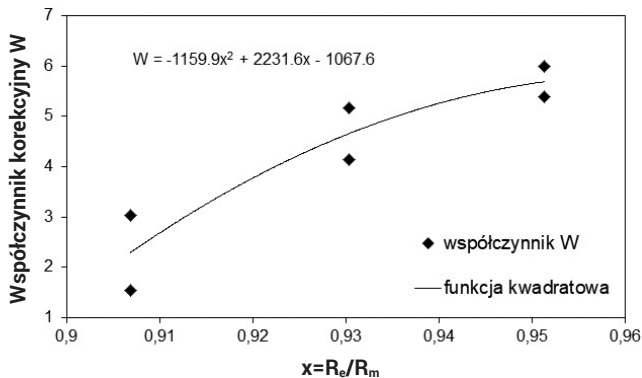
$$W = \frac{CTOD_{wz.(8)}}{CTOD_{exp.}} \quad (10)$$

Wtedy rzeczywistą wartość rozwarcia czoła pęknięcia $CTOD_{rzecz.}$ można opisać zależnością:

$$CTOD_{rzecz.} = CTOD_{exp.} = W \cdot CTOD_{wz.(8)} \quad (11)$$

Wielkość współczynnika W można wyznaczyć za pomocą kwadratowej funkcji aproksymującej wyniki określone wzorem (10), co przedstawiono na rysunku 2.

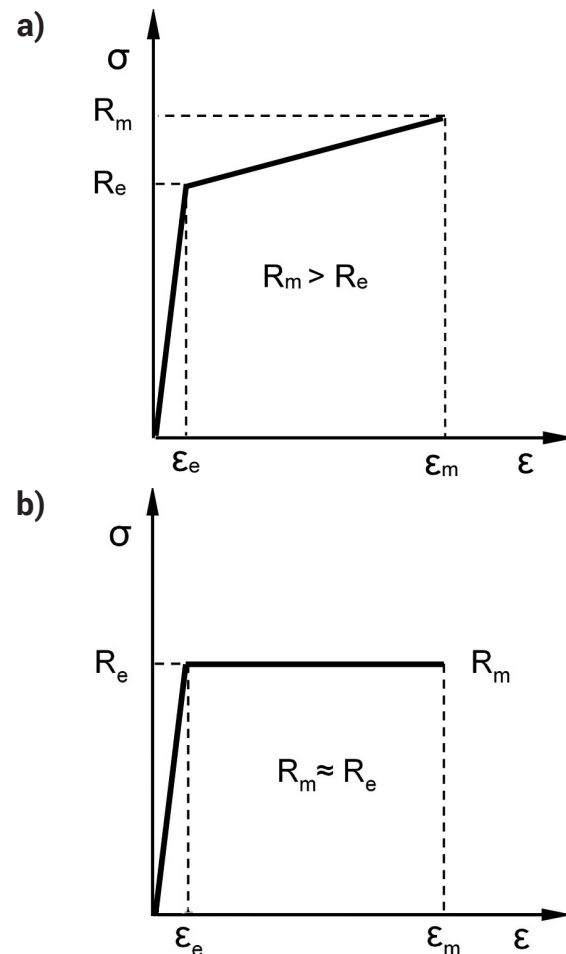
Omówioną wyżej rozbieżność między wynikami CTOD obliczonymi wg wzoru (8) a wynikami uzyskanymi eksperymentalnie można tłumaczyć tym, że empiryczny wzór (8) został określony dla typowych stali konstrukcyjnych – tj. materiałów o modelu sprężysto-plastycznym z umocnieniem



Rys. 2. Zmiana wartości współczynnika korekcyjnego W wg wzoru (10) dla materiału spoin wykonanych przy użyciu drutu SF-3AM
Fig. 2. Change of value of the corrective coefficient W according to example (10) for material welds made using the wire SF-3AM

(rys. 3a). Stale kwalifikowane do tego modelu charakteryzują się wyraźnie niższą granicą plastyczności w porównaniu z wytrzymałością na rozciąganie ($R_e/R_m < 0,9$). Spiętrzone naprężenie na czole szczeliny przekraczające granicę plastyczności takiego materiału powoduje jego umocnienie, to jest wzrost poziomu naprężenia potrzebnego do dalszego odkształcenia plastycznego – umożliwiającego plastyczny wzrost szczeliny. W związku z tym o nagłym rozwoju pęknięcia będzie w dużym stopniu decydować kruchość materiału, a nie jego plastyczność. Dlatego krytyczne rozwarcie pęknięcia w takim materiale będzie niewielkie, a jego wartość CTOD można z niewielkim błędem obliczyć ze wzoru (8).

Natomiast w materiale o poziomie R_e bliskim R_m ($R_e/R_m > 0,9$), tj. w materiale o znacznej ciągliwości – zbliżonym do modelu sprężysto-plastycznego bez umocnienia (rys. 3b), spiętrzone naprężenie na czole szczeliny po przekroczeniu granicy plastyczności spowoduje utworzenie dużej strefy plastycznej o znacznym odkształceniu. W wyniku tego wzrośnie wartość krytyczna CTOD w porównaniu do materiału o charakterystyce zbliżonej do modelu sprężysto-plastycznego z umocnieniem. Wzrost ten może wystąpić nawet w warunkach niskich temperatur, jak w omówionym przypadku zastosowanego materiału dodatkowego do spawania. Wynikać to może z faktu, że oprócz kruchego pęknięcia, wystąpi też pęknięcie plastyczne (ciągliwe), co potwierdza wysoki poziom pracy udarowego łamania próbek KV badanego materiału w niskich temperaturach. Nie uwzględnia tego wzór (8) i dlatego wyniki obliczeń CTOD wg tego wzoru będą znacznie zaniżone (ujemne wartości błędów) w porównaniu z wynikami eksperymentu.



Rys. 3. Modele materiału ze względu na właściwości mechaniczne: a) materiał sprężysto-plastyczny z umocnieniem, b) sprężysto – idealnie-plastyczny (bez umocnienia)
Fig. 3. Models of the material because of mechanical properties: a) the elastic-plastic material with strengthen, b) the elastic – ideal-plastic material (without the strengthen)

Tablica II. Właściwości mechaniczne spoin wykonanych przy użyciu drutu SF-3AM ($t = -36\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Table II. Mechanical proprieties of weld material of joints made using the wire SF-3AM ($t = -36\text{ }^{\circ}\text{C}$)

R_e [MPa]	R_m [MPa]	R_e/R_m [-]	KV [J]	CTOD _{exp.} [mm]	CTOD _{wz.(8)} [mm]	Błąd B [%]
545	602	0,905	78,7	0,27	0,19	-30
550	609	0,903	115,3	0,36	0,28	-22
552	580	0,952	101,7	0,66	0,24	-64

Reasumując można powiedzieć, że praca udarowego zginania próbek odzwierciedla w materiale o małym stosunku R_e/R_m głównie niewielką pracę końcowego zniszczenia próbek poprzez kruche pęknięcie. Natomiast w materiale o dużej wartości R_e/R_m odzwierciedla też w znacznym stopniu pracę pęknięcia ciągłego, co powoduje zwiększenie błędów obliczeń wartości CTOD wg wzoru (8).

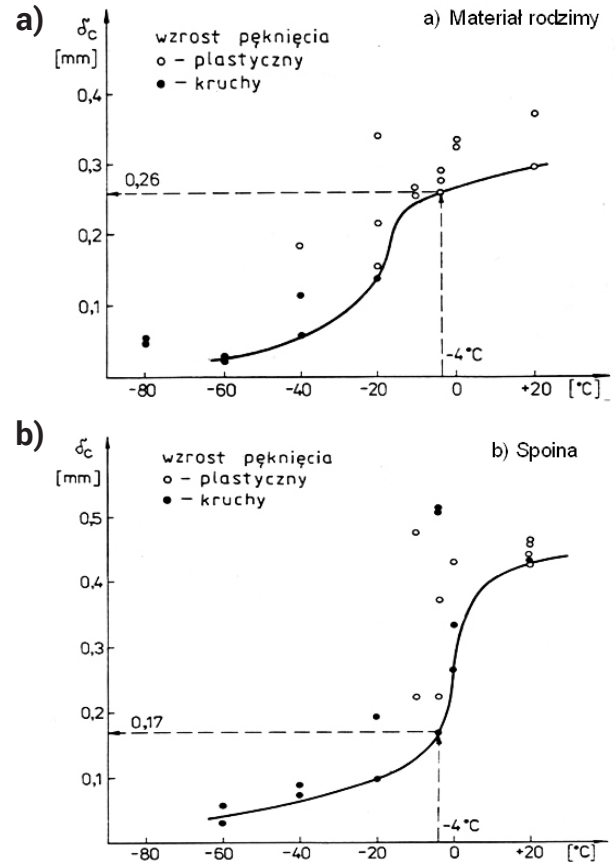
Podobnie małe wartości obliczeń CTOD wg wzoru (8), wyraźnie mniejsze niż wyniki eksperymentalne, uzyskano dla spoiny złączy blach o grubości 50 mm stali YP360 badanych w temperaturze $t = -36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tabl. II). Złącza spawane dwustronnie (ukosowanie X) wykonano przy użyciu drutu SF-3AM – tego samego jak w poprzedniej serii badań dla $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ponadto przeprowadzono badania własne oraz wykorzystano dane zawarte w pracy [3] dotyczące złączy spawanych dwustronnie (ukosowanie X) wykonanych ze stali 18G2ANb, której obecnie odpowiednikiem jest stal E420. Podstawowe właściwości mechaniczne tej stali wyznaczone na próbkach kontrolnych były wysokie i wynosiły: $R_e = 455\text{ MPa}$, $R_m = 608\text{ MPa}$, KV = 119,2 J, $A_5 = 28\%$. Złącza z blachy o grubości 30 mm wykonano metodą spawania łukowego przy użyciu zasadowych elektrod otulonych EB 1.50. Wyniki badań przedstawiono w tablicy III. Badania wykazały, że wartości krytyczne CTOD obliczone ze wzoru (8) dla materiału rodzimego w temp. $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $t = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ były bardzo bliskie wynikom tego parametru wyznaczonym eksperymentalnie (tabl. III). Związane to jest niewątpliwie z właściwościami materiału rodzimego ($R_e/R_m = 0,748$), który zachowuje się zgodnie z modelem materiału sprężysto-plastycznego z umocnieniem.

Podobnie zbliżone wartości obliczeń i badań CTOD uzyskano dla spoiny tych złączy w $t = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale wartość CTOD obliczona ze wzoru (8) była wyraźnie wyższa niż wynik uzyskany z eksperymentu (B = 24%). Związane to może być z pojawieniem się w tej temperaturze cech kruchego wzrostu pęknięcia (rys. 4b), podczas gdy w materiale rodzimym dominował plastyczny wzrost pęknięcia (rys. 4a). Stwierdzono to na przełomach próbek przy badaniu CTOD w tych strefach złącza (rys. 4).

W temp. $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ w obu strefach złącza wartości CTOD były wyższe niż w temp. $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, ponieważ wzrost pęknięcia w materiale rodzimym miał charakter plastyczny (rys. 4a), a w spoinie dominowały również cechy pęknięcia plastycznego (rys. 4b).

Kolejny materiał, który badano to stal S355 (dawna stal 18G2A). Wyniki badań i obliczeń przedstawiono w tablicy IV. Złącza spawane łukowo dwustronnie (ukosowanie X)



Rys. 4. Wpływ temperatury na wartość krytyczną rozwarcia czoła pęknięcia CTOD oraz na wzrost pęknięcia w materiale rodzimym (a) i w spoinie (b) złącza spawanego wykonanego ze stali 18G2ANb (E420) przy użyciu elektrod EB 1.50 [3]

Fig. 4. Influence of temperature on the critical value of crack tip opening displacement CTOD and on crack growth in original material (a) and in weld (b) of the welded joint made from 18G2ANb steel (E420) use the electrodes EB 1.50 [3]

z blachy o grubości 12 mm wykonano przy użyciu tych samych elektrod otulonych jak dla stali E420. Materiał rodzimy miał cechy materiału sprężysto-plastycznego z umocnieniem ($R_e/R_m = 0,639$). Wartości CTOD obliczone wg wzoru (8) i wyznaczone eksperymentalnie dla tej stali były zbliżone. Natomiast w spoinie ze względu na dominację cech pęknięcia plastycznego ($R_e/R_m = 0,920$) wyniki obliczeń CTOD wg wzoru (8) były wyraźnie niższe niż uzyskane eksperymentalnie.

Tablica III. Właściwości złączy ze stali 18G2ANb (E420) spawanych zasadowymi elektrodami otulonymi EB 1.50

Table III. Mechanical proprieties of welded joints from 18G2ANb steel (E420) made using the basic coated electrodes EB 1.50

t [$^{\circ}\text{C}$]	Strefa złącza	R_e [MPa]	R_m [MPa]	R_e/R_m [-]	KV [J]	CTOD _{exp.} [mm]	CTOD _{wz.(8)} [mm]	Błąd B [%]
20	Materiał rodzimy	455	608	0,748	126	0,298	0,301	1
	Spoina	520	570	0,912	150	0,427	0,361	-15
-4	Materiał rodzimy	460	610	0,754	110	0,260	0,265	2
	Spoina	525	585	0,897	88	0,170	0,211	24

Tablica IV. Właściwości mechaniczne złączy spawanych ze stali S355 przy użyciu zasadowych elektrod otulonych EB 1.50
Table IV. Mechanical properties of welded joints from S355 steel made using the basic coated electrodes EB 1.50

t [°C]	Strefa złącza	R _e [MPa]	R _m [MPa]	R _e /R _m [-]	KV [J]	CTOD _{exp.} [mm]	CTOD _{wz.(8)} [mm]	Błąd B [%]
20	Materiał rodzimy	365	571	0,639	140	0.302	0,336	11
	Spoina	520	565	0,920	116	0.395	0,279	-39

Podobnie jak przy eksperymentalnym wyznaczeniu wartości CTOD tak i przy wyznaczaniu odporności na pękanie K_{IC} należy liczyć się z trudnościami wynikającymi z wymogów przygotowania próbek oraz stosowania odpowiedniej procedury badań. Dlatego autorzy podjęli się oceny możliwości zastosowania wzorów: (4)÷(7) opisujących korelację między odpornością na pękanie K_{IC} a pracą udarowego zginania KV. Wzór określający K_{IC} na podstawie właściwości mechanicznych materiału takich jak: granica plastyczności R_e, moduł sprężystości podłużnej E oraz krytyczna wartość rozwarcia pęknięcia na czole szczeliny δ_{IC} albo krytyczna wartość całki J_{IC} to znana z literatury [1] zależność:

$$K_{IC} = \sqrt{(R_e \cdot \delta_{IC} \cdot E)} = \sqrt{(J_{IC} \cdot E)} \quad (12)$$

Do praktycznej oceny odporności na pękanie stosowane są niekiedy inne zależności – np. zależność określająca wymaganą odporność na pękanie K_{IR}, która stosowana jest na Słowacji zgodnie z normą [13] w postaci:

$$K_{IR} = R_{eg} \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,001 \cdot a_F \cdot k_c \cdot (2k_s - 1)} \quad [MPa\sqrt{m}] \quad (13)$$

gdzie:

R_{eg} – granica plastyczności blachy o grubości g (w mm),
a_F = 0,2g – normatywna max. wielkość szczeliny, pęknięcia lub wady (zakres 5÷20 mm),
k_c = 1,5, k_s = 2 – współczynniki.

Autorzy pracy dokonali porównania wartości K_{IC} obliczonych wg różnych wzorów korelacyjnych i ich zgodności z wymaganą odpornością na pękanie K_{IR}, wyznaczoną zgodnie z ujętą w normie zależnością (13).

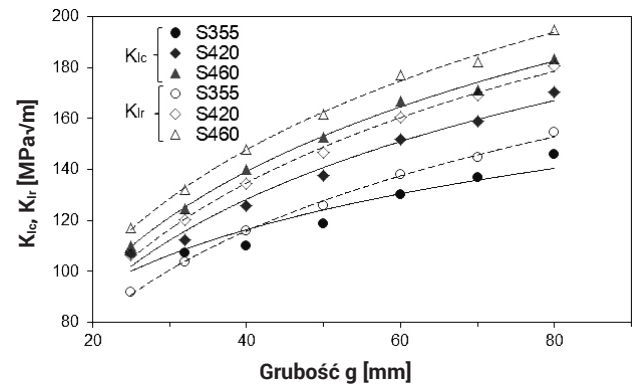
W tym celu przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń tych wielkości dla trzech gatunków drobnziarnistych stali spawalnych S355, S420, S460. Stale te w formie blach były normalizowane po obróbce, tj. po ulepszeniu cieplno-mechanicznym (walcowaniu). Blachy miały różne grubości g w przedziale g = 25÷80 mm i w związku z tym różne wartości granicy plastyczności R_{eg} (malejące ze wzrostem grubości): R_{eg} = 345÷325 MPa dla stali S355, R_{eg} = 400÷380 MPa dla stali S420 i R_{eg} = 440÷410 MPa dla stali S460. Są to stale wykazujące cechy zgodne z modelem materiału sprężysto-plastycznego z umocnieniem (R_e/R_m < 0,9). Wymienione stale stosowane są na elementy konstrukcyjne – np. na przęsła mostów drogowych.

Najlepszą zgodność wyników obliczeń wartości K_{IC} z zależnością określającą K_{IR} (wz. 13) uzyskano dla wzoru (5), co przedstawiono na rysunku 5. Dodatkowo wartości K_{IC} wyznaczone wg tego wzoru są niższe niż K_{IR}, co zwiększa stan bezpieczeństwa elementu konstrukcyjnego.

Jednak jeszcze niższe wyniki obliczeń K_{IC} uzyskuje się stosując wzór (6), co przedstawiono na rysunku 6, ale ich zgodność z wielkościami K_{IR} jest mniejsza niż przy zastosowaniu wzoru (5).

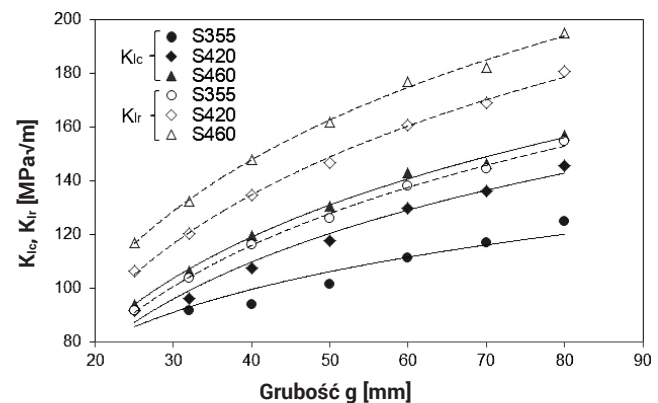
Natomiast wyniki obliczeń ze wzoru (6) są bardzo bliskie wynikowi uzyskanym z klasycznej zależności (12), do której podstawiono wartości δ_{IC} wyznaczone na podstawie rozwarcia pęknięcia KV wg wzoru (8). Widać to bardzo wyraźnie na rysunku 7 (zwłaszcza w stalach S420 i S460). Wzrosty wartości K_{IC} i K_{IR} wraz ze zwiększaniem grubości blach, przedstawione na rysunkach 4÷7, aproksymowano funkcjami logarytmicznymi o wysokich współczynnikach korelacji.

W prezentowanym artykule nie zamieszczono wykresów dla wartości K_{IC} wyznaczonych ze wzoru (4) i (7). Wyniki te w przypadku wzoru (4) są mocno zawyżone w stosunku do wartości K_{IR} wyznaczonych ze wzoru (13), a w przypadku wzoru (7) są mocno zaniżone.



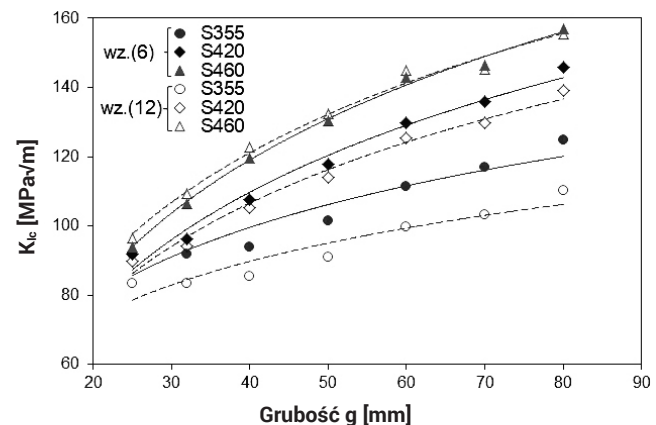
Rys. 5. Odporność na pękanie: K_{IC} wyznaczana ze wzoru (5) i K_{IR} ze wzoru (13)

Fig. 5. Fracture toughness: K_{IC} counted from formula (5) and K_{IR} from formula (13)



Rys. 6. Odporność na pękanie: K_{IC} wyznaczana ze wzoru (6) i K_{IR} ze wzoru (13)

Fig. 6. Fracture toughness: K_{IC} counted from formula (6) and K_{IR} from formula (13)



Rys. 7. Odporność na pękanie: K_{IC} wyznaczana ze wzoru (6) i ze wzoru (12)

Fig. 7. Fracture toughness: K_{IC} counted from formula (6) and from formula (12)

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i obliczeń analitycznych wielkości krytycznych określających odporność na pękanie stali i złączy spawanych można stwierdzić, że dla proponowanych wzorów występuje słabsza lub lepsza korelacja wyników obliczeń i badań eksperymentalnych. Zależy to zarówno od badanego materiału i spoiny, jak również od budowy wzorów stosowanych do obliczeń inżynierskich.

W przypadku materiału rodzimego i materiału spoiny badanych złączy spawanych o modelu sprężysto-plastycznym z umocnieniem, tj. dla ilorazu $R_e/R_m < 0,9$ zgodność wyników obliczeń krytycznego rozwarcia pęknięcia CTOD na podstawie pracy udarowego zginania KV ich próbek jest dobra. Natomiast dla materiałów o modelu zbliżonym do ciała sprężysto-idealnie plastycznego (bez umocnienia) tj. dla $R_e/R_m > 0,9$ zgodność ta jest znacznie gorsza. Wyniki CTOD uzyskane eksperymentalnie w tym przypadku są wyraźnie wyższe niż wyniki obliczeń ze wzoru (8). Tę prawidłowość stwierdzono nie tylko w temperaturze otoczenia (+20 °C), ale także w temperaturach obniżonych.

Wyniki obliczeń wartości K_{Ic} na podstawie pracy udarowego zginania próbek KV wykazały dobrą zgodność z wymaganą odpornością normową na pękanie K_{Ic} (wz. 13) w przypadku dwóch wzorów korelacyjnych (wz. 5 i 6). Ponadto wartości obliczone ze wzoru (6) były bardzo bliskie wartościom tego parametru określonego klasyczną zależnością (12) stosowaną w przeliczeniach wartości parametrów odporności na pękanie, tj. K_{Ic} , δ_{Ic} oraz J_{Ic} .

Literatura

- [1] Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali, WNT Warszawa 1985.
- [2] Neimitz A.: Mechanika pęknięcia, PWN Warszawa 1998.
- [3] Brózda J.: Wprowadzenie do mechaniki pęknięcia, Instytut Spawalnictwa Gliwice 2008.
- [4] Rykaluk K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne Wrocław 2000.
- [5] Słania J., Stanisławski K., Hyc K.: Ocena przelomów złączy spawanych po próbie łamania, Przegląd Spawalnictwa 12/2013, s. 142-151.
- [6] Stasiuk P., Karolczuk A., Kuczko W.: Rozkład naprężeń w krzyżowym złączu spawanym z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu spoiny, Przegląd Spawalnictwa 1/2014, s. 29-33
- [7] PN-EN ISO 12737:2006 Metale. Określenie odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia.
- [8] PN-EN ISO 15653:2010 Materiały metalowe – Metoda badania dotycząca wyznaczania quasistatycznej odporności na kruche pękanie spoin.
- [9] BS 7448-1:1991 Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials.
- [10] Blicharski M.: Inżynieria materiałowa, Warszawa, WNT, 2014.
- [11] Michałak M., Łatka L., Sokołowski P.: Porównanie właściwości mechanicznych powłok natryskiwanych plazmowo proszkowo i z zawieszin, Przegląd Spawalnictwa 10/2017, s. 56-60.
- [12] Werner K., Wojsyk K.: Analiza możliwości kruchego pęknięcia spawanych elementów konstrukcji stalowych, Przegląd Spawalnictwa 5/2015, s. 91-93.
- [13] STN EN 1993-1-10/NA čl. NB1.1 vzt'ah (1): Material toughness and trough-thickness properties (Eurocode 3: Design of steel structures).