

Badanie właściwości mechanicznych złączy z niskowęglowych stali Cr-Mo spawanych laserowo

Testing the low carbon Cr-Mo steel parts for mechanical properties of the laser welded joints

IHOR DZIOBA
WŁODZIMIERZ ZOWCZAK
JUSTYNA KASIŃSKA
TADEUSZ PAŁA *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.1.4

Prezentowano wyniki badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych złączy spawanych laserowo, wykonanych z dwóch gatunków stali: 16Mo3 i 13CrMo4-5. Wyznaczono rozkład twardości w złączach oraz charakterystyki wytrzymałości i odporności na pękanie materiału w różnych strefach tych złączy. Uzyskane wyniki potwierdziły, że techniki spawania laserowego pozwalają na uzyskanie spoin o dobrej jakości i wysokiej wytrzymałości. **SŁOWA KLUCZOWE:** spawanie laserowe, mikrostruktura, odporność na pękanie

Presented in the paper are the results of microstructural examination as well as those of mechanical tests to the laser welds joining the parts made from steel grades: 16Mo3 and 13CrMo4 5 respectively. The weld joint areas were tested for disposition of specific hardness points and for tensile strength and fracture toughness as revealed in particular weld zones. The obtained results confirmed the laser welding techniques to be adequate to produce joints of high quality and strength.

KEYWORDS: laser welding, microstructure, tensile properties, fracture toughness

W produkcji kotłów i wykonywaniu różnego rodzaju instalacji grzewczych istotną rolę odgrywa spawanie elementów stalowych. Zdarza się, że łączone elementy są obciążone wysokim ciśnieniem i poddane działaniu wysokiej temperatury, a jakość spoin często decyduje o trwałości całej instalacji. W branży energetycznej większość połączeń spawanych wykonuje się metodami tradycyjnymi – palnikami łukowymi lub plazmowymi.

Niniejsza praca została zrealizowana w ramach programu badawczego „Technologie laserowego spawania dla energetyki i ochrony środowiska”, którego celem jest opracowanie odpowiednich technologii spawania elementów konstrukcyjnych. Przedstawiono w niej wyniki badań dwóch typów złączy spawanych laserowo, w których materiałem rodzimym była stal 16Mo3 lub 13CrMo4-5 (obie nadają się do spawania metodami konwencjonalnym). Są to stale niskowęglowe, chromowo-molibdenowe, o osnowie ferrytycznej. Zawartość wspomnianych składników stopowych zwiększa odporność na podwyższone temperatury i korozję. Wyroby z tych stali znajdują zastosowanie w energetyce cieplnej, w tym w rurociągach transportujących gorące ciecze [1-4]. Skład chemiczny stali 16Mo3 i 13CrMo4-5 pokazano w tabl. I.

Spawanie laserowe przeprowadzono na płaskich płytach o grubości 6 mm z użyciem lasera CO₂, wyposażonego w głowicę dwuogniskową. W tym przypadku wiązka laserowa jest optycznie podzielona na pół, a obie części są zogniskowane na płaszczyźnie prostopadłej do osi, w odległości 0,7 mm jedna od drugiej. Długość każdej z ogniskowych wynosi 200 mm.

TABLICA I. Skład chemiczny badanych stali

Stal	16Mo3	13CrMo4-5
Pierwiastek		
C, %	0,12±0,20	0,10±0,18
Si, %	0,35	0,15±0,35
Mn, %	0,40±0,90	0,40±0,70
P, %	0,025	0,04
S, %	0,01	0,04
Cr, %	0,30	0,30±0,60
Mo, %	0,25±0,35	0,50±0,65
Ni, %	0,30	0,30
N/V, %	0,012	0,22±0,35
Cu, %	0,30	0,25

wa jest optycznie podzielona na pół, a obie części są zogniskowane na płaszczyźnie prostopadłej do osi, w odległości 0,7 mm jedna od drugiej. Długość każdej z ogniskowych wynosi 200 mm.

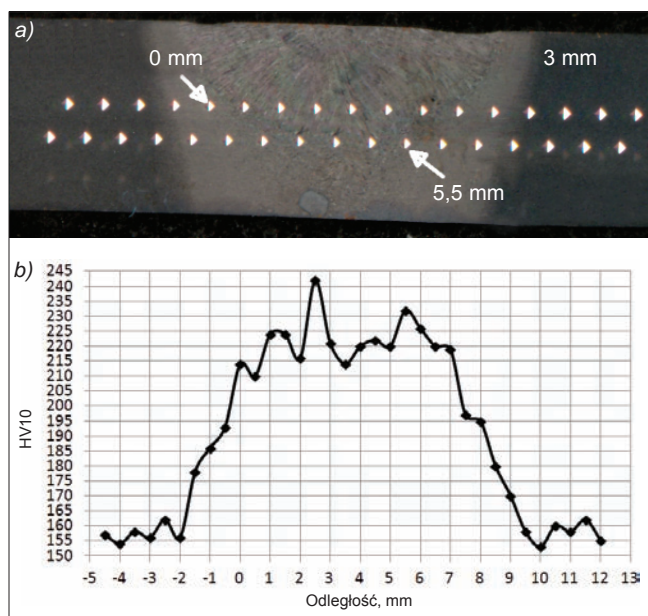
Podczas spawania stali 13CrMo4-5 ogniska były usytuowane wzdłuż kierunku spawania, prędkość posuwu wynosiła 700 mm/min, a moc wiązki – 6 kW, natomiast gazem osłonowym był hel (He). W procesie spawania stali 16Mo3 ogniska były usytuowane wzdłuż prostej prostopadłej do kierunku ruchu głowicy. Zastosowanie tego układu optycznego miało na celu zwiększenie szerokości spoiny – tak by właściwości mechaniczne w kierunku poprzecznym nie zmieniały się zbyt gwałtownie. Spawanie przeprowadzono z prędkością 400 mm/min, wiązką o mocy 5 kW i w osłonie mieszanki gazów: 70% He, 28% Ar i 2% O₂.

Dalej omówiono mikrostrukturę i właściwości materiału w złączu spawanym.

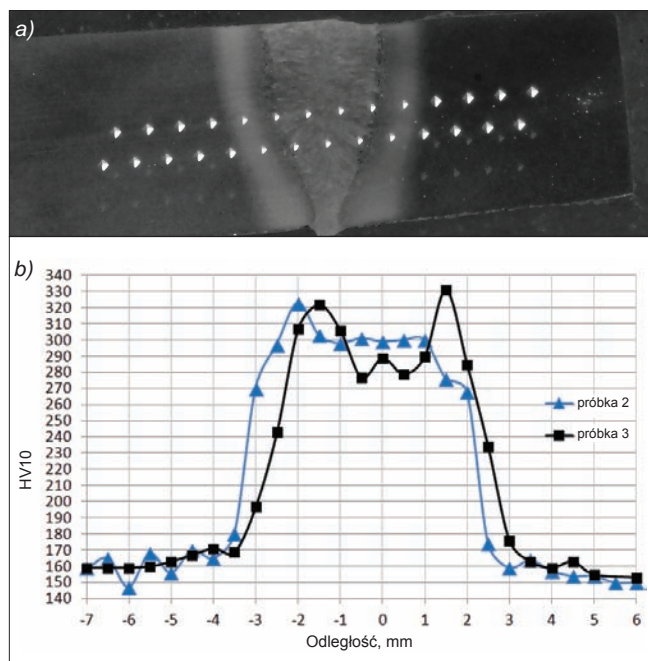
Rozkłady twardości

Na pierwszym etapie badań wykonano pomiary rozkładów twardości w złączach spawanych. Na przedstawionym zdjęciu (rys. 1) widoczne są odciski – w odstępach co 1 mm – po wykonaniu pomiaru twardości metodą Vickersa przy obciążeniu 10 N. Szerokość spoiny (przetopu) przy licu jest równa ok. 9 mm, w środkowej części zwęża się do 7 mm, a następnie jeszcze maleje pomiędzy środkiem a granią do ok. 4 mm. Po obu stronach przetopu wyraźnie widać strefę całkowitej normalizacji o szerokości ok. 1,5±2 mm. Pomiary twardości wykonano wzdłuż linii poprowadzonej w połowie grubości płyty. W materiale spoiny twardość wynosi ok. 220±230 HV10. W materiale strefy wpływu ciepła na odcinku 3 mm zanotowano równomierne obniżenie twardości do poziomu ok. 155±165 HV10, odpowiadającego twardości materiału rodzimego.

* Dr hab. Ihor Dzioba prof. PŚk (pkmid@tu.kielce.pl), mgr inż. Tadeusz Pała (tadeusz.pala@gmail.com) – Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej; dr hab. inż. Włodzimierz Zowczak prof. PŚk (wzowczak@tu.kielce.pl) – Katedra Przemysłowych Systemów Laserych Politechniki Świętokrzyskiej; dr inż. Justyna Kasińska (kasinska@tu.kielce.pl) – Katedra Technik Komputerowych i Uzbrojenia Politechniki Świętokrzyskiej



Rys. 1. Spoina laserowa złącza ze stali 16Mo3 (a), rozkład twardości w złączu spawanym (b)



Rys. 2. Spoina laserowa złącza ze stali 13CrMo4-5 (a), rozkład twardości w złączu spawanym w próbkach 2 i 3 (b)

Szerokość spoiny w złączu ze stali 13CrMo4-5 (rys. 2a) od strony lica jest równa 3,5 mm, w środkowej części nieco się zwęża – do 3 mm, a następnie zmniejsza się do 1,5 mm w pobliżu grani. Szerokość strefy całkowitej normalizacji wynosi od 1,5 mm w środkowej części i od strony lica, a od strony grani wzrasta do 2 mm. Rozkłady twardości mierzone na dwóch próbkach przedstawiono na rys 2b. Twardość materiału w pobliżu osi spoiny jest równa 280÷300 HV10, na pograniczu przetopu i materiału rodzimego rośnie do 320÷330 HV10, a w strefie wpływu ciepła równomiernie się obniża do poziomu właściwego dla materiału rodzimego – ok. 160 HV10.

Mikrostruktura złącza ze stali 16Mo3

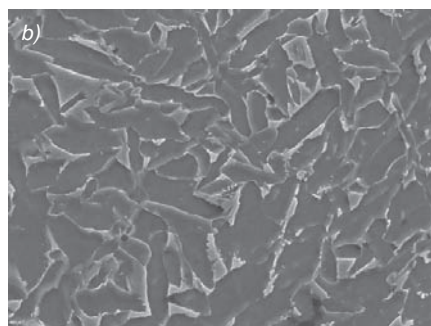
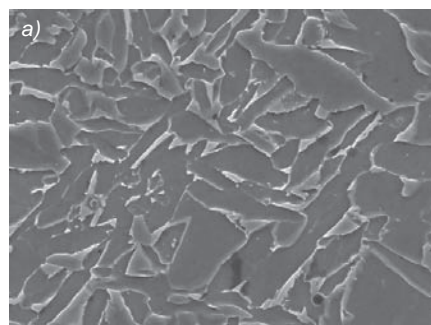
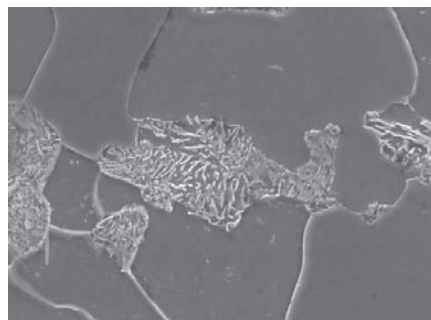
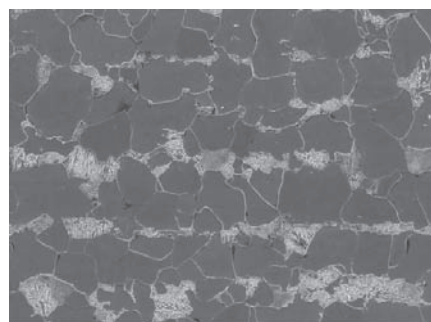
Mikrostruktura materiału rodzimego – stali 16Mo3 o twardości 155÷160 HV10 – jest typu ferrytyczno-perlitycznego, z ziarnami ferrytu o wymiarach 8÷12 μm (rys. 3). Występuje

tu wyraźna pasmowość obszarów perlitu. W koloniach perlitu widoczna jest budowa płytkowa.

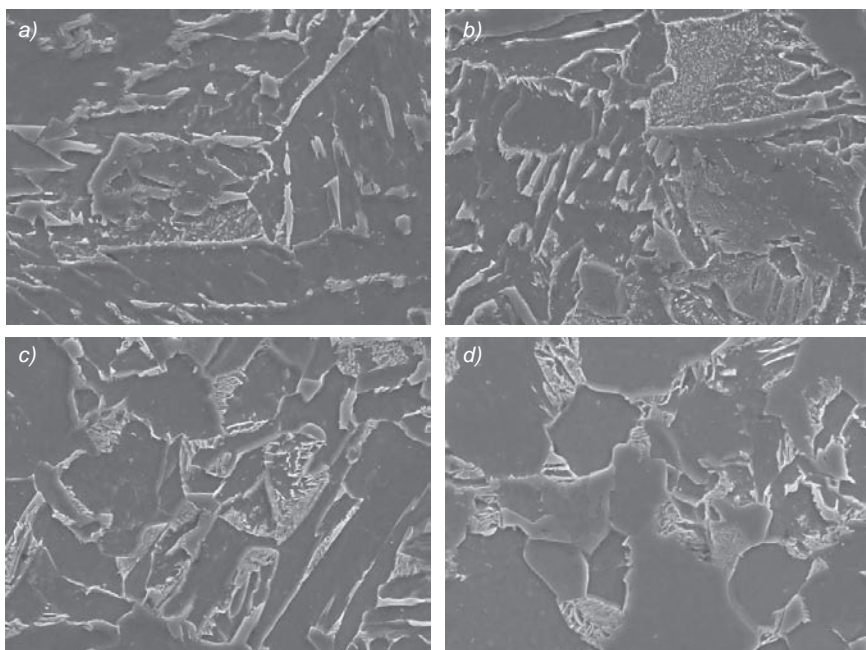
W złączu spawanym ze stali 16Mo3 w środkowej części materiału przetopu oraz przy linii wtopienia (ok. 1,5 mm od osi) obserwowano podobną mikrostrukturę drobnoziarnistego ferrytu-bainitu o wielkości ziarna 2÷5 μm i twardości 210÷230 HV10 (rys. 4). W materiale spoiny zauważono oddzielne sferoidalne cząstki o średnicy 300÷500 nm.

W strefie wpływu ciepła typ mikrostruktury zmienia się wraz z oddalaniem się od spoiny. W odległości 2,5÷3 mm od osi spoiny (przy linii wtopienia, ok. 0,5 mm od przetopu) występuje mikrostruktura bainityczno-ferrytyczna o twardości ok. 200÷220 HV10, która powstaje w wyniku procesu normalizacji (rys. 5a i b). W odległości 4÷5 mm od osi spoiny typ mikrostruktury transformuje się do ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej (rys. 5c i d), a twardość materiału spada do 170÷180 HV10. W odległości ok. 5,5 mm od osi spoiny (3 mm od linii wtopienia) i dalej obserwowano perlityczno-ferrytyczną mikrostrukturę odpowiadającą materiałowi rodzimemu (rys. 3).

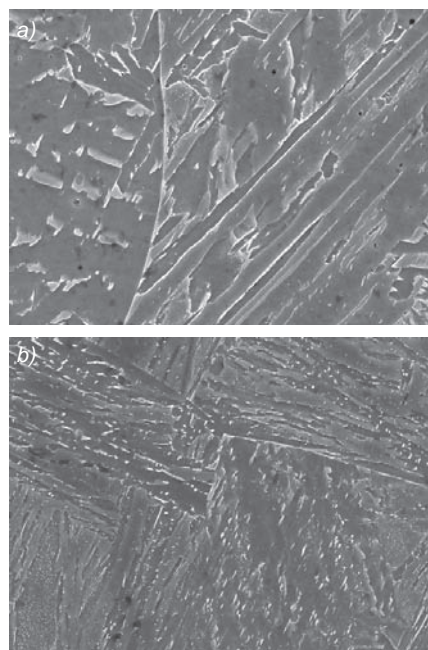
Rys. 3. Ferrytyczno-perlityczna mikrostruktura stali 16Mo3



Rys. 4. Mikrostruktura przetopu stali 16Mo3:
a) w osi spoiny,
b) przy linii wtopienia



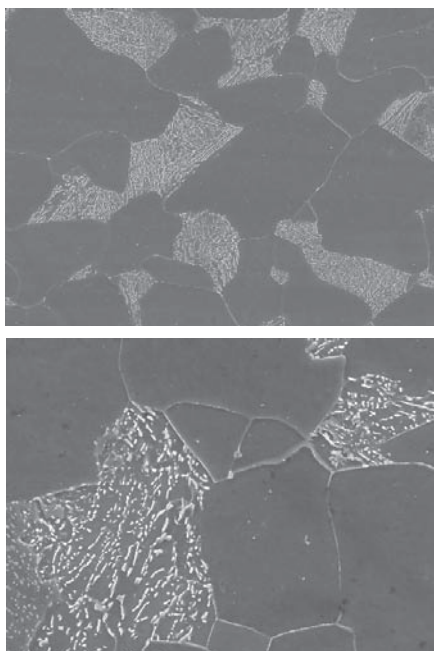
Rys. 5. Mikrostruktura stali 16Mo3 w strefie wpływu ciepła. Odległość od osi spoiny: a) 2,5 mm, b) 3 mm, c) 4 mm, d) 5 mm



Rys. 7. Mikrostruktura przetopu stali 13CrMo4-5: a) w osi spoiny, b) przy linii wtopienia

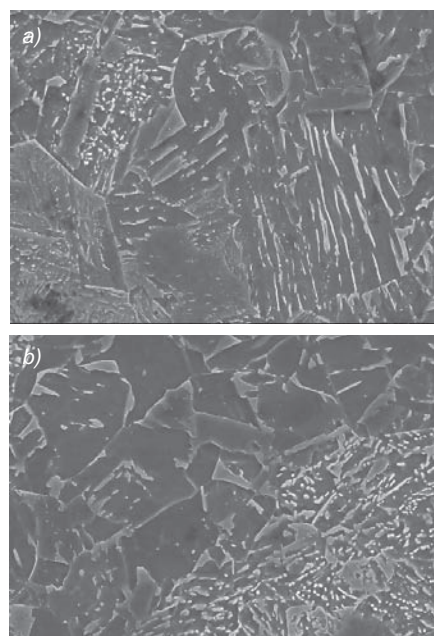
Mikrostruktura złącza ze stali 13CrMo4-5

Mikrostruktura materiału rodzimego, tj. stali 13CrMo4-5 o twardości ok. 160 HV10, również jest ferrytyczno-perlityczna (rys. 6). Nie występuje tu jednak uporządkowana pasmowość perlitu i można zaobserwować większy rozrzut rozmiarów ziaren ferrytu – $5\div 15\ \mu\text{m}$.



Rys. 6. Ferrytyczno-perlityczna mikrostruktura stali 13CrMo4-5

W strefie wpływu ciepła twardość gwałtownie się obniża, a ponadto wraz z oddalaniem się od spoiny zmienia się mikrostruktura, dlatego w tym obszarze trudno jednoznacznie określić jej typ. W odległości 2 mm od osi spoiny (przy linii wtopienia, w odległości ok. 0,5 mm od przetopu) obserwowano mikrostrukturę bainityczno-martenzytyczną i bainityczną (rys. 8a) o twardości $260\div 280\ \text{HV}_{10}$, w odległości 3 mm od osi spoiny (ok. 1,5 mm od linii wtopienia) – ferrytyczno-bainityczną (rys. 5c i d) o twardości $180\div 200\ \text{HV}_{10}$, natomiast w odległości ok. 3,5 mm od osi spoiny (2 mm od linii wtopienia) i dalej – perlityczno-ferrytyczną odpowiadającą materiałowi rodzimemu (rys. 6).



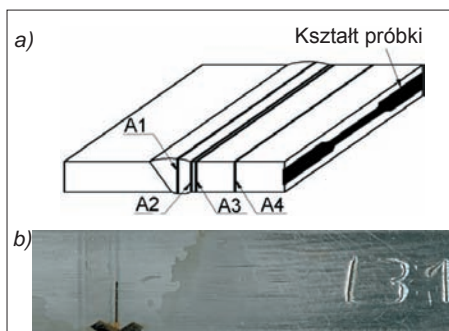
Rys. 8. Mikrostruktura stali 13CrMo4-5 w strefie wpływu ciepła. Odległość od osi spoiny: a) 2 mm, b) 3 mm

W środkowej części spoiny ze stali 13CrMo4-5 oraz przy linii wtopienia (ok. 1,5 mm od osi) obserwowano podobną mikrostrukturę bainityczno-martenzytyczną o budowie listwowej (rys. 7). W mikrostrukturze przetopu w bezpośredniej bliskości od linii wtopienia listwy są cieńsze oraz występuje więcej drobnych wydzieliń (rys. 7b), co prowadzi do wzrostu twardości do $320\div 330\ \text{HV}_{10}$ w porównaniu z materiałem ze środkowej części spoiny ($280\div 300\ \text{HV}_{10}$).

Charakterystyki wytrzymałości i odporności na pękanie

Przedstawione badania potwierdziły, że mikrostruktura i twardość zmieniają się w materiale spoiny i materiale strefy wpływu ciepła. W każdej strefie złącza spawanego,

a zwłaszcza w strefie wpływu ciepła, zmieniają się również właściwości mechaniczne. Bezpośrednie wyznaczanie charakterystyk wytrzymałościowych materiału w różnych obszarach złącza spawanego jest bardzo trudne. Aby je wyznaczyć, pobrano – wzdłużnie do osi spoiny – próbki płaskie (rys. 9a), a otrzymane dla nich wartości parametrów wytrzymałościowych opisano w funkcji twardości. Pośrednie wartości obliczono ze wzorów korelacyjnych wiążących te wielkości z twardością, zaproponowanych dla stali ferrytycznych w [5, 6].



Rys. 9. Schemat wykonania próbek do wyznaczania charakterystyk wytrzymałościowych w materiale spoiny (A1), linii wtopienia (A2), strefy wpływu ciepła (A3) i materiale rodzimym (A4) (a); widok próbki z karbem w strefie wpływu ciepła przy linii wtopienia (b)

Badania w celu wyznaczenia krytycznych wartości odporności na pękanie przeprowadzono na wyciętych z płyt spawanych próbkach o wymiarach $6 \times 16 \times 76$ mm z jednostronnym karbem, trójpunktowo zginanych (SENB). Badania prowadzono w temperaturze 20°C . Karby nacięto w taki sposób, aby wstępne pęknięcia zmęczeniowe ułożyć odpowiednio w:

- materiale spoiny (MS),
- materiale strefy wpływu ciepła przy spoinie (SWC_MS),
- środkowej części materiału strefy wpływu ciepła (SWC_S),
- materiale strefy wpływu ciepła przy zakończeniu strefy normalizacji (SWC_MR),
- materiale rodzimym (MR).

Podczas obciążania próbek rejestrowano sygnały czujników, charakteryzujące: zmianę potencjału, wartość siły, ugięcie próbki w punkcie obciążenia oraz rozwarcie szczeliny. Na tej podstawie sporządzono krzywe J_R i zgodnie z procedurą normy ASTM E1820-09 wyznaczono krytyczne wartości całki J , tj. J_C [7, 8]. W przypadkach występowania skokowego spadku siły (*pop-in*) podczas obciążania lub pęknięcia całkowitej krytyczną wartość całki J , a więc J_C , obliczano ze wzoru Rice'a:

$$J_C = \frac{2E_C}{Bb_0} \quad (1)$$

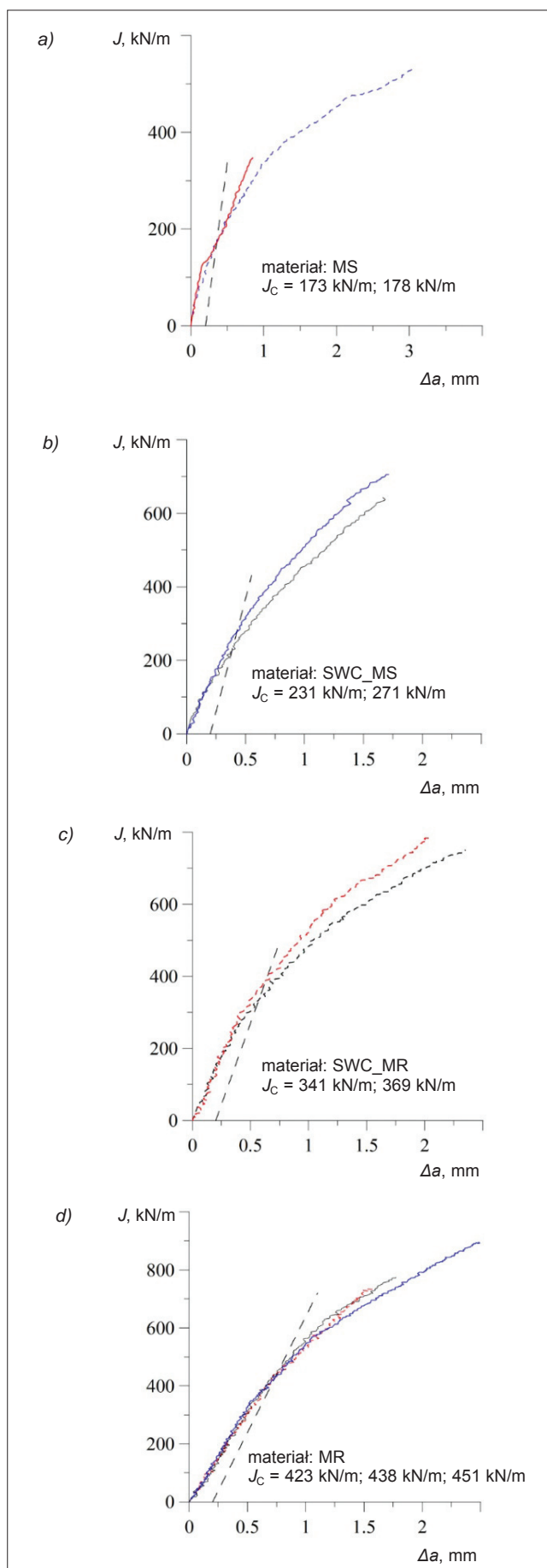
gdzie: E_C – energia w momencie krytycznym, B – grubość próbki netto, $b_0 = (W - a_0)$ – niepęknięta część szerokości próbki (W – szerokość próbki, a_0 – długość szczeliny początkowej).

Do przeliczenia odporności na pękanie z jednostek całki J na jednostki WIN zastosowano wzór:

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{E \cdot J_C}{(1 - \nu^2)}} \quad (2)$$

gdzie ν – współczynnik Poissona, E – moduł Younga.

W przypadku obu złączy spawanych materiał wszystkich stref cechuje się ogólnie ciągłym charakterem rozwoju pęknięcia podkrytycznego. Przykładowe krzywe odporności na pękanie uzyskane podczas badań materiału w odpowiednich strefach złącza spawanego ze stali 16Mo3 pokazano na rys. 10. Symbolem Δa oznaczono przyrost długości pęknięcia.



Rys. 10. Krzywe odporności na pękanie złącza ze stali 16Mo3 w: a) materiale spoiny (MS), b) strefie wpływu ciepła przy spoinie (SWC_MS), c) strefie wpływu ciepła przy zakończeniu strefy normalizacji (SWC_MR), d) materiale rodzimym (MR)

Jak widać, najniższą odporność na pękanie wykazuje materiał spoiny (tabl. II, rys. 10a). W niektórych próbkach w trakcie obciążania po uplastycznieniu materiału spoiny i po ciągłym przyroście pęknięcia występowało pękanie kruche. Materiał w strefie wpływu ciepła ma wyższą odporność na pękanie niż materiał spoiny, natomiast najwyższą odpornością cechuje się materiał rodzimy (rys. 10d).

W złączu ze stali 13CrMo4-5 rozkład odporności na pękanie był inny (tabl. II). Materiał spoiny ma bardzo wysoką odporność na pękanie – wyższą niż materiał rodzimy. Najniższe wartości odporności na pękanie zanotowano dla materiału strefy wpływu ciepła.

Należy jednak zauważyć, że we wszystkich strefach obu złączy spawanych odporność na pękanie pozostaje na wysokim poziomie, co zapobiega występowaniu pęknięcia kruchego.

TABLICA II. Zestawienie charakterystyk wytrzymałości i odporności na pękanie złączy spawanych

Materiał	Strefa złącza	HV10	R_e , MPa	R_m , MPa	J_c , kN/m	K_{JC} , MPa·m ^{1/2}
stal 16Mo3	MR	155	298	487	423 438 451	305 310 315
	SWC_MR	170	338	530	341 369	274 285
	SWC_S	185	387	565	231 245	225 232
	SWC_MS	220	533	686	231 271	225 244
	MS	210	486	646	173 178	195 198
stal 13CrMo4-5	MR	165	323	520	379 385 513	288 291 336
	SWC_MR	235	597	734	293 314 337	254 263 272
	SWC_MS	325	924	1010	374 406	287 299
	MS	310	871	970	521 797 816	338 418 423

Objaśnienia:
MR – materiał rodzimy,
SWC_MR – materiał strefy wpływu ciepła przy zakończeniu strefy normalizacji,
SWC_S – środkowa część materiału strefy wpływu ciepła,
SWC_MS – materiał strefy wpływu ciepła przy spoinie,
MS – materiał spoiny,
 R_e – wyraźna granica plastyczności,
 R_m – granica doraźnej wytrzymałości na rozciąganie,
 K_{JC} – odporność na pękanie.

Podsumowanie

Na podstawie wyników badań odporności na pękanie materiału w różnych strefach złączy spawanych laserowo można stwierdzić, że laserowe spawanie elementów pozwala uzyskać złącza o wysokiej wytrzymałości i jakości, pod warunkiem odpowiednio dobranych parametrów procesu. W przypadku obu badanych złączy wytrzymałość materiału spoiny i materiału strefy wpływu ciepła istotnie przewyższa poziom właściwy dla materiału rodzimego.

Inaczej jest z odpornością na pękanie analizowanych złączy. W złączu ze stali 16Mo3 odporność na pękanie osiąga najniższy poziom w materiale spoiny, wzrasta w materiale strefy wpływu ciepła, a w materiale rodzimym jest najwyższa. Obniżenie poziomu odporności na pękanie w materiale spoiny jest spowodowane obecnością mikropustek i wtrąceń w postaci drobnych cząstek sferoidalnych.

Odporność na pękanie materiału z różnych stref złącza ze stali 13CrMo4-5 na ogół pozostaje wysoka, co jest wynikiem zastosowanego reżimu spawania i powstania w strefie spoiny mikrostruktury bainityczno-martenzytycznej, która odznacza się wysoką odpornością na pękanie [5, 9]. Nawet materiał strefy wpływu ciepła, gdzie zanotowano minimalne wartości odporności na pękanie, charakteryzuje się całkowicie ciągłym mechanizmem rozwoju pęknięcia.

Praca powstała w ramach projektu badawczego „Technologie laserowego spawania dla energetyki i ochrony środowiska” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- Hernas A. „Żarowytrzymałość stali i stopów”, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1999.
- Pilarczyk J. (red.). „Poradnik inżyniera – spawalnictwo”, t. 1. Warszawa: WNT, 2003.
- Dobrzański L.A. „Metalowe materiały inżynierskie”. Gliwice–Warszawa: WNT, 2004.
- Adamczyk J., Szkaradek K. „Materiały metalowe dla energetyki jądrowej”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1992.
- Dzioba I. “Properties of the 13HMF steel after operation and degradation under laboratory conditions”. *Materials Science*. Vol. 46, No. 3 (2010): pp. 357–364.
- Dzioba I., Pała T., Valkonen I. „Strength and Fracture Toughness of the Welded Joints Made of High-Strength Ferritic Steel”. *Acta Mechanica et Automatica*. Vol. 7, Iss. 4 (2013): pp. 226–229.
- ASTM E1737-96. Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness.
- ASTM E1820-09. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. Annual book of ASTM standards. Vol. 03.01 (2011): pp. 1070–1118.
- Bhadeshia H.K.D.H. „Bainite in Steels”. London: Institute of Materials, 2001.