

Mateusz Ścisłowski
Leopold Michał Barwicki
Anna Zielińska-Lipiec
Edmund Tasak
Krzysztof Pańcikiewicz

Badanie właściwości i struktury połączeń spawanych nowej i eksploatowanej stali 14 MoV6-3 (13HMF)

Evaluation of the mechanical properties and microstructure of before and after operations 14 MoV6-3 (13HMF) steel joints

Streszczenie

W pracy przedstawiono właściwości i strukturę połączenia spawanego pomiędzy elementem ze stali eksploatowanej 14 MoV6-3 oraz elementem nowym, nieeksploatowanym, również ze stali 14 MoV6-3. Oba elementy w postaci płyt o wymiarach 110x220x20 mm połączono dwoma metodami spawania łukowego. Grań spoiny wykonano metodą spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego (TIG), natomiast wypełnienie metodą spawania elektrodą otuloną (MMAW). Pospawany element został poddany wyżarzaniu odprężającemu. Powstałe złącze spawane zostało poddane badaniom nieniszczącym: VT, PT, RT oraz badaniom niszczącym: badaniu udarności, rozciąganiu złącza, badaniom metalograficznym oraz badaniu rozkładu twardości w złączu. W wyniku badań ustalono, iż istnieje możliwość wykorzystania zastosowanych metod spawania do wykonywania remontów lub modernizacji instalacji energetycznych

Słowa kluczowe: stal 13HMF, właściwości, mikrostruktura

Abstract

The paper presents the structure and properties of the weld joint between the operated steel 14MoV6-3 and a new, non-operated steel 14MoV6-3 element. Both elements in the form of plates of dimensions 110 x 220 x 20 mm were joined by two methods of arc welding. Ridge welds made by welding tungsten inert shielding gas TIG, while filling was made by welding with coated electrode MMAW. Welded item has been heat treated stress-relief annealing. The resulting joint has been subjected to non-destructive testing: VT, PT, RT and destructive testing: impact test, tensile joints, metallographic examination and testing of hardness distribution in the joint. The research found that there is a possibility to use the methods of welding for repair or upgrading of power plants structures.

Keywords: 13HMF steel, properties, microstructure

Mgr inż. Mateusz Ścisłowski; dr inż. Leopold Michał Barwicki – Enrem – Połaniec; dr hab. inż. Anna Zielińska-Lipiec, prof. AGH; prof. dr hab. inż. Edmund Tasak; mgr inż. Krzysztof Pańcikiewicz – AGH Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: tasak@agh.edu.pl

Wstęp

Złącza elementów nowych z eksploatowanymi znajdują szerokie zastosowanie w energetyce. Po określonym czasie eksploatacji przewidzianym dla danych elementów przeprowadza się w sposób kontrolowany czynności mające na celu przedłużanie czasu eksploatacji elektrowni [5]. Jednak, w celu uniknięcia olbrzymich kosztów związanych z wymianą całych instalacji, stosuje się wymiany wybranych fragmentów najbardziej narażonych na zużycie podczas pracy. Prace remontowe wymagają wielu procesów technologicznych, jednak jednym z najważniejszych jest konieczność łączenia elementów przez spawanie.

Istotnym problemem dotyczącym trwałości elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych jest trwałość eksploatacyjna złączy spawanych oraz wykonanie naprawczych złączy spawanych materiałów po eksploatacji z materiałami w stanie wyjściowym [1, 4, 5]. Wykonywanie złączy spawanych przy modernizacjach bloków energetycznych powoduje, że konieczne jest badanie wpływu cyklu spawania na właściwości materiałowe elementów poddanych pracom remontowym, głównie w obszarze nowo powstałych spoin między elementami z materiałów nowych i eksploatowanych [6-8]. Poznanie właściwości tego typu połączeń spawanych jest ważne do oszacowania dalszego czasu bezpiecznej eksploatacji bloku energetycznego [2, 3].

Metodyka badań

Do badań zostały użyte elementy rurociągów pary świeżej. Elementy te wytworzone zostały ze stali 14MoV6-3 (13HMF), której skład chemiczny przedstawiono w tabelicy I. Jeden z elementów przepracował w warunkach wysokiej temperatury (540°C) i ciśnienia (11 MPa) 200 000 h, natomiast drugi element był materiałem nieeksploatowanym (nowym). Oba materiały połączono przez spawanie grani metodą TIG i wypełnienie metodą MMA.

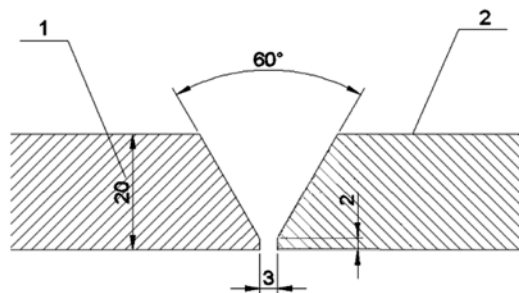
Przed procesem spawania elementy ze stali 14MoV6-3, nowej i eksploatowanej, zostały odpowiednio przygotowane przez ukosowanie brzegów zgodnie z ISO 9692-1:2003(E) (rys. 1) [11]. Próbki po procesie spawania przedstawiono na rysunku 2.

Tak przygotowany element został poddany w pierwszej kolejności serii badań nieniszczących: badaniom wizualnym, penetracyjnym i radiologicznym. Następnie wykonano próbki do badań niszczących.

Tabela I. Skład chemiczny stali 14MoV6-3 (13HMF) wg EN 10216-2, % wag.

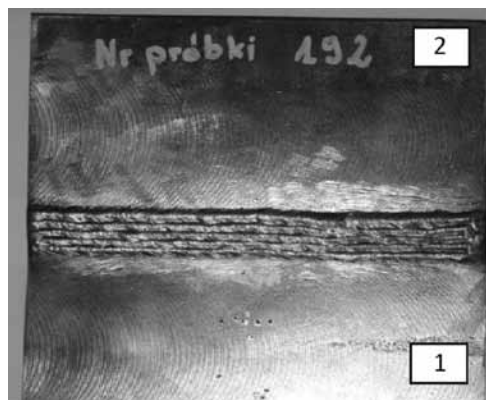
Table I. Chemical composition of 14MoV6-3 (13HMF) steel acc. to. EN 10216-2, wt. %

C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	V	B	W
0,10÷0,15	0,40÷0,70	0,30÷0,70	0,30÷0,60	0,50÷0,70	–	–	0,22÷0,28	–	–



Rys. 1. Schemat ukosowanie brzegów materiału przed procesem spawania; 1 – materiał nowy (13HMF), 2 – materiał eksploatowany (13HMF)

Fig. 1. Edge of welded plates shape before welding: 1 – new steel (13HMF), 2 – operated steel (13HMF)

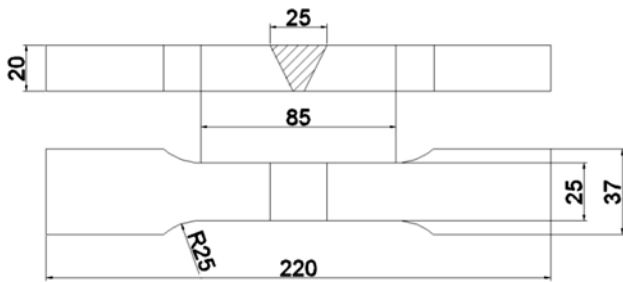


Rys. 2. Złącze spawane próbne – doczołowe blachy 20x200x220 mm

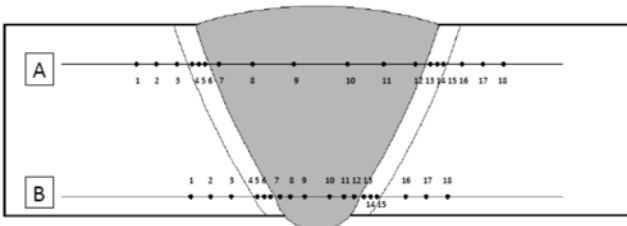
Fig. 2. Welded joint – butt weld in 20x200x220 mm plates

Próbki do poszczególnych badań wykonano zgodnie z obowiązującymi normami:

- do badania udarności wg PN-EN 875:1999 [12]. Wykorzystano 9 próbek Charpy'ego V. Zgodnie z wytycznymi po 3 próbki ze strefy wpływu ciepła po stronie materiału nowego, strefy wpływu ciepła po stronie materiału eksploatowanego oraz próbki z karbem naciętym w osi spoiny;
- do badania wytrzymałości na rozciąganie wg PN-EN ISO 4136:2011 [13]. Na rysunku 3 przedstawiono wymiary dobrane zgodnie z wytycznymi normy dla próbek do rozciągania złącza;
- pomiary twardości wykonano na próbce z badań metalograficznych sposobem Vickersa zgodnie z PN-EN 1043-2, PN-EN ISO 15614-1, w dwóch liniach pomiarowych. Zostały wykonane po 3 pomiary w materiale rodzimym po obu stronach złącza i 3 pomiary w SWC oraz po 6 pomiarów w spoinie. Linia A przedstawia miejsce pomiaru twardości przez spoinę wykonaną metodą MMA, natomiast linia B została usytuowana w miejscu wykonania grani metodą TIG (rys. 4).



Rys. 3. Wymiary próbki do badania wytrzymałości złącza na rozciąganie
Fig. 3. Dimensions of sample for tensile strength test



Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiaru twardości złącza spawanego
Fig. 4. Location across of hardness measurements

Wyniki badań

Wyniki badań nieniszczących

Podczas badań wizualnych złącza spawanego doczołowego blach ze stali 14MoV6-3 nie stwierdzono występowania niezgodności.

Badania penetracyjne nie wykazały wskazań. Złącze uzyskało poziom jakości B wg wymagań PN-EN ISO 5817:2009.

W wyniku badania radiograficznego (rys. 5) nie stwierdzono żadnych niezgodności. Złącze uzyskało poziom jakości B wg PN-EN ISO 5817:2009.



Rys. 5. Zdjęcie radiogramu złącza spawanego stali 14MoV6-3
Fig. 5. Radiogram of welded joint of 14MoV6-3 steel

Wyniki badań niszczących

Próba udarowości

Wymagania podane w PN-EN 10216-2 określają minimalną wartość pracy łamania na poziomie 27 J w temperaturze otoczenia; wartość tę zaznaczono na wykresie w postaci poziomej linii (rys. 6).

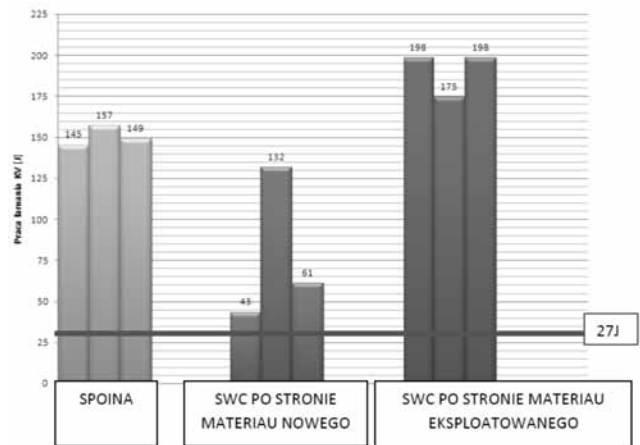
Uzyskane wyniki pracy łamania spoiny i SWC są wyraźnie wyższe niż wartości wymagane przez powołaną powyżej normę.

Przeprowadzono również badanie morfologii przełomów za pomocą SEM. Materiał spoiny pęka w sposób zróżnicowany w zależności od cyklu cieplnego, jakiego był poddawany w wyniku spawania wieloma ściegami. Wygląd tego przełomu pokazano na rysunku 7.

Przy większych powiększeniach można obserwować różny charakter przełomów w zależności od miejsca obserwacji. Przełom ciągliwy (rys. 8) występuje w obszarach, które podczas układania ściegów uległy normalizowaniu. W gruboziarnistym obszarze ściegu, który przekryształizował, przełom miał charakter quasi-kruchy (rys. 9). W obszarze nieprzekryształizowanym w spoinie występowały przełomy mieszane: kruche na granicach ziaren i ciągliwe wewnątrz ziaren (rys. 10, 11).

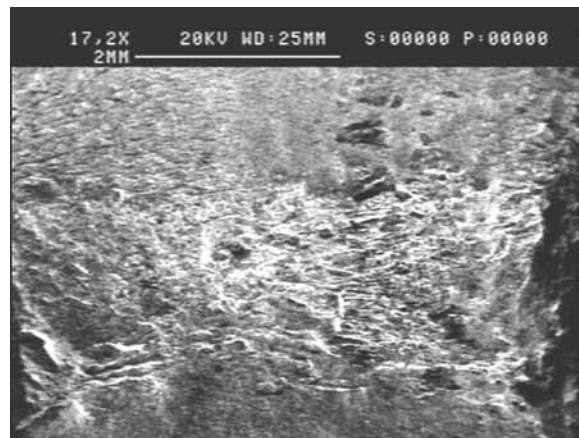
Na przełomie z naciętym karbem w SWC materiału eksploатованego można obserwować jedynie przełom ciągliwy (rys. 12).

W strefie wpływu ciepła materiału nowego przełom ma charakter, zależnie od obszaru w próbce (rys. 13), quasi-kruchy (rys. 14) i kruchy (rys. 15).



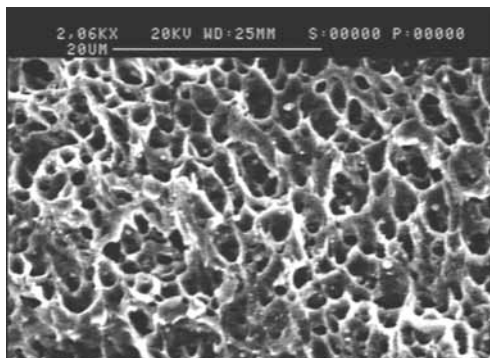
Rys. 6. Praca łamania spoiny i SWC złącza doczołowego blach ze stali 13HMF

Fig. 6. Nominal energy for weld and HAZ of butt weld joint of 13HMF steel



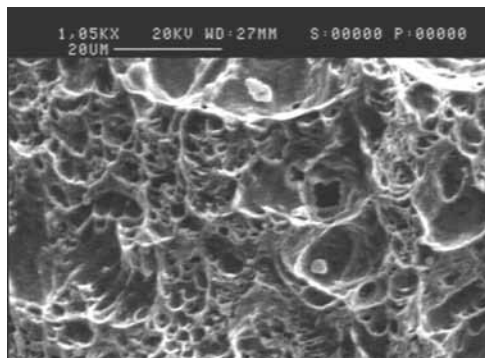
Rys. 7. Morfologia przełomu materiału spoiny

Fig. 7. Fracture of weld



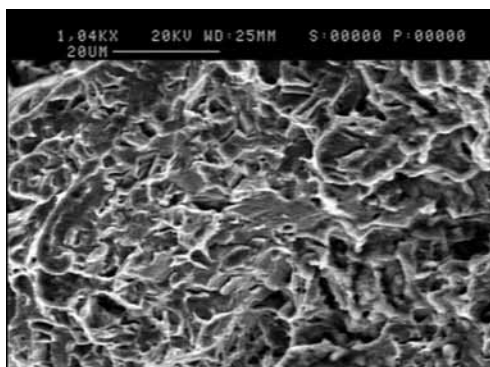
Rys. 8. Przełom ciągliwy w obszarach spoiny, które podczas spawania uległy normalizowaniu

Fig. 8. Ductile fracture of normalized weld zone



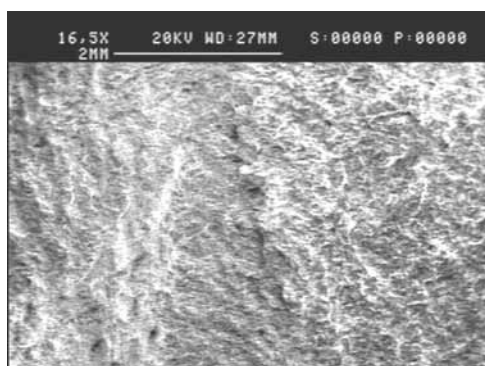
Rys. 12. Przełom ciągliwy w SWC materiału eksploatowanego

Fig. 12. Ductile fracture of HAZ In operated steel



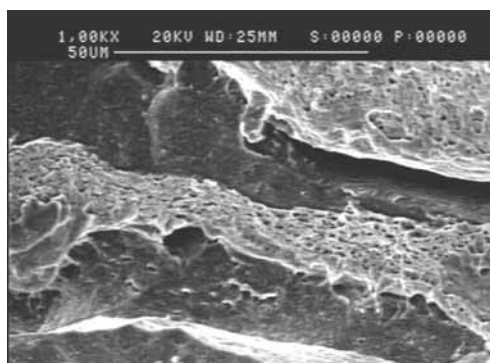
Rys. 9. Przełom quasi-kruchy w spoinie

Fig. 9. Quasibrittle fracture of weld



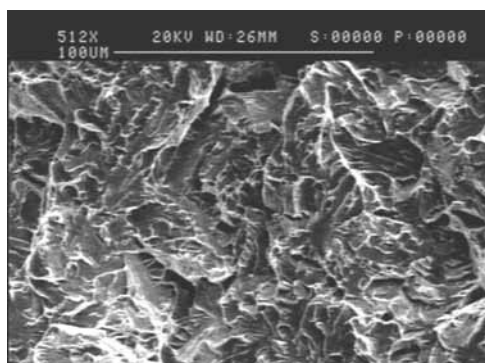
Rys. 13. Morfologia przełomu w SWC materiału nieeksploatowanego

Fig. 13. Different fracture morphology in HAZ of non-operated steel



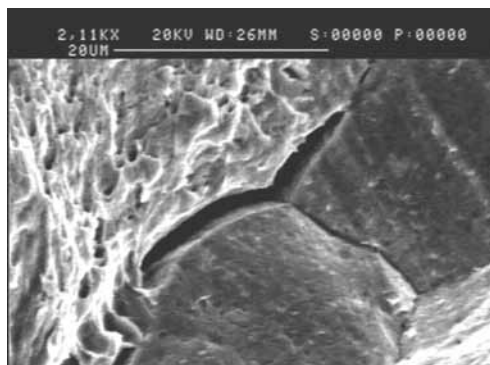
Rys. 10. Przełom kruchy na granicach krystalitów i ciągliwy wewnątrz nich

Fig. 10. Brittle fracture of crystallite boundaries and ductile fracture inside of them



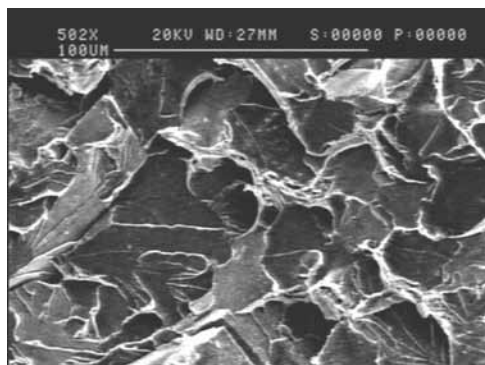
Rys. 14. Przełom quasi-kruchy w SWC materiału nieeksploatowanego

Fig. 14. Quasibrittle fracture in HAZ of non-operated steel



Rys. 11. Przełom kruchy na granicach ziaren byłego austenitu

Fig. 11. Brittle fracture in the transformed austenite grain boundaries



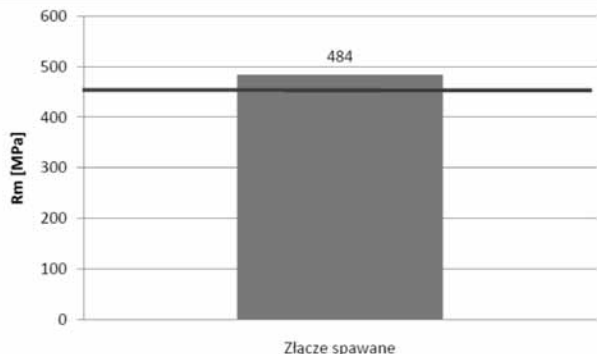
Rys. 15. Przełom kruchy w SWC materiału nieeksploatowanego

Fig. 15. Brittle fracture in HAZ of non-operated steel

Próba rozciągania złącza

W próbie rozciągania określono wytrzymałość złącza spawanego (R_m) i przeprowadzono ocenę uzyskanych wyników pod względem wymaganej minimalnej wartości R_m dla materiału rodzimego, która wynosi 460 MPa wg EN 10216-2. Wartość tę zaznaczono na wykresie linią poziomą (rys. 16).

Próbkę przed rozciąganiem przedstawiono na rysunku 17, natomiast próbkę po próbie rozciągania na rysunku 18.



Rys. 16. Wykres wytrzymałości próbki na rozciąganie R_m z zaznaczoną minimalną wartością wytrzymałości dla materiału rodzimego
Fig. 16. Tensile strength (R_m) with marked minimum value for base metal



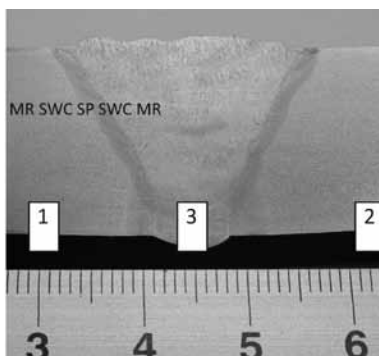
Rys. 17. Próbka do rozciągania złącza – widok od strony lica
Fig. 17. Sample for tensile strength test – face of weld side



Rys. 18. Próbka po zerwaniu – widok od strony lica
Fig. 18. Sample after tensile strength test – face of weld side

Badanie makroskopowe

Badanie makroskopowe nie wykazało żadnych niezgodności spawalniczych. Po wytrawieniu złącza nitalem uwidoczniła została struktura wielościęgowej spoiny i wąskiej SWC (rys. 19).



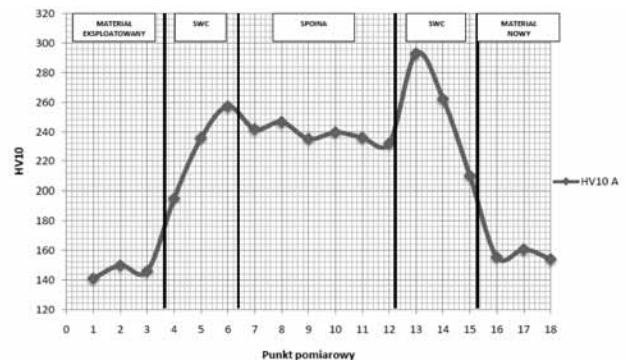
Rys. 19. Próbka po badaniu makroskopowym z widoczną spoiną i SWC (1 – materiał eksploatacyjny 13HMF, 2 – materiał nowy 13HMF, 3 – spoina)
Fig. 19. Sample after microscopic evaluation with visible weld and HAZ (1 – operated steel 13HMF, 2 – non-operated steel 13HMF, 3 – weld)

Badanie twardości

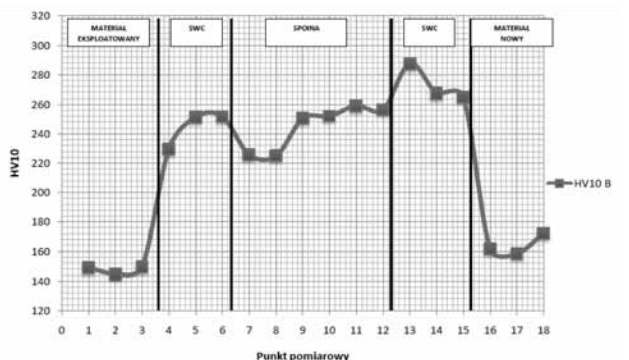
Pomiary twardości wykonano sposobem Vickersa zgodnie z PN-EN 1043-2, PN-EN 15614-1 i PN-EN 12952-6, z których wynika, że dla stali 13HMF po obróbce cieplnej kryterium twardości wynosi maksimum 350 HV10.

Wszystkie wyniki pomiarów są niższe niż dopuszczalne, jednak na uwagę zasługuje fakt, że twardość spoiny w obszarze grani, która została wykonana metodą TIG, jest większa niż twardość ściegów wypełniających wykonanych za pomocą metody MMA, co może świadczyć o utwardzeniu spoiny w wyniku oddziaływania strumienia gazu formującego, który powodował szybsze niż w następnych ściegach stygnięcie spoiny.

Obserwacja mikrostruktury



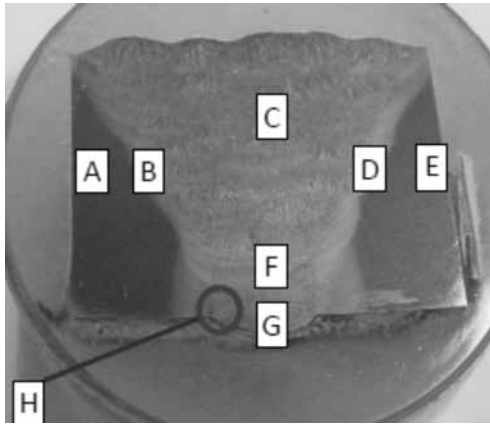
Rys. 20. Rozkład twardości złącza spawanego na linii pomiarowej A (obszar wypełnienia metodą MMA)
Fig. 20. Hardness distribution of welded joint in measurement line A (filling by MMA zone)



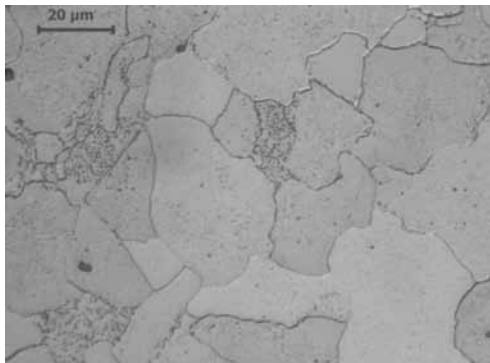
Rys. 21. Rozkład twardości złącza spawanego na linii pomiarowej B (obszar grani wykonanej metodą TIG)
Fig. 21. Hardness distribution of welded joint in measurement line B (root by GTAW zone)

Badania mikrostruktury spawanego złącza za pomocą mikroskopu świetlnego obejmowały materiał rodzimy po eksploatacji i nowy, a także mikrostrukturę spoiny i SWC. Miejsca obserwacji zaznaczono na rysunku 22.

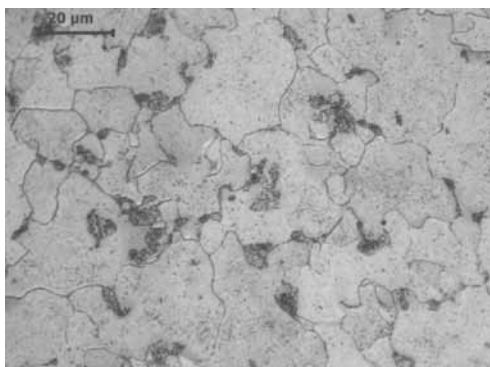
Badane złącze po spawaniu wyżarzono z przystankiem w temperaturze 450°C przez 60 min i następnie nagrzano do 730°C i wytrzymano przez 60 min. Taka obróbka cieplna spowodowała odpuszczenie mikrostruktury bainitycznej. W materiale eksploatacyjnym



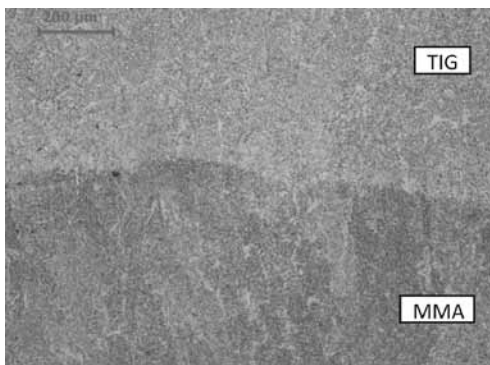
Rys. 22. Miejsca obserwacji mikrostruktury
Fig. 22. Location of microstructure observation



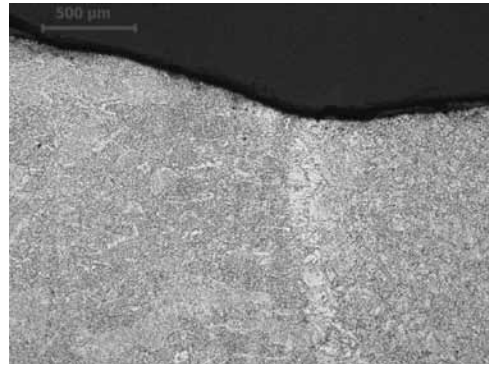
Rys. 23. Mikrostruktura materiału eksploatowanego
Fig. 23. Microstructure of operated steel



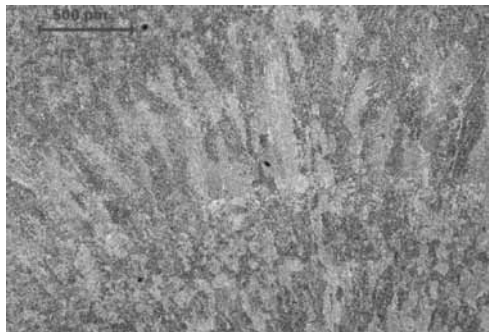
Rys. 24. Mikrostruktura materiału nowego
Fig. 24. Microstructure of non-operated steel



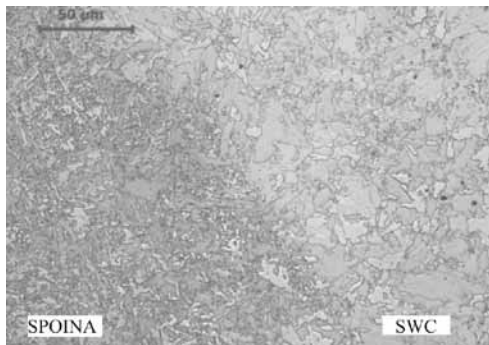
Rys. 25. Mikrostruktura spoiny w obszarze F (przejście między ścięciem granicznym wykonanym metodą TIG i wypełnieniem MMA)
Fig. 25. Microstructure of weld in F zone (boundary between TIG welded root bead and MMAW filling)



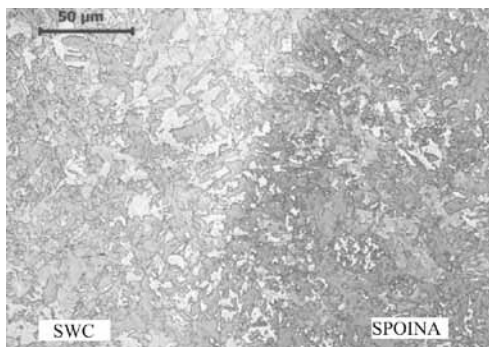
Rys. 26. Mikrostruktura obszaru przejścia grani spoiny do materiału eksploatowanego (obszar H)
Fig. 26. Microstructure of fusion between root of weld bead and operated steel (H zone)



Rys. 27. Mikrostruktura spoiny wykonanej metodą MMA (obszar C z rys. 22)
Fig. 27. Microstructure of weld made by MMA (C zone from fig. 22)



Rys. 28. Mikrostruktura obszaru linii wtopienia od strony materiału eksploatowanego (obszar B z rys. 22)
Fig. 28. Microstructure of fusion line in the operated steel side (B zone from fig. 22)



Rys. 29. Mikrostruktura obszaru linii wtopienia od strony materiału nieeksploatowanego – obszar D
Fig. 29. Microstructure of fusion line in the non-operated steel – D zone

(pozycja A) w obszarach byłego bainitu oraz na granicach ziaren ferrytu widoczne są duże skoagulowane wydzielenia węglików (rys. 23). Również w materiale nowym zaawansowany jest proces odpuszczania w obszarach bainitu (rys. 24). Obserwuje się znaczną różnicę w wielkości ziarna ferrytu w materiale nowym i eksploatowanym. W materiale nowym jest ono prawie dwukrotnie mniejsze niż w materiale eksploatowanym.

Mikrostrukturę spoiny i SWC, obserwowaną w grani, pokazano na rysunkach 25 i 26, natomiast na rysunku 27 przedstawiono typową mikrostrukturę spoiny wykonaną metodą MMA. Mimo obróbki cieplnej nadal zachowany jest iglasty charakter mikrostruktury. W obszarach ściegu, który nie był poddawany wpływo-

wi podwyższonej temperatury przy nakładaniu kolejnego ściegu, widoczne są wyraźne kryształy kolumnowe. W strefie oddziaływania ciepła pochodzącego od kolejnego ściegu w wyniku przekroczenia temperatury A_{c3} następuje rozdrobnienie ziarna i mikrostruktura traci swój pierwotny charakter.

Mikrostrukturę linii wtopienia (obszar B i D) pokazano na rysunkach 28 i 29. W obu przypadkach strefa gruboziarnista jest bardzo wąska i obserwuje się w niej odpuszczony bainit z niewielkim udziałem ferrytu. Ziarno byłego austenitu jest znacznie większe w SWC materiału eksploatowanego.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Złącze spawane nowej i eksploatowanej stali 14MoV6-3 zostało wykonane poprawnie i według badań nieniszczących pozbawione było wszelkich niezgodności zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych.
2. Udarność poszczególnych stref złącza (SWC i spoina) jest wysoka i przekracza wartość 27 J, która jest wartością minimalną pracy łamania dla tej stali.
3. Wytrzymałość złącza na rozciąganie wyniosła 484 MPa, co pozwala stwierdzić, że złącze wykazuje dość wysoką wytrzymałość R_m , gdyż wartość minimalna dla tej stali wynosi 460 MPa.

4. Badania mikroskopowe wykazały zmiany mikrostrukturalne w materiale eksploatowanym, w którym doszło do rozrostu ziarna oraz koagulacji węglików w obszarach bainitu lub perlitu. Zmiany te jednak nie wpłynęły na obniżenie właściwości wytrzymałościowych całego złącza poniżej wymaganego przez normę minimum.
5. Badanie przełomów wykazało, że charakter i mechanizm pękania zależy od cykli cieplnych, jakim dany obszar złącza został poddany w wyniku spawania wielościęgowego.
6. Wszystkie wymagania stawiane stali 14MoV6-3 zostały spełnione, co może świadczyć o przydatności zastosowanych metod spawania do wykonywania połączeń spawanych stali eksploatowanej z nową w przypadku rurociągów pary świeżej ze stali 14MoV6-3 (13HMF). Pozwoli to na ograniczenie kosztów związanych z wymianą całych instalacji i urządzeń.

Literatura

- [1] Dobrzański J., Paszkowska H., Kowalski B., Wodzyński J.: Diagnostyka elementów urządzeń energetycznych pracujących pod działaniem ciśnienia w podwyższonej temperaturze. Prace IMŻ 1(2010).
- [2] Zieliński A., Dobrzański J., Wodzyński J.: Ocena trwałości elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych w procesie dopuszczania do eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy. Prace IMŻ 1(2010).
- [3] Wińcza M.: Analfabetyzm techniczny – rzeczywistość, czy fikcja: (analiza problemu). Przegląd Spawalnictwa 6/2008, s.11÷15.
- [4] Dobrzański J.: Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki, Scientific International Journal of the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering; Vol. 3, 2011.
- [5] Trzecznyński J.: Żywotność urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych po ich modernizacji. Pro Nowum, grudzień 2000, s. 14÷17.
- [6] Brunne W.: Możliwość wydłużania żywotności głównych rurociągów parowych do założonego czasu pracy. Energetyka, Zeszyt tematyczny, s. 16÷19, grudzień 2002.
- [7] Brunne W.: Korzyści płynące z modernizacji rurociągów w celu wydłużenia czasu ich eksploatacji. Dozór techniczny 1-2/2010.
- [8] Trzecznyński J.: Żywotność urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych po ich modernizacji. Energetyka, Zeszyt tematyczny, s. 14÷15, grudzień 2000.
- [9] EN 10216-2, Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties (including amendment A1:2004).
- [10] PN-EN 1321 marzec 2000, Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.