

Mikrostruktura i właściwości mechaniczne złączy stali T24 spawanych metodami konwencjonalnymi i wysokoenergetycznymi

Microstructure and mechanical properties of T24 steel joints welded by typical and high-power processes

Streszczenie

Przedstawiono wyniki obserwacji wizualnych, badań makro- i mikroskopowych oraz pomiarów twardości złączy doczołowych blach ze stali 7CrMoVTiB10-10 (T24). Złącza spawane wykonano łukiem krytym, wiązką laserową i metodą hybrydową (wiązka laserowa + spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazów). Obserwacje wizualne pozwoliły na ujawnienie nielicznych niezgodności spawalniczych, których obecność została potwierdzona w badaniach makroskopowych. Badania mikroskopowe wykazały istotnego wpływu technologii spawania na mikrostrukturę SWC, natomiast spoiny uzyskane w poszczególnych procesach charakteryzowały się zróżnicowaną mikrostrukturą, determinowaną m.in. szybkością odprowadzania ciepła. Pomiar twardości wykazały, iż niezależnie od zastosowanej technologii maksymalna wartość twardości przekracza 350 HV10.

Słowa kluczowe: energetyka, stal T24, spawanie

Abstract

The paper presents the results of visual observation, macro- and microscopic examination and hardness testing of butt-welded joints of 7CrMoVTiB10-10 steel. Welded joints was made by Submerged Arc Welding, Laser Beam Welding and a hybrid method (Laser Beam Welding + Gas Metal Arc Welding). Visual observation shown the presence of a few imperfections, what confirmed the macroscopic examination. Microscopic examination shown no significant effect of welding processes in the HAZ microstructure, while weld metal obtained by different processes is characterized by varied microstructure, that is determined i.e. heat removal rate. Hardness measurement shown that maximum hardness value exceed 350 HV10, regardless of welding process.

Keywords: power industry, T24 steel, welding

Wstęp

Projektowanie i wdrażanie nowych materiałów w energetyce spowodowane jest koniecznością podnoszenia sprawności wytwarzania energii i zmniejszenia emisji zanieczyszczeń. Równie ważnym aspektem jest opracowywanie odpowiedniej technologii ich łą-

czenia. W przypadku rozważanej, niskostopowej stali bainityczno-martensytycznej 7CrMoVTiB10-10 (T24) zamierzeniem projektowym było wyeliminowanie podgrzewania wstępnego przed spawaniem oraz wykonywania obróbki cieplnej po spawaniu [1]. Husemann i współautorzy [2] wskazywali na problem z uzyskaniem twardości w SWC poniżej wymaganej 350 HV10, co jednak nie przeszkodziło w stosowaniu tej stali

Mgr inż. Krzysztof Pańcikiewicz; dr hab. inż. Anna Zielińska-Lipiec, prof. AGH; prof. dr hab. inż. Edmund Tasak
– AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: krzysztof.pancikiewicz@agh.edu.pl

w kolejnych projektach kotłów. Jednocześnie podjęto próby spawania łukiem krytym bez stosowania dodatkowych zabiegów cieplnych, czego wynikiem były liczne problemy [3÷14].

Wynikiem prac nad właściwymi technologiami łączenia jest np. wykorzystanie wysokoenergetycznych źródeł ciepła do wykonywania wzdłużnych złączy pachwinowych typu rura-płaskownik [15].

W pracy przedstawiono wyniki analizy struktury i właściwości mechanicznych złączy doczołowych blach ze stali T24, spawanych różnymi metodami.

Przebieg badań

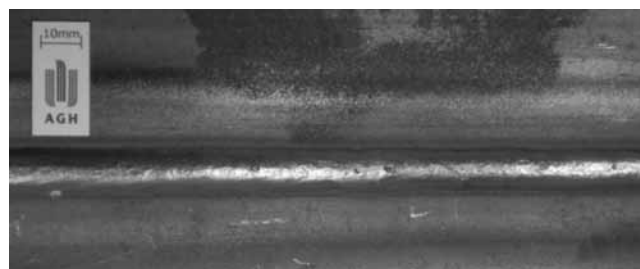
Ocenę mikrostruktury i właściwości mechanicznych doczołowych złączy spawanych blach stali 7CrMo-VTiB10-10 (T24) przeprowadzono w oparciu o obserwacje wizualne, badania makro- i mikroskopowe oraz pomiary twardości. Złącza spawane wykonano łukiem krytym, wiązką laserową i metodą hybrydową – wiązka laserowa i spawanie łukowe (elektroda topliwa w osłonie gazów). Badania makroskopowe wykonano na mikroskopie stereoskopowym Delta Optical SZ-453T, natomiast obserwacje mikroskopowe przy użyciu mikroskopu świetlnego Leica DMLM. Badania makro- i mikroskopowe przeprowadzono na zglądach metalograficznych przygotowanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi spoiny, szlifowanych mechanicznie, polerowanych tlenkiem aluminium i trawionych nitałem. Pomiary twardości wykonano na twardościomierzu uniwersalnym Zwick ZHU 187,5 metodą Vickersa przy obciążeniu 49,035 N (5 kG). Odciski wykonywane były wzdłuż linii pomiarowej przebiegającej przez wszystkie strefy złącza, z zachowaniem stałej odległości 0,5 mm pomiędzy punktami wyznaczonymi przez przekątne odciski. W przypadku złącza spawanego wiązką laserową i metodą hybrydową linia pomiarowa usytuowana była w połowie grubości złącza, natomiast dla złącza spawanego łukiem krytym linia pomiarowa znajdowała się w połowie grubości ostatniego ściegu.

Obserwacje wizualne

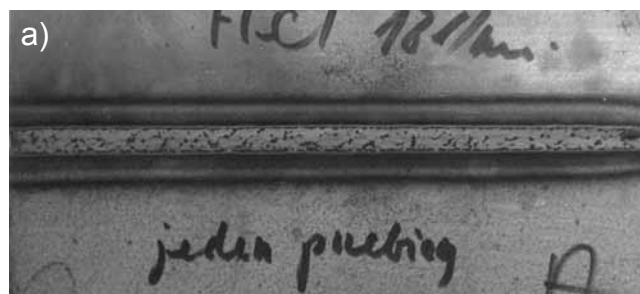
Złącza spawane poddano ocenie pod kątem spełnienia wymagań PN-EN ISO 5817 i PN-EN ISO 13919-1, klasyfikujących poziomy jakości wg niezgodności spawalniczych odpowiednio w złączach spawanych łukowo i wiązką laserową. Na rysunkach 1÷3 przedstawiono lico i grań złączy spawanych.

Pomiary wielkości geometrycznych wykonano suwmiarką o dokładności pomiarowej 0,05 mm i spoinomierzem analogowym typu SPA-40 o dokładności pomiarowej 0,05 mm. Grubość płaskowników spawanych łukowo wynosiła 8 mm, natomiast złączy wykonanych

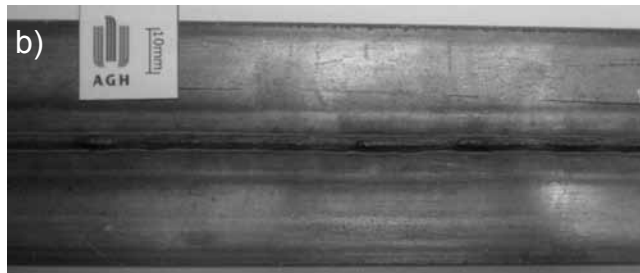
metodami wysokoenergetycznymi 6 mm. Obserwacje wizualne nie wykazały niezgodności spawalniczych w złączu wykonanym łukiem krytym, klasyfikując złącze na poziomie jakości B.



Rys. 1. Złącze spawane łukiem krytym: widok od strony lica
Fig. 1. Submerged arc welded joint: view of face of weld



Rys. 2. Złącze spawane wiązką laserową: a) lico spoiny, b) grań spoiny
Fig. 2. Laser beam welded joint: a) face of weld, b) root of weld



Rys. 3. Złącze spawane metodą hybrydową: a) lico spoiny, b) grań spoiny

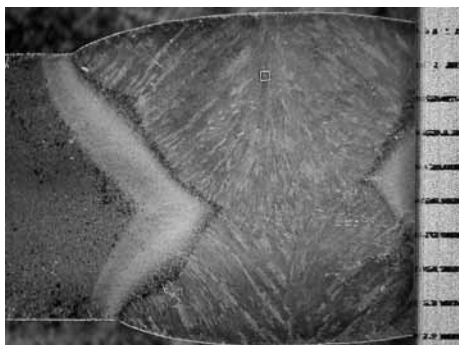
Fig. 3. Hybrid method welded joint: a) face of weld, b) root of weld

W złączu spawanym wiązką laserową stwierdzono występowanie krateru (2024) o głębokości 1,0 mm, mieszczącego się w wartości granicznej dla poziomu jakości B ($< 1,8$ mm). Z kolei w złączu wykonanym metodą hybrydową stwierdzono niezgodność spawalniczą rozpoznaną jako niepełne wypełnienie rowka spawalniczego (511). Głębokość niewypełnienia wynosząca 0,25 mm mieściła się w wartości granicznej dla poziomu jakości B, przewidzianego dla niezgodności krótkich ($\leq 0,5$ mm). Zaobserwowany wyciek (504) od strony grani o wysokości 1,5 mm mieści się w wartości granicznej dla poziomu jakości D ($\leq 1,8$ mm). Odnotowano również rozprysk (602) po obu stronach lica spoiny. Liczba osadzonych cząsteczek metalu wynosiła ok. 10 szt. na każde 100 mm długości spoiny.

Ze względu na założony program badań stwierdzone niezgodności spawalnicze nie będą miały wpływu na wyniki oceny mikrostruktury i pomiary twardości.

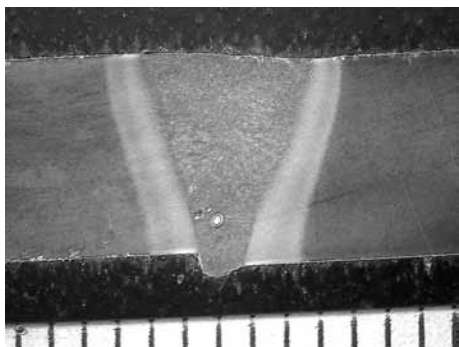
Badania makroskopowe

Na rysunkach 4÷6 przedstawiono odpowiednio przekroje poprzeczne złączy spawanych łukiem krytym, wiązką laserową i metodą hybrydową. Obserwacje



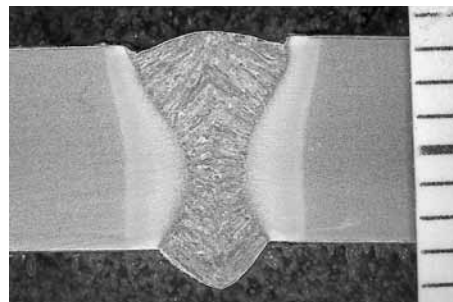
Rys. 4. Makrostruktura złącza stali T24 spawanego łukiem krytym. Trawiono nitałem. Na zdjęciu dodatkowo widoczny odcisk w spoinie po pomiarze twardości

Fig. 4. Macrostructure of T24 steel submerged arc welded joint. Nital etching. Visible the stamp from hardness measurement



Rys. 5. Makrostruktura złącza stali T24 spawanego laserowo. Trawiono nitałem

Fig. 5. Macrostructure of T24 steel laser beam welded joint. Nital etching



Rys. 6. Makrostruktura złącza stali T24 spawanego metodą hybrydową. Trawiono nitałem

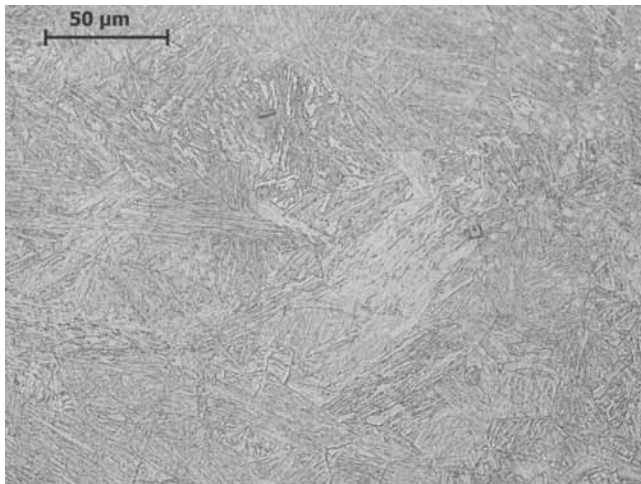
Fig. 6. Macrostructure of T24 steel hybrid method welded joint. Nital etching

makroskopowe potwierdziły występowanie niezgodności spawalniczych ujawnionych podczas obserwacji wizualnych. Dodatkowo odnotowano występowanie pustek gazowych (200) w złączu wykonywanym wiązką laserową. Maksymalny wymiar dla pojedynczego pęcherza (0,42 mm) mieścił się w wartości granicznej dla poziomu jakości B ($\leq 1,8$ mm; $f < 0,7\%$). W przypadku spawania metodami wysokoenergetycznymi zaobserwowano również niezgodność określaną jako przesunięcie brzegów (507). Zarówno w przypadku złącza spawanego wiązką laserową, jak i metodą hybrydową mieści się ono w wartości granicznej dla poziomu jakości B ($\leq 0,6$ mm) i wynosi odpowiednio 0,4 mm i 0,3 mm.

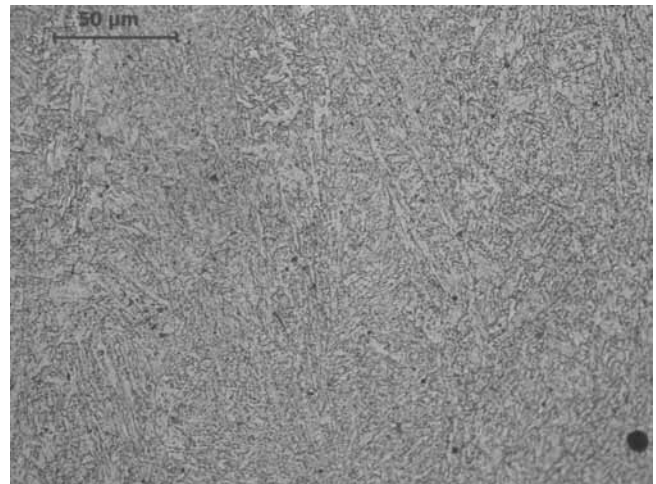
Badania mikroskopowe

Badania mikroskopowe wykazały brak istotnych różnic w mikrostrukturze strefy wpływu ciepła złączy spawanych metodami konwencjonalnymi i wysokoenergetycznymi. Na rysunku 7 przedstawiono obszar przegrzania, który został nagrany podczas spawania powyżej 1100°C . Charakteryzuje się on gruboziarnistą strukturą bainityczno-martenzytyczną z widocznymi wydzieleniami węglikoazotków tytanu. Na rysunku 8 przedstawiono obszar normalizowania o strukturze drobnoziarnistej, identycznej jak w przypadku materiałów poddanych wyżarzaniu normalizującemu. W obszarze częściowego przekształcenia (rys. 9), nagrzanego do temperatury w zakresie $A_{c1}-A_{c3}$, występują zarówno ziarna, które uległy przekształceniu (świeża struktura bainityczno-martenzytyczna), jak i ziarna charakterystyczne dla materiału rodzimego (wysokoodpuszczona struktura bainityczno-martenzytyczna).

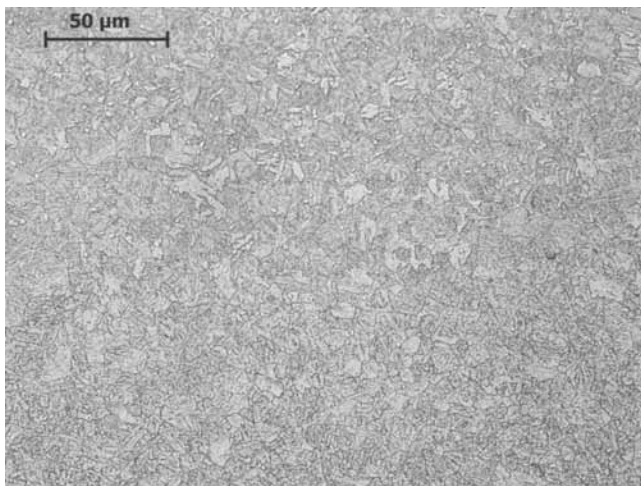
W obszarze spoiny (rys. 10÷12) obserwowana jest zróżnicowana mikrostruktura wynikająca z szybkości chłodzenia zależnej od stosowanej technologii spawania. Dodatkowo zaobserwowano, że poszczególne składniki mikrostruktury ulegają odmiennemu trawieniu, które może być determinowane przez szybkość odprowadzania ciepła. Dokładna analiza tego zagadnienia wymaga przeprowadzenia szczegółowych badań.



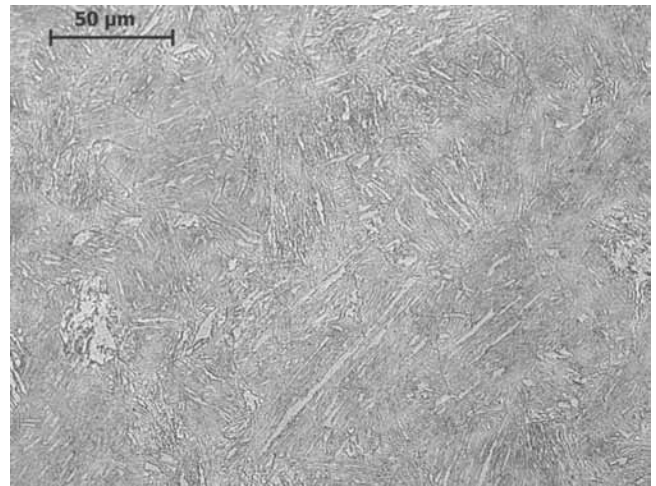
Rys. 7. Mikrostruktura w obszarze przegrzania SWC stali T24. Trawiono nitałem
Fig. 7. Microstructure of T24 steel in the overheating zone of HAZ. Nital etching



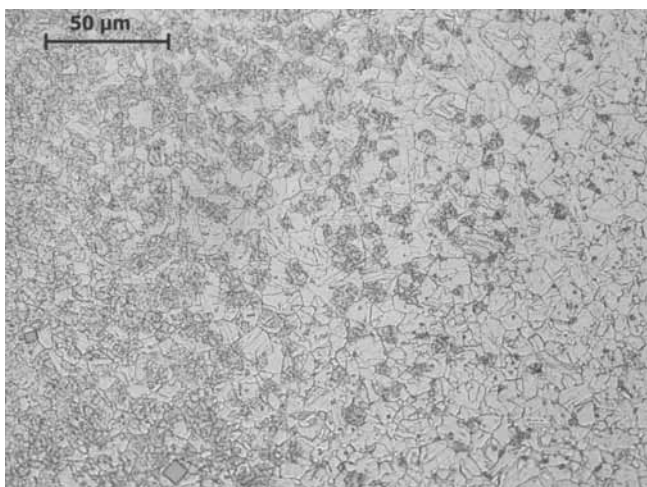
Rys. 10. Mikrostruktura spoiny stali T24 wykonanej łukiem krytym. Trawiono nitałem
Fig. 10. Microstructure of T24 steel weld metal made by submerge arc welding. Nital etching



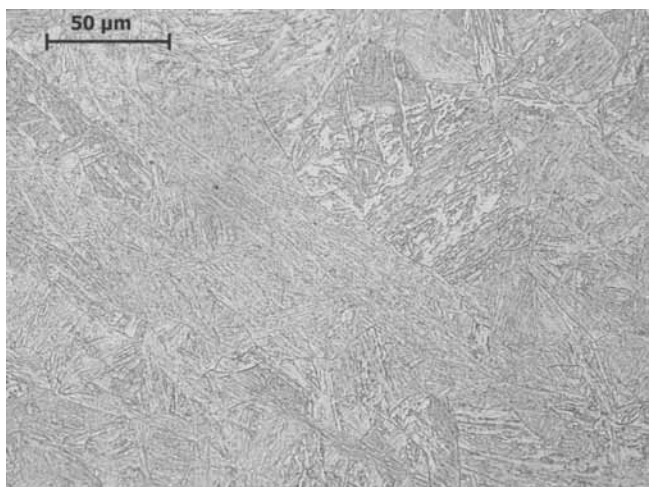
Rys. 8. Mikrostruktura w obszarze normalizowania SWC stali T24. Trawiono nitałem
Fig. 8. Microstructure of T24 steel in the normalizing zone of HAZ. Nital etching



Rys. 11. Mikrostruktura spoiny stali T24 wykonanej wiązką laserową. Trawiono nitałem
Fig. 11. Microstructure of T24 steel weld metal made by laser beam welding. Nital etching



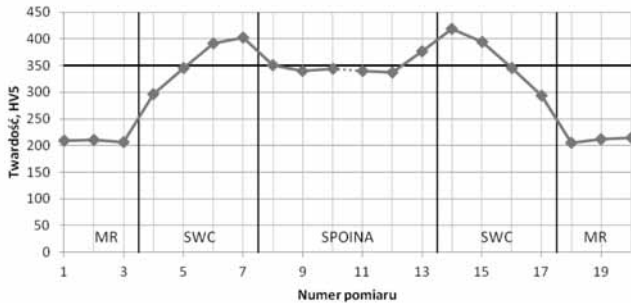
Rys. 9. Mikrostruktura w obszarze częściowego przekryształizowania SWC stali T24. Trawiono nitałem
Fig. 9. Microstructure of T24 steel in the recrystallization zone of HAZ. Nital etching



Rys. 12. Mikrostruktura spoiny stali T24 wykonanej metodą hybrydową. Trawiono nitałem
Fig. 12. Microstructure of T24 steel weld metal made by hybrid method. Nital etching

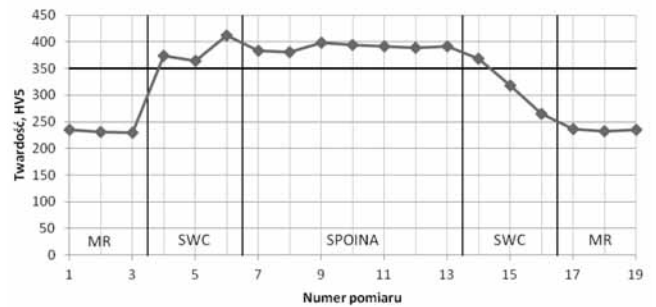
Pomiary twardości

Rozkłady wyników pomiarów twardości wykonanych na przekroju poprzecznym złączy spawanych przedstawiono dla poszczególnych metod na rysunkach 13÷15. We wszystkich złączach maksymalna wartość twardości w spoinie i SWC przekracza 350 HV₅, co może być m.in. przyczyną zwiększonej skłonności do występowania pęknięć zimnych.



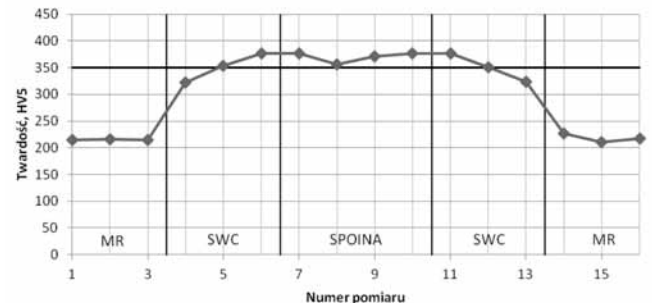
Rys. 13. Rozkład twardości w złączu stali T24 spawanym łukiem krytym

Fig. 13. Hardness distribution in the submerged arc welded joint of T24 steel



Rys. 14. Rozkład twardości w złączu stali T24 spawanym wiązką laserową

Fig. 14. Hardness distribution in the laser beam welded joint of T24 steel



Rys. 15. Rozkład twardości w złączu stali T24 spawanym metodą hybrydową

Fig. 15. Hardness distribution in the hybrid method welded joint of T24 steel

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały brak istotnego wpływu technologii spawania na mikrostrukturę strefy wpływu ciepła i twardość złączy spawanych. Jednakże zastosowanie spawania wysokoenergetycznego powoduje wzrost wydajności procesu łączenia i uzyskanie spoiny w jednym przejściu. Spoina ta ma odmienną mikrostrukturę niż spoiny wykonane łukiem krytym. Różnice te ujawniane są

na etapie trawienia. Prawdopodobną przyczyną ich występowania jest różna szybkość odprowadzania ciepła.

W omawianych przypadkach twardość w spoinie i strefie wpływu ciepła przekracza 350 HV₅, przy czym jej wartość w spoinie wykonanej łukiem krytym została przekroczona tylko w pobliżu linii wtopienia.

Literatura

- [1] J. Arndt, K. Haarmann, G. Kottmann, J. Vaillant, W. Bendick, G. Kubla, A. Arbab, F. Deshayes: The T23/T24 Book. New Grades for Waterwalls and Superheaters, Vallourec & Mannesmann Tubes, 2000.
- [2] R.-U. Husemann, W. Bendick, K. Haarmann, J. Heeschen, A. Helmrich: Der neue Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 für die Kesselkomponente Membranwand (Teil 2), VGB Kraftwerks Technik, 2000, nr 8, s. 97-101.
- [3] J. Adamiec: Produkcja paneli ścian szczelnych kotłów z nowej bainitycznej stali 7CrMoVTiB10-10, Spajanie metali i tworzyw w praktyce, 2008, nr 2, s. 14-18.
- [4] J. Adamiec, M. Więcek, W. Gawrysiuk: Spawanie łukiem krytym paneli ścian szczelnych kotłów przemysłowych z bainitycznej stali 7CrMoVTiB10-10, Spawanie w energetyce: XVI międzynarodowa konferencja Opole-Jarnołtówek, Opole, 23-25 kwietnia 2008.
- [5] E. Tasak, J. Adamiec, A. Ziewiec: Pęknięcie złączy spawanych stali bainitycznej w gatunku 7CrMoVTiB10-10 (T24), Spawanie w energetyce: XVI międzynarodowa konferencja Opole-Jarnołtówek, Opole, 23-25 kwietnia 2008.
- [6] E. Tasak, A. Ziewiec, J. Adamiec: „Wpływ wodoru na pęknięcie spoin w stalach bainitycznych i mikrostopowych,” Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 2008, R. 75, nr 4, s. 170-176.
- [7] J. Adamiec, A. Hernas: Experiences in welding of membrane panels made of 7CrMoVTiB10-10 (T24) steel, 14th International Research/Expert Conference: Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Mediterranean 66, Cruise, 11-18 września 2010.
- [8] J. Adamiec, M. Więcek, W. Gawrysiuk: Doświadczenia przy spawaniu łukiem krytym paneli ścian szczelnych kotłów z bainitycznej stali 7CrMoVTiB10-10, Spawanie w energetyce: XVII międzynarodowa konferencja Opole-Turawa, Opole, 20-23 kwietnia 2010.

- [9] W. Gawrysiuk, M. Więcek, J. Adamiec: Spawanie ścian szczelnych wykonanych ze stali T/P24 (7CrMoVTiB10-10). Fakty i Mity, Spawanie w energetyce: XVII międzynarodowa konferencja Opole-Turawa, Opole, 20-23 kwietnia 2010.
- [10] J. Adamiec: Hot cracking of welded joints of the 7CrMoVTiB10-10 (T/P24) steel, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2011, nr 22.
- [11] J. Adamiec: Pękanie złączy spawanych ze stali 7CrMoVTiB10-10, Materiały konferencji POWERWELDING 2011, Kroczyce - Ostaniec, 8-9 wrzesień 2011.
- [12] L. Mráz, P. Bernasovský, P. Zifčák, P. Brziak, J. Kotora, D. Krajčí, M. Mráz, J. Pecha: Skúsenosti s úžitkovými vlastnosťami ocele T24, Zváranie - Svařování, 2012, R. 61, nr 5-6, s. 105-114.
- [13] A. Ziewiec, K. Pańcikiewicz, E. Tasak: Pękanie spoin w stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) w czasie spawania, uruchamiania i eksploatacji bloków energetycznych, Przegląd Spawalnictwa, 2012, R. 84, nr 5, s. 2-7.
- [14] E. Tasak, A. Ziewiec, K. Pańcikiewicz: Problemy materiałowe przy wytwarzaniu ścian szczelnych kotłów energetycznych na parametry nadkrytyczne, Hutnik-Wiadomości Hutnicze, 2012, R. 79, nr 4, s. 247-253.
- [15] W. Gawrysiuk, M. Więcek, J. Adamiec: Spawanie hybrydowe (laser+MAG) paneli ścian szczelnych kotłów ze stali 7CrMoVTiB10-10, Materiały i technologie stosowane w budowie kotłów o parametrach nadkrytycznych o temperaturze pary do 700°C, Gliwice, 2013.

Podziękowanie

Autorzy dziękują firmie *Energoinstal Katowice* za wykonanie złącza spawanego metodą hybrydową oraz *Centrum Laserowych Technologii Metali w Kielcach* za wykonanie złącza spawanego wiązką laserową. Badania wykonano w ramach projektu nr 2012/07/N/ST8/00630.

ARTYKUŁY ARCHIWALNE PRZEGLĄDU SPAWALNICTWA

Cena

Cena 1 artykułu z numeru archiwalnego w wersji elektronicznej: 21 zł (w tym 5% VAT)

W celu zamówienia artykułu należy wypełnić formularz zamieszczony obok i przesłać go w formie skanu wraz z potwierdzeniem wpłaty na adres:

pspaw@ps.pl

Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:

Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie
45 1060 0076 0000 3200 0043 1836

Artykuły wysyłane są drogą elektroniczną w ciągu 2 dni od otrzymania zamówienia.

REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP

ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa
tel.: 22 827 25 42, faks: 22 336 14 79

Zamawiam artykuły:

Nr zeszytu:, rok, strony

Nr zeszytu:, rok, strony

Nr zeszytu:, rok, strony

Adres e-mail

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej: