

Hanna Purzyńska, Jacek Stroniewski,
Tymoteusz Jung, Michał Szulc

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza

ODPORNOŚĆ NA PEŁZANIE NOWOCZESNEJ STALI Thor 115

Głównym celem przeprowadzonych badań była analiza mikrostruktury oraz podstawowych właściwości mechanicznych nowoczesnej stali martenzytycznej Thor 115. Wdrażanie nowych materiałów dla energetyki wymaga nie tylko zdobycia wiedzy w zakresie stabilności mikrostruktury w wyniku długotrwałego oddziaływania temperatury i naprężenia ale także opracowania technologii wykonywania elementów konstrukcyjnych z wykorzystaniem technologii spawania. Szczegółowa analiza zmian mikrostruktury, właściwości mechanicznych oraz zastosowanie metod ilościowej analizy obrazu mikrostruktury tych stali po długotrwałym oddziaływaniu podwyższonej temperatury i naprężenia umożliwi opisanie i opracowanie modeli zmian w procesie wydzieleniowym, które z kolei pozwolą oszacować ich stopień wyczerpania a więc czas dalszej bezpiecznej eksploatacji elementów ciśnieniowych wykonanych z tej stali.

Słowa kluczowe: pełzanie, mikrostruktura, Thor 115, wydzielenia

CREEP RESISTANCE OF MODERN Thor 115 STEEL

The main goal of the research was to analyse the microstructure and basic mechanical properties of modern Thor 115 martensitic steel. The implementation of new materials for the power industry requires not only knowledge of the stability of the microstructure as a result of long-term exposure to temperature and stress, but also the development of technology for the fabrication of structural components using welding technology. A detailed analysis of changes in the microstructure, mechanical properties and the use of quantitative methods of analysing the image of the microstructure of these steels after long-term exposure to increased temperature and stress will enable the description and development of models of changes in the precipitation process, which, in turn, will allow to estimate their exhaustion level, and thus the time of further safe operation of pressure components made of this steel.

Keywords: creep, microstructure, Thor 115, precipitates

Wprowadzenie

Polska gospodarka w chwili obecnej jest w stanie podejmowania strategicznych decyzji związanych z kierunkami rozwoju elektroenergetyki. Wśród kilku uwarunkowań dokonywania koniecznej transformacji krajowej energetyki dwa są fundamentalne, a mianowicie dbałość o bezpieczeństwo energetyczne kraju oraz spełnianie ekologicznych wymagań UE. Osiągnięcie tego celu mają umożliwić wprowadzone mechanizmy stymulujące nowe niskoemisyjne i bezemisyjne technologie energetyczne. Aktualny stan polskiej energetyki jest i będzie oparty o tzw. mikś energetyczny, na który składa się głównie udział produkcji energii elektrycznej z bloków węglowych oraz OZE, które w UE są priorytetową strategią. Uwarunkowania geograficzne i klimatyczne Polski nie stwarzają warunków do znaczącego podniesienia (powyżej 23%) realnej produkcji energii z OZE i tym samym

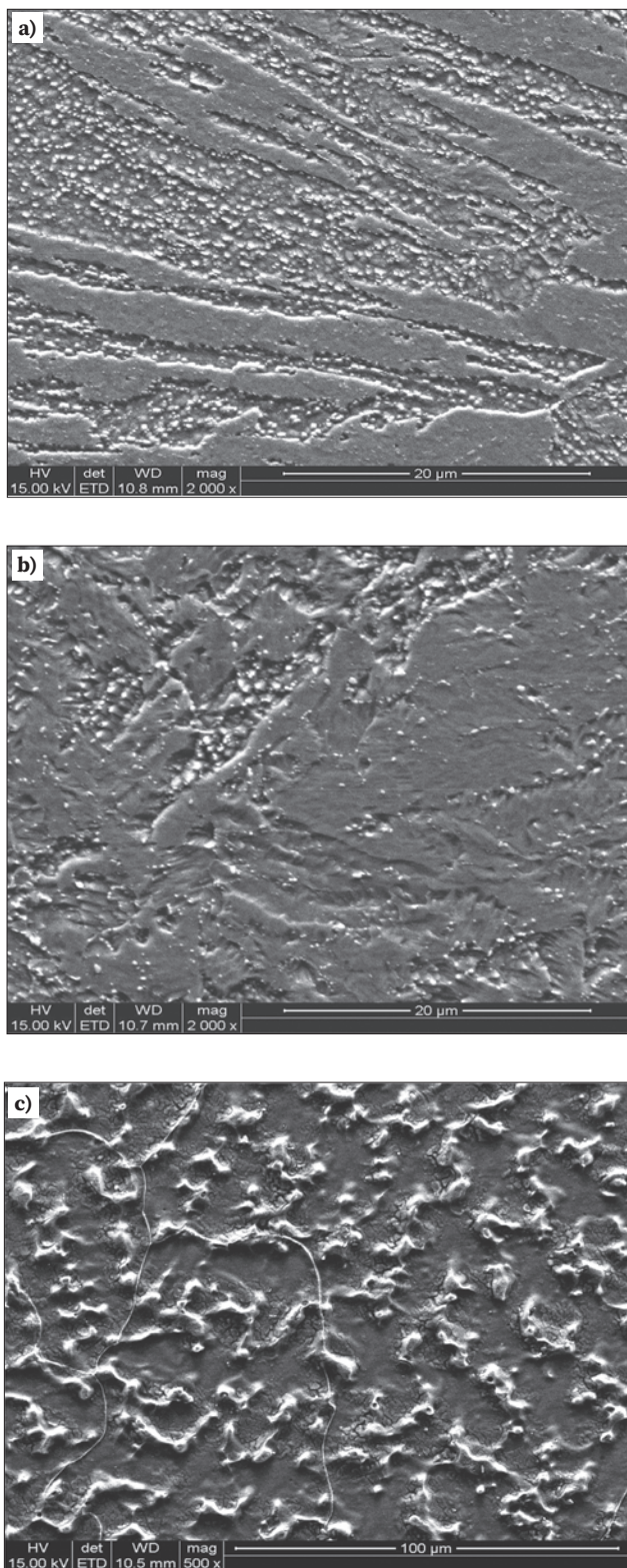
zapewnić bezpieczeństwa energetycznego. Ponadto okresowa efektywność tych źródeł, które często są bardzo niestabilne produkcyjnie, wymaga zabezpieczenia stabilizującego przez produkcję energii z bloków węglowych, narażając je na bardzo niekorzystne warunki eksploatacji w tzw. układzie regulacyjnym z bardzo częstymi odstawieniami i uruchomieniami. Powyższe czynniki spowodowały, że w Polsce opracowano strategię rozwoju sektora paliwowo-energetycznego, która wyznacza ramy transformacji energetycznej do 2040 r. Energetyka krajowa, pomimo coraz bardziej zaostrzonych przez Unię Europejską kryteriów ekologicznych, na długie lata będzie jednak oparta o spalanie węgla brunatnego i kamiennego ze stopniowym ograniczaniem ich udziału. PEP2040 zakłada, że udział produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem paliw kopalnych zmniejszy się z obecnych 76% do około 56% w roku 2030. Pokazuje to, że energetyka wysokotemperaturowa przez co najmniej kolejne 20 lat, pozostanie głównym źródłem energii w Polsce. Powyższe dane wskazują, że należy poszukiwać rozwiązań materiałowych do modernizacji pracujących jednostek energetycznych w naszym kraju.

Materiał i zakres badań

W ramach niniejszej pracy przedstawiono wstępne wyniki badań dwóch jednorodnych złączy stali Thor 115 spawanych przy użyciu dwóch materiałów dodatkowych: SNi6082 (ozn. A) i EPRI P87 (ozn. B) oraz jedno różnorodne złącze stali Thor 115 i stali T/P92 (ozn. C), spawane materiałem dodatkowym SNi6082. Wybrane złącza spawane zostały zbadane w stanie wyjściowym, przy czym zostaną również zbadane po długotrwałym wyżarzaniu w podwyższonej temperaturze. Do badań wykorzystano podstawowe i zaawansowane metody badań materiałowych, między innymi: skaningową i transmisyjną mikroskopię elektronową, statyczne próby rozciągania w temperaturze pokojowej i podwyższonej, pomiary twardości, rentgenowską analizę składu fazowego wydzielen. Próby pełzania są i będą kontynuowane w jednopróbkowych maszynach do prób pełzania a długotrwałe wyżarzanie w wielopróbkowych maszynach do prób pełzania produkcji własnej w Łukasiewicz – Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Porównanie próbek w stanie dostawy oraz po długotrwałym wyżarzaniu i pełzaniu, obejmujące materiał podstawowy, strefę wpływu ciepła oraz spoinę, pozwoli opracować charakterystyki materiałowe zawierające wyniki badań mechanicznych, mikrostruktury materiału oraz prób pełzania, co w efekcie końcowym umożliwi oszacowanie trwałości eksploatacyjnej, a tym samym czas dalszej bezpiecznej eksploatacji elementów pracujących w podwyższonej temperaturze wykonanych z nowoczesnej stali Thor 115.

Wyniki badań i dyskusja

Badania mikrostruktury przeprowadzono na jednorodnych złączach stali T115 spawanych przy uży-



Rys. 1. Obrazy elementów mikrostruktury materiału jednorodnego złącza spawanego A ze stali Thor 115/Thor 115 w stanie dostawy obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym na trawionym poprzecznym zglądzie metalograficznym: a) MR, b) SWC, c) SP

Fig. 1. Images of microstructure components of the material of similar welded joint A made of steel Thor 115/Thor 115 in the delivery condition observed using a scanning electron microscope on an etched transverse metallographic specimen: a) MR, b) SWC, c) SP

ciu dwóch materiałów dodatkowych SNI6082 (złącze A) oraz EPRI P87 (złącze B). Złącza po spawaniu poddane były obróbce cieplnej. W mikrostrukturze strefy wpływu ciepła złącza A oraz złącza B można wyróżnić dwa obszary SWC o strukturze drobnoziarnistej z licznymi o zróżnicowanej wielkości wydzieleniami. Wydzielenia obserwowano głównie na granicach ziaren byłego austenitu, na granicach listew oraz wewnątrz ziaren. Mikrostruktura spoiny złącza A i złącza B jest zbliżona.

Badania mikrostruktury przeprowadzono również na złączu różnorodnym ze stali Thor115 i T/P92 spawanego materiałem dodatkowym SNI6082 (złącze C). Materiał podstawowy stali Thor115 charakteryzuje się mikrostrukturą odpuszczonego martenzytu z licznymi wydzieleniami, występującymi głównie na granicach ziaren byłego austenitu, listwach martenzytu oraz wewnątrz listew. W stanie wyjściowym materiał podstawowy stali P92 charakteryzuje się mikrostrukturą z dominującym udziałem odpuszczonego martenzytu listwowego.

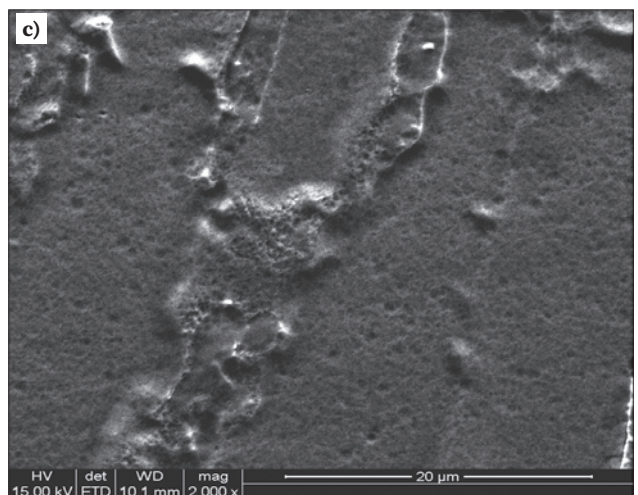
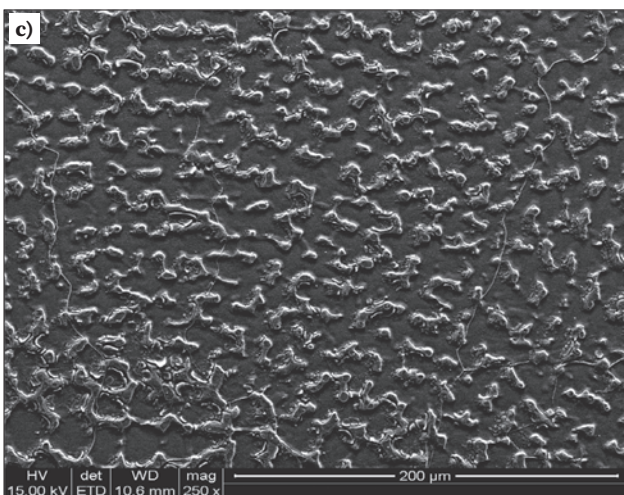
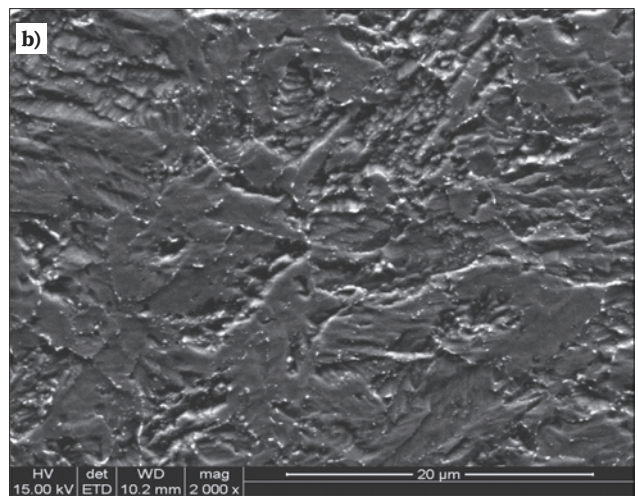
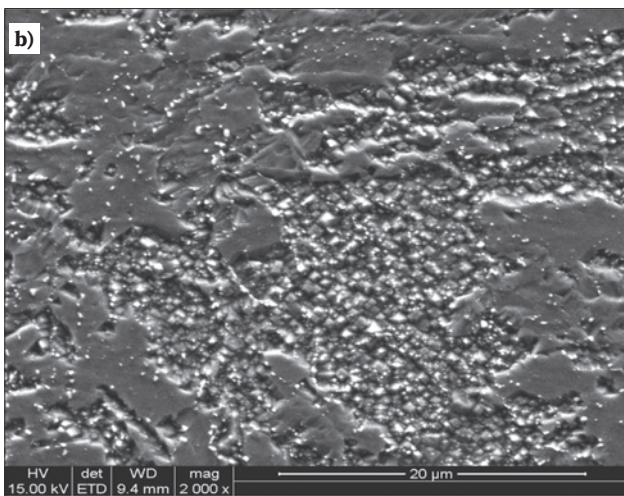
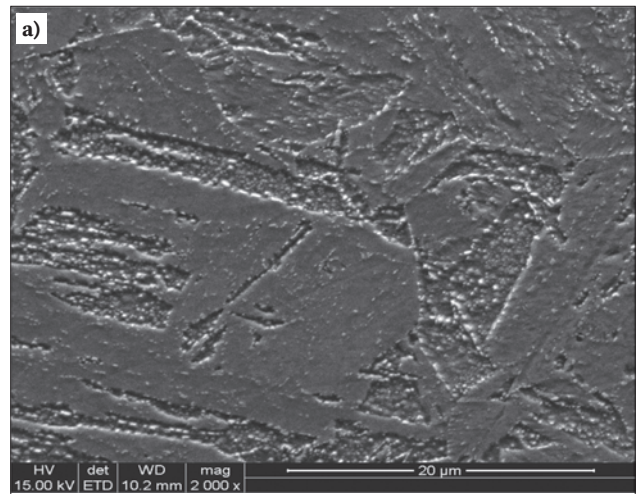
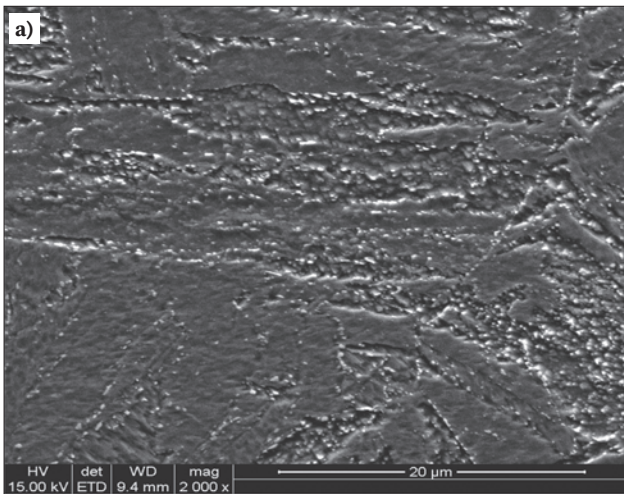
Na rys. 4 przedstawiono krzywe pełzania w postaci zależności średniego wydłużenia procentowego A_f od czasu trwania próby, uzyskane podczas prób pełzania z pomiarem wydłużenia w czasie jej trwania.

Zastosowano parametry naprężeniowo-temperaturowe zgodne z zaproponowanymi przez producenta badanej stali. Dla złączy spawanych okazało się, że dane parametry skutkują czasem trwania prób dużo krótszym niż 3000 godzin w związku z czym nie udało się wyznaczyć szybkości pełzania. Zdecydowano o przeprowadzeniu prób pełzania przy parametrach niższych, niż zakładane przez producenta stali. Uzyskane wyniki przeprowadzonych prób pełzania można traktować porównawczo pomiędzy złączami wykonanymi różnymi materiałami dodatkowymi.

Podsumowanie

Według wstępnych badań złączy spawanych w stanie dostawy wykonanych ze stali Thor 115 oraz Thor 115 i T/P92 dwoma różnymi materiałami dodatkowymi można stwierdzić, że złącza spawane materiałem SNI6082 jak i EPRI P87 charakteryzują się wysoką jakością, co jest potwierdzone w badaniach mikrostruktury, jak i w wykonanych pomiarach twardości. Spawalność stali Thor 115 można porównać do innych niskowęglowych stali o podstawie martenzytowej. Nie są wymagane specjalne środki ostrożności przed spawaniem i po spawaniu w porównaniu ze stalą T/P91.

Badania stanu mikrostruktury złączy spawanych ujawniły charakterystyczne obrazy struktury dla badanych stali, zarówno w materiale podstawowym, w strefach wpływu ciepła, jak i w spoinach. Kontynuowane są badania stanu mikrostruktury badanych złączy w stanie wyjściowym na mikroskopie transmisyjnym oraz skaningowym, celem analizy wydzieleni ujawnionych w obrazie mikrostruktury w SEM.

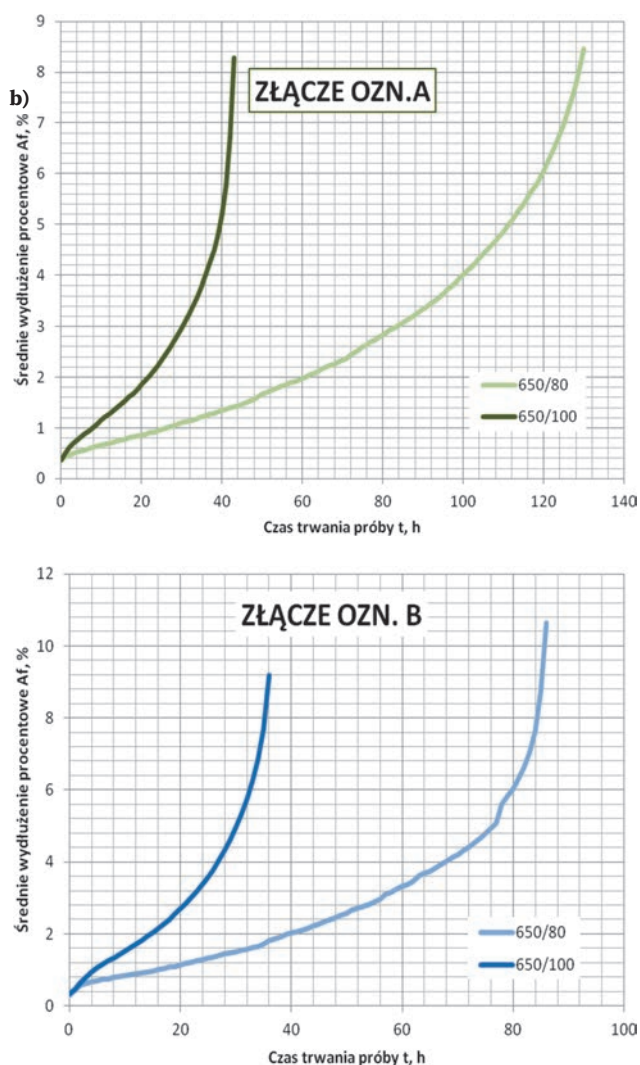


Rys. 2. Obrazy elementów mikrostruktury materiału jednorodnego złącza spawanego B ze stali Thor 115/Thor 115 w stanie dostawy obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym na trawionym poprzecznym zglądzie metalograficznym: ozn. MR1.a) MR, b) SWC, c) SP

Fig. 2. Images of microstructure elements of the material of homonymous welded joint B made of steel Thor 115 / Thor 115 in the delivery condition, observed in a scanning electron microscope on an etched transverse metallographic specimen: marked MR1.a) MR, b) SWC, c) SP

Rys. 3. Obrazy elementów mikrostruktury materiału jednorodnego złącza spawanego ze stali Thor 115/Thor 115 ozn. B w stanie dostawy obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym na trawionym poprzecznym zglądzie metalograficznym: ozn. MR1.a) MR, b) SWC, c) SP

Fig. 3. Images of microstructure elements of the material of homonymous welded joint made of Thor 115 / Thor 115 steel marked B in the delivery condition, observed in a scanning electron microscope on an etched transverse metallographic specimen: marked MR1.a) MR, b) SWC, c) SP



Rys. 4. Wyniki prób pełzania z pomiarem wydłużenia materiału dwóch złączy spawanych stali Thor115 ozn. A i B w stanie wyjściowym w temperaturze badania 650°C przy dwóch różnych poziomach naprężenia $\sigma_{b1} = 80$ MPa i $\sigma_{b2} = 100$ MPa

Fig. 4. Results of creep tests with measurement of elongation of the material of two welded joints of Thor115 steel marked A and B in the initial state at the test temperature of 650°C at two different stress levels $\sigma_{b1} = 80$ MPa and $\sigma_{b2} = 100$ MPa

Badania pełzania przeprowadzono dla materiału podstawowego stali Thor 115 oraz dla złączy spawanych dwoma różnymi materiałami dodatkowymi. Przy wysokich parametrach temperaturowo-naprężeniowych wyniki dla materiału podstawowego można porównać z wynikami prób pełzania przeprowadzonymi dla stali P91. Dla złączy spawanych wykonanych różnymi materiałami dodatkowymi mniejszą szybkość odkształcenia i dłuższe czasy trwania prób wykazało złącze wykonane materiałem SNI6082. Próby są kontynuowane przy niższych parametrach temperaturowo-naprężeniowych.

Z wycinków złączy spawanych wykonano próbki, które zostały umieszczone w piecach wielopróbkowych celem przeprowadzenia długotrwałego starzenia. Zaplanowano prowadzenie długotrwałego starzenia w temperaturze 600°C i 650°C przez okres 1000, 3000 i 10 000 godzin.

Następnie na materiale po wyżarzaniu planowane są badania mikrostruktury, podstawowych właściwości wytrzymałościowych oraz przeprowadzenie prób pełzania celem stworzenia charakterystyk materiałowych dla badanych złączy, które umożliwią ocenę trwałości eksploatacyjnej stali Thor115 i wykonanych z niej złączy spawanych.

LITERATURA

- [1] *Polityka energetyczna Polski do 2040 r.* Monitor Polski, 2021, poz. 264.
- [2] J. Dobrzański. *Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki.* Monografia. Wydawnictwo Open Access Library, 2011, 3. ISBN 978-83-63553-43-2.
- [3] A. Zieliński. *Trwałość eksploatacyjna żarowytrzymałych stali o osnowie ferrytycznej w warunkach długotrwałego oddziaływania temperatury.* Monografia habilitacyjna. Gliwice: Instytut Metalurgii Żelaza im. St. Staszica, 2016.
- [4] H. Purzyńska, G. Golański, A. Zieliński, J. Dobrzański, M. Sroka. Precipitation study in Ti-stabilised austenitic stainless steel after 207,000 h of service. *Materials at High Temperatures*, 2019, 36 (4), s. 296–303.
- [5] A. Hernas, J. Dobrzański, J. Pasternak, S. Fudali. *Charakterystyki nowej generacji materiałów dla energetyki.* Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej, 2015.
- [6] M. Urzyncok, K. Kwieciński, J. Slania, M. Szubryt, P. Mariani. Comparison of SMAW and GMAW Methods used in P92 Butt Welds. W: *1st Australasian International Welding, Inspection and NDT (iwin2013) Conference*, Perth, Australia, 10–13 marca 2013.
- [7] M. Urzyncok, K. Kwieciński. Fabrication experience of new high oxidation material – Thor™ 115. W: *EPRI's Conference on Advances in Materials Technology*. ASM International, 2019.
- [8] M. Ortolani, M. D'inciau, R. Ciancio, P. Scardi. Microstructural Evolution of Thor™ 115, creep strength enhances ferritic steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48 (12), s. 6111–6117.
- [9] M. Urzyncok, K. Kwieciński, M. Szubryt. Testing butt joints in pipes made of VM12-SHC martensitic steel. *Welding International*, 2012, 28 (2), s. 1–6.
- [10] M. Ortolani, S. Baietta, E. Escorza. New Generation Ferritic Steels for more Efficient Power Plants. W: *POWER-GEN International 2017: Convergence and Collaboration*. Las Vegas 5–7 grudnia 2017.
- [11] G. Golański, A. Merda, K. Klimaszewska, M. Urzyncok, J. Slania. Microstructure and mechanical properties of welded joints of Thor 115 steel. *Arch. Metall. Mater.* 2020, 65 (2), s. 743–748.
- [12] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN 10216-2+A1:2020-05. *Rury stalowe bez szwu do zastosowań ciśnieniowych – Warunki techniczne dostawy – Część 2: Rury ze stali niestopowych i stopowych z określonymi własnościami w temperaturze podwyższonej.* Warszawa: PKN 2020.
- [13] H. Purzyńska, A. Zieliński, J. Stroniewski. Wpływ procesów wydzieleniowych na utratę trwałości eksploatacyjnej stali o osnowie ferrytycznej. W: *MTS Conference Materials Technologies in Silesia*. Zawiercie 13–16 października 2019.
- [14] Tenaris. Inspection certificate, (UNI EN 10204 3.1/ISO 10474 3.1.B) 2014.
- [15] S.A. David, J.A. Siefert, Z. Feng. Welding and weldability of candidate ferritic alloys for future advanced ultrasupercritical fossil power plants. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2013, 18 (8), s. 631–651.
- [16] K. Kwieciński, M. Urzyncok, A. Ferrara, V. Barsan. Practical experience with welding new generation steel Thor 115 assigned for Power industry. W: *29th International Conference on Metallurgy and Materials*. Brno, Czech Republic, EU, 20–22 maja, 2020, s. 603–608.
- [17] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN ISO 15614-1:2017. *Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie*

technologii spawania – Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu. PKN 2017.

- [18] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN 12952-6:2011. *Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze – Część 6: Badania podczas wytwarzania, sporządzanie dokumentacji i znakowanie części ciśnieniowych kotłów*. Warszawa: PKN 2011.
- [19] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN ISO 6507-1:2018. *Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badania*. PKN 2018.
- [20] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN ISO 9015-1:2018-05. *Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badania*. Warszawa: PKN 2018.
- [21] A. Jasiński, A. Zieliński, H. Purzyńska. Residual life of repair welded joints in pipelines made of 13HMF after use for the design operating time. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza* 2018, 70 (3), s. 2–10.
- [22] J. Dobrzański. The procedure for Determining the time of Safe Service beyond the Design Service Time Based on Creep Testing. W: T.A. Tański (Ed.) *Creep Characteristics of Engineering Materials*. Londyn, United Kingdom: IntechOpen, 2019.
- [23] M. Urzunicok, K. Kwieciński, M. Szubryt, J. Słania. Application of new GMAW welding methods used in prefabrication of P92 (X10CrWMoVNb9-2) pipe butt welds. W: *9th Liege Conference on Materials for Advanced Power Engineering*. Liege, Belgium, 27–29 września, 2010.