

Diagnostyka złączy spawanych pracujących w warunkach pełzania

Diagnostics of welded joints working under creep conditions

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań nieniszczących oraz niszczących złączy spawanego rurociągu parowego pracującego w warunkach pełzania. Opisano sposób podejścia do oceny stanu technicznego materiału złączy spawanych rurociągów wysokoprężnych pary pracujących powyżej obliczeniowego czasu pracy oraz metodykę oceny wyników badań. Przedstawiono wyniki badań niszczących złączy spawanego usuniętego z instalacji na podstawie negatywnych wyników badań nieniszczących. Analizy te obejmowały badania metalograficzne wykonane na mikroskopie skaningowym, badania własności mechanicznych oraz skrócone próby pełzania. Zwrócono uwagę na wpływ jakości wykonania złączy spawanych na bezpieczeństwo eksploatacji urządzeń energetycznych.

Słowa kluczowe: pełzanie; diagnostyka

Abstract

The paper presents the results of non-destructive and destructive testing of the welded joint of the steam pipeline working under creep conditions. The purpose of this study is to describe the approach to assessment of technical condition of material of welded joints of hp steam pipelines in operation beyond the design work time and to define the methodology for assessing test results. The paper provides the results of destructive testing of the welded joint removed from the installation due to the negative results of non-destructive testing. The analysis comprises metallographic examination by means of a scanning electron microscope, the evaluation of mechanical properties and abridged creep tests. Particular attention is paid to the influence of quality of welded joints on operational safety of power equipment.

Keywords: creeping; diagnostics

Wstęp

Spawanie to podstawowa metoda łączenia elementów kotłów i rurociągów wysokoprężnych pary stosowanych w energetyce. Złącza spawane, jako jedne ze składowych części urządzeń wytwarzających parę, poddawane są obciążeniom związanym z ciśnieniem i temperaturą czynnika roboczego czy powstającymi momentami skręcającymi i zginającymi. Oddziałujące długotrwale na materiał danego elementu obciążenia są przyczyną spadku jego właściwości mechanicznych i skracają czas bezpiecznej eksploatacji [1÷11]. Dotyczy to przede wszystkim elementów pracujących powyżej temperatury granicznej, gdzie zachodzi proces ciągłego, powolnego odkształcenia plastycznego przy naprężeniach niższych od granicy plastyczności [2,3]. Możliwości eksploatacyjne złączy spawanych pracujących w warunkach pełzania uzależnione są również od jakości ich wykonania. W warunkach przemysłowych wykonanie złączy spawanego o wysokiej klasie jakości wymaga wysokiej kultury technicznej personelu oraz stosowania odpowiednio dobranych materiałów dodatkowych. Końcowa weryfikacja, która pozwala dopuścić dane złącze spawane do eksploatacji, wymaga

doboru odpowiedniego programu badań diagnostycznych, aby ocenić rzeczywisty stan techniczny złączy. Opiera się ona głównie na badaniach nieniszczących oraz – tam, gdzie wymaga tego sytuacja – na badaniach niszczących [7÷11].

Badania nieniszczące

Zachowanie bezpiecznej eksploatacji urządzeń energetycznych wymaga wykonywania okresowych badań, które mają na celu uzyskanie informacji na temat ich rzeczywistego stanu technicznego. Zdobyte informacje pozwalają na określenie możliwości dalszej pracy badanych elementów. W przypadku złączy spawanych pracujących w warunkach pełzania jest to szczególnie istotne, ponieważ ich możliwości eksploatacyjne są często nawet o połowę mniejsze niż elementów łączonych. Przy zastosowaniu odpowiedniego programu badań nieniszczących, opartego na wieloletnich doświadczeniach, oraz wytycznych UDT można zagwarantować odpowiednie bezpieczeństwo eksploatacji takich złączy,

a także określić konieczne do wykonania naprawy oraz prace zapobiegawcze. Program diagnostyczny może obejmować następujące rodzaje badań:

- badania wizualne powierzchni zewnętrznych złączy spawanych oraz powierzchni wewnętrznych,
- badania magnetyczno-proszkowe oraz penetracyjne, które umożliwiają wykrycie uszkodzeń powierzchniowych,
- badania objętościowe ultradźwiękowe lub radiograficzne umożliwiające wykrycie wad wewnętrznych,
- badania metalograficzne metodą replik, za pomocą których dokonuje się oceny stanu technicznego materiału oraz jego stopień wyczerpania (określenie przydatności do dalszej eksploatacji).

W przypadku rurociągów istotnym elementem oceny jest stan techniczny systemu zamocowań. Zachowanie poprawnej pracy systemu związane jest z prowadzeniem regularnych przeglądów oraz wykonywania na bieżąco koniecznych napraw. Brak takich działań może prowadzić do lokalnego wzrostu poziomu naprężeń w materiale, co sprzyja przyspieszonemu zużyciu. Na rysunkach 1÷4 przedstawiono przykłady wad złączy spawanych wykrytych podczas badań nieniszczących.

Diagnostyka złączy spawanych nie sprowadza się jedynie do wykonania samych badań. Obejmuje ona również ocenę rzeczywistego stanu technicznego złączy i określenie perspektywy dalszej bezpiecznej ich eksploatacji. Główne znaczenie mają tutaj badania metalograficzne z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego pozwalające oszacować



Rys. 1. Badania wizualne za pomocą wideoendoskopu. Fragment spoiny obwodowej. Punktowy brak przetopu [1]

Fig. 1. Visual inspection with the use of video endoscope. Fragment of the circumferential weld. Spot missing joint penetration [1]



Rys. 2. Badania wizualne za pomocą wideoendoskopu. Fragment spoiny obwodowej. Wklęsłość grani spoiny i podtopienia [1]

Fig. 2. Visual inspection with the use of video endoscope. Fragment of the circumferential weld. Concavity of the weld root and its shrinkage [1]



Rys. 3. Badania magnetyczno-proszkowe. Pęknięcie na spoinie pachwinowej króćca odwodnienia [1]

Fig. 3. Magnetic particle tests. Cracking on the fillet weld of the drain nozzle [1]



Rys. 4. Badania magnetyczno-proszkowe. Pęknięcie w miejscu wykonania wcześniejszej naprawy [1]

Fig. 4. Magnetic particle tests. Cracking at the place of previous repair [1]

bezpieczny czas pracy. Metodykę oceny wyników badań złączy oraz pozostałych elementów pracujących w warunkach pełzania przedstawiono na rysunku 5.

Badania niszczące

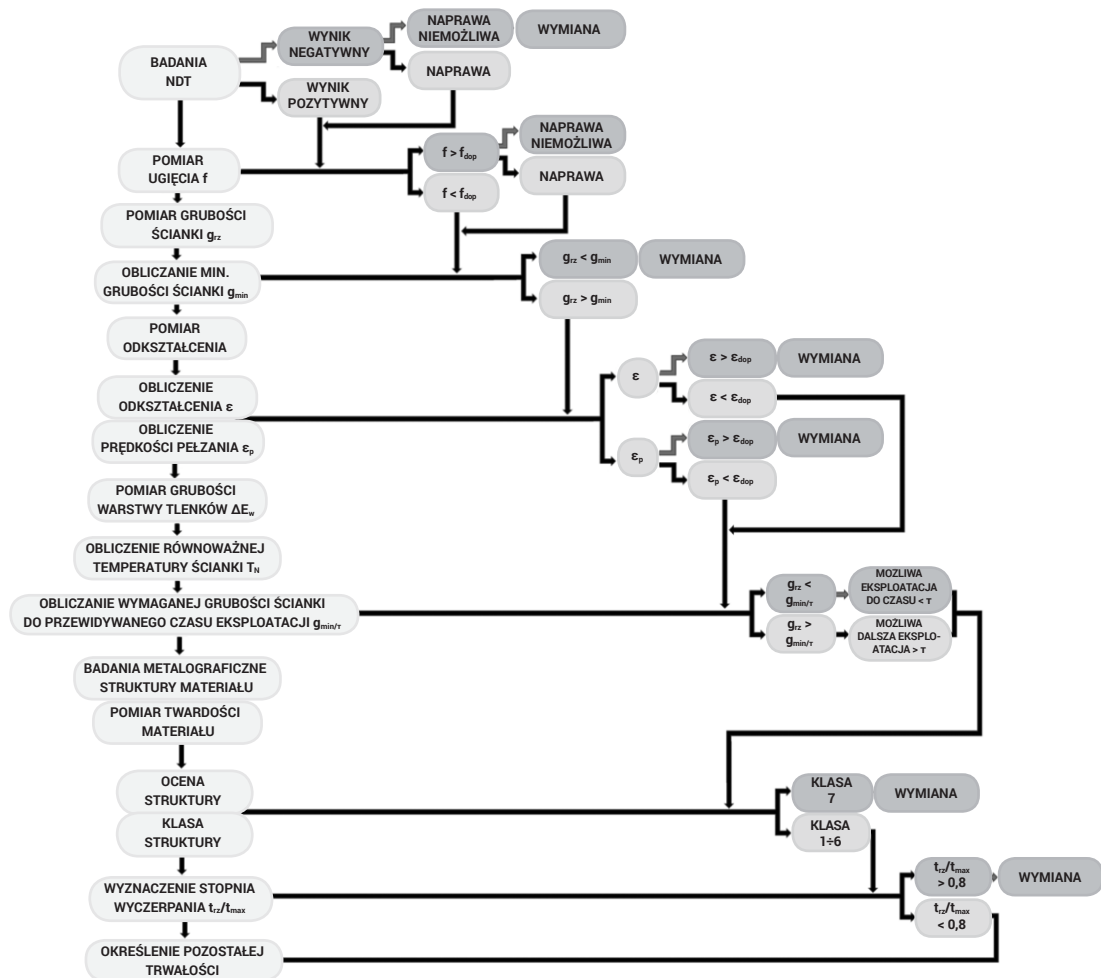
Opracowanie wytycznych do badań niszczących, które umożliwiają ocenę stanu materiału złącza spawanego po eksploatacji w warunkach pełzania wymaga wyznaczenia szeregu wskaźników wytrzymałościowych, oprócz wymaganych normami przedmiotowymi dla materiału w stanie wyjściowym, oraz ujawnienia stanu struktury.

W praktyce ocena sprowadza się do wyznaczenia trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzałnej oraz przyporządkowaniu im stopnia wyczerpania, które odniesione do parametrów roboczych dalszej eksploatacji (pr, Tr) określają przydatność do dalszej pracy.

Wybór metody badań niszczących lub ich kombinacji zależy od rodzaju i dostępu do analizowanego elementu, usytuowania w nim miejsc o największym wyężeniu oraz względów ekonomicznych.

W grupie metod oceny trwałości resztkowej polegających na niszczących badaniach materiałów po eksploatacji można wyróżnić:

- próby pełzania,
- statyczne, udarowe i zmęczeniowe próby mechaniczne,
- badania metalograficzne,
- badania własności fizycznych,
- badania szybkości odkształcania materiału.



Rys. 5. Metodyka oceny wyników badań elementów pracujących w warunkach pełzania materiału [12]
 Fig. 5. Evaluation method for test results of elements operating under material creeping conditions [12]

Na podstawie danych literaturowych i wieloletnich doświadczeń z badań diagnostycznych stwierdzono przydatność szeregu metod badań niszczących, a w szczególności:

- badań właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej i podwyższonej,
- badań udarności w celu wyznaczenia progu kruchości,
- długotrwałych prób pełzania do zerwania bez pomiaru wydłużenia w czasie trwania próby,
- długotrwałych prób pełzania z pomiarem wydłużenia w czasie trwania próby,
- przyspieszonych prób pełzania,
- badań struktury i twardości na zglądach litych próbek.

Niszczące badania materiałowe elementów po eksploatacji wymagają bezpośredniego dostępu do elementu oraz możliwości pobrania reprezentatywnych próbek do badań.

Stosowane metody badań niszczących do oceny stanu materiału i dopuszczenia do dalszej eksploatacji elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania sprowadzają się do wyznaczenia trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzalnej.

Badania takie umożliwiają dokładną ocenę stopnia wyczerpania i stopnia uszkodzenia badanego materiału bez znajomości historii warunków dotychczasowej eksploatacji, a zwłaszcza naprężeń roboczych i rzeczywistej temperatury pracy oraz bez wykorzystywania standardowych danych materiałowych (dla stanu wyjściowego).

Badania własności wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej i podwyższonej

Badania własności wytrzymałościowych materiałów po długotrwałej eksploatacji pracujących w warunkach pełzania

i zmęczenia przeprowadzane są w próbach rozciągania w temperaturze pokojowej i podwyższonej celem wyznaczenia:

- wytrzymałości na rozciąganie R_{mT} ,
- granicy plastyczności R_{eT} ,
- wydłużenia A_5 ,
- granicy plastyczności R_{eT} .

Wyniki takich badań pozwalają stwierdzić czy badany materiał spełnia wymagania w zakresie wyżej wymienionych wskaźników wytrzymałościowych dla wymagań norm przedmiotowych na wyroby hutnicze z badanego gatunku stali.

Nie znaleziono korelacji pomiędzy badanymi wskaźnikami wytrzymałościowymi a własnościami na pełzanie materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, której to korelacji nie ma również dla materiałów w stanie dostawy hutniczej.

Wyniki badań własności wytrzymałościowych (R_{mT} , R_{eT} , A_5 , R_{eT}) w powiązaniu z obrazem struktury, odniesionym do posiadanych charakterystyk wytrzymałości na pełzanie materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania i odpowiadającego mu stopnia wyczerpania, pozwalają na ocenę stanu materiału i szacowanie jego przydatności do dalszej pracy.

Badania udarności w celu wyznaczenia progu kruchości

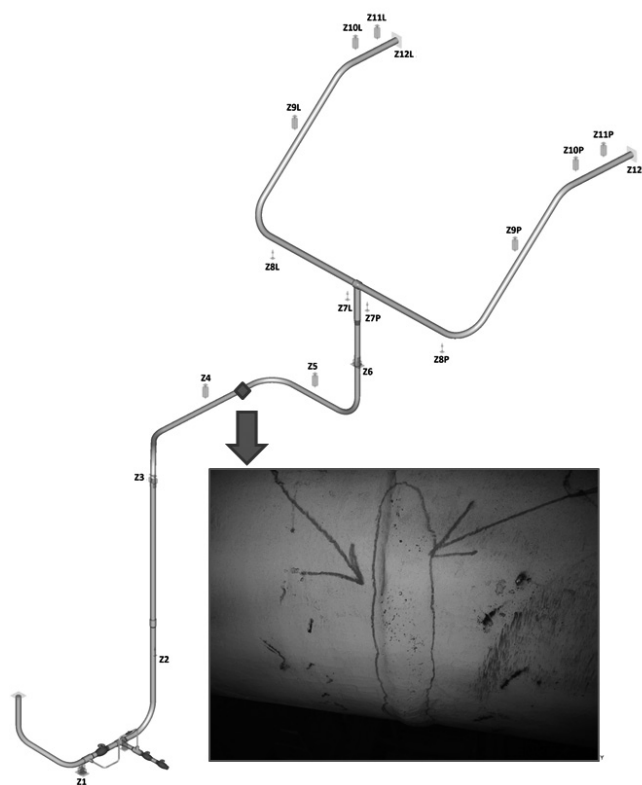
W celu oceny trwałości resztkowej materiału po długotrwałej eksploatacji wykonuje się badania udarności na próbkach z karbem „V”, wykonanych w różnej temperaturze badania.

W porównaniu ze stanem dostawy temperatura przejścia w stan kruchy dla większości materiałów badanych elementów ze stali Cr-Mo i Cr-Mo-V jest przesunięta do wyższych wartości. Tylko w nielicznych przypadkach materiał

po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania charakteryzuje się poziomem udarności o wartościach wyższych niż minimalna wymagana dla materiału w stanie dostawy hutniczej. Na podstawie własnych doświadczeń i danych literaturowych zauważono, że wartość udarności nie zależy wyłącznie od rozwoju procesów wydzieleniowych w wyniku pełzania, ale również od rozwoju wewnętrznych uszkodzeń i powstałych w czasie eksploatacji nieciągłości struktury. Można zatem stwierdzić, że metoda badań udarności na materiale po eksploatacji w warunkach pełzania jest tylko pośrednio przydatna do oceny trwałości resztkowej i wyznaczenia stopnia wyczerpania. Może jednak posłużyć do oceny zdolności materiału do przenoszenia obciążeń związanych z wykonywanymi próbami ciśnieniowymi oraz odstawieniami i uruchomieniami instalacji w procesie jej dalszej eksploatacji. Dane literaturowe i własne doświadczenia w diagnostyce elementów ciśnieniowych kotłów potwierdzają:

- konieczność przeprowadzania dla materiału po eksploatacji ciśnieniowych prób wodnych w temperaturze wyższej niż 30 °C z zachowaniem statycznego sposobu napełniania wodą badanego układu,
- konieczność ścisłego przestrzegania dopuszczalnych szybkości wzrostu temperatury układu przy rozruchach oraz jej spadku przy odstawieniach.

Dochowanie przyjętych procedur przy prowadzeniu wodnych prób ciśnieniowych oraz w czasie rozruchów i odstawień umożliwia dalszą bezpieczną eksploatację elementów po długotrwałej eksploatacji, co potwierdza przydatność tych badań w praktyce diagnostycznej.



Rys. 6. Schemat rurociągu oraz lokalizacja wadliwej spoiny [1]
Fig. 6. Pipeline diagram and the location of the defective weld [1]

Przedmiot badań

Przedmiotem badań była spoina obwodowa pobrana z rurociągu pary wysokoprężnej łączącego kocioł typu OP-230 z turbozespołem. Podstawowe parametry eksploatacyjne rurociągu przedstawiono w tabelicy I.

W wyniku przeprowadzonych okresowych badań nieniszczących rurociągu stwierdzono na jednym ze złączy obwodowych $\varnothing 237,0 \times 32,0$ obecność wad w postaci porów lica, które obejmowały odcinek o długości ok. 30 mm (rys. 6).

Podjęto próbę usunięcia wad przez szlifowanie, która nie dała oczekiwanych rezultatów, ponieważ w późniejszym czasie pojawiały się wady w postaci pęcherzy oraz zażużeń.

Po wybraniu materiału spoiny na głębokość 10 mm podjęto decyzję o konieczności usunięcia złącza i wykonaniu naprawy przez zamontowanie wstawki o długości ok. 1000 mm. Takie rozwiązanie pozwoliło uniknąć wprowadzenia niekorzystnego stanu naprężeń w rurociągu.

Badania niszczące złącza

Przeprowadzone badania niszczące złącza spawanego obejmowały m.in.:

- badania struktury w skaningowym mikroskopie elektronowym;
- badania właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej i podwyższonej zbliżonej do temperatury pracy;
- pomiar twardości;

Tabela I. Podstawowe dane techniczne rurociągu [1]

Table I. Basic technical data of the pipeline [1]

Ciśnienie obliczeniowe [MPa]	Temp. obliczeniowa [°C]	Ilość godzin pracy [h]	Wymiary		Materiał podstawowy
			\varnothing [mm]	Grubość ścianki [mm]	
16,2	540	224 000	327,9 273,0	60 32	10H2M 13HMF

- skrócone próby pełzania celem wyznaczenia rozporządzalnej trwałości resztkowej, która jest czasem bezpiecznej eksploatacji w założonych parametrach dalszej pracy.

Wyniki badań metalograficznych

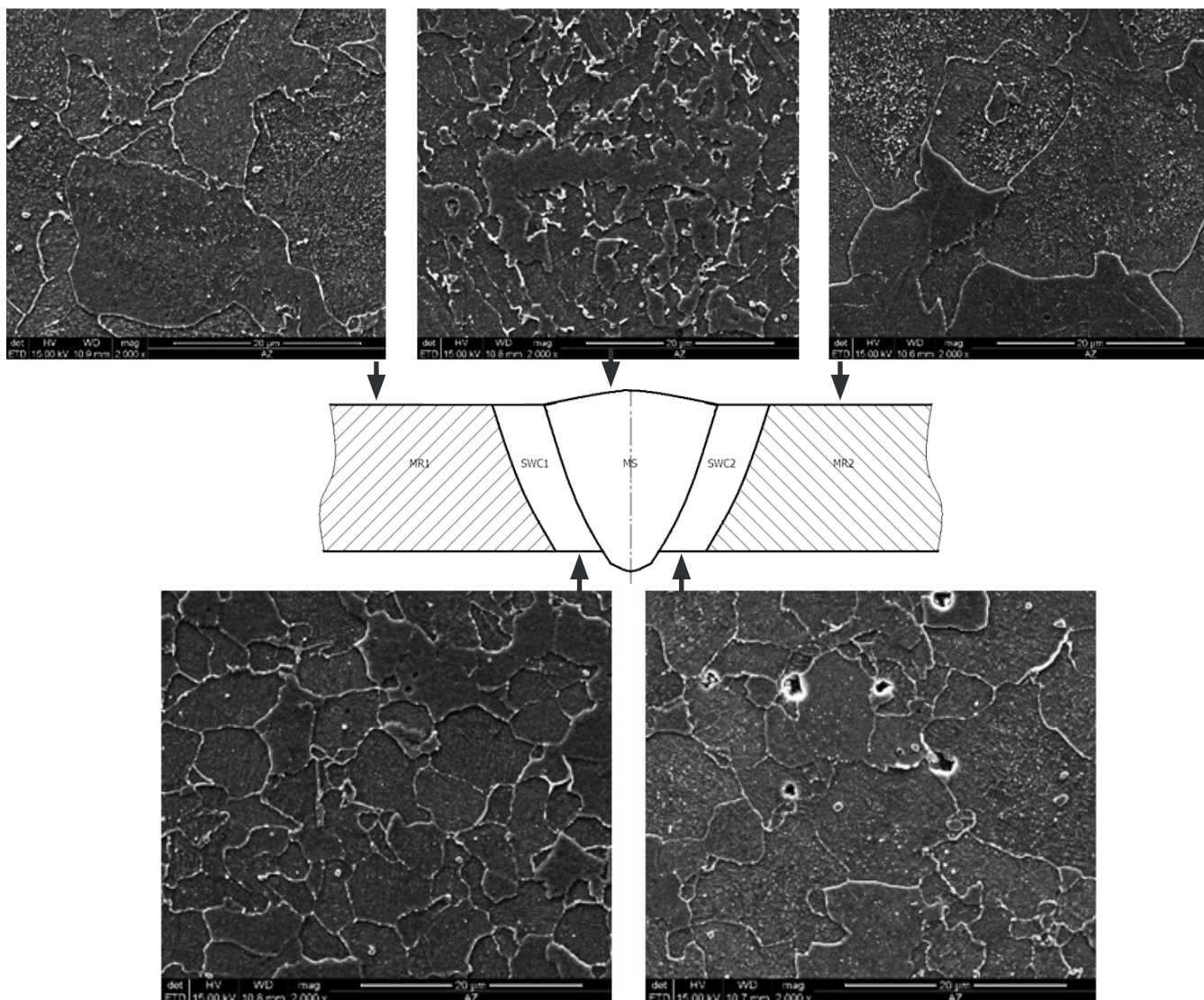
Przeprowadzone wyniki badań struktury materiału badanego złącza wykazały, że materiał rodzimy posiada strukturę ferrytyczno-bainityczną. Obszary bainityczne są w większości skoagulowane, a na granicach ziarn ferrytu zauważyć można zróżnicowanej wielkości wydzielenia, niektóre znaczne. Wydzielenia występują również w ziarnach ferrytu. Są bardzo drobne i równomiernie rozmieszczone. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropęknięć w strukturze materiału rodzimego, a także zapoczątkowania procesów uszkodzenia. Stopień wyczerpania struktury materiału rodzimego po obu stronach złącza zakwalifikowano do drugiej klasy głównej, co daje stopień wyczerpania materiału na poziomie $0,3 \div 0,4$ wg klasyfikacji Instytutu Metalurgii Żelaza (IMŻ).

W przypadku samej spoiny również nie zaobserwowano nieciągłości i mikropęknięć w jej strukturze. Nie stwierdzono również procesów uszkodzenia. W przypadku strefy wpływu ciepła po jednej ze stron spoiny stwierdzono obecność procesów uszkodzenia, co przedstawiono na rysunku 7.

Badania właściwości mechanicznych

Badania właściwości mechanicznych (wytrzymałościowych), w tym wytrzymałość na rozciągania R_m , granicę plastyczności R_e i R_{eL} , wydłużenia A_5 oraz przewężenie Z przeprowadzono w temperaturze pokojowej oraz w temperaturze podwyższonej tj. 500 °C. Wyniki tych badań przedstawiono w tabelicy II.

Z uzyskanych wyników badań wytrzymałościowych wynika, że granica plastyczności dla próby wykonanej w temperaturze pokojowej nie spełnia warunków stawianych przez PN-74/H-74252, która określa właściwości wytrzymałościowe dla materiału w stanie wyjściowym. Pozostałe wyniki nie budzą zastrzeżeń. Pomimo spadku właściwości



Rys. 7. Obrazy struktury złącza spawanego rurociągu pary świeżej ze stali 13HMF po długotrwałej eksploatacji [1]
 Fig. 7. Images of the welded joint structure of the 13HMF steel main steam pipe after long-term operation [1]

Tablica II. Wyniki badań wytrzymałościowych badanego złącza spawanego [1]
 Table II. The results of the strength tests performed on the inspected welded joint [1]

Nazwa elementu	Gatunek stali	Temperatura badania [°C]	Właściwości wytrzymałościowe			
			R _m [MPa]	R _{eH} [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]
Złącze spawane 13HMF (14MoV63)	13HMF	20	494 (min. 490)	293 (min. 365)	21 (min. 20)	78
		500	300	234 (min. 186)	23	84

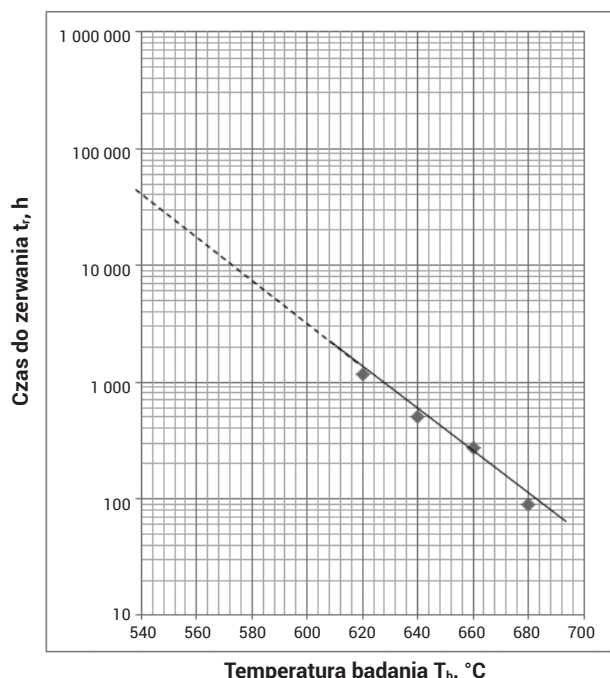
plastycznych złącze takie może być eksploatowane, ponieważ elementy pracujące w warunkach pełzania projektowane są na podstawie naprężenia dopuszczalnego, uwzględniającego średnią czasową wytrzymałość na pełzania lub granicę pełzania na obliczeniowy czas pracy. Należy jednak uwzględnić taką informację podczas planowania próby wodnej, która może mieć w tym przypadku charakter próby szczelności, a nie próby wytrzymałościowej.

Skrócone próby pełzania

Skrócone próby pełzania przeprowadzono dla pięciu poziomów temperatury badania, od 600 do 680 °C ze stopniowaniem co 20 °C, przy stałym poziomie naprężenia badania $\sigma_b = \text{const}$ odpowiadającym eksploatacyjnemu.

Zastosowany sposób skrócania czasu wykonania prób pełzania polega na przyspieszeniu procesu pełzania poprzez podwyższenie temperatury badania T_b znacznie ponad poziom temperatury właściwej dla eksploatacji T_e , w próbkach prowadzonych przy stałym naprężeniu badania odpowiadającym eksploatacyjnemu $\sigma_b = \sigma_r = \text{const}$. Pozwalają one na wykreślenie prostej nachylonej do osi czasu do zerwania t_r . Trwałość resztkową wyznacza się przez ekstrapolację uzyskanej prostej w kierunku niższej temperatury odpowiadającej eksploatacyjnej T_e .

Wyniki badań prób pełzania obwodowego złącza spawanego przedstawiono na wykresie (rys. 8) w postaci zależności $\log t_z = f(T_b)$ przy $\sigma_b = \text{const}$, gdzie t_z jest czasem do zerwania w próbce pełzania.



Tablica III. Prognozowana trwałość resztkowa na podstawie skróconych prób pełzania [1]

Table III. Estimated residual service life based on the shortened creep testing [1]

Oznaczenie	Przyjęte naprężenie robocze σ_r [MPa]	Przyjęta temp. dalszej eksploatacji T_r [°C]	Oszacowana trwałość [h] ¹⁾	
			resztkowa	rozporządzalna resztkowa
Złącze spawane 13HMF (14MoV63)	55	540	50 000	30 000
		530	80 000	48 000

¹⁾ Pod warunkiem, że wielkość trwałego odkształcenia po dotychczasowej długotrwałej eksploatacji nie przekracza 1%.

Rys. 8. Rozporządzalna trwałości resztkowa dla naprężenia roboczego w zależności od poziomu temperatury roboczej dla materiału obwodowego złącza spawanego rurociągu pary po długotrwałej eksploatacji [1]

Fig. 8. Available residual service life for working tension depending on the operating temperature level for circumferential material of the welded joint of the steam pipe after long-term operation [1]

Podsumowanie

Zmiany w obrazie mikrostruktury badanego materiału rurociągu i jego jednorodnego złącza spawanego świadczą o ich zróżnicowanej degradacji wskutek długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. W strefie wpływu ciepła badanego złącza spawanego stwierdzono zapoczątkowanie procesów uszkodzeń wewnętrznych i nieciągłości struktury w postaci nielicznych pustek.

Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności w temperaturze pokojowej oraz podwyższonej materiału złącza spawanego rurociągu pary spełniają wymagania dla materiału w stanie wyjściowym z wyjątkiem granicy plastyczności w temperaturze pokojowej, która tych wymagań nieznacznie nie spełnia.

Trwałość resztkowa wyznaczona w skróconych próbach pełzania dla temperatury roboczej $T_r=540$ °C oraz naprężenia roboczego $\sigma_r=55$ MPa złącza spawanego rurociągu pary wynosi 50 tys. godzin. Natomiast trwałość rozporządzalna, będąca czasem dalszej bezpiecznej eksploatacji dla ww. parametrów, wynosi 30 tys. godzin.

Wykonane badania złącza spawanego wykazały, że czas jego dalszej bezpiecznej eksploatacji (ponad obliczeniowy czas pracy) był niewielki. Wynika to z prowadzonej dotychczasowej eksploatacji złącza w warunkach pełzania, ale w dużej mierze spowodowane to jest również jakością jego wykonania.

Część zamieszczonych wyników uzyskane zostały w ramach badań współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju na podstawie umowy NR PBS/B5/42/2015 – projekt: „Metodyka, ocena i prognoza eksploatacji powyżej obliczeniowego czasu pracy złączy spawanych elementów ciśnieniowych kotłów energetycznych”.

Literatura

- [1] Sprawozdania i wyniki prac pomiarowych i badawczych z lat 2014-2016, opracowania „ENERGOPOMIAR” Sp. z o.o., Zakład Chemii i Diagnostyki (niepubl.).
- [2] Dobrzański J.: Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki, Open Access, Library, 2011, Vol. 3.
- [3] Hernas A., Dobrzański J.: Life-time and Damage of Boilers and Steam Turbines Elements, Publishing House of the Silesian University of Technology, Gliwice 2003.
- [4] Dobrzański J., Sroka M., Zieliński A.: Methodology of classification of internal damage the steels during creep service, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, vol. 18, pp. 263-266.
- [5] Zieliński A., Dobrzański J., Krztoń H.: Structural changes in low alloy cast steel Cr-Mo-V after long time creep service, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, vol. 25, Issue 1, pp. 33-36.
- [6] Dobrzański J., Krztoń H., Zieliński A.: Development of the precipitation processes in low-alloy Cr-Mo type steel for evolution of the material state after exceeding the assessed lifetime, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, vol. 23, Issue 2, pp. 19-22.
- [7] Zieliński A.: Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na własności mechaniczne staliwa Cr-Mo-V, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa – Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Częstochowa 25 maja 2007, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, tom II, s. 717-721.
- [8] Zieliński, A., Dziuba-Kałuża, M., Dobrzański, J., Sroka M.: The impact of repair welded joint on the life of Cr-Mo-V steel steam pipeline after service under creep conditions, Materials Science and Engineering, 2014, vol. 68(1), pp. 36-44.
- [9] Dziuba-Kałuża, M., Dobrzański, J., Zieliński, A.: Mechanical properties of Cr-Mo and Cr-Mo-V low-alloy steel welded joints after long-term service under creep conditions, Archives of Materials Science and Engineering, 2013, vol. 63.1, pp. 5-12.
- [10] Sroka M., Zieliński A., Mikula J.: The service life of the repair welded joint of Cr-Mo / Cr-Mo-V, Archives of Metallurgy and Materials, 2016, vol. 61, pp. 969-974.
- [11] Zieliński A., Golański G., Sroka M.: Comparing the methods in determining residual life on the basis of creep tests of low-alloy Cr-Mo-V cast steels operated beyond the design service life, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017.
- [12] Instrukcja badań i oceny stanu technicznego rurociągów pracujących w warunkach pełzania, opracowanie ENERGOPOMIAR Sp. z o.o., Gliwice styczeń 2012 (niepubl.).
- [13] Jasiński A.: System diagnostyczny jako sposób na wydłużenie czasu bezpiecznej eksploatacji rurociągów parowych, Energetyka, 2012, nr 9.
- [14] Kwiecień M., Goławski A.: Pełzanie jako zjawisko ograniczające długotrwałą eksploatację rurociągów parowych, Energetyka, 2013, nr 7.
- [15] Jasiński A.: Jak typować elementy do badań w przypadku rurociągów wysokoprężnych, Energetyka, 2015, nr 9.
- [16] PN-75/H-84024: Rury stalowe bez szwu kotłowe, 1975.
- [17] PN-75/H-84024: Stal do pracy przy podwyższonych temperaturach – Gatunki, 1975.