

Dariusz Mężyk¹, Bogdan Zając^{2*}, Grzegorz Olszewski², Marcin Kowal²

¹Pracownia Diagnostyki Technicznej i Modernizacji Urządzeń Energetycznych, Instytut Energetyki - Instytut Badawczy

²Laboratorium Badań Materiałowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Określenie stopnia wyczerpania struktury i własności mechanicznych wybranych elementów głównych rurociągów parowych bloków energetycznych

Determination of the degree of depletion of the structure and mechanical properties of selected components of main steam pipelines of power units

STRESZCZENIE

W artykule omówiono główne czynniki wpływające na awaryjność układów rurociągów bloków energetycznych krajowych elektrowni i elektrociepłowni. Ze względu na warunki pracy i związane z nimi obciążenia najistotniejsze znaczenie mają rurociągi pary, a głównie ich elementy kształtowe (kolana, trójniki, czwórniki, mieszacze pary, zasuwy główne). Wymieniono podstawowe metody oceny stanu technicznego głównych elementów rurociągów zarówno metodami badań nieniszczących jak i niszczących. W artykule skoncentrowano się na wynikach oceny odcinka kolana (prostki) $\varphi = 508 \times 20$ ze stali 10H2M pobranego z rurociągu pary wtórnie przegrzanej o sumarycznym czasie pracy około $T = 280\,000$ godzin.

Słowa kluczowe: rurociągi pary świeżej; badania NDT, koncentracja naprężeń, wyznaczanie trwałości eksploatacyjnej.

ABSTRACT

The article discusses the main factors influencing the failure frequency of pipeline systems of power units in domestic power plants and combined heat and power plants. Due to the operating conditions and the associated loads, the most important are the fresh steam pipelines, and mainly their shaped elements (elbows, tees, cross-pieces, steam mixers, main valves). The basic methods of assessing the technical condition of the main elements of pipelines using both non-destructive and destructive testing methods were listed. The article focuses on the results of the assessment of the $\varphi = 508 \times 20$ bend (straight) section made of 10H2M steel taken from a reheated steam pipeline with a total operating time of approximately $T = 280,000$ hours.

Keywords: fresh steam pipelines, NDT tests; stress concentration; determination of service life.

1. Wstęp

Długotrwała eksploatacja bloków energetycznych powoduje, że materiały konstrukcyjne stosowane w przemyśle energetycznym pracują w warunkach zmiennych pól naprężeń i zmiennych temperatur. Materiały te są narażone na oddziaływanie środowiska gazów i cieczy oraz na działanie obciążeń mechanicznych. Czynniki te powodują w okresie eksploatacji zmiany mikrostruktury materiałów i w rezultacie pogorszenie ich własności mechanicznych. Efektem wzrostu wartości i koncentracji naprężeń jest pękanie złączy spawanych i awarie elementów kształtowych instalacji cieplnych i ciśnieniowych obiektów energetycznych.

2. Główne czynniki awaryjności układów rurociągowych

Wysoka temperatura w zakresie temperatur rzędu 540°C oraz wysokie wartości ciśnienia dochodzące do 20 MPa

powodują, że elementy z jakich zbudowana jest instalacja nie zawsze są w stanie przenieść pojawiające się obciążenia i w konsekwencji rurociągi mogą ulec uszkodzeniu lub nawet zniszczeniu.

Bardzo istotnym problemem występującym podczas eksploatacji urządzeń energetycznych jest wzajemne oddziaływanie układu rurociąg - turbina. Z uwagi na to, że z tym problemem boryka się większość krajowych elektrowni i elektrociepłowni prowadzone są wielokierunkowe badania zmierzające do określenia wzajemnego oddziaływania wymienionych elementów bloków energetycznych [1].

Na wyłączenie materiału elementów ciśnieniowych główny wpływ mają naprężenia pochodzące od ciśnienia wewnętrznego i naprężenia temperaturowe. Duży wpływ mają również obciążenia mechaniczne pochodzące od ciężaru rurociągu i zamontowanej na nim armatury oraz pochodzące od ograniczenia swobody dylatacji cieplnej i jakości pracy systemu zamocowań.

Ze względu na warunki pracy i związane z nimi obciążenia najistotniejsze znaczenie mają rurociągi pary świeżej,

*Autor korespondencyjny.

E-mail: bogdan.zajac@ncbj.gov.pl

a głównie ich elementy kształtowe (kolana, trójniki, zawórnik, mieszacz pary, zasuwę główne).

Rurociągi pary wtórnie przegrzanej pracują w wysokiej temperaturze, lecz przy znacznie niższych ciśnieniach. Na rurociągach pary wtórnie przegrzanej znajdują się zawory bezpieczeństwa. Ta część rurociągów pracuje w cyklu okresowym, przez co dochodzi do gwałtownych schłodzeń i wzrostów temperatur wpływając na niszczenie niskocyklowe. Z tego powodu tę część rurociągu należy objąć szczególną troską.

3. Diagnostyka stanu technicznego

Zgodnie z obowiązującą instrukcją, diagnostyką należy objąć rurociągi, a szczególnie mocno obciążone elementy rurociągów. Elementy rurociągów należy badać metodami nieniszczącymi i niszczącymi w tym badaniach materiałowymi. W przypadku gdy wystąpią zauważalne zmiany kształtu lub struktury materiału należy zwiększyć częstotliwość badań elementów [2].

Istotne znaczenie dla diagnostyki stanu technicznego rurociągów ma monitoring położenia przestrzennych rurociągów wysokoprężnych. Wyniki pomiarów geodezyjnych prowadzone w stanach zimnych rurociągów, jak i w stanach pełnego obciążenia cieplnego stanowią podstawę do określenia rozkładu naprężeń temperaturowych wzdłuż trasy rurociągu, ze szczególnym uwzględnieniem elementów kształtowych rozmieszczonych na rurociągu.

W związku z tym, że sprawność techniczna elementów kształtowych ma zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji rurociągów i całego bloku energetycznego winny one być również objęte systemem diagnostycznym.

Bezpieczeństwo eksploatacji obiektu wiąże się z trwałością, którą można włączyć w zakres ogólnie pojętego wyężdżenia materiału.

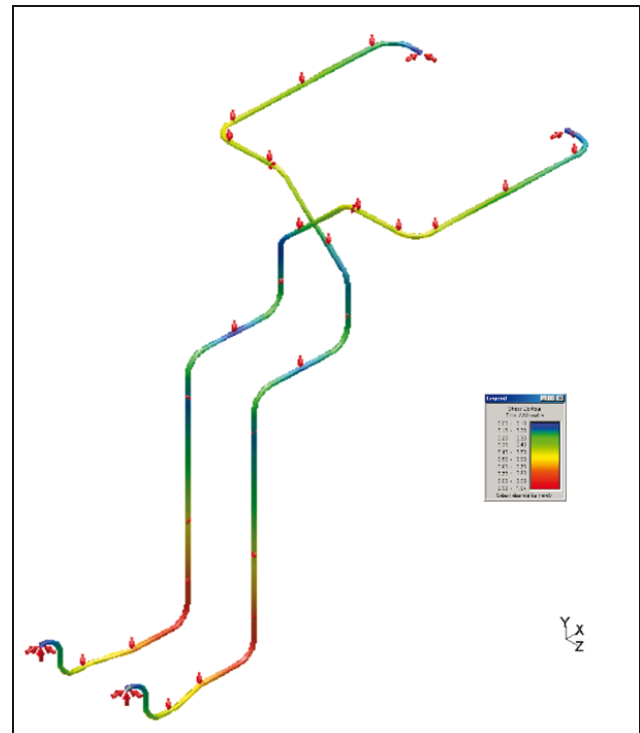
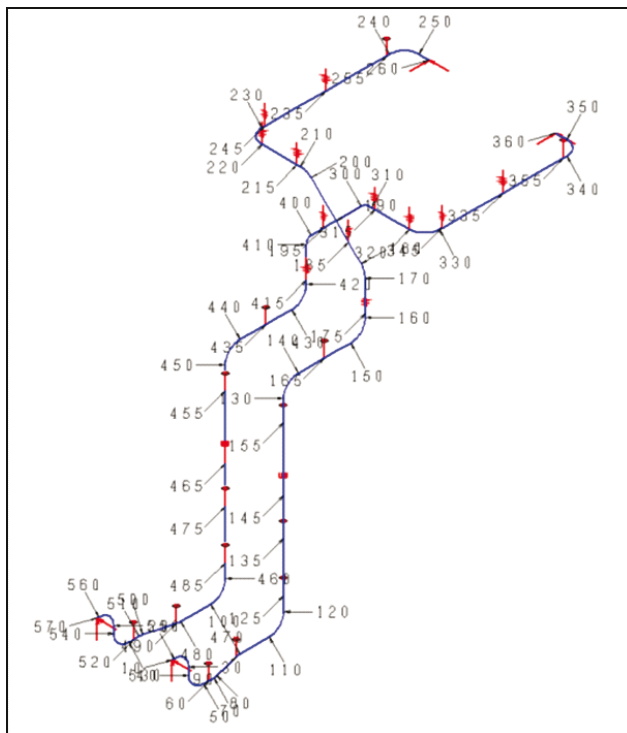
Pojęcie trwałości wymaga określenia:

- czasu granicznego do zniszczenia,
- granicznej liczby cykli do zniszczenia,
- liczby operacji technologicznych,
- innych wielkości mierzalnych.

Wśród czynników wpływających na trwałość elementów urządzeń ciśnieniowych znajdują się czynniki związane z:

- wykonaniem elementu,
- montażem,
- eksploatacją,
- diagnostyką, naprawami i modernizacją [3].

Aby zapobiec sytuacjom awaryjnym należy kontrolować pracę systemu zamocowań, sprawdzać geodezyjnie położenie rurociągów w stanach zimnych i gorących oraz prowadzić badania diagnostyczne pozwalające określić stan naprężeń, stopień degradacji struktury materiału, a także przeprowadzić obliczenia oparte o rzeczywiste dane uwzględniające przemieszczenia dylatacyjne i położenie rurociągu w stanie zimnym i gorącym. Ze względu na zmienność stanu wyężdżenia materiału obliczenia stopnia wyczerpania trwałości eksploatacyjnej możliwe są w sposób przybliżony. Przeliczenia elastyczności rurociągu prowadzone w oparciu o dane zgromadzone podczas badań rurociągów wraz z armaturą potrafią przybliżyć odpowiedź dotyczącą prawidłowości prowadzonej eksploatacji oraz rozpatrywać symulowane stany przeciążeń i ograniczeń w pracy rurociągów[4]. Przykładowe obliczenia stanu naprężeń rurociągów przy pomocy programu ADLPIPE (Rys. 1).



Rys. 1. Rurociągi pary wtórnej: a) węzły obliczeniowe, b) rozkład naprężeń od temperatury.

Fig. 1. Secondary steam pipelines: a) calculation nodes, b) stress distribution due to temperature.

Rurociąg jest wykonany z materiału 10H2M, parametry obliczeniowe: $p = 2,9 \text{ MPa}$, $t = 540^\circ\text{C}$. Wg PN-79/M-34033 Naprężenia dopuszczalne wynoszą $k(540^\circ\text{C}) = 59,13 \text{ MPa}$ [4].

Przeprowadzono analizę wyężenia rurociągu zgodnie z procedurą przedstawioną w normie ASME B31.1 – 1995 [5] w wyniku której określono rozkład naprężenia materiału rurociągu w trakcie obciążenia cieplnego obiektu. Największe wartości naprężenia przedstawiono w Tabeli 1.

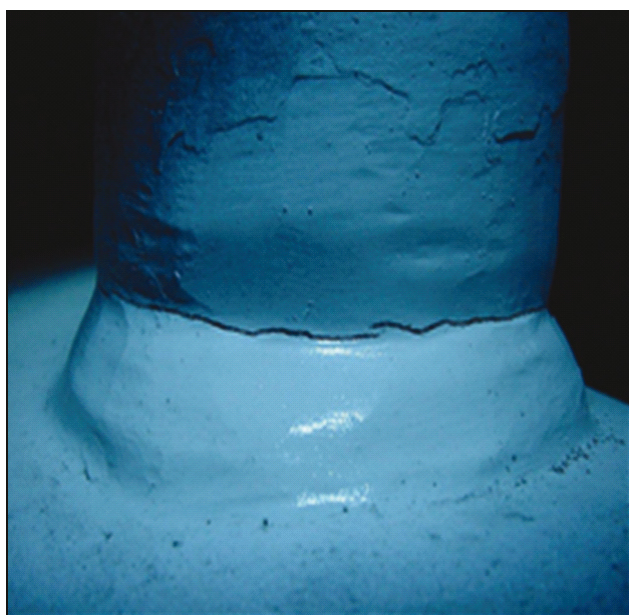
Czynnikiem decydującym o czasie, po którym elementy rurociągu należy poddać specjalnym badaniom jest naprężenie. Wartość naprężenia należy kontrolować w miejscach krytycznych jakimi są elementy kształtowe (mieszacze, łuki, kolanka). Częstą przyczyną uszkodzeń (rys. 2) jest występowanie złożonego stanu naprężenia w wyniku oddziaływania momentów gnących i skręcających.

W zależności od stopnia degradacji materiału stosowane

Tab. 1. Przykładowe węzły o największych naprężeniach od temperatury.

Tab. 1. Examples of nodes with the highest stresses due to temperature.

Lp.	Numer węzła	Wartość naprężenia w pracy cieplnej [MPa]	Naprężenie cieplne / Naprężenie dopuszczalne
No	No of nodes	Thermal stress [MPa]	thermal stress / allowable stress
1	2	3	4
01	460 BEG	56.7	0.953
02	470 END	56.1	0.943
03	120 END	55.1	0.925
04	110 BEG	54.6	0.917
05	460 END	50.0	0.839
06	470 BEG	49.4	0.831
07	120 BEG	48.5	0.815
08	110 END	48.0	0.807
09	485 BEG	45.3	0.762
10	125 BEG	44.0	0.739



Rys. 2. Widok pęknięcia na trójniku.

Fig. 2. View of the crack in the tee.

są różne technologie napraw: szlifowanie, napawanie z obróbką cieplną lub wymiana spoiny.

Do określenia stanu materiału, oprócz badań NDT, wykonywane są badania niszczące. Badania niszczące wykonywane są na próbkach pobranych z konstrukcji, oczywiście gdy istnieje możliwość ich pobrania. Badania niszczące mają na celu określenie właściwości mechanicznych i rodzaju struktury materiału. Najczęściej stosowane badania niszczące to:

1. badania składu chemicznego metoda spektralną;
2. badania metalograficzne na zglądach wraz z oceną stopnia wyczerpania struktury. (Kryteria odniesienia zgodne z Wytycznymi UDT nr 1/2015) [6];
3. badania własności mechanicznych podczas statycznej prób rozciągania prowadzonej wg PN-EN ISO 6892-1:2010 [4];
4. próba uderzeniowa (energii łamania) sposobem Charpy'ego wg PN-EN ISO 148-1:2010 [4];
5. badanie twardości metodą Vickersa HV 10 wg PN-EN ISO 6507-1:2007 [4];
6. pomiary średnic i grubości ścianek odcinków rurowych (pomiar suwmiarkami, mikrometrem);
7. skrócone obliczenia wytrzymałościowe z oceną trwałości resztkowej.

W omawianym przypadku przeprowadzono badania i analizę odcinka kolana (prostki) $\varnothing 508 \times 20$ ze stali 10H2M pobranego z rurociągu pary wtórnie przegrzanej o sumarycznym czasie pracy około $T = 280\,000$ godzin.

Głównym celem prac kontrolno – badawczych było określenie stopnia wyczerpania struktury na podstawie oceny własności mechanicznych kolana, spowodowanych warunkami pracy (Temperatura robocza $t_r = 540^\circ\text{C}$, ciśnienie robocze $p_r = 2,9 \text{ MPa}$).

Wymagania dla elementów rurociągowych wykonanych ze stali 10H2M podane są w nieobowiązujących już normach PN-75/H-84024 [5] oraz PN-74/H-74252.[5].

Długotrwała eksploatacja elementów rurociągowych pracujących w warunkach pełzania powoduje degradację materiału poprzez zmiany strukturalne, które w konsekwencji prowadzą do obniżenia odporności na pełzanie oraz do przesunięcia temperatury przejścia w stan kruchy w kierunku wyższej temperatury. Nie powoduje to jednak jednoznacznej konieczności dokonania wymiany takich elementów na nowe. W większości przypadków elementy te mogą pracować znacznie poza obliczeniowy czas pracy co związane jest z istnieniem trwałości resztkowej.

Stal 10H2M w stanie wyjściowym tzn. przed eksploatacją charakteryzuje się strukturą ferrytyczno – bainityczną. Długotrwała eksploatacja elementów rurociągowych w temperaturze powyżej temperatury granicznej t_g tzn. w warunkach pełzania wysokotemperaturowego powoduje zmiany w strukturze, co prowadzi do pogorszenia ich właściwości użytkowych.

W stali 10H2M po długotrwałej eksploatacji obserwuje się powstawanie nowych węglików wewnątrz jak i na granicach ziaren oraz rozrost już istniejących. Procesy postępowania powyższych procesów w znacznym stopniu zależą od naprężeń zredukowanych i temperatury pracy.

Przy założeniu stosunkowo stabilnego poziomu temperatury pracy, wzrost naprężeń zredukowanych powyżej założonych konstrukcyjnie, może przyczynić się do znacznego wzrostu ilości wydzielen, rozpadu obszarów perlit/bainit, co w konsekwencji prowadzi do nadmiernej utraty trwałości.

W początkowym okresie eksploatacji w stali 10H2M obserwuje się stabilność struktury, a pierwsze zauważalne zmiany dotyczą rozrostu i ilości wydzielen węglików na granicach i wewnątrz ziaren oraz ich sferoidyzacji.

Długotrwała eksploatacja w warunkach pełzania w ostatnim okresie powoduje trwałe, nieodwracalne procesy niszczenia. Proces niszczenia rozpoczyna się od zarodkowania pojedynczych pustek, które są równomiernie rozmieszczone w ferrytyczno-bainitycznej strukturze stali 10H2M. Wraz z rozwojem procesu niszczenia na granicach ziaren ferrytu następuje koncentracja pustek, w konsekwencji tworzenie łańcusków pustek na granicach ziaren ferrytu. Następnie tworzą się międzykrystaliczne pęknięcia obejmujące początkowo jedno ziarno, a następnie obejmują kilka ziaren, co stanowi początek katastroficznego pęknięcia całego materiału w miejscu największych naprężeń.

4. Wyniki badań

Badania nieniszczące prowadzone były metodami: ultradźwiękową i magnetyczno-proszkową.

Badania ultradźwiękowe w całej objętości dostarczonych odcinków kolan nie wykryły wzdłużnych ani poprzecznych nieciągłości. Podobnie badania magnetyczno-proszkowe na powierzchni zewnętrznej, a także powierzchni wewnętrznej nie ujawniły nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych.

Wyniki badań niszczących zostały zestawione w kolejnych Tablicach (Tablica 2 i Tablica 3) [3].

Tab. 2. Wyniki badań składu chemicznego.

Tab. 2. Chemical composition test results.

Norma/ Badane kolano	Skład chemiczny %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Ni
PN-75/H-84024 10H2M	0,08 0,15	0,40 0,60	0,15 0,50	max 0,030	max 0,030	2,0 2,5	0,90 1,10	-	max 0,30
Badany odcinek rury	0,10	0,50	0,31	0,020	0,027	2,1	0,90	-	0,12

Tab. 3. Wyniki badań własności mechanicznych.

Tab. 3. Test results for mechanical properties.

Oznaczenie	Kierunek poboru próbek	Własności mechaniczne stali 10H2M				
		R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	KCU ₂ J/cm ² KV [J]	HV 10
Rury bez szwu PN-74/ H-74252 N+O g = max 30 mm	Wzdłużny	min 265	440- 590	min 20	min 80 64 J	----
Badany odcinek rury	Wzdłużny	268	455	27	45 49 34 śr. 42,6 J	140 - 146

Badania mikrostruktury materiału przeprowadzono na zglądzie metalograficznym. Dodatkowo zmierzono twardość wycinka.

Wyniki badań mikrostruktury.

Zaobserwowany obraz struktury materiału badanego odcinka rurociągu pary wtórnej ze stali 10H2M po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wskazuje na znaczny stopień degradacji struktury, „odpowiedni” do parametrów roboczych i czasu pracy. Obserwowany zgląd posiada strukturę bez widocznych trwałych uszkodzeń pełzaniowych (Rys. 3).

Opis struktury i ocena stopnia jej degradacji przy zastosowaniu kryteriów podanych w Wytocznych UDT nr 1/2015 „Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania” [6].

Stwierdzono struktura bainitu z ferrytem, utrzymujący się w części rozpad bainitu, koagulacja węglików w obszarach bainitycznych. Na granicach ziaren ferrytu wydzielenia tworzące miejscami łańcuszki. Wewnątrz ziaren ferrytu zróżnicowane co do wielkości i kształtu wydzielenia. Nie zaobserwowano zapoczątkowania procesów uszkodzeniowych. Nie stwierdzono nieciągłości i mikropęknięć strukturalnych. Szacunkowy stopień wyczerpania struktury t/t_r około 0,3/0,4.

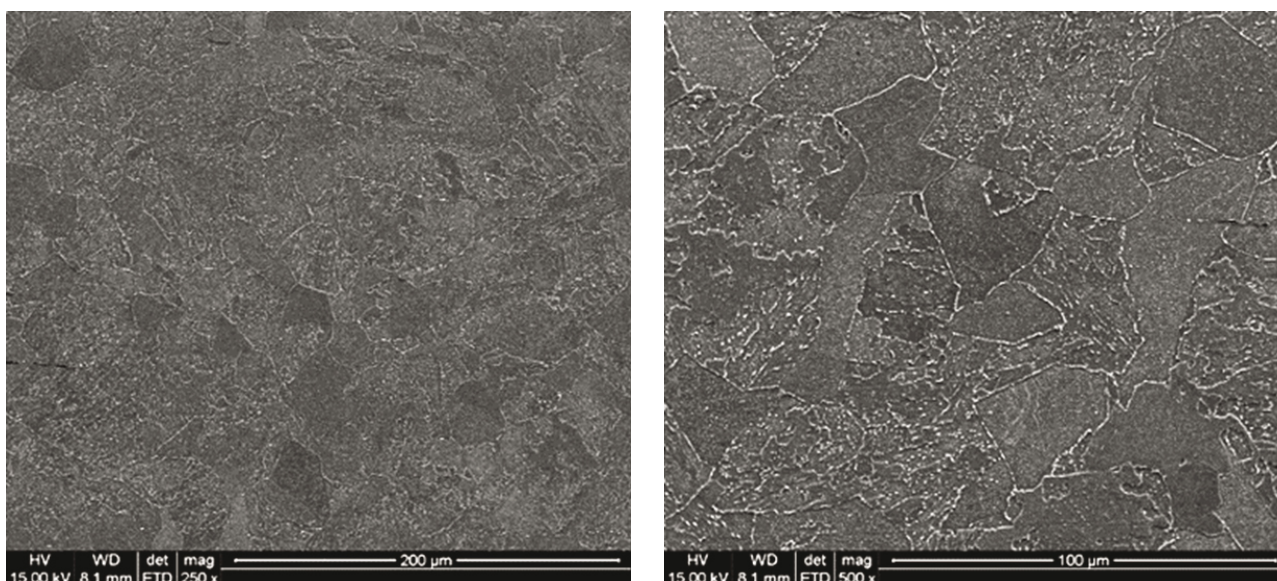
Informacyjne obliczenia wytrzymałościowe prowadzone wg EN-PN 13480-3 [5].

Rzeczywiste wymiary odcinków dostarczonych do badań: - średnica zewnętrzna $\phi = 510$ mm, grubość ścianki min. $g = 17$ mm.

Obliczeniowe naprężenie występujące w ścianie elementu rurociągowego wyliczone na podstawie przepisów Dozoru Technicznego WUDT-UC-WO-O/01:01.2005 [7] z wyżej podanych wymiarów i parametrów rzeczywistych - wynoszą maksymalnie około $\sigma_{rz} = 38$ MPa. Odcinek badanego elementu rurociągowego wykonany został ze stali 10H2M, a więc znane są wytrzymałości na pełzanie dla tej stali w temperaturze roboczej ($t = 540^\circ\text{C}$). Wg normy PN-75/H-84024 [5] dla czasów pracy $Rz_{\min/100000/540} = 62,4$ MPa, i $Rz_{\min/200000/540} = 54,4$ MPa

Przy założeniu dodatkowych obciążeń (dla bezpieczeństwa) pochodzących od niedoskonałej pracy zamocowań, nie zapewnienia pełnej zdolności do samokompensacji około 20% do obliczeń zakładamy $\sigma_{\max} = 45$ MPa.

Porównanie naprężeń $\sigma_{\max}$ ze wspomnianymi wskaźnikami pełzaniowymi pozwoliły na orientacyjne obliczenie trwałości



Rys. 3. Przykładowe miejsca zglądu, obserwowane na mikroskopie SEM; a) drobne, równomiernie rozmieszczone wydzielienia; b) liczne wydzielienia na granicach ziaren, tworzące łańcuszki.

Fig. 3. Examples of the extermination sites observed on the SEM microscope; a) fine, evenly distributed secretions; b) numerous precipitates at the grain boundaries forming chains.

resztkowej τ_{Br} , a także resztkowej trwałości rozporządzalnej τ_r czyli czasu pracy kolana po przekroczeniu którego należy rozpocząć specjalny jego nadzór. W wyniku obliczeń otrzymano $\tau_{Br} =$ około 512 861 godzin i $\tau_r = 307 717$ godzin.

Ponieważ dotychczasowy czas eksploatacji badanego elementu wynosi 280 000 godzin, to teoretycznie pozostało $(307 717 - 280 000) = 26 718$ godzin do momentu rozpoczęcia specjalnego nadzoru kolana, a także i innych elementów tego rurociągu.

Omówienie wyników badań:

- Wyniki badań składu chemicznego oraz statycznej próby rozciągania w temperaturze otoczenia są zgodne z wymaganiami przedmiotowych norm, nie mniej jednak granica plastyczności i wytrzymałość są na poziomie wymagań minimalnych.
- Energia łamania w temperaturze otoczenia określana dla próbek Charpy'go V, jest niezgodna z wymaganiami normy PN-74/H-74252 [5] dla stanu przed eksploatacją. Wyniki są jednak wyższe od umownego progu kruchości dla warunków pracy.
- Mikroskopowa obserwacja zglądu pobranego z dostarczonej prostki kolana i jej klasyfikacja wg wytycznych UDT nr 1/2015 [6] informuje o stopniu degradacji t/t_r w granicach 0,3/0,4. Taki wynik i rzeczywisty czas pracy znacznie przekraczający obliczeniowy, nakazuje następne badania kontrolne metodą replik matrycowych wykonać po czasie nie dłuższym niż 30 000 godzin.
- Obliczony teoretycznie wskaźnik pozostałego czasu rozporządzalnej trwałości resztkowej wskazuje na konieczność po czasie mniejszym od ok. 30 000 godzin rozpocząć specjalny nadzór nad rurociągiem.

5. Podsumowanie

Rozwój nowoczesnych metod badawczych i narzędzi modelowania numerycznego pozwala monitorować postęp degradacji, a w konsekwencji umożliwia przewidywać okres żywotności elementu oraz instalacji ciśnieniowych. Wśród metod tych szczególnie użyteczne wydają się metody badań nieniszczących prowadzonych bezpośrednio na obiekcie. Dodatkowo stosuje się procedury oceny z wykorzystaniem maszyn wytrzymałościowych z próbkami wyciętymi z badanych elementów (badania niszczące). Obliczenia pozwalają zbudować ogólny model zużycia rozpatrywanych obiektów pracujących powyżej temperatury granicznej z uwzględnieniem czasowego zużycia od pełzania oraz zużycia termo-zmęczeniowego.

Prowadzenie badań ma na celu kompleksową ocenę materiału z zastosowaniem nowoczesnych technik badawczych, prowadzącą do wczesnego wykrycia ewentualnych zmian mikrostruktury i własności wytrzymałościowych materiału badanych elementów kryterialnych, a w konsekwencji do oceny stopnia zużycia oraz prognozowania żywotności instalacji energetycznych. Pogorszenie własności wytrzymałościowych materiału nie powoduje jednoznacznej konieczności dokonania wymiany eksploatowanych elementów na nowe. W większości przypadków elementy te mogą pracować znacznie poza obliczeniowy czas pracy co związane jest z istnieniem trwałości resztkowej.

Na bezpieczeństwo i niezawodność eksploatacji obiektów energetycznych najistotniejszy wpływ ma stan wytężenia węzłów kryterialnych, co nierozdzielnie łączy się z prawidłowo prowadzoną polityką diagnostyczną.

6. Literatura

- [1] I.D. Mężyk: Wpływ przebiegu eksploatacji urządzeń ciśnieniowych w energetyce zawodowej na ich bezpieczeństwo i niezawodność pracy, Zagadnienia projektowo-diagnostyczne. Seminarium rozwoju niszczenia materiałów i laserowego modelowania materiałów, Zakopane 2003.
- [2] D. Mężyk: Eksploatacja i diagnostyka rurociągów energetycznych, IX Forum Energetyków 2004. ,
- [3] Sprawozdanie z badań IEn 2/2020. Prowadzenie nadzoru technicznego nad głównymi rurociągami pary wraz z układem zamocowań oraz rurociągami łączącymi komory przegrzewaczy, zgodnie z wymaganiami UDT.
- [4] Sprawozdanie z badań IEn 22/2021. Główne rurociągi pary - pełna diagnostyka i regulacja zawiesznień i podparć.
- [5] Polskie normy: PN-75/H-84024, PN-74/H-74252, EN-PN 13480-3. ASME B31.1 – 1995.
- [6] Wytyczne UDT nr 1/2015 „Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania”.
- [7] WUDT-UC-WO-O/01:01.2005. „Obliczenia wytrzymałościowe”.