

Dariusz Mężyk*

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

Rola diagnostyki technicznej w zapewnieniu bezpiecznej eksploatacji ciśnieniowych instalacji rurociągowych

The role of technical diagnostics in ensuring the safe operation of pressure pipeline installations

STRESZCZENIE

Podczas długotrwałej eksploatacji bloków energetycznych 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 pogorszenie ich własności mechanicznych. Jedną z metod rozpoznania aktualnego stanu materiału są badania diagnostyczne, zarówno nieniszczące, jak i niszczące. W referacie omówiono niektóre aspekty badań kilku elementów długo eksploatowanego kotła energetycznego i problemy związane z oceną ich aktualnego stanu technicznego.

Słowa kluczowe: Kotły energetyczne, Badania NDT, koncentracja naprężeń, wyznaczanie trwałości eksploatacyjnej.

ABSTRACT

During long-term operation of power units, construction materials used in the power industry work in conditions of changing stress fields and changing temperatures. These materials are exposed to the effects of gases and liquids and to mechanical loads. These factors cause deterioration of their mechanical properties. One of the methods of recognizing the current state of the material are diagnostic tests, both non-destructive and destructive. The paper discusses some aspects of testing several elements of a long-operated power boiler and problems related to the assessment of their current technical condition.

Keywords: Energy boilers, NDT tests, stress concentration, determination of service life.

1. Wprowadzenie

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 wytrzymałości materiału.

Pojęcie trwałości wymaga określenia:

- czasu granicznego do zniszczenia,

- granicznej liczby cykli do zniszczenia,
- liczby operacji technologicznych,
- innych wielkości mierzalnych,
- błędów eksploatacyjnych.

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

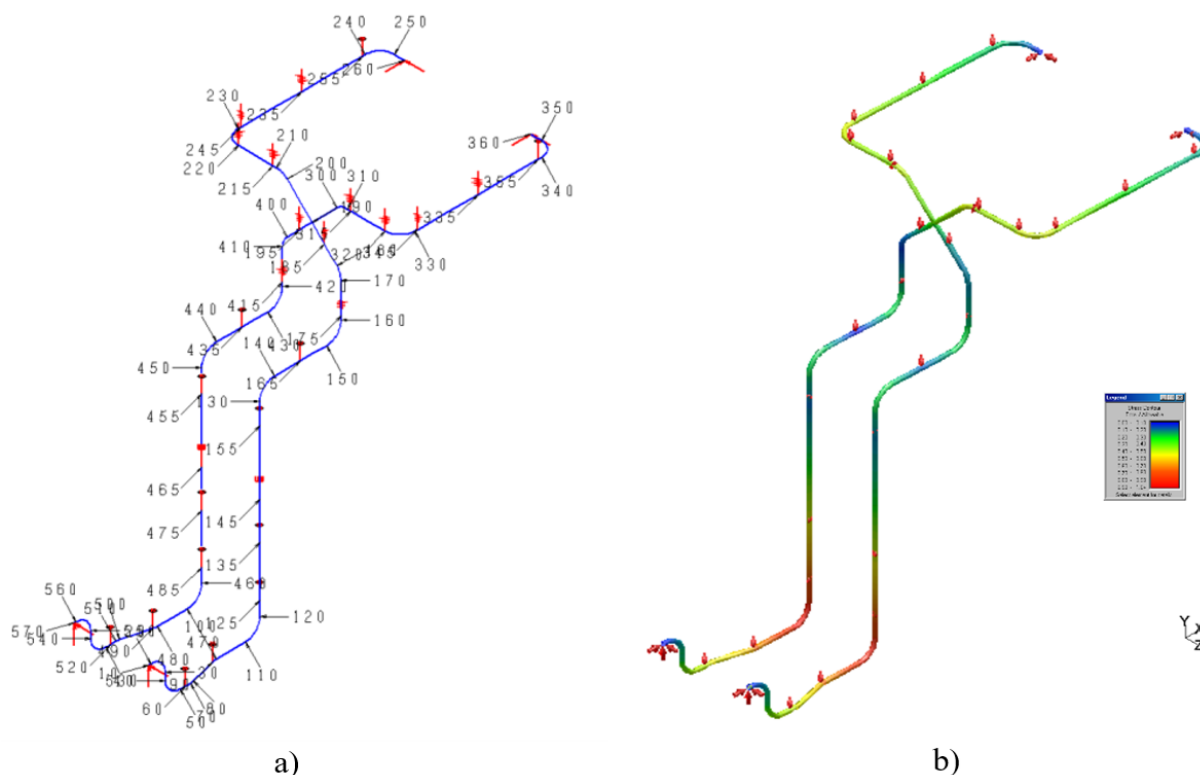
- wykonaniem elementu,
- montażem,
- eksploatacją,
- diagnostyką,
- naprawami i modernizacją [3].

2. Wskazanie obszarów o podwyższonym naprężeniu

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 wytrzymałości 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

*Autor korespondencyjny.

E-mail: dariusz.mezyk@ien.com.pl



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

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

<u>Lp</u>	Numer węzła	Wartość naprężenia w pracy cieplej [MPa]	Naprężenie cieplne / Naprężenie dopuszczalne
No	No of nodes	<u>Thermal stress</u> [MPa]	<u>thermal stress / allowable stress</u>
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

W zależności od stopnia degradacji materiału stosowane są różne technologie napraw: szlifowanie, napawanie z obróbką cieplną lub wymiana spoiny.



Rys. 2. Widok pęknięcia na trójniku.
Fig. 2. View of the crack in the tee.

3. Badania w procesie nadzoru

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:

- 2) badania składu chemicznego metoda spektralną;
- 3) badania metalograficzne na zglądach wraz z oceną stopnia wyczerpania struktury. (Kryteria odniesienia zgodne z Wytycznymi UDT nr 1/2015) [6];
- 4) badania własności mechanicznych podczas statycznej prób rozciągania prowadzonej wg PN-EN ISO 6892-1:2010 [4];
- 5) próba uderności (energii łamania) sposobem Charpy'ego wg PN-EN ISO 148-1:2010 [4]
- 6) badanie twardości metodą Vickersa HV 10 wg PN-EN ISO 6507-1:2007 [4]
- 7) pomiary średnic i grubości ścianek odcinków rurowych (pomiar suwmiarkami, mikrometrem)
- 8) 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 $p_r = 2,9$ 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 ostatnich 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 łańcuszków 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 kolana 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].

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

Tablica 2 Wyniki badań składu chemicznego

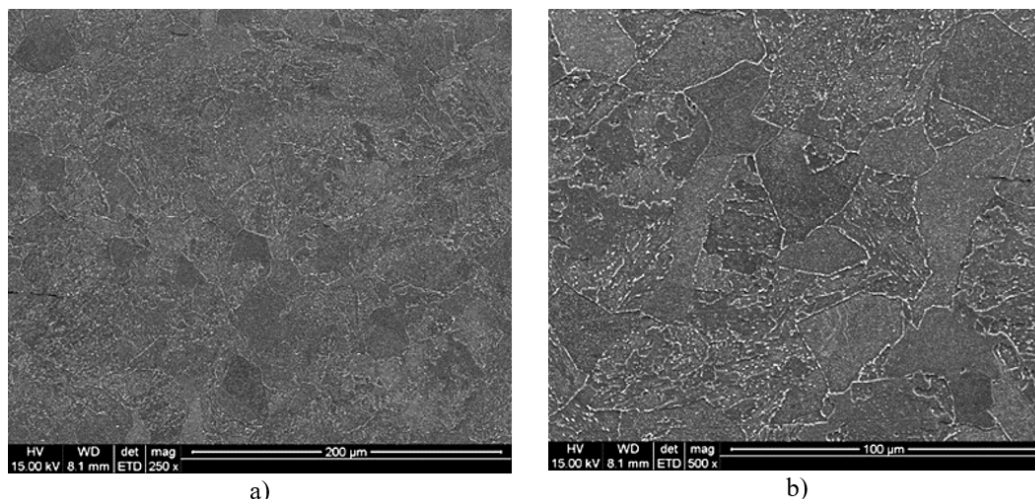
Table 2. Chemical composition test results

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

Tablica 3 Wyniki badań własności mechanicznych.

Table 3. Test results for mechanical properties.

Oznaczenie	Kierunek poboru próbek	Własności mechaniczne stali 10H2M					HV 10
		$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KCU_2 J/cm ²	KV [J]	
Rury bez szwu PN-74/ H-74252 N+O $g = \max 30 \text{ mm}$	Wzdłużny	<u>min 265</u>	440- 590	<u>min 20</u>	<u>min 80</u>	64 J	----
Badany odcinek rury	Wzdłużny	268	455	27	45 49 34 śr. 42,6 J		140 - 146



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.

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 Wytycznych 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 wydzielienia tworzące miejscami łańcuszki. Wewnątrz ziaren ferrytu zróżnicowane co do wielkości i kształtu wydzielienia. 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 $\phi = 510 \text{ mm}$,

grubość ścianki min. $g = 17 \text{ mm}$. Obliczeniowe napężenie 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 $\sigma_{rz} = 38 \text{ MPa}$. Odcinek badanego elementu rurociągowego wykonany został ze stali 10H2M, a więc znane są wytrzymałości na pełzanie dla tej stali w temperaturze roboczej ($t = 540 \text{ }^\circ\text{C}$). Wg normy PN-75/H-84024 [5] dla czasów pracy $Rz_{\min/100000/540} = 62,4 \text{ MPa}$, i $Rz_{\min/200000/540} = 54,4 \text{ MPa}$

Przy założeniu dodatkowych obciążeń (dla bezpieczeństwa) pochodzących od niedoskonałej pracy zamocowań, nie zapewnienia pełnej zdolności do samokompensacji około 20% do obliczeń zakładamy $\sigma_{\max} = 45 \text{ MPa}$. Porównanie naprężeń $\sigma_{\max}$ ze wspomnianymi wskaźnikami pełzaniowymi pozwoliły na orientacyjne obliczenie trwałości 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 $\tau_{Br} = \text{około } 512\,861 \text{ godzin}$ i $\tau_r = 307\,717 \text{ godzin}$ [8]. Ponieważ dotychczasowy czas eksploatacji badanego elementu wynosi 280 000 godzin, to teoretycznie pozostało $(307\,717 - 280\,000) = 26\,718 \text{ godzin}$ do momentu rozpoczęcia specjalnego nadzoru kolana, a także i innych elementów tego rurociągu.

5. Omówienie wyników badań

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Mikroskopowa obserwacja zglądu pobranego z dostarczonej próbki kolana i jej klasyfikacja wg wytycznych UDT nr 1/2015 [6] informuje o stopniu degradacji t/tr 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.

6. Literatura

- [1] 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 zawiesz 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”.
- [8] Sprawozdanie z badań IEn-PIB 12/2024. Główne rurociągi