

Dariusz MEŻYK

DOI: 10.32730/imz.0137-9941.18.4.4

EKSPLOATACJA RUROCIĄGÓW PARY – DIAGNOSTYKA I WNIOSKI EKSPLOATACYJNE

Materiały konstrukcyjne bloków energetycznych są eksploatowane w warunkach długotrwałego oddziaływania zmiennych pól naprężeń i temperatur oraz są narażone na oddziaływanie środowiska gazów i cieczy. Czynniki te powodują postępujące w czasie zmiany mikrostruktury materiałów i w rezultacie pogorszenie ich właściwości mechanicznych. Efektem wzrostu wartości i koncentracji naprężeń jest pękanie złączy spawanych i awarie elementów kształtowych instalacji. Szczególną opieką diagnostyczną należy objąć rurociągi wysokoprężne, eksploatowane przy wysokim ciśnieniu i temperaturze pary, połączenia rurociąg – turbina oraz zawory bezpieczeństwa w rurociągach pary wtórnie przegrzanej. Należy kontrolować system zamocowań oraz prowadzić badania diagnostyczne stanu naprężeń i stopnia degradacji struktury materiału. Zastosowanie w procesie diagnostycznym odpowiednich metod badawczych pozwala na formułowanie trafnych prognoz czasu bezpiecznej eksploatacji obiektów. Wśród metod tych szczególnie użyteczne są metody badań nieniszczących prowadzonych bezpośrednio na obiekcie. Generalnie o stanie rurociągów decyduje stan elementów poddanych największemu obciążeniu eksploatacyjnym, tzw. elementów krytycznych, którymi są elementy kształtowe, takie jak kolana, trójniki i czwórniki, a także obszary zmian średnic i grubości ścianek, co ma miejsce na styku rurociąg – trójnik, gdzie koncentracja naprężeń może powodować pękanie złączy spawanych.

Słowa kluczowe: rurociągi pary, diagnostyka, wytrzymałość, bezpieczeństwo eksploatacji

THE OPERATION OF STEAM PIPELINES – DIAGNOSTICS AND OPERATING CONCLUSIONS

Construction materials of power units are operated under conditions of long-lasting variable stress and temperature fields and are exposed to the environment of gases and liquids. These factors cause the material microstructure to change over time and, as a result, deteriorate their mechanical properties. The effect of the increase in value and concentration of stress is the cracking of welded joints and failures of the molded parts of the installation. Particular diagnostic care should be extended to include high-pressure pipelines operated at high pressure and steam temperature, connections pipeline-turbine and safety valves in secondary superheated steam pipelines. It is necessary to control the fastening system and conduct diagnostic tests of the state of stress and the degree of degradation of the material structure. The use of appropriate research methods in the diagnostic process allows for the formulation of accurate time forecasts for the safe operation of facilities. Among these methods, non-destructive testing methods carried out directly on the site are particularly useful. In general, the condition of pipelines is determined by the condition of the elements subjected to the greatest operational loads, the so-called criterion elements, which are shaped elements, such as elbows, tees and cross-sections, as well as areas of changes in diameters and wall thicknesses, which takes place at the pipe-to-tee intersection, where the concentration of stresses may cause cracking of welded joints.

Keywords: steam pipelines, diagnostics, durability, operational safety

1. WPROWADZENIE

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 w okresie eksploatacji ciągłe zmiany mikrostruktury materiałów i w rezultacie pogorszenie ich właściwości 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

Szczególną opieką diagnostyczną należy objąć rurociągi wysokoprężne z uwagi na ich wyjątkowy charakter. Wysoka temperatura – w zakresie temperatur rzędu 540°C, wartości ciśnienia dochodzące do 20 MPa powodują, że elementy z jakich zbudowana jest instalacja nie zawsze są w stanie przenieść obciążenia i rurociągi mogą ulec zniszczeniu.

Bardzo istotnym problemem występującym podczas eksploatacji urządzeń energetycznych jest wzajemne oddziaływanie układu rurociąg-turbina. Mechanizm wzajemnego oddziaływania ww. elementów nie został jednoznacznie określony. Z uwagi na wagę problemu,

z którym boryka się większość krajowych elektrowni i elektrociepłowni prowadzone są wielokierunkowe badania zmierzające do określenia wzajemnego oddziaływania wymienionych elementów bloków energetycznych [1].

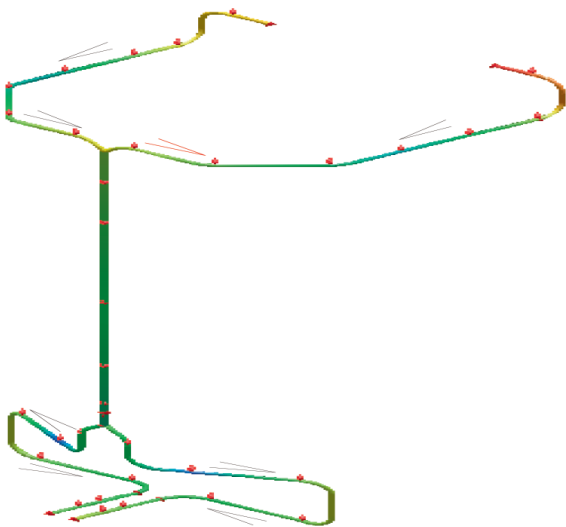
Na wyężenie materiału elementów ciśnieniowych poza naprężeniami od ciśnienia wewnętrznego i naprężeniami temperaturowymi wpływ mają obciążenia mechaniczne pochodzące od ciężaru rurociągu i zamontowanej na nim armatury oraz pochodzące od ograniczenia swobody dylatacji cieplnej i obciążeń związanych z niewłaściwą pracą systemu zamocowań. Ze względu na warunki pracy i związane z nimi obciążenia najistotniejsze znaczenie mają rurociągi pary świeżej, a głównie ich elementy kształtowe (kolana, trójniki, czwórniki, mieszacze pary, zasuwę główną).

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 temperatury wpływających na niszczenie niskocyklowe. Z tego powodu tę część rurociągu należy objąć szczególną troską.

3. DIAGNOSTYKA STANU TECHNICZNEGO

Zakres badań rurociągów pary do wtórnego przegrzewu obejmuje rurociągi o pracy okresowej, elementy kształtowe, odwodnienia. Pozostałe rurociągi należy objąć diagnostyką materiałową zgodnie z obowiązującą instrukcją, a wszędzie tam gdzie wystąpią zauważalne zmiany własności materiału lub kształtu, zwiększyć częstotliwość badań [2].

Istotne znaczenie dla monitoringu położenia przestrzennych rurociągów wysokoprężnych mają pomiary geodezyjne prowadzone w stanach zimnych rurociągów, jak i w stanach pełnego obciążenia cieplnego. Wyniki tych pomiarów są podstawą do określenia rozkładu naprężeń termicznych wzdłuż trasy rurociągu ze szczególnym uwzględnieniem elementów kształtowych.



Rys. 1. Ilustracja obrazująca zmiany położenia osi rurociągu tzw. „spadki” osi rurociągu

Fig. 1. Changes in the position of the pipeline axis, ‘drop’ of the pipeline axis

Ważnymi elementami węzła technologicznego pod nazwą „główne rurociągi parowe” są części zabudowanej na nich armatury. Znajdują się one głównie pod turbiną, ale armatura ta zabudowana jest na rurociągach i łącznie z nimi powinna być rozpatrywana.

Armaturę stanowią zawory szybkozamykające, główne zasuwę parowe i zasuwę obejściowe głównych zasuw parowych. Zawory szybkozamykające są istotnym elementem układu, gdyż one w sytuacjach awaryjnych odcinają dopływ pary do turbiny. Prawie wszystkie układy automatyki zabezpieczeniowej bloku, zarówno cieplnej, technologicznej jak i elektrycznej w konsekwencji oddziałują na natychmiastowe zamknięcie zaworów szybkozamykających i odcięcie pary do turbiny. Zawory te sterowane są hydraulicznie i są ściśle powiązane z układem oleju regulacyjnego turbiny. W związku z tym, że ich pełna sprawność techniczna ma zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji bloku energetycznego winny one być również objęte systemem diagnostycznym.

Bezpieczeństwo eksploatacji obiektu wiąże się z trwałością, którą można włączyć w zakres ogólnie pojętego wyężenia 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
- czynniki związane z montażem
- czynniki związane z eksploatacją
- czynniki związane z 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 wyężenia 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. UWARUNKOWANIA MATERIAŁOWE EKSPLOATACJI RUROCIĄGÓW WYSOKOPRĘŻNYCH NA PRZYKŁADZIE MATERIAŁU 13HMF (14MOV63)

W eksploatowanych krajowych obiektach energetycznych od wielu lat w instalacjach rurociągów pary pierwotnej stosowano materiał 13HMF (14MoV63) zastępowaną obecnie innymi materiałami jak np. P91, P92.

Właściwości mechaniczne elementów rurociągowych wykonanych ze stali 13HMF określane w temperaturze pokojowej, wśród stosowanych stali niskostopowych do pracy w podwyższonych temperaturach, charakteryzują się już nawet po eksploatacji w warunkach pełzania powyżej 100 000 godzin niskimi wartościami. Wyniki badań granicy plastyczności czy energii łamania są znacznie niższe niż wymagania minimalne dla stanu wyjściowego tej stali.

Pogorszenie tych właściwości spowodowane jest zmianami struktury stali, do których zalicza się:

- rozpad obszarów bainit/perlit
- rozwój procesów wydzieleniowych węglików (przemianami węglików, zmianą morfologii – kształtu, wielkości i rozmieszczeniu faz wtórnych, zubożenie osnowy w dodatki stopowe).

W stali 13HMF po długotrwałej eksploatacji obserwuje się powstawanie nowych węglików wewnątrz jak i na granicach ziarn oraz rozrost już istniejących. Przy założeniu stosunkowo stabilnego poziomu temperatury pracy, wzrost naprężeń może przyczynić się do znacznego wzrostu wydzielen, rozpadu obszarów perlit/bainit, co w konsekwencji prowadzi do nadmiernej utraty trwałości.

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 [4].

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.

Wymagane właściwości mechaniczne stali 13HMF oraz część uzyskanych wyników badań kolana w temperaturze otoczenia przedstawiono w tabeli 1.

Przeprowadzone badanie składu chemicznego próbek potwierdziło zgodność z wymaganiami normy PN-75/H-84024.

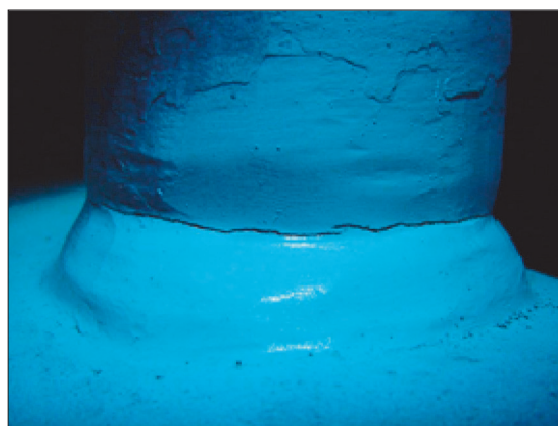
Analizując otrzymane wyniki stwierdzić należy, że:

- właściwości uzyskane podczas statycznej próby rozciągania we wszystkich badanych miejscach potwierdzają zgodność R_m i A_5 z wymaganiami normy PN-74/H-74252
- umowna granica plastyczności $R_{e0,2}$ we wszystkich badanych miejscach jest nieznacznie niższa od wymagań normy PN-74/H-74252

- energia łamania w temperaturze otoczenia próbek Charpy V pobranych ze wszystkich badanych miejsc kolana jest niska co jest charakterystyczne dla stali 13HMF po długotrwałej eksploatacji i świadczy znacznym postępie w zmianach struktury.

Ponadto badania wykazały, że umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ w temperaturze 500°C (zawierająca się w granicach 230÷242 N/mm²) we wszystkich badanych miejscach jest zgodna z wymaganiami normy PN-74/H-74252 (wartość normatywna 226 N/mm²). Wstępne badanie progu kruchości prowadzone na próbkach pobranych z prostki wskazują, że dla tej stali w tym stanie struktury próg kruchości znajduje się w pobliżu 100°C. Wyniki badań pracy łamania J (próbka KV) mieszczą się w zakresie 25÷31 J. Przeprowadzone zostały obserwacje zglądów, wszystkie zglądy posiadały strukturę bez widocznych trwałych uszkodzeń pełzaniowych. Analiza uzyskanych wyników badań strukturalnych, a także właściwości mechanicznych prowadzonych w temperaturze otoczenia potwierdzają niekorzystne skłonności stali 13HMF poddanej długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania do niskiej pracy łamania i niższej granicy plastyczności.

Na podstawie analizy wyników, można stwierdzić, że rozpatrywane kolano mogłoby pracować w instalacji rurociągowej około 30 000 h do następnych badań diagnostycznych. W innych przypadkach długoletnia praca materiału w warunkach eksploatacji w temperaturach rzędu 540°C skutkuje szybciej postępującą degradacją materiału rodzimego oraz występowaniem pęknięć złączy spawanych z reguły w strefie wpływu ciepła.



Rys. 2. Widok pęknięcia trójnika

Fig. 2. Tee crack

Tabela 1. Wyniki badań właściwości mechanicznych kolana po długotrwałej eksploatacji (13HMF)

Table 1. Test results for the elbow's mechanical properties after long-term operation (13HMF)

Oznaczenie badanej próbki	Kierunek poboru próbek	Właściwości mechaniczne stali 13HMF				
		$R_{e0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KCUs ₂ [J/cm ²]	HB
					KV [J]	
wg PN-74/H-47252	poprzeczny	min 355	490÷690	min 18	min 60	135÷180
					48	
prostka	poprzeczny	321	531	26,0	27,5 20 20	155
					22 16 16	153
„rozciągana”	poprzeczny	313	524	26,4	17,5 20 17,5	157
					14 16 14	155
						157

W zależności od stopnia degradacji materiału stosowane są różne technologie napraw, rozszlifowanie, napawanie z obróbką cieplną lub wymiana spoiny. Często przyczyną uszkodzeń jest poziom naprężenia rzeczywistego wynikającego z rzeczywistych wymiarów geometrycznych, głównie grubości ścianki oraz występowania złożonego stanu naprężenia w wyniku oddziaływania momentów gnących i skręcających.

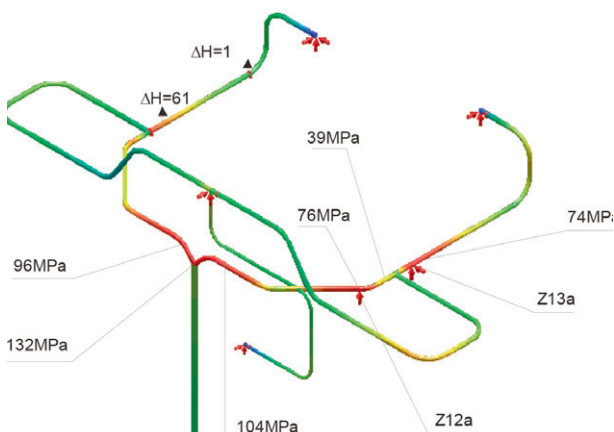
5. DYSKUSJA AWARII RUROCIĄGU

W trakcie długoletniej eksploatacji rurociągów pomimo prowadzonych badań diagnostycznych mających na celu zapewnienie bezawaryjnej pracy instalacji rurociągowych spotyka się co jakiś czas sytuacje awaryjne wynikające z przyczyn konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i materiałowych.

Poniżej przedstawiony przykład ilustruje zaobserwowaną awarię rurociągu wysokopięnego – pęknięcie kolana w trakcie eksploatacji (ponad 150 000 h) obiektu energetycznego. Przedstawiony przypadek awarii kolana (pęknięcie wzdłużne w wyniku procesów pełzaniowych) jest pierwszym w skali polskich obiektów energetycznych. Pęknięcia wzdłużne jednego z głównych rurociągowych elementów kształtowych pary świeżej stanowi bardzo poważną awarię mogącą pociągnąć za sobą katastrofalne skutki.

Rozkład naprężenia obliczony na podstawie pomiarów dylatacji cieplnej przy założeniu nieprawidłowej pracy zamocowania Z13a i Z12a ujawnia wzrost naprężenia na trójniku widlastym (duże przekroczenie naprężeń dopuszczalnych) oraz wzrost naprężenia na kolanie w rejonie zamocowania Z12a i trójnika przy zamocowaniu Z13a.

Obliczenia prowadzone przy założeniu obciążeń projektowych oraz poprawności działania zamocowań, nie wykazały przekroczeń naprężenia zredukowanego w kolanie, które uległo zniszczeniu. Wytężenie w tym kolanie (stosunek naprężenia od temperatury do naprężenia dopuszczalnego) nie przekraczało wskaźnika 0,5.



Rys. 3. Rozkład naprężenia przy nieprawidłowej pracy zamocowań (Z12a i Z13a)

Fig. 3. Distribution of stress in the case of improper operation of clamps (Z12a and Z13a)

Wyniki obliczeń w świetle faktu pęknięcia kolana, przy braku wad produkcyjnych jak i niedopuszczalnych zmian pełzaniowych, wyraźnie wskazują na dodatkowe

inne przyczyny. Stwierdzone szybkie zmiany pełzaniowe w badanym kolanie musiały być spowodowane nieprzewidywalnym lokalnym wzrostem obciążeń.

W rejonie pękniętego kolana stwierdzono niesprawność w pracy układu zamocowań powodującą wzrost naprężeń w materiale rurociągu podczas eksploatacji w zmiennych warunkach cieplnych przez ograniczenie możliwości dylatacyjnych rurociągu.



Rys. 4. a) pęknięcie zlokalizowane na rurociągu, b) fragment materiału pobranego do badań

Fig. 4. a) crack located on the pipeline, b) section of the material for testing

Badania składu chemicznego próbek potwierdziło zgodność ze składem materiału 13HMF.

Wartości wyjściowe stali 13HMF zawiera tabela 1.

Wyniki uzyskane podczas statycznej próby rozciągania w części giętej kolana, po długim czasie eksploatacji są praktycznie zgodne z wymaganiami normy PN-74/H-74252. Wymienione wyżej własności w prostych częściach kolana są znacznie gorsze od wymagań normy PN-74/H-74252. Energia łamania w temperaturze otoczenia próbek Charpy V pobranych z odcinków kolana jest bardzo niska, co świadczy o poważnych,

Tabela 2. Wyniki właściwości mechanicznych materiału kolana
Table 2. Results of mechanical properties of the elbow's material

Oznaczenie badanej próbki	Właściwości mechaniczne stali 13HMF po eksploatacji					
	Kierunek poboru próbek	$R_{e0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KV [J]	HB
prostka od strony pęknięcia	poprzeczny	370	470	16	8 8 11	162
„rozciągana”	poprzeczny	319	515	23	34 30 24	163

niekorzystnych zmianach struktury (umowny próg kruchości – 27 J). Wyniki badań zawiera tabela 2.

Badania ultradźwiękowe w całej objętości dostarczonych odcinków kolan z wyłączeniem widocznych pęknięć nie wykryły wzdłużnych ani poprzecznych nieciągłości. Podobnie badania magnetyczno-proszkowe na powierzchni zewnętrznej, a także powierzchni wewnętrznej nie ujawniły nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych. Wyjątkiem są okolice pęknięcia głównego, w których wykryto wiele makro pęknięć o niewielkiej głębokości.

Obserwacje przeprowadzone na zglądach ujawniły strukturę ferrytu z obszarami bainitu. Obszary bainityczne po części skoagulowane. Wewnątrz ziaren ferrytu liczne, w większości drobne, równomiernie rozmieszczone wydzielenia. Po granicach ziaren liczne znacznej wielkości wydzielenia, tworzące łańcuszki. Blisko pęknięcia widoczne liczne nieciągłości mające postać mikroszczelin.

Wnioski wynikające z zaistniałej awarii:

Stwierdzone szybkie zmiany pełzaniowe w badanym kolanie musiały być spowodowane nieprzewidywalnym lokalnym wzrostem obciążeń. Wzrost naprężeń, a w szczególności momentów skręcających, obciążając uszkodzony element wraz z wyraźnym obniżeniem wskaźników wytrzymałościowych przyczynił się do pęknięcia materiału rurociągu. Opisany przypadek wskazuje również na niebagatelną rolę układu zamocowań dla bezpieczeństwa eksploatacji energetycznych instalacji rurociągowych.

Należy zaznaczyć, że wady materiałów w postaci nieciągłości bądź nieodpowiednich własności powstają zarówno w czasie eksploatacji, jak i podczas procesów produkcyjnych. Wady powstające w trakcie eksploatacji to przede wszystkim pęknięcia, uszkodzenia korozyjne i degradacja struktury wskutek procesów zmęczeniowych lub pełzania, szczególnie w przypadku materiałów pracujących w podwyższonych temperaturach. Problem rozwoju uszkodzeń wywołanych procesami pełzaniowymi i zmęczeniowymi mającymi bezpośredni wpływ na żywotność materiału badany jest obecnie niezależnymi metodami [6–9] nieniszczącymi i niszczącymi. Zastosowanie w procesie diagnostycznym odpowiednich metod badawczych stwarza możliwość formułowania trafnych prognoz czasu bezpiecznej eksploatacji ocenianego obiektu lub elementu.

6. PODSUMOWANIE

Rozwój nowoczesnych metod badawczych i narzędzi modelowania numerycznego pozwala monitorować postęp degradacji, a w konsekwencji umożliwia prze-

widywać 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 MES pozwalają zbudować ogólny model zużycia rozpatrywanych obiektów pracujących powyżej temperatury granicznej z uwzględnieniem czasowego zużycia od pełzania oraz zużycia termozmęczeniowego.

Obecnie do oceny wytrzymałości i niezawodności elementów konstrukcyjnych zawierających pęknięcia wdraża się również narzędzia mechaniki pęknięcia z procedury SINTAP i FITNET [5] oraz metody akumulacji zniszczenia 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 wyęźnienia węzłów kryterialnych, co nierozdzielnie łączy się z prawidłowo prowadzoną polityką diagnostyczną.

Generalnie o stanie rurociągów decyduje stan poszczególnych elementów poddanych największym obciążeniom eksploatacyjnym, tzw. elementów kryterialnych. Dla układu rurociągów wysokoprężnych są to elementy kształtowe takie jak kolana, trójniki i czwórniki. Dużym obciążeniom podlegają również obszary zmian średnic i grubości ścianek, co ma miejsce na styku rurociąg – trójnik. Są to obszary koncentracji naprężeń mogących powodować pęknięcie złączy spawanych. W przypadku dalszej długookresowej eksploatacji rurociągów z zachowaniem dotychczasowych parametrów pracy należy uwzględnić wymianę najbardziej wyeksploatowanych elementów kształtowych.

W praktyce istnieje jeszcze wiele innych zagrożeń, co należy przeanalizować w ścisłych grupach zawodowych. Dla każdej siłowni stopień zagrożenia jest inny, inny dla elektrowni opalanych węglem kamiennym, brunatnym czy paliwem ciekłym lub gazowym.

LITERATURA

- [1] D. Mężyk. Wpływ przebiegu eksploatacji urządzeń ciśnieniowych w energetyce zawodowej na ich bezpieczeństwo i niezawodność pracy, Zagadnienia projektowo-diagnostyczne. W: *Seminarium rozwoju niszczenia materiałów i laserowego modelowania materiałów*. Zakopane 2003.
- [2] D. Mężyk. Eksploatacja i diagnostyka rurociągów energetycznych. W: *IX Forum Energetyków*. 2004.
- [3] Sprawozdanie z badań IEn 6/12.
- [4] J. Dobrzański. *Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki*. Open access library – v. 3 2011.
- [5] A. Neimitz. *Ocena wytrzymałości elementów konstrukcyjnych zawierających pęknięcia*. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2004.
- [6] Z.L. Kowalewski. Degradacja materiałów konstrukcyjnych stymulowana procesem pełzania. W: *Mat. Konf. Seminarium Szkoleniowego „Rozwój zniszczenia materiałów i laserowe modyfikowanie materiałów”*. 2003.
- [7] J. Szelażek. Postępy w ultradźwiękowych badaniach naprężeń. *Prace IPPT*. 2001, (4).
- [8] T. Płociński, W. Manaj, M. Spsychalski, K.J. Kurzydłowski. Nieniszczące badania metalograficzne – porównanie technik. W: *Seminarium – Badania Nieniszczące*. 2003.
- [9] Z.L. Kowalewski, S. Mackiewicz, J. Szelażek, J. Deputat. Ocena uszkodzenia stali w wyniku pełzania na podstawie badań materiałów. W: *Mat. Konf. XXI Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego*. 2004.
- [10] Polski Komitet Normalizacyjny. PN-75/H-84024. *Stal do pracy przy podwyższonych temperaturach – Gatunki*, PN-74/H-74252 *Rury stalowe bez szwu kotłowe*.