

Wytyczne oceny spoin, kolan rurociągów i komór pracujących w warunkach pełzania

Ekonomiczne zaburzenia w gospodarce, powstałe w ostatnich latach, doprowadziły do zmiany strategii rozwoju krajowej energetyki. Zamiast pokrywania zużycia energii budową nowych, zaczęto stosować naciski na przedłużenie okresu eksploatacji już istniejących obiektów.

Dla realizacji tego celu koniecznym jest dysponowanie procedurami, które by umożliwiły, w sposób wiarygodny, dokonanie oceny stanu oraz prowadzenie, w sposób niezawodny, przedłużonej eksploatacji urządzenia.

Istniejąca tendencja, do przedłużania obliczeniowego czasu eksploatacji urządzeń energetycznych wymaga doskonalenia techniki ich oceny. W pierwszej kolejności dotyczy to rurociągów i komór, a szczególnie kolan i spoin jako najważniejszych ich elementów, długo pracujących w warunkach pełzania, tj. powyżej temperatury granicznej dla danego gatunku stali.

Charakter uszkodzeń

Spoiny

Uszkodzenia spoin, w postaci pęknięć obwodowych (rys. 1), występują w strefie wpływu ciepła (SWC) i mogą być związane z procesami wydzieleniowego starzenia metalu lub niedotrzymaniem warunków cieplnej obróbki po spawaniu.

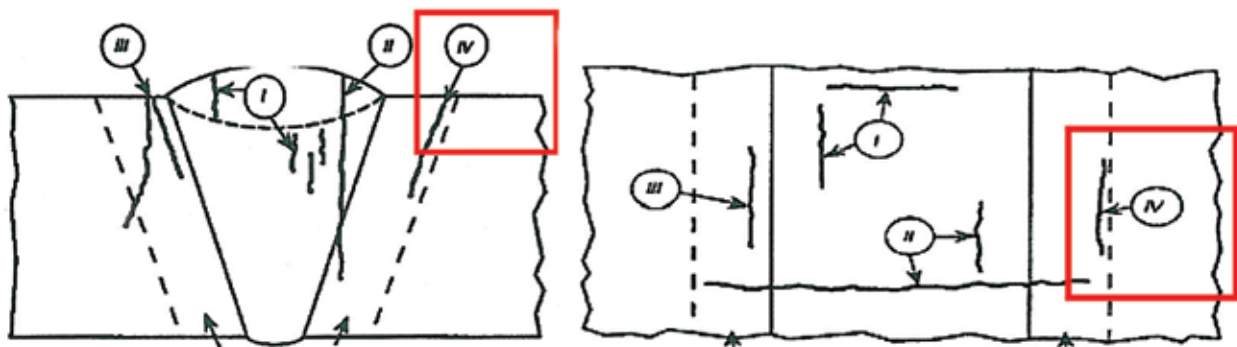
Doświadczenia eksploatacyjne wykazują, że pęknięcia powstają:

- po przpracowaniu ok. 100 000 – 120 000 h w przypadku stali typu HMF, a w przypadku stali martenzytycznych typu 9-12CrVMoN, po 50 000 h,
- gdy naprężenia osiowe (od ciśnienia) stanowią co najmniej 2/3 wartości naprężeń obwodowych.



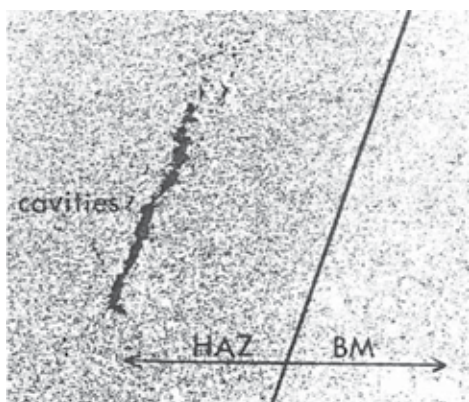
Rys. 1. Obwodowe pęknięcia spoin rurociągu w strefie wpływu ciepła [9, 10]

W elementach walcowych naprężenia osiowe nie przekraczają 1/2 wartości naprężeń obwodowych. Przekroczenie tych wartości może jedynie zaistnieć w przypadkach, gdy na element (rurociąg, komorę) działają naprężenia zewnętrzne, np. od niewłaściwej kompensacji wydłużeń cieplnych, ciężaru własnego, niesprawnych zamocowań itp. Wszystkie pęknięcia spoin, które powstają po pewnym czasie eksploatacji, należą do tzw. rodzaju IV (rys. 2) i są umiejscowione w strefie grzania metalu



Rys. 2. Rodzaje pęknięć w spoinie (IV rodzaj) – pęknięcia związane z czasem eksploatacji [2]

powstającej w czasie spawania w zakresie temperatur między A_{c1} – A_{c3} – raczej w pobliżu A_{c1} i rozprzestrzeniają się wzdłuż strefy drobnoziarnistej. Pęknięciom tym towarzyszą pustki pełzaniowe (rys. 3) obniżające znacznie odporność na odkształcenie co, w porównaniu z trwałością materiału rodzimego, jest powodem przedwczesnego uszkodzenia spoiny.



Rys. 3. Skupisko pustek w spoinie [2]

Kolana

Uszkodzenia kolan rurociągów parowych można podzielić na:

- pęknięcia zmęczeniowo-korozyjne wewnętrznej powierzchni w obojętnej strefie gięcia kolan rurociągów pracujących w temperaturze do 390°C ,
- pęknięcia pełzaniowe na zewnętrznej powierzchni w strefie rozciąganej kolan rurociągów pracujących w temperaturze wyższej niż 390°C .

Na trwałość kolan rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania mają wpływ wymienione poniżej czynniki.

- Metalurgiczne – zmiany własności mechanicznych (zwłaszcza plastyczność) wskutek niewłaściwej obróbki cieplnej kolana.
- Technologiczne – zmiany geometrii przekroju poprzecznego (owalizacja oraz grubość ścianki w strefie rozciągania), wynikające z nieodpowiedniej technologii gięcia kolana. W praktyce, w polskich elektrowniach, zwłaszcza w przypadku dostaw radzieckich, spotykało się kolana o stopniu owalizacji od 8 do 12%, co powodowało przekraczanie dopuszczalnych naprężeń, co skutkuje powstawaniem zmian pełzaniowych. Kolana o owalizacji przekraczającej 8% powinny być eliminowane z eksploatacji, zwłaszcza gdy przepracowały więcej niż 100 000 h. Współczesne technologie gięcia umożliwiają produkcję i dostawę kolan, których owalizacja nie przekracza 4%. W przypadku kiedy owalizacja jest $\leq 2\%$, to naprężenie w kolanie może być niższe niż naprężenie odcinka prostego. Wynika to z kształtu kolana, którego łuk jest wycinkiem toru, a w torze naprężenia obwodowe są mniejsze niż w odcinku prostym (walcowym) – ma to decydujący wpływ na żywotność.
- Eksploatacyjne – tu decydujący wpływ mają zmiany grubości ścianek i pęknięcia zmęczeniowo-korozyjne. Największy wpływ na trwałość kolan rurociągów parowych mają oczywiście ścięcenie ścianki i owalizacja, gdyż powodują wzrost naprężeń obwodowych.

Analiza uszkodzeń połączeń spawanych wykonanych ze stali drobnodispersyjnych (z dodatkiem wanadu, molibdenu, chromu, azotu) rurociągów i komór po przepracowaniu 20 000 – 100 000 h wykazały, że najczęściej występują one na elementach pracujących w warunkach pełzania:

– rurociągach pary świeżej	60%	} wszystkich badanych spoin
– rurociągach pary wtórnej gorącej	20%	
– trójnikach	40%	
– komorach (denka)	30%	

Najmniej uszkodzeń występuje na połączeniach rur z jednakową grubością ścianki.

Uszkodzalność połączeń spawanych pracujących powyżej temperatury granicznej wzrasta o rząd wielkości ze wzrostem temperatury pracy, co świadczy o istotnym wpływie pełzania, które jest podstawową przyczyną powstawania uszkodzeń, zarówno spoin jak i kolan rurociągów.

Doświadczenia eksploatacyjne, potwierdzone badaniami diagnostycznymi, wskazują, że poszczególne elementy tego samego rurociągu mogą wyczerpywać się w bardzo różnym stopniu.

W przypadku kolan przyczyną przedwczesnego wyczerpania trwałości są naprężenia (geometria, układ zawieszzeń), zmiany strukturalne oraz towarzyszące im obniżenie wytrzymałości czasowej i wady technologiczne.

Przy spoinach rurociągów parowych najczęściej powodem wykrywanych uszkodzeń są: obniżona wytrzymałość czasowa w SWC, niewłaściwa praca, często niesprawność zamocowania, przeciwpady oraz uginanie się odcinków prostych w stanach nieustalonych.

Metody oceny dalszej przydatności elementów pracujących w warunkach pełzania

Problem, jak już wspomniano, trwałości elementów urządzenia energetycznego, a szczególnie oceny ich dalszej przydatności, coraz bardziej nabiera aktualności.

To zagadnienie jest uwarunkowane koniecznością przedłużania czasów eksploatacji urządzeń oraz stosowania nowych gatunków stali o wysokiej żaroodporności i żarowytrzymałości i tak, np. w miarę stosowania stali martenzytycznych rośnie liczba uszkodzeń połączeń spawanych.

Istnieje kilka sposobów dokonywania oceny stanu technicznego i żywotności elementów krytycznych eksploatowanych w temperaturach przekraczających wartości graniczne dla danego gatunku stali, czyli takich, które są liczone na wytrzymałość czasową, a ich podstawowym procesem niszczenia jest pełzanie.

Można wyróżnić dwa sposoby podejścia:

- ocena elementów krytycznych na podstawie badań diagnostycznych (niszczących i nieniszczących) wykonywanych okresowo w czasie planowanego odstawienia urządzenia,
- ocena na podstawie ciągłego śledzenia, w czasie eksploatacji, parametrów pracy i obliczanie, na bieżąco, stopnia wyczerpania elementu, a tym samym i całego urządzenia.

Pierwszy sposób kontroli daje precyzyjną, ale okresową ocenę stanu technicznego badanych elementów i całego urządzenia. Ocena taka umożliwi dokonanie aktualnego przeglądu, od remontu do remontu, oraz zastosowanie właściwych zabiegów w postaci naprawy, modernizacji, wymiany itp. Podejście takie obejmuje wszystkie elementy krytyczne danego urządzenia.

Drugi sposób daje mniej dokładne wyniki, lecz umożliwia Użytkownikowi otrzymanie informacji o wpływie warunków pracy na stan urządzenia; nie obejmuje jednak elementów krytycznych pracujących poniżej temperatury granicznej, a więc niepracujących w warunkach pełzania.

Dużą część urządzeń energetycznych, bądź ich części, ulega uszkodzeniom na skutek działania zjawisk, które mają charakter deterministyczny. Jednak deterministyczne podejście (z punktu widzenia analizy niezawodności) nie jest wiarygodne. Dlatego celowe jest wprowadzenie metody oceny, która uwzględniałaby losowy charakter eksploatacyjnych i konstrukcyjnych mechanizmów określonych przez odpowiednie rozkłady naprężeń i wytrzymałości. Jeżeli oba rozkłady są określone, to istnieje możliwość wyznaczenia prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu, a w dalszej konsekwencji stopnia ryzyka.

Ryzyko w diagnostyce materiałowej rozumiane jest jako możliwość wystąpienia nieoczekiwanych okoliczności, o negatywnym wpływie na prawidłową pracę całego urządzenia, przy znanym prawdopodobieństwie ich wystąpienia.

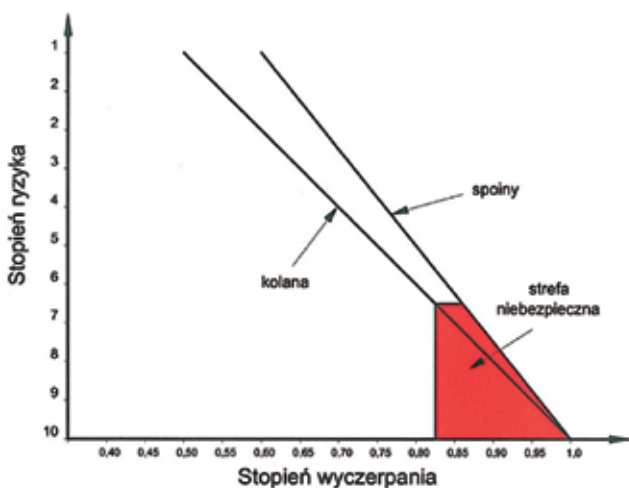
W przypadku omawianych obszarów (kolana, spoiny) ryzyko określane jest jednym procesem.

Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia, spowodowanego pełzaniem jest niższe niż np. uszkodzenia korozyjnego i korozyjno-naprężeniowego.

Mechanizm zniszczenia korozyjno-naprężeniowego nie stanowi tematu niniejszego artykułu.

Natomiast uszkodzenia pełzaniowe, o czym należy pamiętać, są nienaprawialne, a porażone elementy powinny być wymienione.

W zasadzie wielkość ryzyka może być oceniana jedynie po wartościach granicznych $R_n = 1$ zadowalający, $R_n = 10$ niezadowalający (R_n – ryzyko powstania uszkodzenia). Przedstawiono to na rysunku 4.



Rys. 4. Ocena indywidualna elementów krytycznych w ocenie ryzyka

Obliczeniowa ocena stopnia wyczerpania

Obliczenia trwałości wykonywane wg normy EN można wykonywać wg danych nominalnych; temperatura, ciśnienie,

geometria lub rzeczywistych, wyniki których nie zawsze są zgodne ze sobą. Trwałość wg parametrów rzeczywistych może 1,5 – 2 razy przewyższać trwałość wg danych nominalnych. W przypadku obliczenia wg parametrów rzeczywistych, kiedy uwzględniana jest średnia temperatura pracy metalu przeliczana z grubości warstwy tlenków oraz współczynnik wytrzymałościowy spoiny, obliczeniowe rzeczywiste czasy prognozowane są na 300 000 i 350 000 h.

Współczynnik wiarygodności obliczeń (WO) wynosi niestety $\pm 20\%$.

Rzeczywistą, indywidualną trwałość ustanawia się przez porównanie naprężeń zredukowanych σ_z z wytrzymałością czasową $R_{z/t}$ przy spełnieniu warunku $\sigma_z \leq R_{z/t}$ oraz oceny zapasu wytrzymałości.

Naprężenie zredukowane powinno uwzględniać wszystkie możliwe rodzaje naprężeń panujących w danym obszarze (kolano, spoina) elementu. W ten sposób wiarygodność obliczeń może być podwyższona od 40 do 70%.

W obliczeniowych metodach oceny stosuje się trzy pojęcia obliczeniowej trwałości:

- trwałość projektowa „ τ_p ” (projektowy czas) liczona na parametry i współczynniki w obliczeniach koncesyjnych; trwałość projektowa dla długo eksploatowanych elementów opiera się często na danych wytrzymałościowych na 100 000 h, takie były dostępne do urządzeń długo eksploatowanych,
- trwałość konstrukcyjna „ τ_z ” (nominalna) to ponowne przeliczenia elementów przy parametrach znamionowych, ale z uwzględnieniem danych wytrzymałościowych na 250 000 h i 300 000 h,
- trwałość indywidualna „ τ_i ” – uwzględniająca aktualnie dostępne dane wytrzymałościowe na 250 000 h i 300 000 h (dla stali eksploatowanych) i rzeczywiste parametry tj. średnia temperatura metalu (rzeczywista grubość tlenków na powierzchni wewnętrznej) i rzeczywista geometria (średnice i grubości ścianek) – owalizacja.

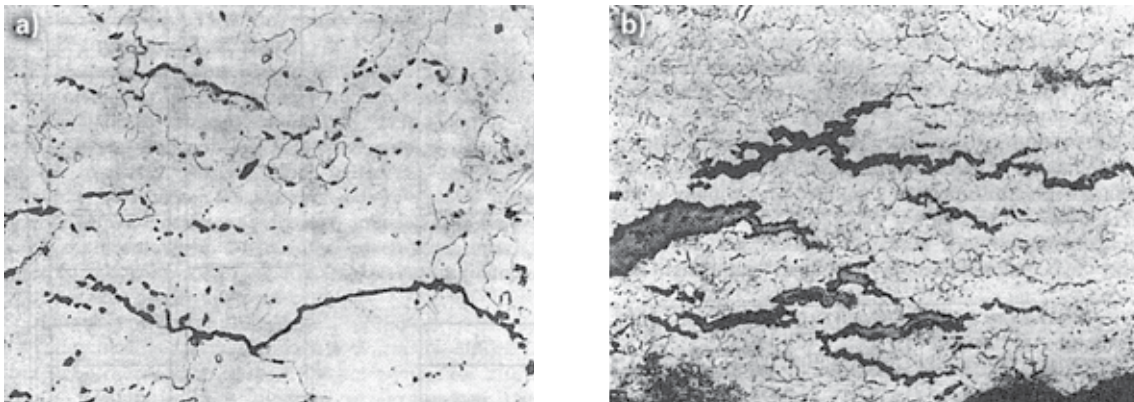
Trwałość nominalna może się wahać w granicach 90 000 – 300 000 h, a indywidualna 170 000 – 400 000 h.

Potwierdzają to również dane z literatury światowej, wg których elementy projektowane na 100 000 h przepracowały do tej pory bezawaryjnie 200 000 h, a ich indywidualny czas przewidyuje się do 300 000 – 400 000 h.

Ocena stopnia wyczerpania wg struktury

Priorytetowe znaczenia dla oceny żywotności ma badanie metalograficzne tj. metalograficzna analiza replik, a szczególnie próbek niszczących, których ocena wyników charakteryzuje się dużą wiarygodnością – ponad 90%. Metoda oceny struktury pozwala wyznaczyć stopień wyczerpania wg rzeczywistego stanu metalu, w najbardziej wyłożonych odcinkach elementów krytycznych.

Biorąc pod uwagę, że typowe uszkodzenia spoin i kolan pracujących długotrwale w warunkach pełzania występują na powierzchni zewnętrznej w spoinach, w strefie drobnoziarnistej i na kolanach, na łukach zewnętrznych, to znajomość tych charakterystycznych obszarów pozwala wybrać miejsca najbardziej niebezpieczne i poddawać je systematycznej kontroli.



Rys. 5. a) Orientowane skupisko mikroporów, pow. 320x [1] b) mikro- i makropęknięcia w pobliżu kolana, pow. 50x [1]

Należy pamiętać, że struktura metalu w strefie uszkodzenia zależy od jego struktury początkowej, jak i czasu pracy kolana. Im dłuższy jest czas pracy do uszkodzenia kolana, tym częściej stwierdza się homogenizację struktury, której efektem końcowym jest rozpad bainitu i perlitu. Uszkodzenia, pęknięcia na kolanach są poprzedzone występowaniem dużej ilości mikroporów ułożonych na granicy ziaren (charakter pojedynczych pęknięć, międzykrystaliczny) i zorientowanych prostopadłe do naprężeń obwodowych (rys. 5).

Największą liczbą pustek pełzaniowych objęta jest zewnętrzna powierzchnia kolana. W miarę oddalania się od osi pęknięcia, po obwodzie i po grubości, liczba mikroporów maleje. Zależnie od znamionowych wymiarów komory czy kolana, szerokość porowatego pasma wynosi od 20 do 60 mm, a długość od 100 do 300 mm.

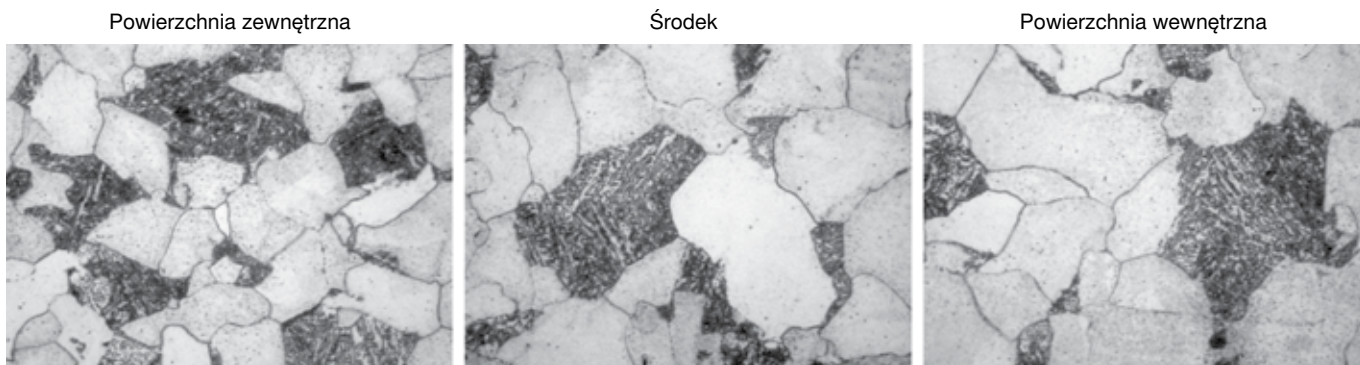
Analizy stosowanych metod oceny stopnia wyczerpania wskazują, że najbardziej wiarygodna ocena jest uzyskiwana na podstawie badań struktury, a szczególnie pustek pełzaniowych, ich miejsca występowania, wielkości i gęstości.

Stopień wiarygodności oceny według struktury zależy od miejsca jej badania. Na powierzchni spoin w przeciwieństwie do kolan, gęstość porów jest mniejsza niż w głębi grubości ścianki elementu.

W przypadku kolan eksploatowanych powyżej 200 000 h, właściwe jest pobranie korka w celu ustalenia stanu struktury na całym przekroju, co daje bardzo wiarygodny wynik, nie powodując zniszczenia, a więc konieczności wymiany kolana jak w przypadku wykonania badań wytrzymałościowych próbek pobranych z wycinków kontrolnych. Podobny sposób można zastosować w odniesieniu do komory (rys. 6 i 7).



Rys. 6. Struktura korka na przekroju kolana, pow. 200x [10]



Rys. 7. Struktura na przekroju komory z pobranych korków, pow. 500x [10]

Podsumowanie

Większość specjalistów uważa, że graniczny czas eksploatacji jest indywidualny i zależy od następujących czynników:

- nieuwzględnionych naprężeń własnych lub powstałych dodatkowo w czasie eksploatacji,
- rozkładu naprężeń stałych i zmiennych w poszczególnych miejscach demontażu,
- temperatury eksploatacji podwyższonej lub obniżonej w stosunku do obliczeniowej,
- rodzaju pracy jednostek – podstawowy lub szczytowy,
- początkowy okres obsługi związany z obiektywnymi i subiektywnymi czynnikami,
- wpływ środowiska, np. korozja,
- możliwości istnienia nieuwzględnionych, w czasie projektowania, mechanizmów niszczenia metalu, jak np. korozja naprężeniowa i zmęczeniuowa,
- własności metalu różniących się od średnich podanych w normach.

W celu ustalenia czasu granicznego stanu metalu, elementów krytycznych jednostek energetycznych, należy określić zespół kryteriów oceny. Tego rodzaju kryteria zależą z kolei od warunków eksploatacji oraz mechanizmów uszkodzenia, które zależą od takich zjawisk jak:

- pełzanie,
- zmęczenie,
- korozja,
- erozja

oraz ich różnorodnych kombinacji.

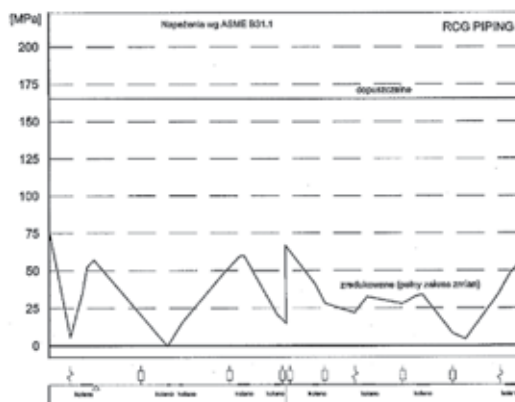
Dlatego należy:

- ocenić realne – rzeczywiste warunki eksploatacji za cały okres wykorzystania urządzenia,
- wykonać ponowne obliczenia wytrzymałościowe na podstawie sprawdzonych danych eksploatacyjnych oraz rzeczywistych wymiarów oraz nowych danych wytrzymałościowych,
- sprawdzić stan obecny wykorzystując badania diagnostyczne, wg tabeli 1,
- zastosować badania diagnostyczne:
- ocenić stopień wyczerpania i postawić diagnozę, a następnie prognozę.

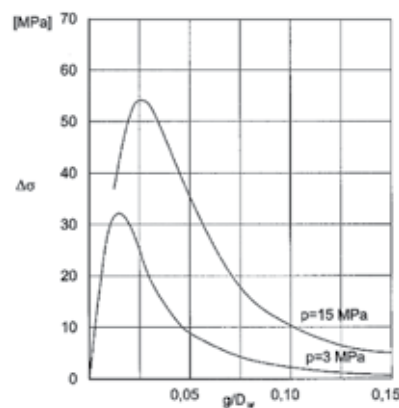
Na podstawie obliczeń i praktyki należy wytypować najbardziej wyczerpane części elementów krytycznych, a następnie ocenić ich stan badaniami diagnostycznymi.

Ustalenie parametru limitującego trwałość (naprężenie w funkcji grubości) wyróżnia, szczególnie rurociągi wysokoprężne, od pozostałych elementów energetycznych (np. walczaków, komór, kadłubów, zaworów itp.), a to ze względu na różnorodność kształtów poszczególnych części składowych (kształtki, kolana, kadłuby itp.), które, nawet w granicach jednego rurociągu, mogą mieć różne grubości. Dlatego tak istotnym jest porównywanie obliczeniowych i rzeczywistych grubości ścianek, co może zmienić dalszą ich przydatność. Wynika to z faktu, że grubość ścianki niekoniecznie jest parametrem limitującym trwałość elementu. Przykładowy poziom sumarycznych naprężeń występujących na długości całego rurociągu przedstawiono na rysunku 8.

Krzywe wpływu względnej grubości ścianki i ciśnienia na wartość naprężeń spowodowanych owalizacją wskazują, że znajomość tych wartości może w sposób istotny decydować o dalszej eksploatacji kolana czy wręcz o jego wymianie (rys. 9).



Rys. 8. Poziom naprężeń zredukowanych na przekroju i dopuszczalnych wg ANSI/ASME B 31.1 dla rurociągu pary świeżej bloku 200 MW [5]



Rys. 9. Krzywe wpływu względnej grubości ścianki i ciśnienia na wartość naprężeń spowodowanych owalizacją [5]

Modne ostatnio są różnego rodzaju liczniki stopnia wyczerpania, jednakże są mało przydatne dla dokonania oceny przyrostu wyczerpania eksploatowanych elementów grubościennych, ponieważ:

- miejsca pomiaru parametrów, a szczególnie temperatury, nie są miejscami krytycznymi,
- brak danych z okresu przed wprowadzeniem pomiarów,
- brak danych rzeczywistych dotyczących geometrii elementów, a tym samym panujących naprężeń.

Własności metalu i wartości naprężeń, odbiegające od podanych w normach i użytych do obliczeń trwałości, a szczególnie od zmęczenia w środowisku agresywnym, są mało przydatne, ponieważ reguły jednoczesnego działania i sumowania tych czynników na metal są bardzo złożone i niedostatecznie rozważane.

Obecnie wiadomo, że zasada liniowego sumowania wartości (stopni) niszczenia od różnych procesów jest niewłaściwa, ponieważ rzeczywista zależność współdziałania tych czynników jest bardzo złożona, co znacząco obniża wiarygodność różnych programów oceny eksploatacyjnego stopnia zużycia. Jest to szczególnie widoczne w przypadku występowania zmęczenia korozyjnego.

Charakterystyki metod stosowanych do badań diagnostycznych

Metoda badania	Oznaczenie	Czułość	Wykrywalne wady	Skuteczność metod	
				mikropęknięcia	makropęknięcia
Wizualna	VTO	>1,0 mm	powierzchniowe	nie wykrywa	raczej wykrywa
Endoskop	VTE	>1,0 mm	powierzchniowe	nie wykrywa	raczej wykrywa
Ultradźwięk	UTT	2 – 7 mm ²	wewnętrzne	wykrywa	nie wykrywa
Magnetyczno-proszkowa	MT	0,3 mm	powierzchniowe i podpowierzchniowe h – do 2 mm	nie wykrywa	wykrywa
Prądowirowa	ET	0,3 mm	powierzchniowe i podpowierzchniowe h – do 15 mm	nie wykrywa	wykrywa
Penetracyjna	PT	0,3 mm	powierzchniowe	nie wykrywa	wykrywa
Metalografia – repliki	REP	1 mm	powierzchniowe	wykrywa	wykrywa
Metalografia – niszczące	MET	< 1 mm	powierzchniowe i wewnętrzne	wykrywa	wykrywa

Tabela 2

Dane	Poziom I ryzyko $R < 4$	Poziom II ryzyko $4 < R > 6$	Poziom III ryzyko $6 < R > 7$
Historia eksploatacji	zapisy i protokoły elektrowni	zapisy i protokoły elektrowni	zapisy i protokoły elektrowni
Wymiary	nominalne	pomierzone lub nominalne	pomierzone
Stan techniczny	nominalny	wyniki kontroli	wyniki szczegółowej kontroli
Temperatura i ciśnienie	projektowe	eksploatacyjne	pomierzone
Naprężenia	projektowe	proste obliczenia	złożone analizy
Własności materiałowe R_z	minimum wg normy	minimum wg normy	własności rzeczywiste
Pobór próbek	nie	nie	tak

Dla kolan i spoin można ustalić związek pomiędzy intensywnością uszkodzeń (liczba uszkodzeń) a ich stanem technicznym określonym za pomocą badań diagnostycznych. Obliczeniowe wartości stopnia wyczerpania i ryzyka powstania uszkodzenia mieszczą się w pasmie rozrzutu o szerokości +/- 20%, co wynika z danych materiałowych znajdujących się w normach oraz stosowanych do obliczeń metod probabilistycznych. Wobec powyższego wskazane jest sprawdzanie stanu urządzenia przez wykonywanie niszczących i nieniszczących badań diagnostycznych.

Zalecany sposób postępowania w ocenie stanu elementów krytycznych w powiązaniu ze stopniem ryzyka przedstawia tabela 2.

LITERATURA

- [1] Dobosiewicz J.: Uszkodzenia kolan rurociągów pracujących w warunkach pełzania. *Energetyka* 1991, nr 4
- [2] P/T91. Damage mechanisms and Inequity/life Assessment” European Technology Development Lit Uk London, September
- [3] Zbroińska-Szczechura E.: Trwałość elementów rurociągów parowych. *Energetyka* 1993, nr 7
- [4] Zbroińska-Szczechura E.: Niektóre kryteria oceny trwałości elementów ciśnieniowych bloków energetycznych pracujących w warunkach pełzania. *Energetyka* 1996, nr 1
- [5] Szczygielski M., Pizon E.: Diagnostyka kolan rurociągów parowych. *Energetyka* 2002, nr 5
- [6] Dobosiewicz J.: Uszkodzenia elementów rurociągów parowych. *Energetyka* 2002, nr 12
- [7] Zbroińska-Szczechura E.: Obliczenia trwałości elementów rurociągów parowych eksploatowanych powyżej 150 000 h. *Energetyka* 2002, nr 12
- [8] Dobosiewicz J., Zbroińska-Szczechura E.: Ocena stopnia zużycia ciśnieniowych elementów kotłów pracujących w warunkach pełzania. IX Sympozjum Informatyczno-Szkoleniowe, Ustroń 2007
- [9] Dobosiewicz J.: Problem przedłużania eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni. X Sympozjum Informacyjno-Szkoleniowe, Ustroń 2008
- [10] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 122.2246/2008. Niepublikowane
- [11] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 35.2321/2009. Niepublikowane
- [12] Salomon J. i inni: Life extension of hot steam piping after 200 000 h of services. Baltica VII „Life management an Maintenance or Plants” vol. 1. 2007
- [13] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 67.2353/2009. Niepublikowane