

Feliks SEYNA

Janusz GINALSKI

Instytut Energetyki

ANALIZA METOD PROGNOZOWANIA ZAPASU TRWAŁOŚCI ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH, PRACUJĄCYCH W OBSZARZE PEŁZANIA

Streszczenie. W pracy przedstawiono w ogólnych zarysach metody prognozowania zapasu trwałości elementów ciśnieniowych, eksploatowanych w obszarze pełzania. Przeprowadzono ich krytyczną ocenę pod kątem osiągniętych dokładności.

1. WSTĘP

Wezną rolę w systemie diagnostyki materiałowo-wytrzymałościowej elementów ciśnieniowych, pracujących w obszarze pełzania, odgrywa szacowanie zapasu ich trwałości. Ma ono istotne znaczenie dla bezpieczeństwa i niezawodności eksploatacji bloków energetycznych, zwłaszcza po przekroczeniu projektowego okresu pracy.

Stosowane obecnie metody prognozowania trwałości można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- metody obliczeniowe,
- metody diagnostyczne.

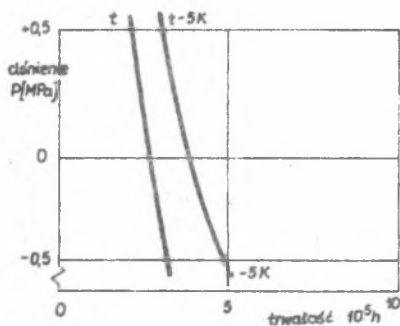
Metody obliczeniowe polegają na ponownym przeprowadzeniu obliczeń wytrzymałościowych, uwzględniających rzeczywistą geometrię elementów, statystycznie opracowane wartości temperatury i ciśnienia, zarejestrowanych w czasie ubiegłej eksploatacji oraz charakterystyki materiałowe, zawarte w obowiązujących normach lub otrzymane z prób pełzania materiału eksploatowanego [1]. Uzupełniane są one niekiedy obliczeniami stopnia degradacji materiału, wywołanej obciążeniem stałym /pełzanie/ i zmiennym /mędocykłowe zmęczenie/ w oparciu o zasadę liniowej akumulacji defektów [2] .

Metody diagnostyczne polegają na określeniu zapasu trwałości w oparciu o ocenę ich aktualnego stanu technicznego, przeprowadzoną metodami nieniszczącymi /pomiaru odkształceń trwałych, obserwacje metalograficzne, pomiaru własności fizycznych, defektoskopie itp./ oraz niszczącymi, polegającymi na określeniu struktury i własności mechanicznych i fizycznych materiału na próbkach pobranych z badanego elementu.

2. OBLICZENIOWE METODY PROGNOZOWANIA ZAPASU TRWAŁOŚCI

Metody obliczeniowe, stosowane powszechnie /również w Polsce/ opierają się na wytycznych, opracowanych w RFN [2]. Obliczeniową trwałość /teoretyczną trwałość/ dla obciążenia stacjonarnego /pełzanie/ stanowi odcięta punktu przecięcia wartości naprężenia zredukowanego z dolną krzywą rozrzutu wartości wytrzymałości na pełzanie $/0,8 R_z/$ danego materiału w temperaturze roboczej [2]. Zapas trwałości stanowi różnica między teoretyczną trwałością a dotychczasowym czasem eksploatacji.

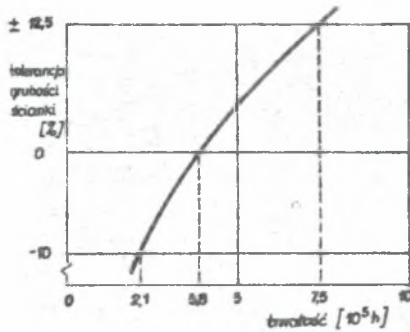
Dokładność obliczeń zależy od rozrzutu wprowadzonych do rachunku wielkości. Średnia statystyczna wartość temperatury zależy od dokładności pomiarów na obiekcie. Obniżenie temperatury na przykład o 5K podwyższa trwałość z 300 tys. na 600 tys. godzin /rys. 1/ [3].



Rys. 1. Wpływ obniżenia ciśnienia i temperatury na trwałość [3]. Rurociąg pary świeżej $\varnothing 290 \times 48$ mm. Stal 13CrMo44

Fig. 1. The influence of the pressure and temperature reduction of the life [3]. Steam pipe line $\varnothing 290 \times 48$ mm. Steel 13CrMo44.

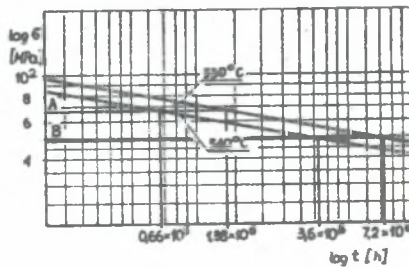
Wartości R_z danego materiału powinny być uzyskane na podstawie długotrwałych prób pełzania. W RFN po wprowadzeniu danego gatunku stali do eksploatacji z upływem lat korygowano w normach wartości R_z /obniżenie wartości/. Przyjęcie dolnej granicy wytrzymałości na pełzanie $0,8 R_z$ zwiększa rzeczywisty zapas trwałości. Istotną rolę ma także wartość naprężenia zredukowanego. Dla jego obliczenia stosuje się przeważnie uproszczone wzory. Dokładność obliczeń zależy od średniej statystycznej wartości mierzonego ciśnienia pary /rys. 1/ i tolerancji mierzonych wartości wewnętrznej średnicy i grubości ścianki rury /rys. 2/[3]. Stosowany dla rurociągów wzór na naprężenie zredukowane uwzględnia tylko obciążenie stacjonarne od ciśnienia wewnętrznego pary. W rzeczywistości są one obciążone także momentami gnącymi i skręcającymi, powstającymi pod wpływem



Rys. 2. Wpływ grubości ścianki na trwałość [3]. Rurociąg pary świeżej $\phi 290 \times 48 \text{ mm}$, stal 13CrMo44

Fig. 2. The influence of wall thickness of the life [3]. Steam pipe line $\phi 290 \times 48 \text{ mm}$, Steel 13CrMo44.

ciężaru własnego rur i izolacji, reakcji podpór /zawieszzeń/ i ograniczenia swobodnej dylatacji cieplnej. Pominięcie w obliczeniach tych naprężeń może dać błędną ocenę trwałości obliczeniowej /rys. 3/ [4].



Rys. 3. Wpływ dodatkowych momentów w obliczeniach trwałości [4]. A - bez dodatkowych momentów, B - z dodatkowymi momentami, Stal 10CrMo910

Fig. 3. The influence of additional moments of the life calculations [4]. A - without additional moments, B - with additional moments, steel 10CrMo910

Wg J.Garleffa i innych [3] dla uzyskania $\pm 20\%$ dokładności prognozy obliczeniowej trwałości jest niezbędne dotrzymanie następujących tolerancji:

- średnicy $\pm 1\%$
- grub. ścianki $\pm 1\%$
- ciśn. wewn. $\pm 1\%$

dodatkowych nepr.	$\pm 5\%$
temp.ścianki	$\pm 0,5\%$
charakterystyk materiałowych	$\pm 5\%$

Dokładność określenia naprężeń można zwiększyć stosując metody doświadczalne, np. metodę tensometrii oporowej. Największy wpływ na dokładność prognozy mają charakterystyki materiałowe, które mogą spowodować różnice w obliczeniowej trwałości sięgające 500% [3].

3. OBLICZENIOWY WSPÓŁCZYNNIK DEGRADACJI MATERIAŁU

Wspomniane wyżej wytyczne [2] zalecają obliczanie względnej degradacji materiału wskutek stacjonarnego i zmiennego obciążenia. Instrukcja krajowa [1] takich obliczeń nie przewiduje. Całkowity współczynnik degradacji materiału zgodnie z zasadą liniowej akumulacji defektów stanowi sumę współczynników degradacji dla pełzania i dla obciążenia zmiennego [2;5]. Do obliczeń tego współczynnika wykorzystuje się także wytyczne TRD 300, 301 Anlage 1.

Największe wątpliwości przy takim obliczeniu współczynnika degradacji materiału wywołuje stosowanie liniowej akumulacji defektów, uzyskanych w wyniku różnych procesów: pełzania i małowykłowego zmęczenia. Całkowity współczynnik degradacji można więc uważać za wielkość fikcyjną. Dlatego też uzyskanie 100% obliczeniowej degradacji materiału badanego elementu według wspomnianych wyżej wytycznych [2] nie kwalifikuje elementu do netychmiastowej wymiany, lecz dopuszcza dalszą eksploatację w przypadku pozytywnych wyników dodatkowych specjalnych badań.

W RFN opracowany został w oparciu o wyżej podaną metodę system automatycznej kontroli degradacji materiału "on - line" /FACOS/. W Instytucie Energetyki są również podjęte prace w tym kierunku.

4. DIAGNOSTYCZNE METODY PROGNOZOWANIA ZAPASU TRWAŁOŚCI

Metody powyższe opierają się na wynikach kontroli materiałowo-wytrzymałościowej, przeprowadzonej na badanym obiekcie. Niektóre z tych badań dają podstawę do szacowania pozostałego zapasu trwałości, a pozostałe, służące do określenia stanu technicznego, stanowią dodatkowe informacje przy opracowywaniu prognozy.

Badania metalograficzne na obiekcie /repliki/

Do badań nieniszczących, dających podstawę do opracowania prognozy trwałości należą badania metalograficzne warstw przypowierzchniowych przeprowadzone bezpośrednio na obiekcie [6]. Doświadczenia stowarzyszeń dozorowych w RFN wykazały, że elementy nie muszą generalnie być wymieniane

lub naprawiane dopóki mikropęknięcia w strukturze materiału nie rozwiną się do wielkości makropęknięć.

Proces degradacji struktury materiału elementów ciśnieniowych kotłów, eksploatowanych w warunkach pełzania polega na:

- koagulacji i koalescencji faz węglkowych,
- grupowaniu się dyslokacji i tworzenie się substruktur,
- wzroście gęstości dyslokacji i deformacji, umożliwiającej tworzenie się defektów w postaci mikropor,
- tworzeniu się mikropor na granicach ziaren lub w otoczeniu faz węglkowych,
- ukierunkowaniu się mikropor,
- tworzeniu się mikropęknięć na granicach ziaren lub w otoczeniu dużych obszarów faz węglkowych,
- powstawaniu makropęknięć.

Tworzenie się mikropor występuje na końcu drugiego stadium pełzania przy przejściu w trzecie stadium. W latach 50 uważano, że na podstawie rozwoju faz węglkowych w stalach ferrytycznych można prognozować zapas trwałości. Z chwilą ustalenia zależności między tworzeniem się mikropor i procesem niszczenia przy pełzaniu zaczęto stosować badania metalograficzne bezpośrednio na obiekcie lub na replikach. W zależności od stopnia degradacji struktury określono szacunkowo okres dalszej dopuszczalnej eksploatacji [7] :

Stopień degradacji struktury	Uszkodzenia struktury	Prognoza
A	Pojedyncze mikropory	Eksploatacja do następnej kontroli
B	Zorientowane mikropory /łańcuchy/ - początek III - stadium pełzania	Po upływie 1-1,5 roku ponowna kontrola
C	Mikropęknięcia	Eksploatacja przez ok. 1/2 roku do najbliższego remontu
D	Makropęknięcia	Natychmiastowy remont lub wymiana

Proces niszczenia wskutek pełzania nie przebiega równomiernie na całej grubości ścianki. Nawet w przypadku stopnia degradacji D pęknięcia sięgają tylko do głębokości 30% grubości ścianki. Głębiej materiał znajduje się jeszcze w drugim stadium pełzania.

Pewność prognozy trwałości elementu zależy w dużym stopniu od właściwego wyboru miejsca do badań. Powinien to być obszar najbardziej obciążony, stanowiący "najsłabsze ogniwo wytrzymałościowe" elementu.

Badania takie muszą być przeprowadzane przez doświadczoną metaloznawcę, aby uniknąć błędnej interpretacji obrazów struktury.

Próby pełzania

Do określenia stopnia degradacji materiału i prognozy zepasu trwałości wycinano z elementu materiał do badań. Rozpowszechnienie się techniki replik i udoskonalenie metod defektoskopowych ograniczyło ten sposób postępowania do sytuacji, kiedy stopień degradacji struktury lub wartość odkształcenia trwałego zbliża się do wartości krytycznej oraz kiedy planowana jest wymiana elementu wzgl. zespołu i trzeba określić termin rozpoczęcia prac.

Prognozę zepasu trwałości przeprowadza się na podstawie ekstrapolacji wyników skróconych /do 5000 - 10 000 godzin/ prób pełzania. Najczęściej stosowane są metody: izotermiczne, izostaticzne i parametryczne. Próbkę do badań powinny być wycięte w kierunku działania maksymalnych naprężeń, tj. w przypadku rury obciążonej tylko ciśnieniem wewnętrznym w kierunku obwodowym. Ze względu na niejednorodność degradacji struktury w przekroju należy próbki wyciąć z warstw przypowierzchniowych zewnętrznych i wewnętrznych. W przeciwnym wypadku wyniki prób pełzania nie będą reprezentatywne dla opracowania prognozy.

Duże błędy w szacowaniu trwałości mogą powstać wskutek przyjęcia do analizy naprężeń projektowych /obliczeniowych/ a nie rzeczywistych. Również nieuwzględnienie naprężeń od dodatkowych sił i momentów może dać prognozy zbyt optymistyczne. Konieczność opracowania prognozy w możliwie krótkim czasie powoduje tendencję do maksymalnego skrócenia czasu i ilości prób pełzania, co może wyniki obciążyć poważnym błędem /różne mechanizmy odkształcenia, niewłaściwe ekstrapolacje wyników/.

Badania dodatkowe

Przy opracowaniu prognozy wykorzystuje się często wyniki rutynowych kontroli materiałowych. Szczególnie cenne są wyniki pomiarów odkształceń trwałych, stanowiące wielkości kryterialne /1 - 2%/, pod warunkiem, że są one dokładne.

Najczęściej jednak dokładność tych pomiarów jest niewielka, a błędy przekraczają niekiedy wartość odkształcenia.

Wyniki badań odporności na kruche pękanie $/K_{Ic}, J_{Ic}, KV/$ na materiale pobranym z obiektu mogą być także wykorzystane przy ocenie stopnia zaawansowania procesu degradacji materiału.

5. PODSUMOWANIE

Podstawową trudność w dokładnym określeniu zapasu trwałości stanowi zróżnicowany przebieg procesu degradacji materiału w poszczególnych elementach i obszarach.

Z przeprowadzonej analizy metod prognozowania trwałości wynika, że wszystkie obecnie stosowane metody umożliwiają jedynie przybliżone szacowanie pozostałego zapasu trwałości. Większe dokładności prognozy uzyskć można na podstawie prób przeprowadzonych na materiale pobranym z eksploatowanego elementu, poddanego uprzednio badaniom tensometrycznym. Koncepcja rachunkowego określenia trwałości opracowana 35 lat temu jest jeszcze aktualna, a osiągnięcie większej dokładności jest możliwe przez zawężenie tolerancji wielkości wprowadzonych do rachunku. Metoda replik może służyć do szacowania trwałości elementów w końcowym okresie eksploatacji. Umożliwia ona wykrywanie defektów struktury przed wystąpieniem makropęknięć.

Dokładność prognozowania powinna być zróżnicowana w zależności od względów technicznych i ekonomicznych. W przypadku elementów konstrukcyjnych mających wpływ na bezpieczeństwo bloku prognoza powinna być możliwie najdokładniejsza. Dokładna prognoza jest także pożądana w przypadkach, kiedy koszty przedwczesnej modernizacji, wymiany, remontu lub skutki awaryjnego unieruchomienia będą wysokie. Wymagane bezpieczeństwo i niezawodność eksploatacji można uzyskać jedynie przez śledzenie postępu degradacji materiału w systemie kompleksowej diagnostyki materiałowo-wytrzymałościowej.

LITERATURA

- /1/ Instrukcja oceny stanu oraz kwalifikowania do wymiany komór, kolektorów, rurociągów kotłowych i głównych rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania. MGIE, 1986.
- /2/ TRD 508 Anlage 1 - Zusätzliche Prüfungen an Bauteilen. Verfahren zur Berechnung von Bauteilen mit zeitabhängigen Festigkeitswerten. 1970.
- /3/ Garleff J., Dooley R.B., Kautz H.R., van Liere J., Plate K. - Lebensdauerverlängerung - ein komplexes Planungsziel. VGB Kraftwerkstechnik, 66, 1988, H.12, 1232-38.
- /4/ Koschel P., Gillesse R., John R., Steegmanns G. - Konzept zur Lebensdauerüberwachung und Ermittlung von Kraftwerksrohrleitungen im Zeitstandbereich. VGB Kraftwerkstechnik, 66, 1986, H.10, 983-999.
- /5/ Seyne F., Ginalski J. - Obliczeniowe zasady szacowania zapasu trwałości eksploatacyjnej rurociągów parowych. Dozór Techniczny, 3, 1989, 65-70.
- /6/ Milewski K., Seyne F. - Nieniszczące badania struktury stali elementów ciśnieniowych eksploatowanych w warunkach pełzania. Biuletyn IEn, Energetyka, 5, 1989, 183-185.
- /7/ Neubauer B., Arens-Fischer F. - Bestimmung der Restlebensdauer kriechbeanspruchter Kraftwerkskomponenten. VGB Kraftwerkstechnik, 1983, H.7, 637-644.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Franciszek MŁYNARSKI

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Резюме

Рассматриваются современные методы прогнозирования ресурса дальнейшей эксплуатации, именно: расчетные и диагностические методы. Проанализировано эти методы с точки зрения качества прогноза. Среди диагностических методов большое внимание уделяется металлографическим исследованиям непосредственно на конструкции.

EVALUATION OF RESIDUAL LIFE ESTIMATION METHODS OF PRESSURIZED
ELEMENTS SUBMITTED TO CREEP

Summary

There were presented actually used methods to estimate the remaining safe operating life, namely: calculation and diagnostic methods. These methods were analysed from the point view of quality of estimation. Among the diagnostic methods especially attention was payed to the metallographic examinations (replicas) on the components.