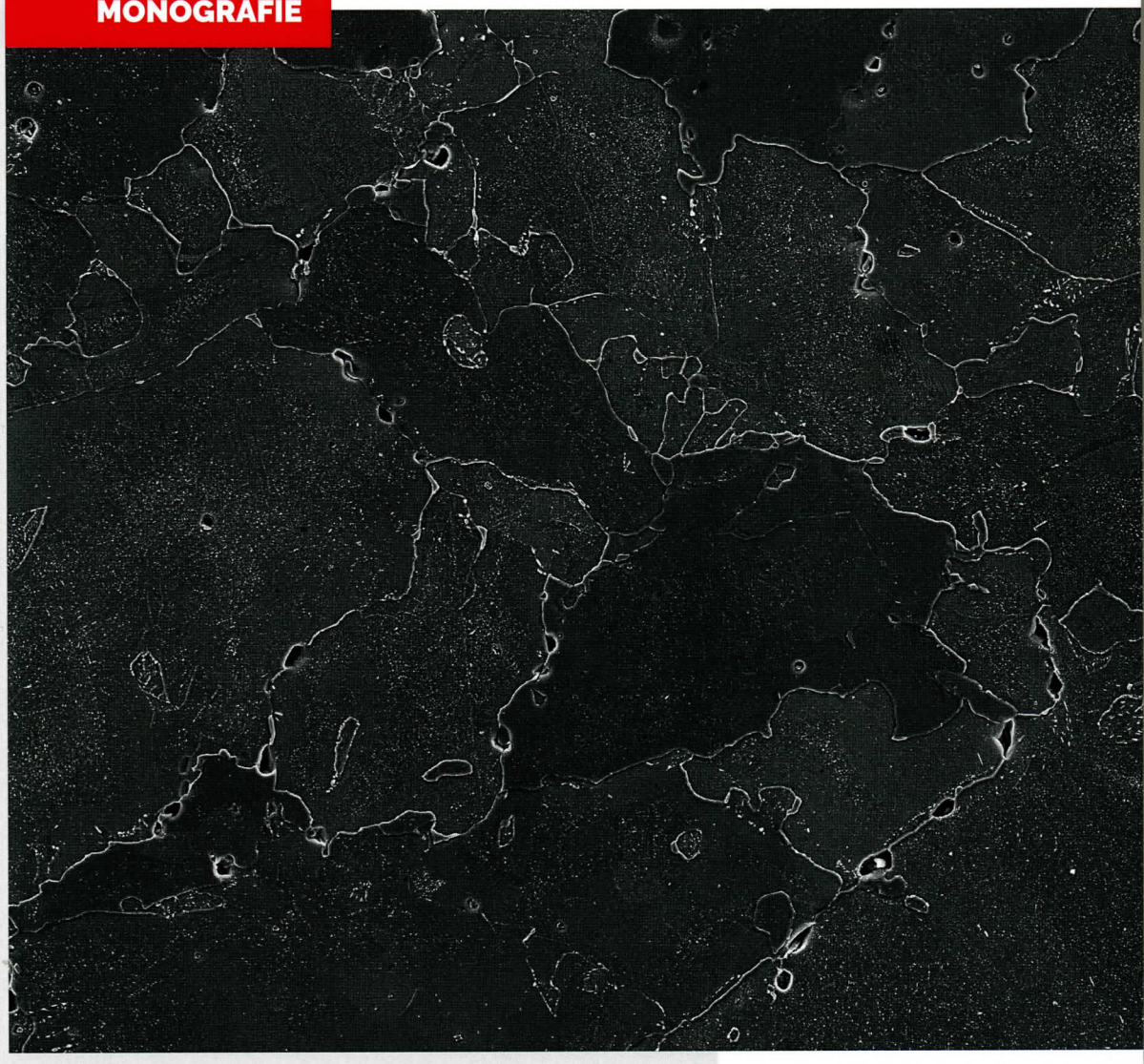
Janusz Dobrzański

TRWAŁOŚĆ ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

MONOGRAFIE



Instytut
Metalurgii
Żelaza

Monografie

Janusz Dobrzański

TRWAŁOŚĆ ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

Gliwice 2019

RECENZENCI
Prof. dr hab. inż. Adam HERNAS
Prof. dr hab. inż. Jan TALER

RADA NAUKOWA SERII MONOGRAFIE
Prof. dr hab. inż. Leszek BLACHA
Prof. dr hab. inż. Włodzimierz DERDA
Prof. dr hab. inż. Henryk DYJA, M. dr h.c.
Prof. dr hab. Roman KUZIAK
Prof. dr hab. inż. Andrzej ŁĘDZKI
Prof. dr hab. inż. Kazimierz MAMRO

ISSN: 0137-9941
ISBN: 978-83-938130-3-2

Wydawca: Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica
ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

ZESPÓŁ REDAKCYJNY
redaktor naczelny – dr hab. inż. Adam ZIELIŃSKI, prof. IMŻ
zastępca redaktora naczelnego – prof. dr hab. Józef PADUCH
redaktorzy tematyczni – dr hab. inż. Janusz DOBRZAŃSKI, prof. IMŻ,
prof. dr hab. Roman KUZIAK, dr hab. inż. Marian NIESLER, prof. IMŻ,
dr hab. inż. Krzysztof RADWAŃSKI, prof. IMŻ, dr Grażyna STANKIEWICZ
redaktorzy językowi – mgr Maja KAMIŃSKA, mgr Anna STĘPIEŃ
redaktor techniczny – mgr inż. Danuta GRUSZCZYŃSKA
sekretarz redakcji – mgr Małgorzata SKALMIERSKA

Ark. wyd. 32

Skład i łamanie: IMŻ
Druk: D&D Sp. z o.o. – Gliwice, tel. 32 230 84 24

Spis treści

Przedmowa 7

1. WPROWADZENIE 9

2. PODZIAŁ ELEMENTÓW CZĘŚCI CIŚNIENIOWEJ KOTŁA, RUROCIĄGÓW I TURBIN PAROWYCH 12

3. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE 17

4. PROCESY NISZCZENIA ELEMENTÓW KOTŁÓW, RUROCIĄGÓW I TURBIN PAROWYCH PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA 26

4.1. Wybrane procesy niszczenia materiału elementów kotła ujawnione na przykładach 36

5. METODOLOGIA OCENY STANU ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA 85

5.1. Wybór miejsc do badań 85

5.2. Dobór metod badań 89

5.3. Badania nieniszczące 91

5.4. Badania niszczące 97

5.4.1. Badania struktury 99

5.4.2. Badania właściwości mechanicznych 100

5.5. Badania procesów korozyjnych 102

6. BADANIA PEŁZANIA I SPOSÓB POSTĘPOWANIA W WYZNACZANIU CZASU BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI 106

6.1. Badania pełzania 106

6.2. Sposób wyznaczania czasu bezpiecznej pracy materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy 113

6.3. Sposób wyznaczania minimalnej grubości ścianki elementu niezbędnej do przenoszenia rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych materiału po długotrwałej pracy w warunkach pełzania o znanej charakterystyce wytrzymałości na pełzanie .. 122

7. OBLICZENIOWE METODY OCENY STANU ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA 129
7.1. Ocena stanu elementu w oparciu o dane obliczeniowe 129
7.2. Oszacowanie stopnia wyczerpania z reguły ułamków trwałości . 131
7.3. Ocena przydatności metod obliczeniowych w praktyce przemysłowej 137
8. OCENA STANU MATERIAŁU ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH KOTŁA I RUROCIĄGÓW 142
9. OCENA STANU MATERIAŁU ZŁĄCZY SPAWANYCH ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA 160
9.1. Ocena złączy spawanych elementów eksploatowanych po przekroczeniu czasu obliczeniowego 161
9.2. Ocena naprawczych/modernizacyjnych złączy spawanych materiału po eksploatacji z materiałem nowym 178
9.3. Zasady wykonywania naprawczych i modernizacyjnych złączy spawanych elementów pracujących w warunkach pełzania 207
10. PRZYKŁADOWE PROCEDURY OCENY STANU MATERIAŁU WYBRANYCH ELEMENTÓW BLOKU ENERGETYCZNEGO 210
10.1. Sposób postępowania w diagnostyce materiałowej elementów krytycznych części ciśnieniowej bloku energetycznego 210
10.2. Ocena materiału wężownic przegrzewacza pary po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania 223
10.3. Ocena materiału komór przegrzewacza pary po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania 234
10.4. Ocena materiału rurociągów pary po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania 246
10.5. Ocena materiału wału turbiny parowej po długotrwałej eksploatacji 266
10.6. Ocena materiału korpusu turbiny parowej po długotrwałej eksploatacji 286
10.7. Ocena materiału walczaka po długotrwałej eksploatacji 327

11. ROLA BADAŃ W ROZWIĄZYWANIU INŻYNIERSKICH PROBLEMÓW ZWIĄZANYCH Z OCENĄ STANU ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH KOTŁA 349

11.1. Badania materiałowe w identyfikacji przyczyn nadmiernej utraty trwałości eksploatacyjnej elementów części ciśnieniowej kotłów 349

11.2. Skutki nadmiernego wytężenia elementu konstrukcyjnego.... 350

11.3. Wpływ niezgodności temperatury obliczeniowej i rzeczywistej przyczyną utraty trwałości eksploatacyjnej 361

11.4. Cechy geometryczne wyrobu hutniczego przyczyną obniżonej trwałości eksploatacyjnej 366

11.5. Uszkodzenia mechaniczne przyczyną utraty trwałości eksploatacyjnej 371

11.6. Wpływ sumowania się skutków procesów niszczenia na utratę trwałości eksploatacyjnej 374

12. WPŁYW NIESTABILNYCH WARUNKÓW EKSPLOATACJI BLOKÓW ENERGETYCZNYCH NA SKRACANIE ICH TRWAŁOŚCI UŻYTKOWEJ 378

12.1. Wpływ zmienionych warunków pracy na rzeczywistą trwałość eksploatacyjną materiału elementów pracujących w warunkach pełzania 378

12.2. Ocena przydatności do eksploatacji w układzie regulacyjnym materiału podstawowego i złączy spawanych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania na przykładach..... 384

12.3. Wpływ temperaturowych warunków pracy na rzeczywistą trwałość eksploatacyjną materiału elementów pracujących w warunkach pełzania 400

13. PODSUMOWANIE 410

Literatura..... 417

Streszczenie 445

Abstract 448

PRZEDMOWA

Diagnostyka techniczna części ciśnieniowej bloków energetycznych jest niezbędna w ocenie stanu i stopnia wyczerpania oraz wyznaczaniu rzeczywistej trwałości eksploatacyjnej i czasu dalszej bezpiecznej pracy. Ma to szczególne znaczenie, gdy oczekuje się eksploatacji bloków energetycznych po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy.

Początki profesjonalnej diagnostyki technicznej tych urządzeń to lata siedemdziesiąte dwudziestego wieku kiedy pierwsze bloki energetyczne przekroczyły obliczeniowy czas pracy. To wtedy w ówczesnym Południowym Okręgu Energetycznym mgr inż. Jerzy Dobosiewicz stworzył pierwszą komórkę diagnostyczną. Należy uznać, że był on pionierem i prekursorem tej działalności w Polsce. Wówczas rozpoczęła się również współpraca tej komórki diagnostycznej z zespołem pracowników naukowych Instytutu Metalurgii Żelaza zajmujących się materiałami dla energetyki kierowanym przez dr. inż. Piotra Milińskiego z udziałem Autora. Również od tego czasu datuje się współpraca IMŻ w obszarze materiałów dla energetyki z Politechniką Śląską, a personalnie z prof. dr. hab. inż. Adolfem Maciejnym i prof. dr. hab. inż. Adamem Hernasem. Ścisła współpraca w obszarze materiałów dla energetyki z Profesorem Adamem Hernasem trwa do dzisiaj.

Pierwsze kompleksowe nieniszczące i niszczące badania diagnostyczne części ciśnieniowej kotłów energetycznych w IMŻ zostały wykonane przez Autora wspólnie ze współpracownikami w drugiej połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Również w tym czasie na potrzeby ówczesnej Raciborskiej Fabryki Kotłów „Rafako" zostały zdefiniowane podstawowe pojęcia z diagnostyki materiałowej urządzeń ciśnieniowych, takie jak: trwałość, trwałość resztkowa, resztkowa trwałość rozporządzalna, stopień wyczerpania, degradacja struktury itd. w pracach zrealizowanych przez Autora wspólnie z dr. inż. Piotrem Milińskim i prof. dr. hab. inż. Leszkiem Dobrzańskim. Od lat osiemdziesiątych dwudziestego wieku prace badawcze z obszaru diagnostyki ciśnieniowych urządzeń energetycznych, szczególnie w obszarze diagnostyki materiałowej, były realizowane w ówczesnym Zakładzie Materiałoznawstwa kierowanym przez prof. dr. Tadeusza Bołda.

Wieloletnie konsekwentne zajmowanie się diagnostyką ciśnieniowych urządzeń energetycznych zaowocowało stworzeniem komplementarnego systemu diagnostyki, szczególnie materiałowej, stworzeniem i weryfikacją przemysłową wielu opracowanych w IMŻ metod badawczych, które od lat z powodzeniem stosowane są w praktyce przemysłowej.

Wykonywanie przez wiele lat, w funkcjonującym również obecnie, Zakładzie Badań Materiałów dla Energetyki IMŻ szeregu wyprzedzających prac badawczych z tego obszaru, badawczych projektów w zakresie badań stosowanych, jak również prac wykonywanych bezpośrednio dla przemysłu z udziałem pracowników naukowych młodszego pokolenia, pozwoliło na wychowanie

pracowników tego Zakładu o potwierdzonych wysokich kwalifikacjach i kompetencjach: dr. hab. inż. Adama Zielińskiego, prof. IMŻ, obecnego Dyrektora Instytutu, dr inż. Hanny Purzyńskiej i dr inż. Marii Dziuby-Kałuży.

Na uwagę zasługuje również wieloletnia współpraca pracowników naukowych Instytutu Metalurgii Żelaza i Politechniki Śląskiej z Urzędem Dozoru Technicznego. Dzięki tej współpracy, zaangażowaniu kierownictwa oraz działań inspektorów dozoru technicznego nadzorujących pracę ciśnieniowych urządzeń energetycznych udało się stworzyć i zrealizować szereg rozwiązań z obszaru diagnostyki urządzań ciśnieniowych pracujących w podwyższonej temperaturze oraz zastosować je w praktyce przemysłowej. Ukoronowaniem tej współpracy były wydane przez UDT „Wytyczne Urzędu Dozoru Technicznego nr 1/2015. Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania" stworzone w ścisłej współpracy z Instytutu.

1. WPROWADZENIE

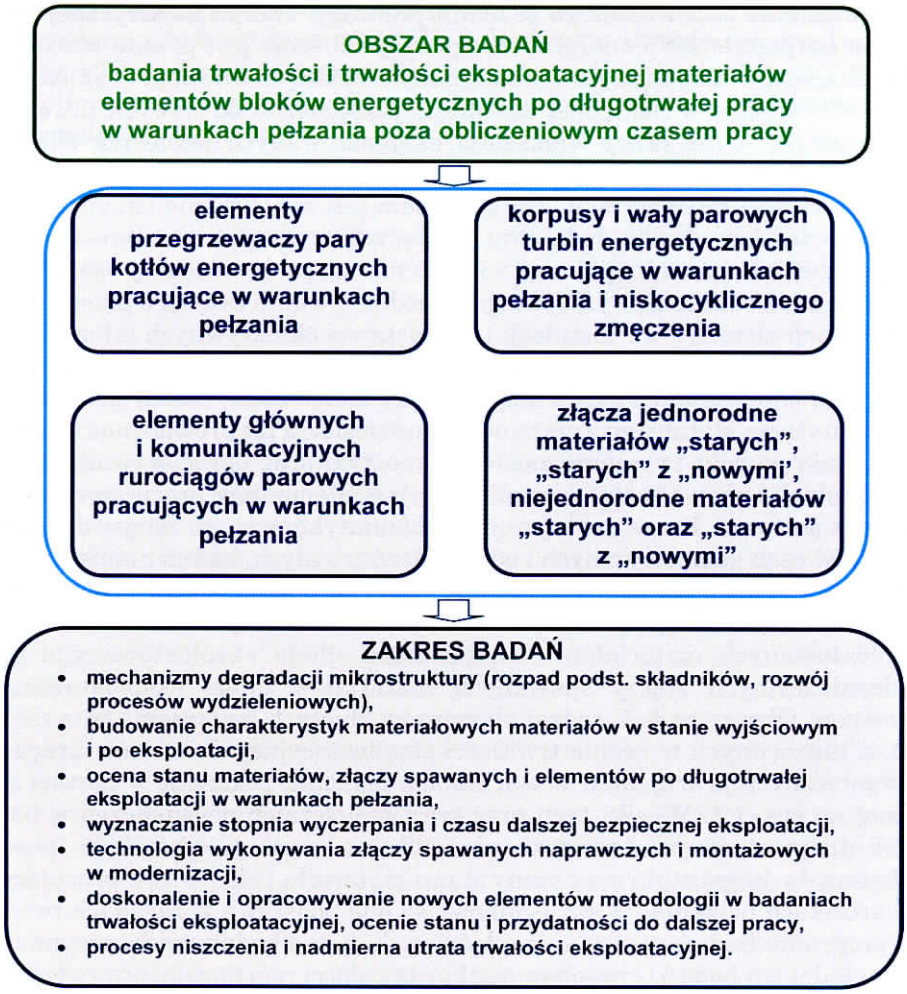
Problematyka oceny trwałości długo eksploatowanych elementów ciśnieniowych bloków energetycznych i wydłużania czasu bezpiecznej ich eksploatacji ma niezwykle istotne znaczenie dla funkcjonowania gospodarki kraju. Większość bloków energetycznych pracujących w Polsce przekroczyła obliczeniowy czas pracy. Dotyczy to szczególnie bloków energetycznych: ok. 20 bloków o mocy 120 MW, 52 o mocy 200 MW, 16 o mocy 360 MW i 2 o mocy 500 MW, czyli łącznie ok. 90 jednostek stanowiących ponad 75% krajowej mocy.

Zapewnienie odpowiedniego poziomu produkcji energii elektrycznej i tym samym bezpieczeństwa energetycznego kraju obecnie jest przede wszystkim uwarunkowane bezpiecznym i niezawodnym funkcjonowaniem eksploatowanych jednostek, a w następnej kolejności jest zależne od nowych inwestycji w energetyce. Czas pracy większości eksploatowanych jednostek znacznie przekroczył obliczeniowy, często ponad dwukrotnie. Jednostki te są poddawane procesowi modernizacji, którego celem jest zwiększenie ich sprawności i efektywności przy uwzględnieniu rosnących wymagań w zakresie ochrony środowiska naturalnego oraz wydłużenie czasu bezpiecznej eksploatacji znacznie poza obliczeniowy. Wymaga to podejmowania decyzji o przedłużeniu eksploatacji elementów i instalacji na podstawie obiektywnych informacji na temat stanu materiału i elementu. Podejście takie uwarunkowane jest zastosowaniem odpowiednich zasad diagnostyki i metod oceny stanu elementów.

W Instytucie Metalurgii Żelaza od kilkudziesięciu lat prowadzone są prace, które mają na celu tworzenie zasad diagnostyki oraz opracowywanie metod i metodologii oceny trwałości eksploatacyjnej elementów pracujących w warunkach pełzania. Prace te obejmują problematykę: wyboru miejsc do badań, pomiarów cech geometrycznych i odkształceń trwałych, badań nieniszczących i niszczących oraz sposobu i kryteriów oceny, a także dotyczą problematyki trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych oraz złączy naprawczych długo eksploatowanych materiałów z materiałami długo eksploatowanymi oraz modernizacyjnych złączy spawanych materiałów długo eksploatowanych z nowymi. Obszar badań, rodzaj elementów objętych badaniami oraz zakres badań niezbędnych w ocenie trwałości eksploatacyjnej elementów urządzeń energetycznych pracujących w warunkach pełzania pokazano w postaci graficznej na rys. 1.1. Wyniki tych prac oraz wieloletnich doświadczeń w badaniach diagnostycznych Instytutu pozwoliły na usystematyzowanie sposobu podejścia do diagnostyki oraz oceny stanu materiału i elementów pracujących w warunkach pełzania. W szczególności są one podstawą w zasadach tworzenia programu badań, stosowania właściwych metod badawczych, przyjmowanej metodologii badań i sposobów analizy trwałości resztkowej, prowadzonych przez użytkowników bloków energetycznych i diagnostów. Efekty tych prac to również zwiększanie obiektywizmu wyników badań diagnostycznych i ich interpretacji zapewniających poprawność w podejmowaniu decyzji w ocenie

trwałości eksploatacyjnej i przydatności elementów części ciśnieniowej kotła, głównych rurociągów parowych i elementów turbin do przedłużonej bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji [1–14].

Wyniki tych prac oraz wieloletnich doświadczeń obejmujących elementy ciśnieniowe kotła i głównych rurociągów parowych stały się istotnym wkładem IMŻ [15, 16] w opracowanie wytycznych Urzędu Dozoru Technicznego „Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania"[17].



Rys. 1.1. Obszar badań, rodzaj elementów objętych badaniami oraz zakres badań niezbędnych w ocenie trwałości i trwałości eksploatacyjnej elementów urządzeń energetycznych pracujących w warunkach pełzania

Długotrwała eksploatacja elementów pracujących w warunkach pełzania nie jest prowadzona w sposób ciągły. Odstawianie kotła wynika z braku zapotrzebowania na energię elektryczną, konieczności przeprowadzania planowanych remontów, czy też z powodów występujących awarii. Kolejne uruchomienie kotła powoduje pojawienie się w materiale ponownie pierwszego okresu pełzania. Okres ten charakteryzuje się znacznym przyrostem trwałego odkształcenia w krótkim czasie.

Obecnie od pracujących bloków energetycznych jak i nowych, wprowadzanych oraz planowanych do wprowadzenia do eksploatacji w najbliższym czasie, wymaga się zdolności do pracy w układzie regulacyjnym. Praca w takim układzie wiąże się z dodatkową znaczną liczbą odstawień i uruchomień w krótkim czasie oraz pracą w stanach nieustalonych o różnym poziomie obciążeń cieplno-mechanicznych. Z jednej strony zwiększa to dynamikę niekorzystnych zmian w mikrostrukturze osłabiając dodatkowo zdolność materiału do przenoszenia rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych, a z drugiej skutkuje nałożeniem się na procesy niszczenia, wynikające z występującego pełzania, procesów niszczenia związanych z występowaniem zmęczenia cieplno-mechanicznego.

Praca w układzie regulacyjnym będzie skutkować niekorzystnymi dodatkowymi zmianami w materiale elementów ciśnieniowych i to zarówno pracujących w warunkach pełzania, jak i pracujących poniżej temperatury granicznej [18–20].

Decydujący wpływ na obniżanie się i utratę zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń, głównie wynikających z temperatury i ciśnienia (naprężenia), gdy temperatura eksploatacji jest wyższa od granicznej ($T_e > T_g$), ma pełzanie powodujące trwałe zmiany w strukturze materiału skutkujące obniżaniem się właściwości użytkowych do wartości poniżej minimalnych wymaganych.

Proces pełzania jest jednak przyspieszany poprzez uruchamianie i odstawianie, powodujące każdorazowo występowanie pierwszego okresu pełzania, skutkując znacznym przyrostem trwałego odkształcenia w krótkim czasie oraz poprzez wystąpienie zmęczenia cieplno-mechanicznego (głównie wynikającego z nadmiernego gradientu temperatury), którego wpływ jest istotny przy zastosowaniu skróconego czasu, głównie uruchomień [21].

13. PODSUMOWANIE

W polskiej energetyce zawodowej pomimo eksploatowanych od niedawna i uruchamianych siedmiu wysokosprawnych bloków na parametry nadkrytyczne podstawowymi jednostkami wytwórczymi energii elektrycznej są bloki energetyczne o mocy 200 i 360 MW, których rzeczywisty czas eksploatacji przekroczył znacznie czas obliczeniowy (100 tys. godz.), obecnie nawet trzykrotnie. Stanowią one ponad 70% mocy wytwórczych w Polsce i zapewniają wymagane bezpieczeństwo energetyczne kraju. Zrodziło to konieczność stworzenia rozbudowanej diagnostyki technicznej części ciśnieniowej bloków energetycznych, której wyniki i ich analiza umożliwiałyby wiarygodną ocenę techniczną i prognozę dalszej bezpiecznej pracy. Przedłużanie czasu eksploatacji „starych" bloków ma zatem ogromne znaczenie dla krajowej gospodarki i bezpieczeństwa energetycznego.

Jednym z najistotniejszych elementów tej diagnostyki jest diagnostyka materiałowa tworzona i rozbudowywana przez kolejne lata eksploatacji, gromadzone doświadczenia i wyniki badań prowadzonych konsekwentnie przez wiele lat.

Podstawą podejmowania decyzji o czasie przedłużonej eksploatacji powinna być obiektywna ocena stanu rzeczywistego materiału i elementu. Na obiektywizm tej oceny, a także na właściwą inżynierię utrzymania urządzeń energetycznych w kontekście ich trwałości i bezpiecznej eksploatacji ma wpływ szereg czynników, które opisano w kolejnych rozdziałach pracy.

Uzyskane wyniki i doświadczenia z ponad 40-letniej pracy zawodowej w dziedzinie materiałów dla energetyki można usystematyzować w następujące grupy zagadnień, w których znajdują się konkretne przykłady rozwiązań problemów inżynierskich.

1. Po czasie eksploatacji przekraczającym obliczeniowy konieczna jest indywidualna ocena każdego obiektu. Nie ma dwóch identycznych obiektów, są tylko obiekty podobne. O stanie każdego z nich decyduje szereg elementów, a do najważniejszych spośród nich należy zaliczyć: stan wyjściowy zastosowanych materiałów, rzeczywiste wymiary geometryczne, wykonawstwo elementów i ich montaż, rzeczywiste parametry pracy, historię eksploatacji, dokonywane naprawy, ich rodzaj i zakres.
2. Ocenę stanu instalacji (elementu) po przekroczeniu jej obliczeniowego czasu eksploatacji dokonuje się na podstawie uzyskanych wyników badań i pomiarów tej instalacji. Szczególnie dotyczy to oceny stopnia wyczerpania eksploatowanych materiałów. Tylko tak oceniony rzeczywisty stan materiału/elementu i instalacji, w odniesieniu do zdefiniowanych parametrów temperaturowo-naprężeniowych dalszej pracy, pozwala prognozować resztkową trwałość rozporządzalną i wyznaczyć czas dalszej bezpiecznej eksplo-

atacji do następnego przeglądu oraz maksymalny czas do przeprowadzenia kolejnych badań diagnostycznych.

Uwagi metodyczne do uwzględniania przed przystąpieniem do badań diagnostycznych

3. Program badań, jego zakres, rodzaj metod badawczych, wyznaczenie miejsc do badań, muszą być każdorazowo dobierane w zależności od rzeczywistego czasu eksploatacji, rodzaju instalacji i jej elementów krytycznych oraz charakteru dotychczasowej pracy. Zwykle do oceny stosuje się zespół metod. Ogólne zasady ustalania programu badań i jego zakresu są ustalone w postaci wytycznych i są odniesione do czasu eksploatacji w relacji do przyjętego obliczeniowego czasu ocenianej instalacji.

Na podstawie ponad 40-letnich badań materiałowych i doświadczeń diagnostycznych Autora prowadzonych w Instytucie Metalurgii Żelaza należy przyjąć następujące zasady dotyczące zakresu diagnostyki:

- jeżeli rzeczywisty czas eksploatacji t_e jest mniejszy od 150.000 godzin ($t_e < 1{,}5t_o$) to wystarczające jest przeprowadzenie nieniszczących badań materiałowych oraz NDT i pomiarów dla oszacowania stopnia wyczerpania i czasu dalszej eksploatacji do następnych badań diagnostycznych,
- jeżeli rzeczywisty czas eksploatacji t_e jest równy lub większy od 150.000 godzin ($t_e \geq 1{,}5t_o$) to niezbędne jest przeprowadzenie badań NDT i pomiarów oraz nieniszczących i niszczących badań materiałowych dla wyznaczenia trwałości resztkowej, resztkowej trwałości rozporządzalnej i stopnia wyczerpania oraz czasu dalszej eksploatacji do następnych badań diagnostycznych.

W przypadku decyzji o zamiarze dopuszczenia instalacji do pracy poza obliczeniowy czas eksploatacji 100.000 godzin pierwsze kompleksowe diagnostyczne badania materiałowe jako obligatoryjne należy przeprowadzić przed osiągnięciem obliczeniowego czasu eksploatacji (t_e = ok. 95.000÷100.000 godzin). Informacja ta będzie szczególnie przydatna w odniesieniu do obiektów uruchomionych w ostatnich latach.

Gdy obliczeniowy czas eksploatacji wynosi 200.000 godzin i jest decyzja o zamiarze dopuszczenia instalacji do pracy poza obliczeniowy czas pracy wówczas w przypadku:

- gdy rzeczywisty czas eksploatacji t_e wynosi ok. 190.000 godzin (t_e = 190.000 godz.) to należy przeprowadzić pierwsze kompleksowe badania NDT i pomiary oraz nieniszczące badania materiałowe dla oszacowania stopnia wyczerpania i czasu dalszej eksploatacji do następnych badań diagnostycznych,
- gdy rzeczywisty czas eksploatacji t_e jest powyżej 210.000 godzin (t_e > 210.000 godz.) to niezbędne jest przeprowadzenie badań NDT i pomiarów oraz nieniszczących i niszczących badań materiałowych dla wyznaczenia trwałości resztkowej, resztkowej rozporządzalnej i stopnia

wyczerpania oraz czasu dalszej eksploatacji do następnych badań diagnostycznych.

Ocena stanu struktury i stopnia wyczerpania materiału

4. Metodologia oceny stanu badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania oparta jest na ocenie zmian w strukturze jej procesów składowych:
   a) dla stali o osnowie ferrytycznej obejmujących stale niskostopowe i wysokochromowe:
      - zmian w podstawowych składnikach fazowych tzn. odpowiednio w: perlicie, bainicie lub martenzycie,
      - zmian wynikających z rozwoju procesów wydzieleniowych,
      - zmian wynikających z rozwoju uszkodzeń wewnętrznych, odniesionych do stopnia wyczerpania,

   b) dla stali austenitycznych:
      - zmian wynikających z rozwoju procesów wydzieleniowych,
      - zmian w strukturze dyslokacyjnej (uwzględnianych głównie w analizach teoretycznych),
      - zmian wynikających z rozwoju uszkodzeń wewnętrznych, odniesionych do stopnia wyczerpania.
5. Dokonując oceny podanych elementów składowych struktury, przypisując odpowiadające im klasy składowe wyznaczone na podstawie badań strukturalnych, wyznacza się główną klasę struktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania. Znając stopień wyczerpania materiału i dotychczasowy czas eksploatacji, na podstawie wyników badań nieniszczących można oszacować, a na podstawie wyników badań niszczących wyznaczyć trwałość resztkową, czyli czas pozostający do zniszczenia materiału, którego częścią jest rozporządzalna trwałość resztkowa, będąca bezpiecznym czasem dalszej eksploatacji dla przyjętych temperaturowo-naprężeniowych parametrów dalszej pracy.

Wykorzystywanie prób pełzania do wyznaczania trwałości resztkowej i bezpiecznego czasu eksploatacji

6. W ocenie trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzalnej głównym źródłem informacji są próby pełzania pomimo, że ich wadą jest długi czas oczekiwania na wyniki badań. W praktyce inżynierskiej dla wyznaczenia trwałości resztkowej materiałów elementów pracujących w warunkach pełzania są stosowane wyłącznie skrócone próby pełzania przy stałym naprężeniu i różnych poziomach temperatury badania znacznie wyższej od temperatury eksploatacyjnej. Badania takie są przeprowadzane po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy, najczęściej wynoszącego 100.000 godzin. W przypadku przekroczenia czasu obliczeniowego o 50% ($1{,}5t_o$) badania takie są obligatoryjne. Ich wiarygodność jest zachowana, gdy stałość poziomu zadanej temperatury badania T_b w całym czasie trwania próby

jest równa lub mniejsza od ±0,5°C na długości pomiarowej próbki, niezależnie od poziomu temperatury badania.

7. Najważniejszym parametrem wpływającym na poziom odporności na pełzanie jest temperatura. W praktyce przyjmuje się, że wzrost temperatury pracy o 10°C powoduje skrócenie czasu eksploatacji elementów pracujących w warunkach pełzania o połowę.

   O trwałości eksploatacyjnej w głównej mierze decyduje relacja pomiędzy rzeczywistą temperaturą eksploatacji T_e a przyjętą do obliczeń temperaturą tzw. obliczeniową T_o. Gdy rzeczywista temperatura eksploatacji jest równa lub niższa od obliczeniowej ($T_e \leq T_o$), można oczekiwać bezawaryjnej pracy co najmniej do osiągnięcia obliczeniowego czasu pracy. Natomiast gdy rzeczywista temperatura pracy T_e jest wyższa od obliczeniowej T_o ($T_e > T_o$), należy liczyć się z rzeczywistą trwałością eksploatacyjną znacznie niższą od założonej obliczeniowej (100 lub 200 tys. godzin dla elementów pracujących w warunkach pełzania).

8. Elementem kryterialnym decydującym o przydatności do dalszej eksploatacji doczołowych złączy spawanych elementów pracujących w warunkach pełzania jest stopień wyczerpania materiałów podstawowych wyznaczony w oparciu o ujawniony stan mikrostruktury i wyznaczoną jej klasę oraz stopień wewnętrznych uszkodzeń i klasę uszkodzenia materiału strefy wpływu ciepła (SWC) i spoiny.

   Wykonując badania mikrostruktury materiału elementów składowych złączy spawanych tzn.: materiału rodzimego po obu stronach spoiny, materiału stref wpływu ciepła po obu stronach spoiny oraz materiału spoiny, należy dokonać:
   - oceny stanu materiału rodzimego wyznaczając jego klasę mikrostruktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania,
   - oceny stopnia uszkodzenia materiału stref wpływu ciepła i spoiny.

   Na tej podstawie możne przeprowadzić ocenę przydatności badanych złączy do dalszej eksploatacji, do naprawy lub przydatności do wykonania nowych złączy spawanych materiałów po długotrwałej eksploatacji lub materiałów po eksploatacji z materiałami nowymi.

Wyniki badań złączy spawanych po długotrwałej eksploatacji ważne dla praktyki inżynierskiej

9. W postępowaniu dotyczącym wykonywania złączy spawanych z udziałem materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania warunkiem koniecznym jest ocena ich stanu i przydatności do wykonania takiego złącza. Niezależnie od rodzaju wymaganego i planowanego do wykonania złącza (naprawcze, modernizacyjne), o przydatności do przeprowadzenia takiego procesu technologicznego decyduje stan struktury materiału po długotrwałej eksploatacji i jego stopień wyczerpania. Pierwszym kry-

terium jest stan struktury materiału po eksploatacji i odpowiadający jej oszacowany stopień wyczerpania. Według dotychczasowych doświadczeń i wyników badań można przyjąć, że dla materiałów o klasie struktury wyższej niż 3, stopniu wyczerpania 0,6 i powyżej oraz klasie uszkodzenia większej niż 0/A, zabieg spawania z udziałem takiego materiału nie powinien być wykonywany. Jeżeli wystąpi niezbędna konieczność wykonania takiego zabiegu z udziałem materiału o klasie struktury wyższej od 3 i stopniu wyczerpania wyższym niż 0,6, wówczas powinien być on wykonany z zastosowaniem szczególnych jednorazowych zasad i wymagań. Jednak zabiegi te, wg dotychczasowych doświadczeń nie są możliwe, gdy klasa uszkodzeń odpowiada klasie B. W większości przypadków należy wykonać złącze próbne, a zastosowana technologia spawania wymaga akceptacji UDT. Ponadto dowiedziono, że spawane złącza naprawcze z udziałem rur „nowych" w stanie dostawy wykonywane na obiekcie po eksploatacji wykazują mniejszą, w porównaniu do złączy rodzimych po długotrwałej eksploatacji, trwałość eksploatacyjną.

10. W praktyce diagnostycznej metody obliczeniowe można i należy stosować w prognozowaniu czasu dalszej eksploatacji ale jako element analizy ekonomicznej w podejmowaniu decyzji o przystąpieniu do badań diagnostycznych i pomiarów instalacji oraz jej elementów pracujących znacznie poza czasem obliczeniowym. Zasadne jest również tworzenie rozwiązań informatycznych i kontrolno-pomiarowych umożliwiających ocenę stanu iprognozowanie czasu dalszej eksploatacji na podstawie zarejestrowanych on-line parametrów rzeczywistych eksploatacji i charakterystyk materiałowych, które jednak mają ograniczone zastosowanie. Nie mogą być stosowane w podejmowaniu decyzji w zakresie bezpieczeństwa pracy urządzeń, szczególnie eksploatowanych po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy, a jedynie w zakresie optymalizacji ekonomicznej w podejmowaniu decyzji o rodzaju i zakresie diagnostyki.

Algorytmy oceny stanu elementów krytycznych bloku energetycznego

11. Do elementów, które determinują przydatność bloku energetycznego do dalszej pracy, należy zaliczyć wszystkie elementy pracujące w warunkach pełzania, liczone na określony wymagany obliczeniowy czas pracy, a wśród nich: komory wlotowe i wylotowe, regulatory temperatury oraz wężownice wyższych stopni przegrzewu, główne i komunikacyjne rurociągi pary, części WP i SP wirnika oraz korpusy WP i SP turbiny, definiowane jako elementy krytyczne. Również walczak, pomimo że jest elementem pracującym poniżej tzw. temperatury granicznej, jest elementem krytycznym.

Rodzaj wymaganych badań diagnostycznych jest uzależniony od typu elementu krytycznego, charakteru jego pracy oraz dotychczasowego czasu

eksploatacji odniesionego do przyjętego czasu obliczeniowego i jest każdorazowo dobierany.

W pracy zaproponowano wielokrotnie zweryfikowany w praktyce inżynierskiej sposób postępowania w ocenie stanu i wyznaczaniu czasu bezpiecznej eksploatacji najważniejszych grup elementów krytycznych po długotrwałej pracy powyżej czasu obliczeniowego bloku energetycznego.

Opracowane algorytmy w szczególności dotyczą:

- wężownic przegrzewaczy pary pracujących w warunkach pełzania (pracujące powyżej temperatury granicznej),
- komór, kolektorów oraz schładzaczy pary pracujących w warunkach pełzania (pracujące powyżej temperatury granicznej),
- głównych i komunikacyjnych rurociągów pary pracujących w warunkach pełzania (pracujące powyżej temperatury granicznej),
- części średnioprężnej SP i wysokoprężnej WP wirników turbin parowych,
- korpusów części średnioprężnej SP i wysokoprężnej WP turbin parowych,
- walczaków i wodooddzielaczy (pracujące poniżej temperatury granicznej).

Na trwałość eksploatacyjną elementów krytycznych istotny wpływ, poza aspektami materiałowymi, mają warunki eksploatacji bloku energetycznego (sposób i liczba uruchomień i odstawień bloku, zmienna temperatura i szoki cieplne, praca w układzie regulacyjnym)

12. Dla definiowania związków przyczynowo-skutkowych wykorzystuje się odpowiednio dobierane diagnostyczne badania materiałowe umożliwiające identyfikację przyczyn nadmiernej lub całkowitej utraty trwałości eksploatacyjnej. Identyfikacja ta umożliwia sformułowanie propozycji zmian konstrukcyjnych, materiałowych i/lub sposobu eksploatacji. Ich zrealizowanie skutkuje doskonaleniem konstrukcji i sposobu eksploatacji wpływając w istotny sposób na wzrost rzeczywistej trwałości eksploatacyjnej.
13. Długotrwała eksploatacja elementów pracujących w warunkach pełzania nie jest prowadzona w sposób ciągły. Odstawianie bloku wynika: z braku zapotrzebowania na energię elektryczną, konieczności przeprowadzania planowanych remontów, czy też z powodów występujących awarii. Kolejne uruchomienia bloku energetycznego powodują każdorazowo pojawianie się w materiale elementów krytycznych pierwszego okresu pełzania. Całkowite trwałe odkształcenie jest sumą odkształceń wynikających z eksploatacji w warunkach pracy oraz wszystkich kolejnych uruchomień.
14. Obecnie od pracujących bloków energetycznych jak i nowych wprowadzanych oraz planowanych do wprowadzenia do eksploatacji w najbliższym czasie wymaga się zdolności do pracy w układzie regulacyjnym. Praca

w takim układzie skutkuje dodatkową znaczną liczbą odstawień i uruchomień w krótkim czasie oraz pracą w stanach nieustalonych o różnym poziomie obciążeń cieplno-mechanicznych. Powoduje to nałożenie się na procesy niszczenia wynikające z pełzania, procesów zmęczenia cieplno-mechanicznego.

Praca w układzie regulacyjnym będzie skutkować niekorzystnymi dodatkowymi zmianami w materiale elementów ciśnieniowych i to zarówno pracujących w warunkach pełzania jak i pracujących poniżej temperatury granicznej. Udział procesów niszczenia jest zróżnicowany i zależy od rodzaju i charakteru pracy elementu.

15. Konieczność pracy w narzuconym rygorze z dużą zmiennością obciążeń oraz liczbą odstawień i uruchomień rodzi dodatkowy problem, którym jest dokonywanie oceny przydatności do pracy w zmienionych warunkach eksploatacyjnych. Wymagania dotyczące częstego odstawiania i uruchamiania w skróconym czasie dochodzenia do parametrów pracy stawiają trudne do spełnienia warunki dla materiałów elementów eksploatowanych w czasie znacznie przekraczającym obliczeniowy o zdegradowanej mikrostrukturze i znaczącym stopniu wyczerpania. Dotyczy to w pierwszej kolejności elementów grubościennych, w których dla wymaganych warunków uruchamiania i odstawiania bloku, pojawi się gradient temperatury, skutkujący wysokim poziomem naprężeń, powodując pojawienie się zmęczenia cieplno-mechanicznego. Będzie ono dodatkowo dynamizować zachodzące w nich pełzanie, skracając rzeczywistą trwałość eksploatacyjną. Wymaga to zaproponowania odpowiedniego programu i zakresu badań.
16. Oczekuje się, że całkowity czas bezpiecznej eksploatacji pracujących bloków energetycznych, które znacznie przekroczyły czas obliczeniowy, przy dotychczasowych roboczych parametrach eksploatacji będzie wynosił co najmniej 350.000 godzin. Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że nie wszystkie spośród badanych materiałów po eksploatacji ten warunek są w stanie spełnić i dla części z nich czas dalszej eksploatacji jest znacznie krótszy od przyjętej wartości oczekiwanej. Czas ten w przypadku zmiany warunków eksploatacji na pracę w układzie regulacyjnym może dodatkowo ulec znaczącemu skróceniu i będzie skutkować znacznym zwiększeniem ryzyka wystąpienia awarii oraz pojawienia się nieciągłości materiału. Poziom ryzyka będzie wzrastał, a rzeczywisty czas do zniszczenia t_r będzie malał wraz z wydużaniem się czasu eksploatacji i zwiększaniem się odpowiadającego mu stopnia wyczerpania wynikającego ze stanu struktury po długotrwałej eksploatacji. Stopień wyczerpania jest wypadkową struktury stanu wyjściowego i historii eksploatacji. Poziom szacowanego czasu pozostałej bezpiecznej eksploatacji po przejściu na pracę w układzie regulacyjnym będzie w głównej mierze zależał od relacji czasu eksploatacji t_e do obliczeniowego czasu pracy t_o.

TRWAŁOŚĆ ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH BLOKÓW ENERGETYCZNYCH

STRESZCZENIE

Opracowanie przedstawia stworzoną i zgromadzoną przez autora wiedzę z zakresu problematyki trwałości eksploatacyjnej części ciśnieniowej bloków energetycznych, szczególnie dotyczącą elementów pracujących w warunkach pełzania po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy. Ideą autora było zaprezentowanie zastosowania wiedzy materiałoznawczej w praktyce inżynierskiej w odniesieniu do warunków przemysłowych bloków energetycznych. W ogólności praca odnosi się do problematyki przedłużania czasu eksploatacji elementów konstrukcyjnych, które przekroczyły obliczeniowy czas pracy 100 i 200 tys. godz. Ma to fundamentalne znaczenie dla gospodarki i bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Dla uporządkowania wiedzy przypomniano umowny podział elementów części ciśnieniowej kotła, rurociągów oraz turbin parowych Przedstawiono stosowany podział elementów części ciśnieniowej kotła i rurociągów ze względu na niezawodność i w zależności od temperatury pracy (rozdział 2). Omówiono również podstawowe pojęcia i definicje niezbędne dla zrozumienia przedstawionej problematyki i zachodzących w wyniku eksploatacji zmian w materiale (rozdział 3).

Dokonano krótkiego omówienia zachodzących w czasie eksploatacji procesów niszczenia i wyspecyfikowano procesy niszczenia najczęściej występujące w poszczególnych grupach elementów. Typowe procesy niszczenia scharakteryzowano na przykładach zaczerpniętych z praktyki przemysłowej (rozdział 4).

W kolejnym rozdziale zaprezentowano opracowaną i stosowaną w praktyce przemysłowej metodologię oceny stanu materiału oraz przydatności do dalszej eksploatacji elementów części ciśnieniowej bloków energetycznych pracujących w warunkach pełzania. Szczególną uwagę skupiono na analizie stanu degradacji struktury obserwowanej w badaniach replik wykonanych bezpośrednio na obiekcie. Omówiono sposób oceny stanu elementów pracujących w warunkach pełzania, a w szczególności: wyboru miejsc do badań, doboru metod badań w zależności od czasu eksploatacji, rodzaju i charakteru pracy elementu, oceny elementu na podstawie wyników badań nieniszczących, wyników badań niszczących z uwzględnieniem jako podstawy oceny stanu materiału podstawowego i złączy spawanych (rozdział 5).

Podstawą w wyznaczaniu czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji, a zarazem metodą najbardziej obiektywną są wyniki badań pełzania materiału po

długotrwałej eksploatacji. Omówiono rodzaj prób pełzania i ich przydatność w ocenie stanu, prognozie dalszej bezpiecznej pracy, oraz sposób ich wykorzystania dla celów inżynierskich. Zaprezentowano autorski sposób wyznaczania czasu bezpiecznej eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy na przykładzie z praktyki inżynierskiej, jak również sposób wyznaczania minimalnej grubości ścianki elementu niezbędnej do przenoszenia rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych (rozdział 6).

Omówiono rolę w diagnostyce obliczeniowych metod oceny stanu materiału elementów pracujących w warunkach pełzania dokonując analizy, której wyniki należy stosować wyłącznie we wstępnym prognozowaniu czasu dalszej eksploatacji. Jest to pomocne w analizie ekonomicznej umożliwiającej podejmowanie decyzji o przystąpieniu do badań diagnostycznych i pomiarów instalacji oraz jej elementów (rozdział 7).

Ponadto w pracy mocny akcent położono na zbudowanie obiektywnych zasad oceny elementów stanu materiału części ciśnieniowej kotła i rurociągów na podstawie wieloletnich obserwacji i badań zachodzących zmian w czasie eksploatacji skutkujących obniżaniem się właściwości użytkowych, których miarą jest stopień wyczerpania. Zdefiniowano sposób oceny stanu materiału i określenia bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji na podstawie nieniszczących badań materiałowych dla wybranych grup elementów (rozdział 8).

Ważnym zagadnieniem w ocenie trwałości eksploatacyjnej jest ocena stanu materiału złączy spawanych elementów pracujących w warunkach pełzania. Zaprezentowane wyniki badań dowodzą, że trwałość resztkowa tych złączy jest znacznie mniejsza niż materiału rodzimego. Problemem jest również przesunięcie w kierunku temperatury dodatniej temperatury przejścia w stan kruchy. Oddzielnym problemem jest trwałość resztkowa spawanych złączy modernizacyjnych i naprawczych, która jest zależna od stopnia wyeksploatowania materiału po długotrwałej pracy poddanego spawaniu i najczęściej jest niższa od wyznaczonej dla złącza spawanego po eksploatacji (rozdział 9).

Długoletnie doświadczenie autora w badaniach diagnostycznych umożliwiło opracowanie sposobu postępowania w diagnostyce materiałowej dla najważniejszych grup elementów pracujących w warunkach pełzania. Dla każdej z grup podano sposób postępowania w wyznaczaniu czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji, zweryfikowany wielokrotnie w praktyce przemysłowej i omówiony na przykładach. Szczegółowy przykład takiego postępowania przedstawiono również dla walczaków, które są jednak elementami kotła pracującymi poniżej temperatury granicznej. Są one zaliczane do elementów krytycznych to znaczy pracujących w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych, a ich wymiana technicznie jest prawie niemożliwa. Ich stan ma jednak istotny wpływ na przydatność kotła do przedłużonej eksploatacji (rozdział 10).

Oddzielnym zagadnieniem opisanym w pracy jest ocena roli badań materiałowych w identyfikacji przyczyn nadmiernej utraty trwałości eksplo-

atacyjnej elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych. Ich sposób wykorzystania w analizie przyczynowo-skutkowej pokazano na przykładach z praktyki przemysłowej. Dokonano oceny skutków nadmiernego wytężenia elementów konstrukcyjnych, wpływu niezgodności temperatury obliczeniowej i rzeczywistej oraz innych uwarunkowań eksploatacyjnych, a także sumowania się skutków procesów niszczenia na utratę trwałości eksploatacyjnej (rozdział 11).

Trwałość elementów konstrukcyjnych bloku energetycznego w dużym stopniu zależy również od stabilności warunków eksploatacji. Omówiono wpływ zmiennych warunków pracy na rzeczywistą trwałość eksploatacyjną, dokonano oceny przydatności materiału podstawowego i złączy spawanych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania do eksploatacji w układzie regulacyjnym, a także pokazano wpływ temperaturowych warunków pracy na rzeczywistą trwałość eksploatacyjną materiału na przykładach z praktyki inżynierskiej (rozdział 12).

W podsumowaniu wskazano na najistotniejsze czynniki mające decydujący wpływ na obiektywną ocenę stanu części ciśnieniowej bloków energetycznych i prognozę bezpiecznej eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy.

Praca kierowana jest do kadry inżynierskiej branży energetycznej, inspektorów Urzędu Dozoru Technicznego, firm diagnostycznych, a także studentów i doktorantów oraz pracowników badawczych zajmujących się problematyką materiałów dla energetyki.

Słowa kluczowe: pełzanie, długotrwała eksploatacja, elementy ciśnieniowe pracujące w warunkach pełzania, diagnostyka materiałowa, nieniszczące i niszczące badania materiałowe, degradacja struktury i właściwości, obliczeniowe metody oceny trwałości resztkowej

DURABILITY OF PRESSURE COMPONENTS OF POWER UNITS

ABSTRACT

The study presents expertise developed and acquired by the author concerning lifetime of the pressure part of power boilers, and in particular such concerning the components operating under creep conditions having exceeded their nominal lifetime. The author aimed at presentation of application of material sciences expertise in engineering practice referring to industrial conditions of power units. In general, the paper refers to the issues related to extension of the lifetime of structural components which have exceeded their nominal lifetime 100 and 200 thousand hours. This remains of fundamental meaning for the economy as well as national energy security.

To arrange the knowledge, the commonly used division of the components of the pressure part of boiler, pipelines and steam turbines was reminded. Division of the components of pressure part of boiler and pipelines, based on their reliability and depending on the temperature of operations is presented (Chapter 2). Additionally, basic concepts and definitions are described that are necessary to understand the discussed theme and changes in the material as occurring as a result of service (Chapter 3).

The study also covers brief description on destruction processes occurring during service as well as specification of the most frequent destruction processes in particular groups of component. Typical destruction processes were characterized with examples from industrial practice (Chapter 4).

The following chapter includes developed and applied in industrial practice methodology of assessment of the condition of material and suitability for further service of the components of pressure part of power units operating under creep conditions.

Particular focus was attached to analysis of the degree of structure wear observed in examinations of replicas constructed directly in the concerned facility.

The study encompasses discussion on the manner of assessment of the condition of components operating under creep conditions, and in particular: selection of locations for testing, selection of methods of testing depending on the time of service, type and nature of component service, assessment of the component based on the results of non-destructive tests, results of destructive tests with consideration of the condition of basic material and welded joints as foundation for assessment (Chapter 5).

Results of material creep following long term service constitute foundation in determination of the time of further safe operations, and simultaneously remain the most objective method. Additionally description is included of the type of creep tests and suitability thereof in assessment of the condition, forecast of further safe operations and the manner of use for engineering purposes. Original manner is presented of determining the time of safe operations beyond nominal lifetime based on the example from engineering practice as well as manner of determining the minimum thickness of the wall of component required to transfer actual service loads (Chapter 6).

The paper describes the role of computational methods of assessment of the condition of the material of components operating under creep condition in diagnostics, by execution of analysis, the results of which should be applied only in initial forecasting of the time of further operations. Result of these may be helpful in economic analysis facilitating decisions concerning launch of diagnostic tests and measurements on installation and its components (Chapter 7).

Additionally the study puts emphasis on development of objective principles of assessment of the condition of material of the components of pressure part of the boiler and pipelines based on long term (of many years) observations and examinations of changes occurring during service, resulting in deterioration of functional properties, the measure of which is the degree of wear. The manner of assessment of the condition of material and definition of the time of safe operations was defined based on non-destructive material tests for selected groups of components (Chapter 8).

An important issue in assessment of service life is assessment of the condition of the material of welded joints of components operating under creep conditions.

Presented results of tests prove that residua life of the joints is much lower than native material. Shift towards positive temperature of the temperature of transition into brittle state also constitutes a problem. A separate issue is residual life of welded modernization and repair joints which depends on the degree of wear of the material following long term service subject to welding, and in most cases it is shorter than the one determined for welded joints following service (Chapter 9).

Long term experience (of many years) of the author in diagnostic testing facilitated development of the manner of proceeding in material diagnostics for the major groups of components operating under creep conditions. For each of the groups, manner of proceeding is provided in determination of the time of further safe operations, verified multiple times in industrial practice, it is described with examples. Detailed example of such proceeding is also presented for steam drums, which constitute components of boiler operating below limit temperature. These are regarded as critical components, meaning operating in the most difficult conditions in terms of temperature and stress,

and replacement thereof is technically practically impossible. Their condition on the other hand impacts significantly the suitability of boiler for extended service (Chapter 10).

A separate issue discussed in the study is assessment of the role of material tests in identification of the reasons of extensive loss of service life of the components of pressure part of power boilers. Manner of use thereof in causal analysis was shown based on examples from industrial practice. Results of extensive stress strain state of structural components, impact of discrepancies between computational and actual temperature as well as other service conditions were assessed as well as adding up of the results of destruction processes on loss of service life (Chapter 11).

Durability of structural components of power unit mostly depends on stability of service conditions. The study contains description of the impact of variable conditions of service on effective service life as well as assessment of suitability of basic material and welded joints following long term service under creep conditions for service in control system and moreover impact of temperature conditions of service on effective service life of material based on examples from engineering practice (Chapter 12).

The summary indicates the most critical factors that impact the objective assessment of the condition of the pressure part of power units as well as forecast of safe operations beyond nominal time.

The study is addressed to the engineering staff of power industry, inspectors of Technical Supervision Office (*Urząd Dozoru Technicznego*), diagnostic companies as well as students, graduate students and researchers dealing with the themes concerning materials for power engineering.

Key words: creep, long term service, pressure components operating under creep conditions, material diagnostics, non-destructive and destructive material tests, degradation of the structure and properties, computational methods of assessment of the residual life

Janusz Dobrzański jest pracownikiem Instytutu Metalurgii Żelaza od 45 lat. Jest dr. hab. zatrudnionym na stanowisku profesora IMŻ i Kierownika Zakładu Badań Materiałów dla Energetyki. W ramach działalności naukowej zajmuje się tematyką materiałów do pracy w podwyższonej i wysokiej temperaturze, w tym szczególnie pracujących w energetyce, chemii i petrochemii. Kierunki jego zainteresowań naukowych obejmują m.in.: opracowywanie nowych gatunków stali eksploatowanych poniżej i powyżej temperatury granicznej (rury, odkuwki i blachy na elementy ciśnieniowe kotła) w podkrytycznych warunkach pracy, opracowywanie nowych gatunków stali eksploatowanych w nadkrytycznych warunkach pracy, dla nowej generacji kotłów energetycznych wysokiej sprawności, badanie struktury i własności opracowanych stali, opracowywanie charakterystyk wyrobów hutniczych i wytwarzanych z nich elementów, w tym giętych i spawanych, zmiany strukturalne, przemiany fazowe i procesy niszczenia stali długotrwale eksploatowanych poniżej i powyżej temperatury granicznej oraz w pod- i nadkrytycznych warunkach pracy, badania złącz spawanych eksploatowanych w warunkach pełzania oraz spawanych złączy naprawczych elementów uprzednio uszkodzonych w wyniku pełzania, metodykę badań pełzania stali, metodykę modelowania struktury i własności stali pracujących w warunkach pełzania oraz metodykę prognozowania czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji stali i wykonanych z nich elementów pracujących w warunkach pełzania.

Wśród jego osiągnięć naukowych przynoszących wymierne efekty dla gospodarki na szczególne wyróżnienie zasługują związane z tematyką trwałości eksploatacyjnej urządzeń wysokociśnieniowych pracujących w podwyższonej temperaturze. Jest autorem wielu metod badawczych i metodologii stosowanych w ocenie stanu i prognozie dalszej bezpiecznej pracy tych urządzeń oraz stworzonych niezbędnych baz materiałowych, głównie w oparciu o wieloletnie wyniki badań własnych. Opracowane metodyki diagnozowania uszkodzeń krytycznych elementów instalacji ciśnieniowych kotłów energetycznych, z wykorzystaniem badań materiałoznawczych, są praktycznie wykorzystywane w przemyśle również w ocenie przyczyn ich awarii.

W zakresie jego zainteresowań dotyczących trwałości elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych jest ponadto trwałość eksploatacyjna złączy spawanych, jak i wykonywanie naprawczych złączy spawanych materiałów po eksploatacji z materiałami w stanie wyjściowym lub z materiałami po eksploatacji, elementów wymagających naprawy lub dokonania zmian konstrukcyjnych w modernizacji instalacji po długotrwałej pracy, zarówno w zakresie zachowania się materiałów badanych złączy w warunkach odpowiadających warunkom eksploatacji oraz w zakresie technologii wykonywania naprawczych złączy spawanych.

Janusz Dobrzański w swoim dorobku naukowym posiada ponad 600 prac badawczych w tym ponad 500 (ponad 150 w ostatnich 10 latach) zrealizowanych bezpośrednio dla przemysłu i wykorzystanych w praktyce. Jest autorem lub współautorem 9 monografii (6 w ostatnich 10 latach), ponad 200 publikacji, w większości w renomowanych czasopismach o zasięgu co najmniej krajowym (ponad 100 w ostatnich 10 latach) oraz referatów zamawianych wygłaszanych dla kadry technicznej przemysłu. W okresie ostatnich dziesięciu lat kierował trzema projektami badawczymi oraz był głównym wykonawcą kolejnych czterech dużych projektów, w tym dwóch zrealizowanych w ramach współpracy międzynarodowej w ramach akcji COST.

www.imz.pl

ISSN 0137-9941
ISBN 978-83-938130-3-2