URZĄD DOZORU TECHNICZNEGO

WYTYCZNE URZĘDU DOZORU TECHNICZNEGO NR 1/2015

ZASADY DIAGNOSTYKI I OCENY TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ ELEMENTÓW KOTŁOW I RUROCIĄGÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA

WYDANIE PIERWSZE

WYTYCZNE URZĘDU DOZORU TECHNICZNEGO NR 1/2015

ZASADY DIAGNOSTYKI I OCENY TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ ELEMENTÓW KOTŁÓW I RUROCIĄGÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA

.		
Data:	**Rew.:**	**Zmiany:**

Zatwierdzone: Adam Ogrodnik, 27.10.2015r.

Dyrektor Departamentu Koordynacji Inspekcji Podpis, dnia

Spis treści:

1. Wprowadzenie 4
   1.1. Przedmiot opracowania 4
   1.2. Cel i przeznaczenie opracowania 5
   1.3. Zakres stosowania opracowania 6
2. Pojęcia i definicje 6
3. Elementy kotłów i rurociągów pracujące w warunkach pełzania 11
   3.1. Podział elementów i kotłów pracujących w warunkach pełzania 11
   3.1.1. Podział elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów ze względu na niezawodność pracy 12
   3.1.2. Podział elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów w zależności od temperatury pracy 14
   3.2 Stale i staliwa stosowane na elementy ciśnieniowe kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania 15
   3.3. Procesy niszczenia zachodzące w elementach kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania 18
4. Ocena stanu elementów pracujących w warunkach pełzania 24
   4.1. Podstawowe etapy oceny 24
   4.2. Wybór miejsc do badań 27
   4.3. Badania nieniszczące defektoskopowe 30
      4.3.1. Wybór metody badań 30
      4.3.2. Charakterystyka metod badań 31
      4.3.3. Zakres badań 36
   4.4. Pomiary cech geometrycznych i wielkości odkształceń trwałych 38
   4.5. Obliczeniowa ocena stanu elementu 49
      4.5.1. Podstawowe oznaczenia 49
      4.5.2. Ocena stanu elementu ciśnieniowego w oparciu o dane dokumentacji projektowej 50
      4.5.3. Ocena stanu elementu ciśnieniowego w oparciu o parametry rzeczywiste 52
      4.5.4. Ocena stanu elementu ciśnieniowego w oparciu o obliczeniowe dane projektowe zawarte w dokumentacji i rzeczywiste parametry eksploatacji 53

4.6. Badania nieniszczące i niszczące w celu określenia stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej 58
4.6.1. Uwagi ogólne dotyczące wyboru rodzaju badań 58
4.6.2. Badania nieniszczące 60
4.6.2.1 Badania metalograficzne metodą replik 60
4.6.2.1.1 Wybór techniki badań 60
4.6.2.1.2 Charakterystyka technik badania 60
4.6.2.2. Badania twardości 64
4.6.3. Badania niszczące 65
4.6.3.1. Uwagi ogólne 65
4.6.3.2. Badania własności mechanicznych 66
4.6.3.3. Badania metalograficzne 71
4.6.3.4. Analiza jakościowa i ilościowa procesów korozyjnych 72
4.6.4. Uwagi dotyczące zakresu i sposobu realizacji badań 80
4.7. Metalograficzna interpretacja stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej 86
4.8. Przykłady oceny stanu elementów 93
5. Przykłady sposobu postępowania podczas diagnostyki technicznej wybranych rodzajów elementów pracujących w warunkach pełzania 96
6. Wytyczne dla próby ciśnieniowej urządzenia z materiałem wykazującym obecność obszarów dekohezyjnych 100
Literatura 102

Załącznik A:

Propozycje doboru metod badawczych i częstotliwości badań w trybie nadzoru standardowego dla wybranych elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

Załącznik B:

- Rysunki opisujące modele degradacji oraz klasę mikrostruktury
- Tablice umożliwiające wyznaczenie okresu dopuszczenia do dalszej eksploatacji w zależności od klasy struktury,
- Tablice zawierające przykłady oceny stanu struktur
- Tablica opisująca trafność oceny oraz prognozę dalszej bezpiecznej eksploatacji materiału elementu w zależności od klasy struktury, klasy wewnętrznych uszkodzeń oraz zastosowanych metod badawczych
- Rysunki opisujące przykład oceny stanu materiału głównego rurociągu parowego

1. Wprowadzenie

1.1. Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania są zasady diagnostyki oraz sposób dokonywania oceny stanu elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania, w celu oszacowania lub wyznaczenia ich trwałości eksploatacyjnej.

W procesie oceny stanu i prognozowania bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania stosowane są metody, które można przyporządkować do dwóch następujących grup:

a) związane z wykonywaniem obliczeń głównie na podstawie dostępnych zapisów temperatury i ciśnienia roboczego przy wykorzystaniu charakterystyki wytrzymałości na pełzanie materiałów w stanie wyjściowym, zawartych w normach dla wyrobów hutniczych (np. metoda ułamków trwałości Robinsona),

b) obejmujące pomiary cech geometrycznych i odkształceń trwałych oraz badania nieniszczące oraz niszczące w celu oceny stanu materiału elementów po eksploatacji.

W praktyce inżynierskiej wykorzystuje się metody kwalifikowane do obydwu grup przy czym metody obliczeniowe stosuje się zazwyczaj w prognozowaniu dalszej eksploatacji jako główny element analizy ekonomicznej, w podejmowaniu decyzji o przystąpieniu do badań diagnostycznych oraz pomiarów.

W opracowaniu przyjęto, że wyłącznie pomiary oraz badania nieniszczące i niszczące w celu oceny stanu materiału, uzupełnione wynikami obliczeń przeprowadzonych dla rzeczywistych warunków pracy stanowią podstawę wiarygodnej oceny stanu elementów pracujących w warunkach pełzania, umożliwiając szacowanie/ wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji.

Opracowanie oparto na:

- Sprawozdaniu nr P/XII-2/2014: ‘Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania – Etap I’ [1]
- Sprawozdaniu nr P-2/III-1/2015: ‘Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania – Etap II’ [2],
- Materiałach Technicznych Urzędu Dozoru Technicznego nr 3/2013: ‘Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania’ [3].

1.2. Cel i przeznaczenie opracowania.

Celem opracowania jest przedstawienie jednolitej metodologii oceny stanu materiału i sposobu szacowania/wyznaczania pozostałej bezpiecznej trwałości eksploatacyjnej elementów części ciśnieniowej kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania. Zaproponowany tryb postępowania wykorzystuje współcześnie dostępne narzędzia i metody badawcze zweryfikowane w praktyce na podstawie doświadczeń z pozytywnych wyników wieloletnich diagnostycznych badań materiałowych. Opracowaną metodologię przedstawiono w formie algorytmu pokazującego wymagany lub zalecany sposób postępowania przy diagnozowaniu i wyznaczeniu czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji elementów kotłów i rurociągów, pracujących w warunkach pełzania.

Opracowanie jest przeznaczone dla:

- inspektorów UDT; stanowi podstawę stawiania wymagań w zakresie przygotowania niezbędnego programu oraz zakresu badań i metod oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji. W rezultacie ma służyć określeniu obiektywnej przydatności do dalszej eksploatacji elementów konstrukcyjnych, zarówno przed jak i po osiągnięciu obliczeniowego czasu pracy, a także w przypadku wystąpienia awarii związanej z nadmierną utratą trwałości eksploatacyjnej czy powstaniem nieciągłości materiału,
- służb remontowych i utrzymania ruchu jednostek przemysłowych eksploatujących urządzenia ciśnieniowe pracujące w podwyższonej temperaturze; przedstawia zasady doboru wymaganego programu badań diagnostycznych i jego zakresu w zależności od czasu pracy odniesionego do założonego czasu obliczeniowego.
- jednostek badawczych wykonujących diagnostyczne badania materiałowe; stanowi dokument odniesienia przy doborze racjonalnych metod badawczych i narzędzi do oceny stanu elementu oraz materiału i określania ich przydatności do dalszej eksploatacji.

Opracowanie wskazuje wymagania, które należy uwzględniać przy wyborze reprezentatywnych miejsc do badań, rodzajów pomiarów, nieniszczących oraz niszczących metod badawczych, zakresu a także liczby miejsc do badań, w zależności od czasu eksploatacji odniesionego do założonego czasu obliczeniowego.

Wytyczne mogą być stosowane bezpośrednio jako dokument odniesienia podczas określania stanu oraz trwałości eksploatacyjnej elementów ciśnieniowych. Stanowią także podstawę do opracowania szczegółowych instrukcji, planów lub programów badań, które powinny być zatwierdzone przez Urząd Dozoru Technicznego.

1.3. Zakres stosowania opracowania.

Opracowanie stosuje się do elementów ciśnieniowych kotłów oraz rurociągów i ich armatury pracujących w warunkach pełzania. Zakres opracowania obejmuje elementy wykonane z:

- stali niskostopowych np.: 15Mo3 (16M), 13CrMo4-5 (15HM), 10CrMo9-10 (10H2M), 14MoV6-3 (13HMF), 17HMF, 21HMF, które wykazują strukturę ferrytyczno-perlityczną, ferrytyczno-perlityczno-bainityczną, bainityczno-ferrytyczną oraz perlityczno-bainityczną.
- staliw niskostopowych np.: L20HM, L17HMF, L21HMF,o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej i bainityczno-ferrytycznej w zależności od gatunku stali/staliwa,
- wysokochromowych stali martenzytycznych w gatunkach np. X20CrMoV11-1 (20H12M1F) oraz X10CrMoVNb9-1 (P91),

  przeznaczonych do pracy w warunkach pełzania.

Przedstawioną w niniejszej pracy metodologię diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej można również stosować dla innych materiałów po przeprowadzeniu odpowiedniej analizy przydatności opisanych zasad postępowania. Opracowanie nie ma zastosowania dla tych materiałów, dla których nie opracowano wymaganych charakterystyk materiałowych lub dla których nie są one dostępne.

Wytyczne będą uzupełniane na bieżąco, równocześnie z wdrażaniem i rozwojem nowych metod badawczych oraz rodzajów materiałów stosowanych do wytwarzania elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

2. Pojęcia i definicje [1].

Poniżej zamieszczono definicje następujących głównych pojęć:

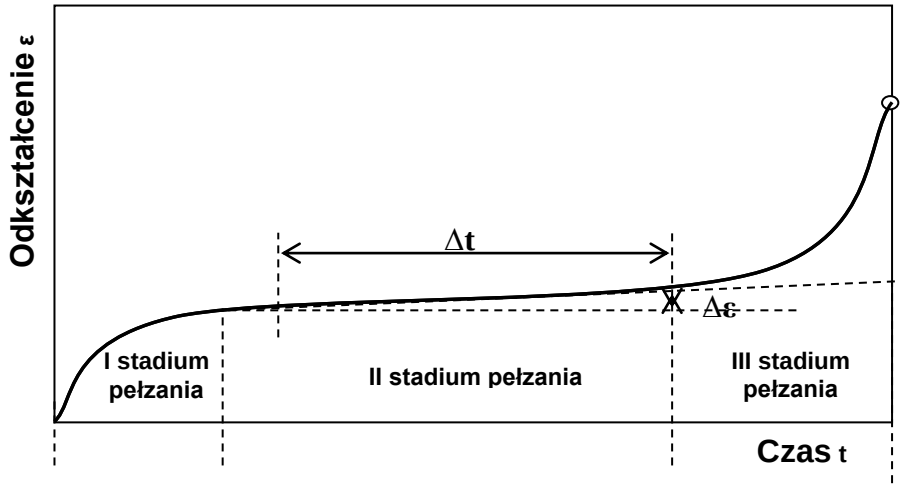
Pełzanie jest to proces ciągłego trwałego odkształcania się materiału poddanego równoczesnemu działaniu naprężenia i podwyższonej temperatury w długim czasie o szybkości odkształcanie w zakresie od 10^{-8} do 10^{-12} s^{-1} (rys. 1).

I-sze stadium pełzania charakteryzuje się znacznym przyrostem trwałego odkształcenia w bardzo krótkim czasie.

II-gie stadium pełzania charakteryzuje się stałym przyrostem odkształcenia w długim czasie (tangens kąta nachylenia krzywej pełzania jest wielkością stałą).

III-cie stadium pełzania charakteryzuje się gwałtownym przyrostem odkształcenia w stosunkowo krótkim czasie prowadząc do utraty ciągłości materiału i zniszczenia.

Szybkość pełzania jest to stosunek przyrostu odkształcenia Δε w czasie Δt w II-gim stadium pełzania (w stanie ustalonym) (rys.1).



Rys.1. Krzywa pełzania w stałej temperaturze i przy stałym obciążeniu.

Trwałość jest to czas (lub liczba cykli) do zniszczenia materiału poddanego pełzaniu.

Trwałość rozporządzalna jest to czas do osiągnięcia końca drugiego okresu pełzania.

Degradacja materiału jest to stan materiału wykazujący negatywne zmiany w mikrostrukturze i właściwościach powodowane procesami niszczenia, w tym pełzania.

Degradacja mikrostruktury polega na:

- rozpadzie głównych faz struktury t.j. perlitu, bainitu i martenzytu, w zależności od gatunku materiału;
- przemianie i powstawaniu wydzieleń (węglików, węgliko-azotków, faz międzymetalicznych), zmianie ich morfologii oraz miejsc usytuowania,
- rozwoju wewnętrznych uszkodzeń (od pojedynczych pustek do makro-pęknięć),
- niszczeniu korozyjnym - nierównomiernym prowadzącym do rozwoju lokalnych nieciągłości i pęknięć oraz równomiernym prowadzącym do pocienienia grubości ścianki.

Degradacja właściwości w wyniku pełzania obejmuje:

- zmniejszenie odporności na pełzanie,
- obniżenie podstawowych właściwości mechanicznych w temperaturze pokojowej i podwyższonej,
- podwyższenie temperatury progu kruchości - przejścia w stan kruchy.

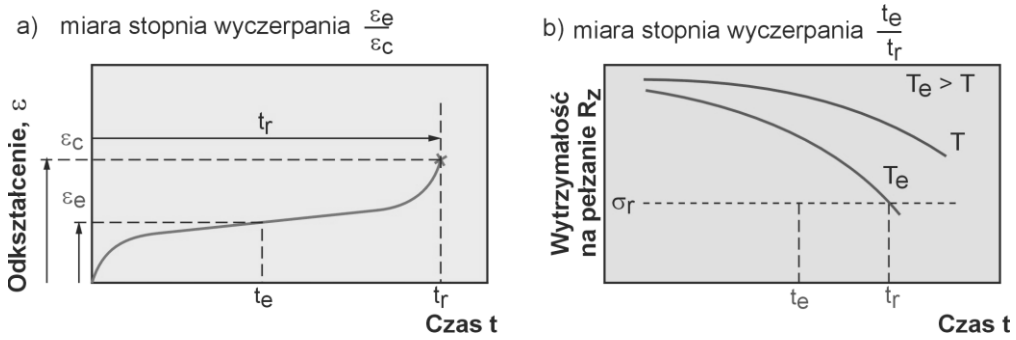
Rodzaje zmian w materiale prowadzące do zwiększenia szybkości pełzania

Wyczerpanie – obejmuje zmiany następujące w strukturze $\neq 0$, gdy nie występuje proces dekohezji $= 0$. Wyraża utratę zdolności materiału do odkształcenia plastycznego

w wyniku przebiegu procesu pełzania. Stopień wyczerpania jest wartością względną i przy zerwaniu równy jest 1 lub 100%. Miarą stopnia wyczerpania jest stosunek odkształcenia ε elementu poddanego pełzaniu do całkowitego odkształcenia przy zerwaniu ε_c (rys.2a). Miarą stopnia wyczerpania może być również stosunek czasu *t* przebiegu pełzania (lub czasu eksploatacji t_e) w danym elemencie do czasu zniszczenia t_r (rys. 2b). Zależność między wyczerpaniem odkształceniowym a czasowym ma charakter liniowy zwykle do końca II stadium.

Stopień wyczerpania będący miarą przydatności elementu do dalszej pracy, w praktyce, definiowany jest jako stosunek czasu eksploatacji t_e do czasu t_r po którym następuje zniszczenie materiału dla roboczych parametrów eksploatacyjnych.

Uszkodzenie w wyniku pełzania obejmuje zmiany związane z powstawaniem i rozwojem uszkodzeń wewnętrznych $\dot{\omega} \neq 0$, którym nie towarzyszą zmiany struktury $\dot{S}_i = 0$. Uszkodzenie w wyniku pełzania to nieodwracalne zmiany w strukturze, spowodowane przez równoczesne oddziaływanie temperatury i naprężenia mechanicznego w długotrwałym czasie. Stopień uszkodzenia może być określony eksperymentalnie metodami metalograficznymi. Wyczerpywanie się materiału jest spowodowane między innymi przez powstawanie i rozwijanie się uszkodzeń wewnętrznych w metalu poddanym pełzaniu w przypadku, gdy $\dot{\omega} \neq 0$, a $\dot{S}_i = 0$ ($\dot{\omega}$ - szybkość propagacji uszkodzeń, $\dot{S}_i$ - szybkość zmian w strukturze).



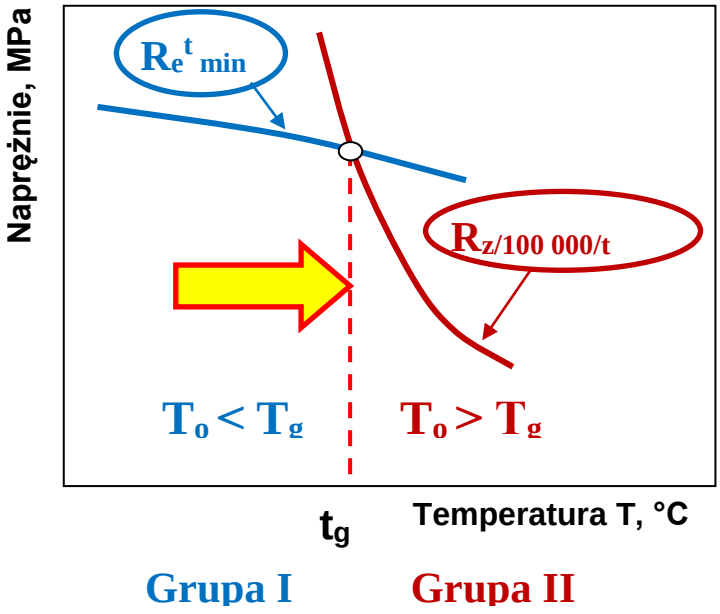
Rys. 2. Graficzne ujęcie wyczerpania materiału, definiowane w oparciu o:
a) stosunek odkształcenia $\varepsilon_e / \varepsilon_c$ lub b) stosunek czasu t_e / t_r
gdzie: ε_e - trwałe odkształcenie odpowiadające czasowi eksploatacji t_e
ε_c - całkowite trwałe odkształcenie odpowiadające czasowi do zniszczenia t_r
t_e - czas eksploatacji, t_r - czas do zniszczenia

W praktyce zwykle oba wymienione procesy (wyczerpanie i uszkodzenie) przebiegają równolegle, a tylko jeden z nich jest dominującym w zależności od stadium pełzania. W zależności od stadium pełzania różny jest stopień wyczerpania materiału i różne nasilenie uszkodzeń, od pojedynczych pustek poprzez szczeliny międzykrystaliczne do pęknięć.

Temperatura graniczna (t_g) jest temperaturą w punkcie przecięcia krzywej minimalnej granicy plastyczności w temperaturze podwyższonej (**R_e^t min**) z krzywą wartości średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie dla 100 000 godzin (**$R_{z/100\ 000/t}$**) (rys. 3).

Czasowa wytrzymałość na pełzanie jest naprężeniem, które po upływie określonego czasu w danej temperaturze spowoduje utratę ciągłości materiału, np. $R_{z/100\ 000/550}$ = 360 MPa oznacza, że dany materiał poddany działaniu naprężenia o wartości 360 MPa i pracujący w temperaturze 550°C ulegnie zniszczeniu po upływie 100 000 godzin.

Podawane wartości są wartościami średnimi, a uzyskiwane rzeczywiste mogą się różnić o ±20% (poziom naprężenia).



Rys.3. Sposób wyznaczenia temperatury granicznej t_g.

Granica pełzania jest to naprężnie, które po upływie określonego czasu działania w danej temperaturze spowoduje trwałe odkształcenie o określoną zdefiniowaną wartość, np. $R_{0,5}$ lub $R_{1/100\ 000/550}$=100 MPa oznacza, że poddanie materiału działaniu naprężenia o wartości 100 MPa w temperaturze 550°C przez 100 000 godzin spowoduje trwałe jednoprocentowe wydłużenie. Podawane wartości są wartościami średnimi, a uzyskiwane rzeczywiste mogą się różnić o ±20% (poziom naprężenia)

Diagnostyka jest procesem złożonym z logicznie powiązanych ze sobą czynności, obejmujących odpowiednio dobrane metody badań, obliczeń oraz analizy i interpretacji wyników. Na diagnostykę składa się ocena stanu: materiału elementu konstrukcyjnego, technicznego urządzenia (obiektu) prowadząca do określenia prognozy pozostałej trwałości eksploatacyjnej elementu (obiektu) oraz

sposobu (warunków) dalszej eksploatacji, planu inspekcji i remontów oraz innych profilaktycznych zaleceń związanych z inżynierią utrzymania urządzeń.

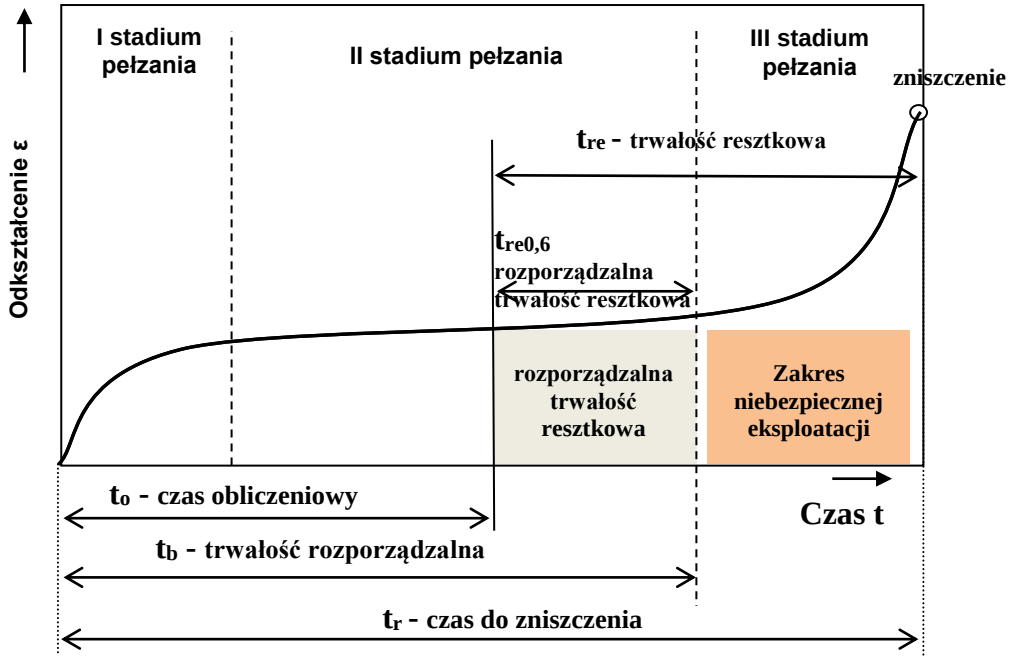
Trwałość obliczeniowa (t_0) jest trwałością wynikającą z czasowej wytrzymałości na pełzanie dla 100 000 lub 200 000 godzin oraz przyjętych parametrów obliczeniowych (rys.4).

Trwałość rzeczywista (t_r) jest to czas po upływie którego nastąpi zniszczenie materiału (rys.4).

Trwałość resztkowa (t_{re}) rozumiana jest jako różnica czasu pomiędzy rzeczywistą a obliczeniową trwałością materiału (rys.4).

Trwałość rozporządzalna (t_b) jest definiowana jako czas do zakończenia II stadium pełzania. Stanowi równocześnie całkowity czas bezpiecznej eksploatacji w założonych warunkach temperatury i obciążenia (rys.4).

Rozporządzalna trwałość resztkowa ($t_{re0,6}$) jest częścią trwałości rozporządzalnej. Jest definiowana jako czas eksploatacji po przekroczeniu czasu obliczeniowego do końca II stadium pełzania dla rzeczywistych parametrów przedłużonej eksploatacji. (rys.4). Rozporządzalna trwałość resztkowa $t_{re0,6}$ jest czasem bezpiecznej eksploatacji poza obliczeniowym w założonych warunkach temperatury i naprężenia. Wartość jej ograniczona jest krytycznym stopniem wyczerpania lub uszkodzenia materiału i łączona jest z III stadium pełzania. Rozporządzalna trwałość resztkowa $t_{re0,6}$ stanowi najczęściej około 60% trwałości resztkowej. Jej udział jest jednak bardzo uzależniony od rzeczywistych parametrów temperaturowo-naprężeniowych materiału badanego elementu.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie pojęcia trwałości resztkowej i rozporządzalnej

Prognoza pozostałej trwałości eksploatacyjnej elementu jest to ustalenie czasu dalszej bezpiecznej jego eksploatacji w zdefiniowanych warunkach dalszej pracy na podstawie uznanych metod badawczych, z wykorzystaniem metod analitycznych.

Trwałość elementu konstrukcyjnego nie jest tożsama z trwałością materiału, z którego wykonano przedmiotowy element. Trwałość materiału (tzw. trwałość obliczeniowa) wyznaczana jest na podstawie czasowej wytrzymałości na pełzanie $R_{z/t/T}$ w testach laboratoryjnych, które realizowane są przy jednoosiowym stanie naprężenia, w stabilnych warunkach temperatury, naprężenia i środowiska, na próbkach o modelowych cechach geometrycznych i stanie powierzchni. Jest to zatem teoretyczne, nieco uproszczone, ujęcie zagadnienia. W rzeczywistości element zazwyczaj poddany jest zmiennym obciążeniom i zmiennej temperaturze, jest odstawiany i uruchomiany, środowisko pracy jest zmienne co do agresywności, a stan powierzchni odpowiada stanowi dostawy. Na trwałość elementu konstrukcyjnego wpływają również warunki transportu oraz inżynieria montażu. Dlatego większe znaczenie praktyczne ma trwałość rozporządzalna $t_{0,6}$ która odpowiada czasowi, w którym element konstrukcyjny może być bezpiecznie eksploatowany w założonych warunkach temperatury i obciążenia. Z tej przyczyny wprowadzono dodatkowo pojęcie rozporządzalnej trwałości resztkowej $t_{re0,6}$, w celu pełnego określenia czasu bezpiecznej eksploatacji. Powyższe powody wskazują na konieczność prowadzenia diagnostyki materiałowej opartej na badaniach, a metody obliczeniowe wykorzystujące charakterystyki materiału w stanie wyjściowym mają tylko charakter pomocniczy. Zastosowanie metod obliczeniowych może mieć wpływ na decyzję dotyczącą celowości podjęcia badań diagnostycznych oraz formułowania wymagań odnośnie zakresu i częstości ich przeprowadzania (czynnik ekonomiczny).

3. Elementy kotłów i rurociągów pracujące w warunkach pełzania [1].

3.1. Podział elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

Podstawowe wymagania techniczne stawiane kotłom modernizowanym i nowobudowanym to wysoka sprawność i niezawodność pracy, podatność naprawcza oraz niska emisja szkodliwych zanieczyszczeń.

Niezawodność pracy w ogólności jest definiowana jako prawdopodobieństwo, że obiekt będzie spełniał swoje funkcje zgodnie z przeznaczeniem przez określony czas w danych warunkach zewnętrznych (np. dyspozycyjność w danej porze roku) oraz eksploatacyjnych. Niezawodność jest ściśle związana z częstością generowania uszkodzeń (awarii) czego konsekwencją są względnie bardzo wysokie koszty wynikające z ich naprawy lub wymiany.

Podatność naprawcza to warunki i umiejętności, a także możliwości dokonywania napraw w krótkim czasie. Szczególnie dotyczy to tzw. elementów krytycznych urządzenia, czyli tych które decydują o funkcjonowaniu i bezpieczeństwie (elementu ciśnieniowego, całego urządzenia). Z tych względów elementy kotła przyjęto dzielić na krytyczne oraz wpływające na niezawodność pracy kotła. Natomiast wszystkie elementy rurociągów parowych należy uznać za krytyczne.

3.1.1. Podział elementów części ciśnieniowej kotłów i rurociągów ze względu na niezawodność pracy.

Podział elementów części ciśnieniowej kotłów

Podział na elementy krytyczne i wpływające na niezawodność w odniesieniu do kotła przedstawiono na rys. 5.

Dla wyspecyfikowanych na rys. 5 elementów kotła podano miejsca, w których w pierwszej kolejności wykonywane są diagnostyczne badania materiałowe.

Elementy wpływające na niezawodność pracy kotła to elementy pracujące w podwyższonej temperaturze pod działaniem wysokiego ciśnienia, które:

- ze względu na ich konstrukcję nie muszą być natychmiast wymienione,
- ich stan nie wpływa w sposób zasadniczy na niezawodność pracy bloku.

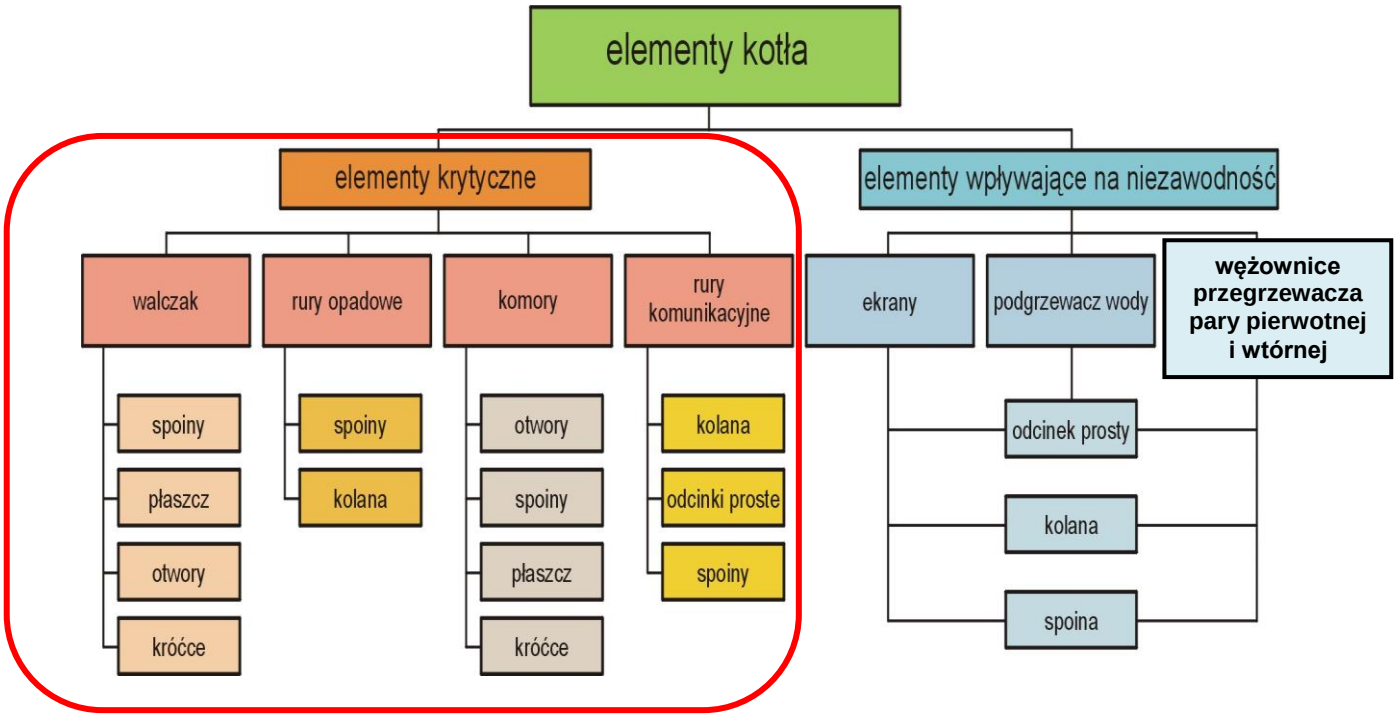
Elementy krytyczne to elementy pracujące w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych, które:

- ze względu na ich konstrukcję nie mogą być natychmiast wymienione podczas okresowych przeglądów,
- ich stan w sposób zasadniczy wpływa na dyspozycyjność i niezawodność pracy bloku.

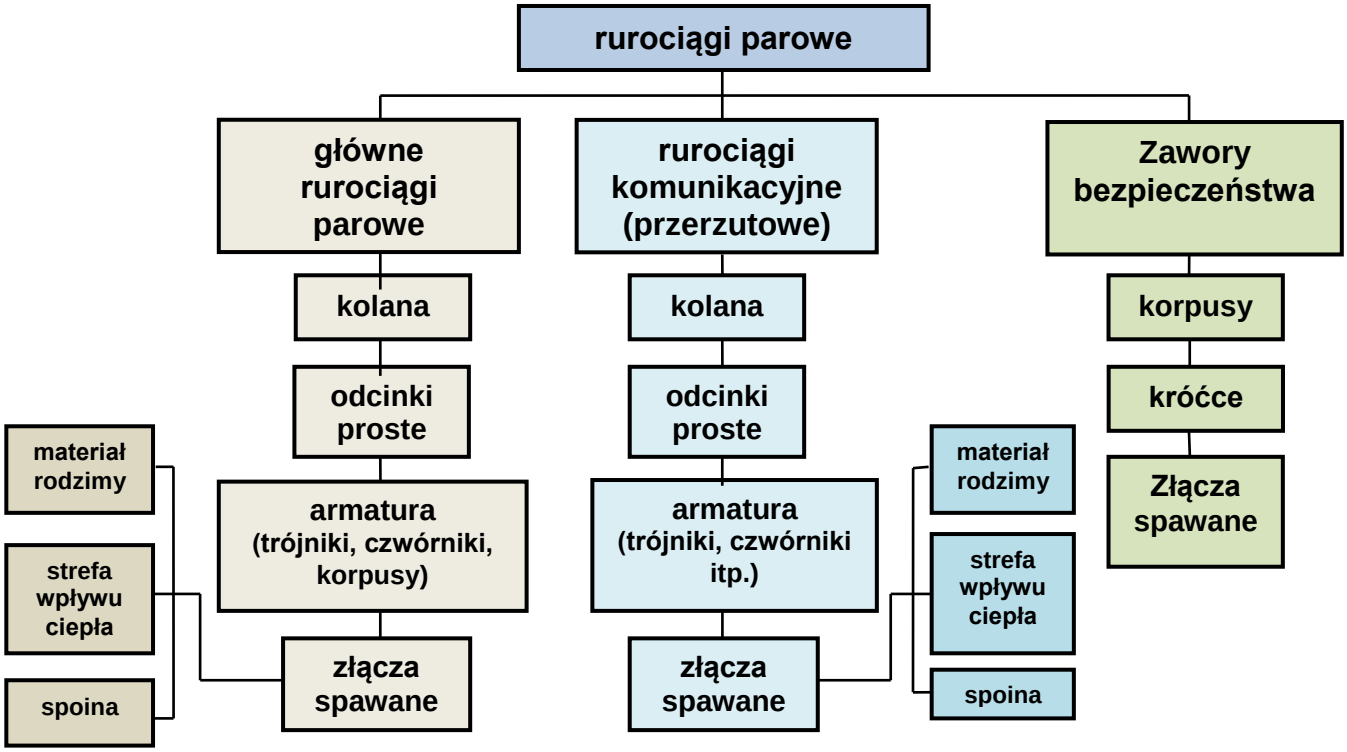
Podział rurociągów parowych

Wszystkie rurociągi parowe zalicza się do grupy elementów krytycznych ponieważ ich stan wpływa w sposób zasadniczy na dyspozycyjność i niezawodność pracy bloku.

Podział elementów rurociągów parowych poddawanych badaniom diagnostycznym pokazano na rys. 6.



Rys. 5. Elementy kotła i miejsca w których poddawane są badaniom diagnostycznym.



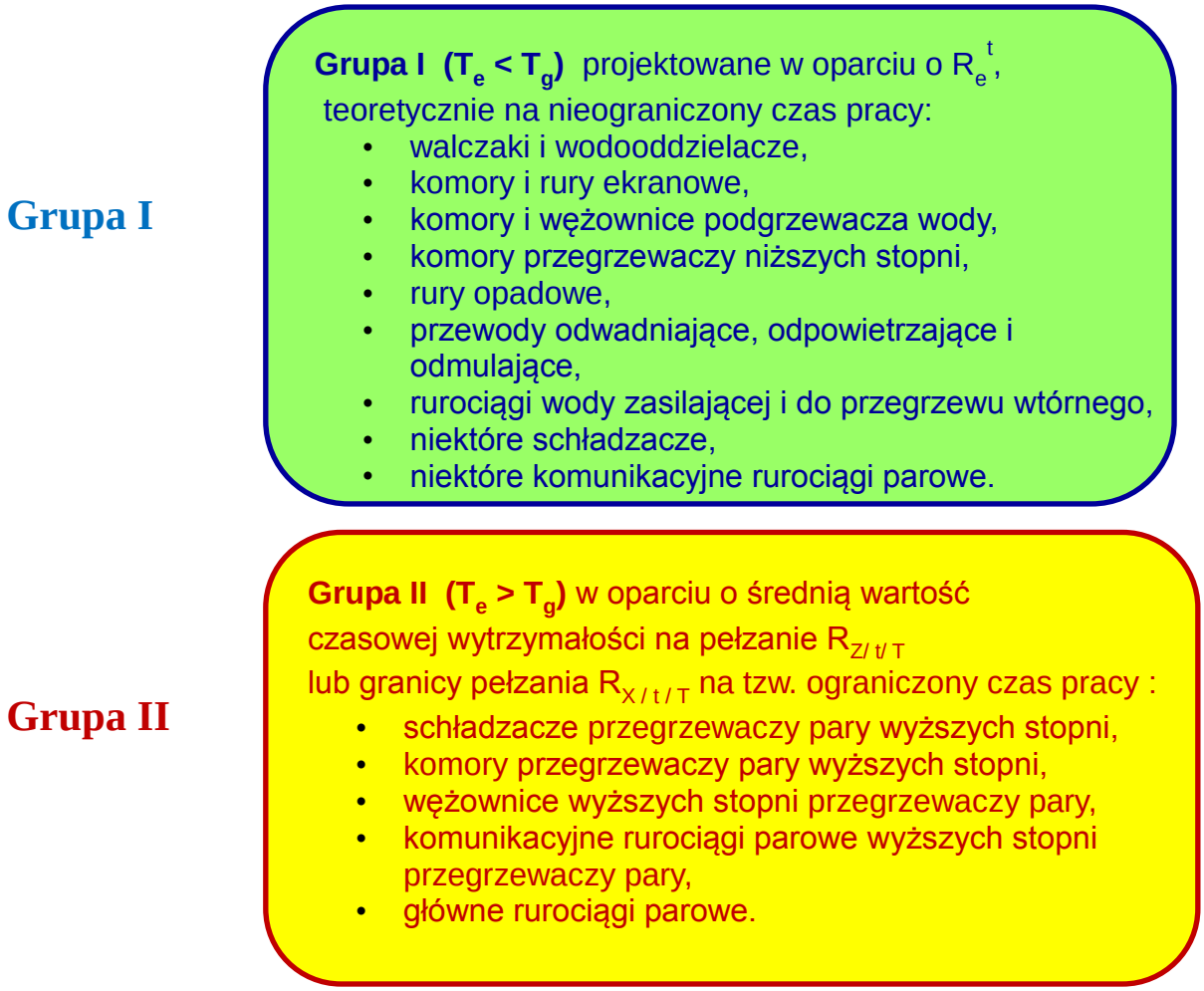
Rys. 6. Rurociągi parowe i miejsca w których poddawane są badaniom diagnostycznym.

3.1.2. Podział elementów części ciśnieniowej kotłów i rurociągów w zależności od temperatury pracy.

Przyjmując za kryterium temperaturę pracy (rys. 3), elementy instalacji energetycznych można podzielić na dwie grupy:

1) elementy pracujące w podwyższonej temperaturze poniżej temperatury granicznej T_g, (Grupa I),
2) elementy pracujące w temperaturze powyżej temperatury granicznej T_g, to znaczy w warunkach pełzania (Grupa II).

Rodzaje elementów należące do poszczególnych grup zestawiono na rys. 7.



Rys.7. Podział elementów części ciśnieniowej kotłów w zależności od temperatury pracy.

Elementy Grupy I, pracujące poniżej temperatury granicznej ($T_o<T_g$) gdzie pełzanie ma mało istotny wpływ, projektowane są w oparciu o wartość minimalnej granicy plastyczności w podwyższonej temperaturze ($R_e^t{}_{min}$), teoretycznie na nieograniczony czas pracy. Wartość naprężenia dopuszczalnego przyjmuje się następująco: $k = R_e^t / x$, gdzie: x - współczynnik bezpieczeństwa przyjmowany w zależności od normy lub specyfikacji technicznej (np. 1,35 - 1,65 - najczęściej w zależności od rodzaju elementu wg WUDT; 1,5 wg PN-EN 12952-3 i PN-EN 13480-3).

Elementy Grupy II, pracujące powyżej temperatury granicznej ($T_o>T_g$), gdzie zjawiskiem dominującym jest pełzanie, projektowane są w oparciu o średnią czasową wytrzymałość na pełzanie ($R_{z/t/T}$) (Grupa II) lub granicę pełzania $R_{X/t/T}$ na tzw. ograniczony czas pracy. W przeszłości czas obliczeniowy przyjmowano 100 000 godz., a obecnie 100, 200 oraz 250 000 godzin w zależności od dostępnych charakterystyk wytrzymałości na pełzanie dla danego gatunku materiału. Czas ten jest równoznaczny z trwałością obliczeniową. Wartość naprężeń dopuszczalnych obliczana jest z zależności $k = R_{Z/t/T}/X$ lub $k = R_{x/t/T} / X$, gdzie X- współczynnik bezpieczeństwa, np. dla kotłów i rurociągów wynosi: 1,35 - 1,65 (najczęściej w zależności od rodzaju elementu) wg WUDT; 1,25 wg PN-EN 12952-3 i PN-EN 13480-3.

Elementy, dla których obowiązuje niniejsze opracowanie należą do II grupy tzn. do pracujących powyżej temperatury granicznej ($T_o>T_g$), chociaż ogólny sposób postepowania i szereg metod badawczych i pomiarów znajduje również zastosowanie dla elementów pracujących poniżej temperatury granicznej.

3.2. Stale i staliwa stosowane na elementy ciśnieniowe kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

Stale do pracy w podwyższonej temperaturze w warunkach pełzania stosowane w energetyce obejmują liczną grupę gatunków różniących się między sobą składem chemicznym, strukturą po obróbce cieplnej i zastosowaniem. Stale niskostopowe przeznaczone są w zależności od składu chemicznego, do pracy w temperaturze od 480 do 590ºC, natomiast wysokochromowe stale martenzytyczne przeznaczone są do pracy w temperaturze do 620ºC.

Stale stosowane na elementy kotłów i rurociągów muszą charakteryzować się:

- stabilnymi właściwościami wytrzymałościowymi w czasie długotrwałej eksploatacji w podwyższonych temperaturach;
- małą skłonnością do wzrostu kruchości (obniżenia udarności, wzrostu temperatury przejścia w stan kruchy) w warunkach pracy;

- wysoką granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie;
- stabilną mikrostrukturą w czasie długotrwałej eksploatacji;
- korzystnymi właściwościami fizycznymi, tj. możliwie małym współczynnikiem rozszerzalności liniowej i dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła;
- odpowiednią żarowytrzymałością i żaroodpornością;
- odpornością na zmęczenie cieplne i cieplno – mechaniczne podczas eksploatacji, a szczególnie odpornością na zmęczenie niskocyklowe;
- odpowiednimi właściwościami technologicznymi, takimi jak: dobra spawalność, podatność do przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej.

Opracowanie dotyczy eksploatowanych przez długi okres czasu w warunkach pełzania następujących rodzajów materiałów:

- stali niskostopowych o strukturze ferrytyczno – perlitycznej, ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej, bainityczno – ferrytycznej oraz perlityczno – bainitycznej, np. gatunków: 16Mo3 (15M), 14MoV6-3 (13HMF), 13CrMo4-5 (15HM), 10CrMo9-10 (10H2M),
- wybranych staliw niskostopowych o strukturze ferrytyczno – perlitycznej, ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej, bainityczno – ferrytycznej, np. gatunków: L20HM, L17HMF i L21HMF,
- wysokochromowych stali martenzytycznych w gatunkach: X20CrMoV11-1 (20H12M1F) i X10CrMoVNb9-1,

które dotychczas najczęściej stosowano w Polsce na elementy instalacji energetycznych, pracujących w warunkach pełzania. W tablicy 1 zamieszczono orientacyjne składy chemiczne wybranych stali stosowanych przez długi okres czasu w energetyce krajowej.

Tablica 1. Składy chemiczne wybranych stali stosowanych do przez długi okres czasu w energetyce krajowej [4].

Znak stali/staliwa [1)]	**Zawartość głównych składników, %**							
	C	**Mn**	**Si**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**V**	**inne**
16M	0,12-0,20	0,7	0,3	≤0,3	≤0,35	0,25-0,35	–	Cu≤0,25, Al≤0,02
15HM	0,10-0,15	0,40-0,70	0,17-0,37	0,8-1,1	≤0,25	0,40-0,55	0,25	Cu≤0,20
10H2M	0,08-0,15	0,5	0,3	2-2,5	≤0,30	0,90-1,10	–	Cu≤0,25, Al≤0,02
13HMF	0,10-0,18	0,6	0,3	0,30-0,60	≤0,30	0,50-0,65	0,28	Cu≤0,25, Al≤0,02
20H12M1F	0,17-0,23	0,60	0,30	11,0-12,5	0,60	0,80-1,20	0,30	–
12HMF	0,08-0,15	0,6	0,3	0,90-1,20	≤0,25	0,25-0,40	0,25	Cu≤0,25, Al≤0,02
20HM	0,19-0,26	0,70	0,30	0,90-1,1	≤0,60	0,90-1,20	-	Al≤0,02
21HMF	0,17-0,25	0,40	0,50	1,2-1,5	≤0,60	1,0-1,2	0,30	-
1) stale wg norm krajowych mających status wycofanych								

Rodzaj prawidłowej, oczekiwanej struktury stanu wyjściowego dla wybranych gatunków materiałów zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Rodzaj występującej typowej struktury stanu wyjściowego poszczególnych stali i staliw pracujących w warunkach pełzania w części ciśnieniowej kotłów krajowych bloków energetycznych.

Oznaczenie materiału	Struktura stanu wyjściowego
16Mo3	struktura ferrytyczno-perlityczna
13CrMo4-5	struktura ferrytyczno-perlityczna
10CrMo9-10	struktura ferrytyczno-bainityczna
14MoV6-3	struktura ferrytyczno-bainityczna czasem z udziałem perlitu
X20CrMoV11-1	struktura odpuszczonego martenzytu
X10CrMoVNb9-1	struktura odpuszczonego martenzytu
L20HM	struktura ferrytyczno-perlityczna
17HMF	struktura ferrytyczno-bainityczna z udziałem perlitu
21HMF	struktura ferrytyczno-bainityczna z udziałem perlitu
L17HMF	struktura ferrytyczno-bainityczna z udziałem perlitu
L21HMF	struktura ferrytyczno-bainityczna z udziałem perlitu

W tablicy 3 wyszczególniono rodzaje elementów, które były najczęściej wykonywane z wymienionych powyżej gatunków materiałów.

Tablica 3. Rodzaj elementów pracujących w warunkach pełzania wykonanych z najczęściej stosowanych stali w krajowej energetyce

Oznaczenie materiału	Rodzaj elementów pracujących w warunkach pełzania
16Mo3	wężownice niższych stopni przegrzewacza pary
14MoV6-3	główne rurociągi pary pierwotnej
13CrMo4-5	wężownice przegrzewacza pary, komory wlotowe i wylotowe przegrzewacza pary, rurociągi komunikacyjne, regulatory temperatury
10CrMo9-10	wężownice przegrzewacza pary, komory wlotowe i wylotowe przegrzewacza pary, rurociągi komunikacyjne, główne rurociągi pary wtórnej, regulatory temperatury
X20CrMoV11-1	komory wylotowe wyższych stopni przegrzewacza pary, wężownice wyższych stopni przegrzewacza pary
X10CrMoVNb9-1	główne rurociągi pary pierwotnej i wtórnej, komory wylotowe wyższych stopni przegrzewacza pary, wężownice wyższych stopni przegrzewacza pary
17HMF	trójniki, czwórniki, korpusy zaworów,
21HMF	trójniki, czwórniki, korpusy zaworów, korpusy zasuw parowych
L20HM	trójniki, czwórniki, korpusy zaworów, korpusy zasuw parowych
L21HMF	trójniki, czwórniki, korpusy zaworów, korpusy zasuw parowych

3.3. Procesy niszczenia zachodzące w elementach kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

Materiały poddane długotrwałemu działaniu naprężenia w podwyższonej temperaturze w agresywnym środowisku ulegają stopniowemu, sporadycznie katastroficznemu niszczeniu. Trwałość elementów konstrukcyjnych jest nierozerwalnie związana z procesami ich niszczenia. Wśród procesów niszczenia występujących w elementach instalacji energetycznych można wyróżnić:

- pełzanie,
- zmęczenie,
- kruche pękanie i pękanie eksploatacyjne,
- korozję i erozję.

Procesem niszczenia dominującym i decydującym o zachodzących niekorzystnych zmianach w materiale, prowadzącym do utraty ciągłości materiału elementów kotłów i rurociągów pracujących powyżej temperatury granicznej **jest pełzanie**. Jednak ze względu na różne rzeczywiste warunki eksploatacyjne, elementy pracujące powyżej temperatury granicznej poddane są działaniu pełzania często z różnym udziałem równocześnie występujących innych procesów niszczenia. Znajomość ich rodzajów, intensywności oraz uprzywilejowanych obszarów działania jest niezbędna dla prawidłowej oceny stanu badanego elementu. Należy nadmienić, że każde odstawienie i ponowne uruchomienie powoduje ponowne pojawienie się pierwszego stadium pełzania skutkujące dodatkowym trwałym odkształceniem. Wówczas sumaryczna wielkość trwałego odkształcenia nieproporcjonalnie wzrasta w stosunku do prognozowanego, zakładającego nieprzerwaną, ciągłą pracę (cykliczne pełzanie).

W komorach przegrzewaczy pary pracujących powyżej temperatury granicznej oprócz pełzania, które jest procesem dominującym, może pojawić się zmęczenie cieplne. Uszkodzenia spowodowane pełzaniem, najszybciej pojawiają się w obszarach najbardziej wytężonych (miejsca koncentracji naprężeń) t.j. na wewnętrznej powierzchni płaszczy komór przy wszelkiego rodzaju otworach. Przyjmują postać odkształceń obwodowych, aż do pęknięć włącznie. Spośród występujących pęknięć najgroźniejsze są usytuowane równolegle do głównej osi komory. Uszkodzenia zmęczeniowe wywołane są przez termoszoki powstające w czasie niestabilnych warunków pracy komór. Mogą wystąpić nawet po bardzo krótkim czasie eksploatacji. Najczęściej mają postać pęknięć powierzchniowych na krawędziach otworów na powierzchni wewnętrznej płaszcza komory lub w przypadku niekorzystnego rozmieszczenia otworów - pęknięć mostków z ukierunkowaniem obwodowym. Natomiast w praktyce rzadko występują pełzaniowe uszkodzenia

komór. Mogą pojawić się w przypadku pracy powyżej temperatury obliczeniowej. Natomiast postępujący proces pełzania przy znaczącym udziale termoszoków, w sposób istotny może przyspieszyć proces degradacji mikrostruktury oraz inicjację pustek pełzaniowych i rozwój wewnętrznych uszkodzeń.

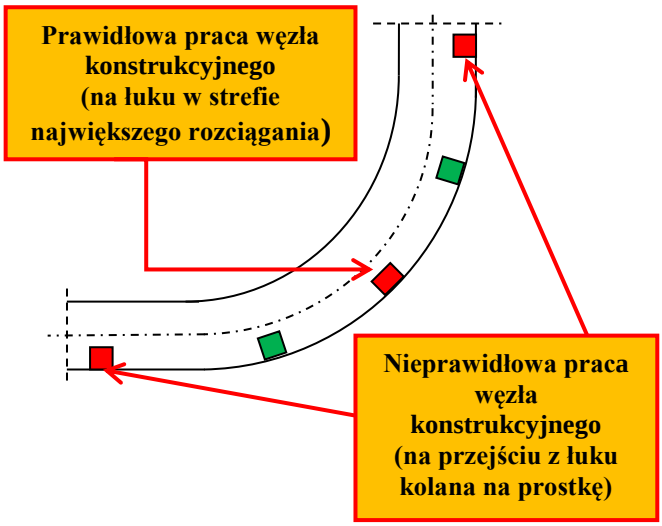
Komory regulatorów temperatury (schładzaczy) charakteryzują się podobnymi warunkami pracy i uszkodzeniami jak komory przegrzewaczy. Mogą jednak w nich dodatkowo wystąpić pęknięcia na powierzchniach wewnętrznych płaszcza wskutek działania termoszoków, w rejonie wtrysków w wyniku przesuniętych lub popękanych koszulek ochronnych lub niesprawnych dysz.

Wężownice przegrzewaczy pary pracujące powyżej temperatury granicznej poddawane są procesowi pełzania z udziałem korozji, głównie od strony spalin a w przypadku niewłaściwych parametrów wody kotłowej również od strony pary, czasem korozji od zawilgoconego popiołu lub korozji zmęczeniowej na powierzchni zewnętrznej.

Najczęściej przyczyną uszkodzeń wężownic przegrzewaczy pary jest przegrzanie materiału (praca w temperaturze przekraczającej, czasem znacznie, temperaturę obliczeniową). Skutkiem przegrzania jest przyspieszona degradacja struktury materiału wynikająca ze zwiększonej szybkości postępowania procesu pełzania, prowadząca do utraty zdolności eksploatowanego materiału do przenoszenia rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych. Nadmierny wzrost temperatury powoduje równocześnie zwiększenie szybkości narastania warstwy tlenków po stronie wewnętrznej, które będąc izolatorem zmniejszają zdolność wężownicy do przewodzenia ciepła. Powoduje to dalszy wzrost temperatury ścianki wężownicy skracając dodatkowo czas do zniszczenia w wyniku pełzania. Ponadto przegrzaniu często towarzyszą ubytki grubości ścianki wskutek korozji oraz erozji od strony spalin co powoduje powstanie uszkodzenia w krótszym czasie.

W **rurociągach pracujących powyżej temperatury** granicznej oprócz pełzania, które jest procesem dominującym, pojawia się czasem zmęczenie lub korozja zmęczeniowa. Przyczyną większości powstałych uszkodzeń jest niewłaściwa praca zamocowań, odchylenia od projektowej trasy oraz niewłaściwa kompensacja rozszerzalności cieplnej rurociągu, powodujące powstanie złożonego stanu naprężeń. Przedwczesna utrata trwałości eksploatacyjnej jest zatem skutkiem złożonego stanu naprężeń, z występującą składową od skręcania i/lub zginania. Objawia się to przyspieszoną degradacją mikrostruktury, przedwczesną inicjacją pustek oraz rozwojem procesów wewnętrznych uszkodzeń. W niektórych elementach rurociągów mogą występować również procesy zmęczenia niskocyklicznego i wówczas łączne działanie różnych procesów niszczenia dodatkowo przyspiesza proces utraty trwałości eksploatacyjnej.

Znaczne różnice poziomu naprężenia będące skutkiem niewłaściwego stanu zamocowań i podparć, występujące zwykle w łukach rurociągów i przylegających do nich odcinkach prostych powodują, że stopień degradacji materiału jest na ogół największy w tych obszarach (rys. 9). Dotyczy to również innych elementów rurociągów takich jak: trójniki, czwórniki i in. Potencjalne miejsca inicjacji uszkodzeń wewnętrznych w materiale łuków rurociągów, w obszarach występującego największego wytężenia w strefie rozciągania, pokazano na rys.8.



Rys.8. Potencjalne miejsca inicjacji uszkodzeń wewnętrznych w materiale łuków rurociągów w obszarach występującego największego wytężenia.

Przykłady uszkodzeń powstałych w wyniku niewłaściwego funkcjonowania zamocowań w elementach prostych bezpośrednio przylegających do łuków, będące skutkiem powstania złożonego stanu naprężeń, pokazano na rys.9.

Należy nadmienić, że inicjacja i rozwój uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania są ujawniane na zewnętrznej powierzchni elementów rurociągów lub ich złączy spawanych.

Najczęściej występujące procesy niszczenia dla poszczególnych elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania zestawiono w tablicy 4.

Ze względu na różne rodzaje i intensywność procesów niszczenia zachodzących w materiale poszczególnych elementów kotła i rurociągów pracujących w warunkach pełzania oraz odmienne rozwiązania konstrukcyjne a także zastosowane gatunki materiałów, wyznaczanie metod badawczych i częstotliwości badań powinno wynikać z przeprowadzanej analizy oddzielnie dla każdego przypadku.

Rys. 9. Przykłady uszkodzeń łuków rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania jako skutek występującego złożonego stanu naprężeń spowodowanego zbyt małą liczbą stopni swobody.

Tablica 4. Procesy niszczące występujące w czasie eksploatacji elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

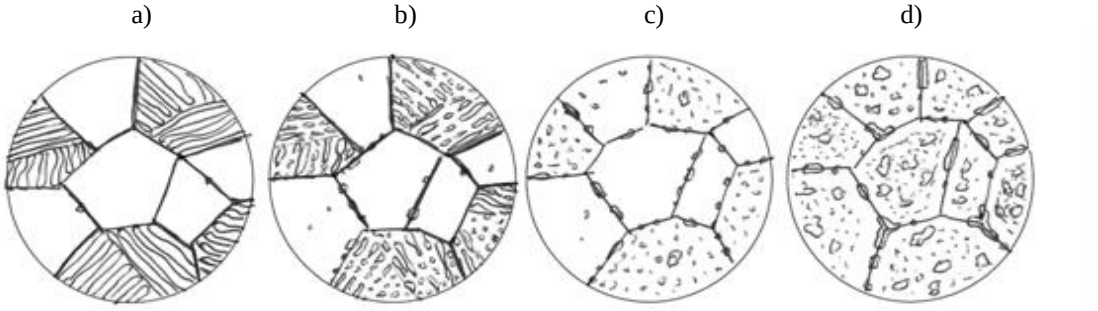
Rodzaj elementów	**komory i schładzacze**	**wężownice przegrzewaczy pary**	**rurociągi**
Procesy niszczenia	**- pełzanie,** - zmęczenie cieplne i korozyjne, - korozja postojowa, - erozja	**- pełzanie,** - korozja wysokotemperaturowa od strony spalin, - korozja parowo-wodna od strony wewnętrznej, - korozja postojowa i dla kolan zmęczenie korozyjne, - erozyjne i korozyjne działania popiołu i spalin, - wady konstrukcyjne i technologiczne rur, kolan i złączy spawanych	**- pełzanie,** - korozja zmęczeniowa - niszczenie zmęczeniowo - pełzaniowe, - pękanie eksploatacyjne

Zagadnienia stabilności struktury materiału pracującego w warunkach pełzania, a w konsekwencji stabilności własności badanych stali w czasie eksploatacji są podstawą analizy procesów ich degradacji. Degradację struktury opisuje zespół czynników strukturalnych i fizykochemicznych, które ulegają zmianie pod działaniem podwyższonej temperatury i naprężenia, w relatywnie długim czasie podczas eksploatacji. Rozpad i zanik głównych składników struktury takich jak: perlit, bainit czy martenzyt, przy równoczesnym rozwoju procesów wydzieleniowych (zanik, powstawanie, koagulacja i koalescencja), są objawami jej degradacji. Ogólnymi kryteriami niestabilności struktury stali są zatem:

- stopień zmian podstruktury, w tym zaawansowanie procesów zdrowienia i rekrystalizacji, przemiany węglików i wydzielanie faz międzymetalicznych, zmiany morfologii faz (rozkładu, kształtu, wielkości oraz odległości między cząstkami);
- stopień rozpadu odpowiednio: perlitu, bainitu lub odpuszczonego martenzytu;
- stopień zubożenia osnowy w pierwiastki stopowe – głównie w Cr, Mo lub W.

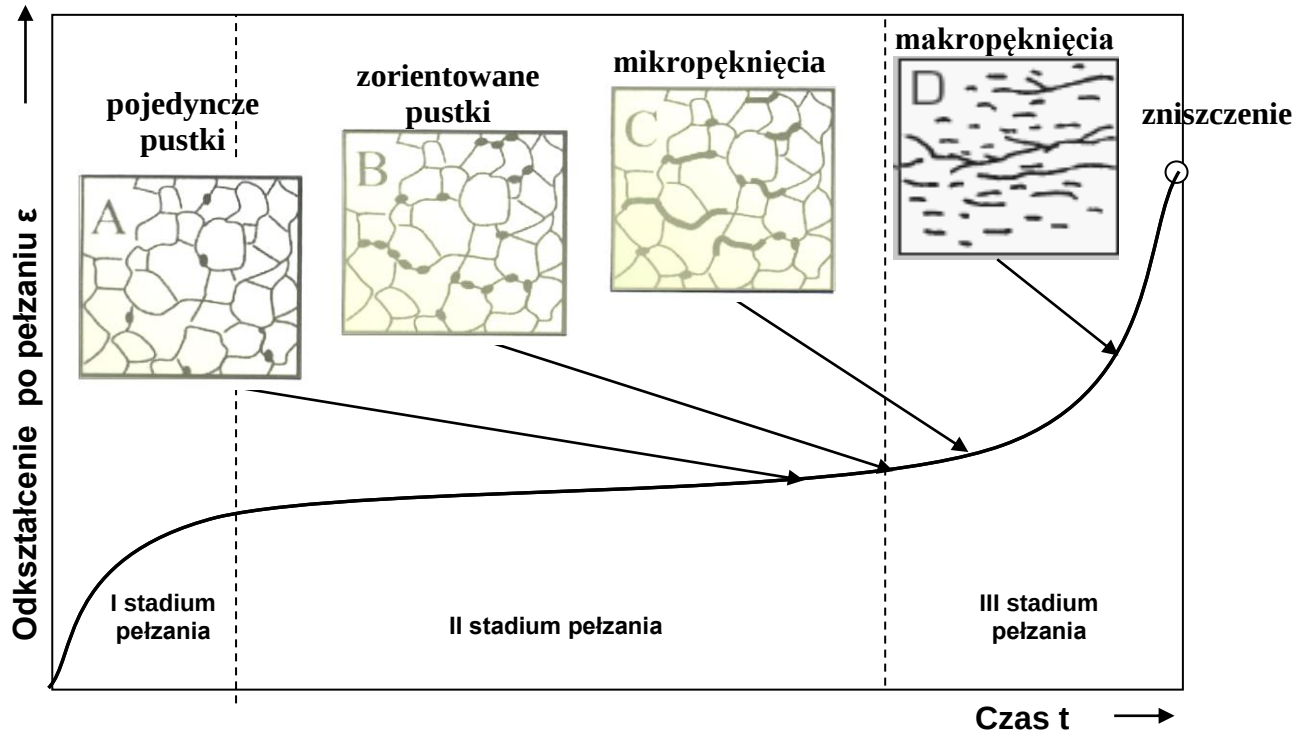
Wymienione czynniki niezależnie od stężenia chromu w stali istotnie wpływają na odporność korozyjną, w tym na przyczepność warstw tlenkowych, a także na spadek umocnienia stali i jej odporność na pękanie. Stabilność tych procesów zależna od składu chemicznego stali, rodzaju osnowy i struktury w stanie wyjściowym, decyduje o zakresie stosowalności poszczególnych gatunków stali przeznaczonych do pracy w warunkach pełzania w określonych warunkach temperatury, stanu naprężenia i środowiska.

Przykładowy model ewolucji struktury w wyniku długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, od struktury perlitu z ferrytem do ferrytu z wydzieleniami węglików pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Model ewolucji struktury niskostopowej stali ferrytyczno-perlitycznej 13CrMo4-5 w wyniku eksploatacji w warunkach pełzania (bez uszkodzeń wewnętrznych):
a) płytki cementytu w perlicie, pojedyncze wydzielenia na granicach i wewnątrz ziarn ferrytu,
b) fragmentacja płytek cementytu w perlicie z częściową koagulacją węglików, wydzielenia na granicach ziarn ferrytu miejscami tworzące łańcuszki,
c) całkowita koagulacja wydzieleń w perlicie, łańcuszki wydzieleń na granicach ziarn, nieliczne drobne wydzielenia wewnątrz ziarn ferrytu.
d) ferryt z wydzieleniami zróżnicowanej wielkości, równomiernie rozmieszczonymi wewnątrz i łańcuszkami zróżnicowanej wielkości na granicach ziarn.

Degradacja struktury, zapoczątkowana powstawaniem znacznej ilości wydzieleń, szczególnie na granicach ziarn, prowadzi do inicjacji porów, powstawania i rozwoju pustek, tworzenia się łańcuszków pustek, które poprzez koalescencję powodują występowanie mikroszczelin, mikropęknięć, a w rezultacie makropęknięć oraz utratę ciągłości materiału i zniszczenie elementu konstrukcyjnego. Uproszczoną sekwencję rozwoju uszkodzeń od powstawania pojedynczych pustek aż do powstania nieciągłości materiału w postaci makropęknięć pokazano na rys.11.



Rys. 11. Wybrane stadia wewnętrznych uszkodzeń materiału podczas eksploatacji w zależności od stopnia zaawansowania procesu pełzania.

W wyniku procesów aktywowanych cieplnie wywołanych oddziaływaniem temperatury i ciśnienia w długim okresie czasu, zmiany następujące w strukturze materiału skutkują pogarszaniem się zespołu jego własności użytkowych. Powoduje to obniżenie zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń eksploatacyjnych. W praktyce, niezależnie od struktury stanu wyjściowego, następuje zmniejszenie wartości określających właściwości wytrzymałościowe (R_m, R_e, R_e^t), przy równoczesnej utracie zdolności do odkształceń, której odzwierciedleniem są uzyskiwane wartości: wydłużenia w próbie rozciągania oraz pracy łamania w próbie udarności (A, KV).

Wskaźnikiem ilustrującym obniżanie się właściwości wytrzymałościowych jest ponadto wartość twardości, odniesiona do obrazu występującej struktury. Jeżeli charakter zachodzących zmian można uznać za stosunkowo łatwy do przewidzenia, to ich wymiar liczbowy w odniesieniu do wymagań dla materiału w stanie wyjściowym, dla różnych stanów zdegradowanej struktury po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, jest w praktyce nie do określenia bez przeprowadzenia odpowiednich badań.

Dynamika zachodzących zmian zależy przede wszystkim od typu struktury, stanu wyjściowego materiału oraz od rzeczywistych, eksploatacyjnych warunków temperaturowo-naprężeniowych. Ponadto, występujące możliwe różnice w strukturze stanu wyjściowego dla danego gatunku stali mogą dodatkowo zwiększać lub zmniejszać skłonność materiału w stanie wyjściowym do rodzaju zachodzących zmian w strukturze i ich szybkości w wyniku eksploatacji.

4. OCENA STANU ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA

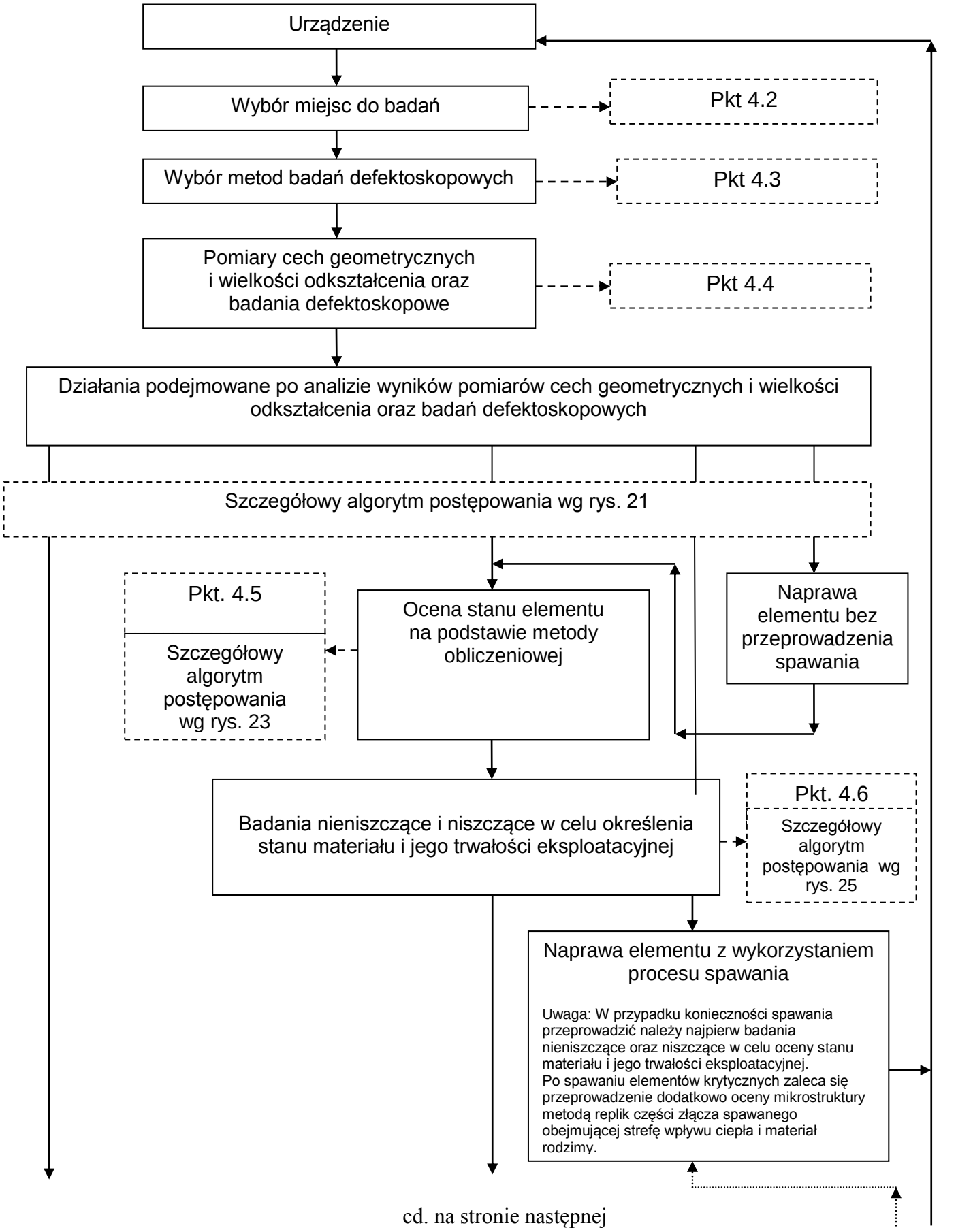
4.1. Główne etapy oceny stanu elementów pracujących w warunkach pełzania.

Rys. 12 przedstawia ogólny algorytm postępowania obejmujący główne etapy oceny stanu elementów pracujących w warunkach pełzania.

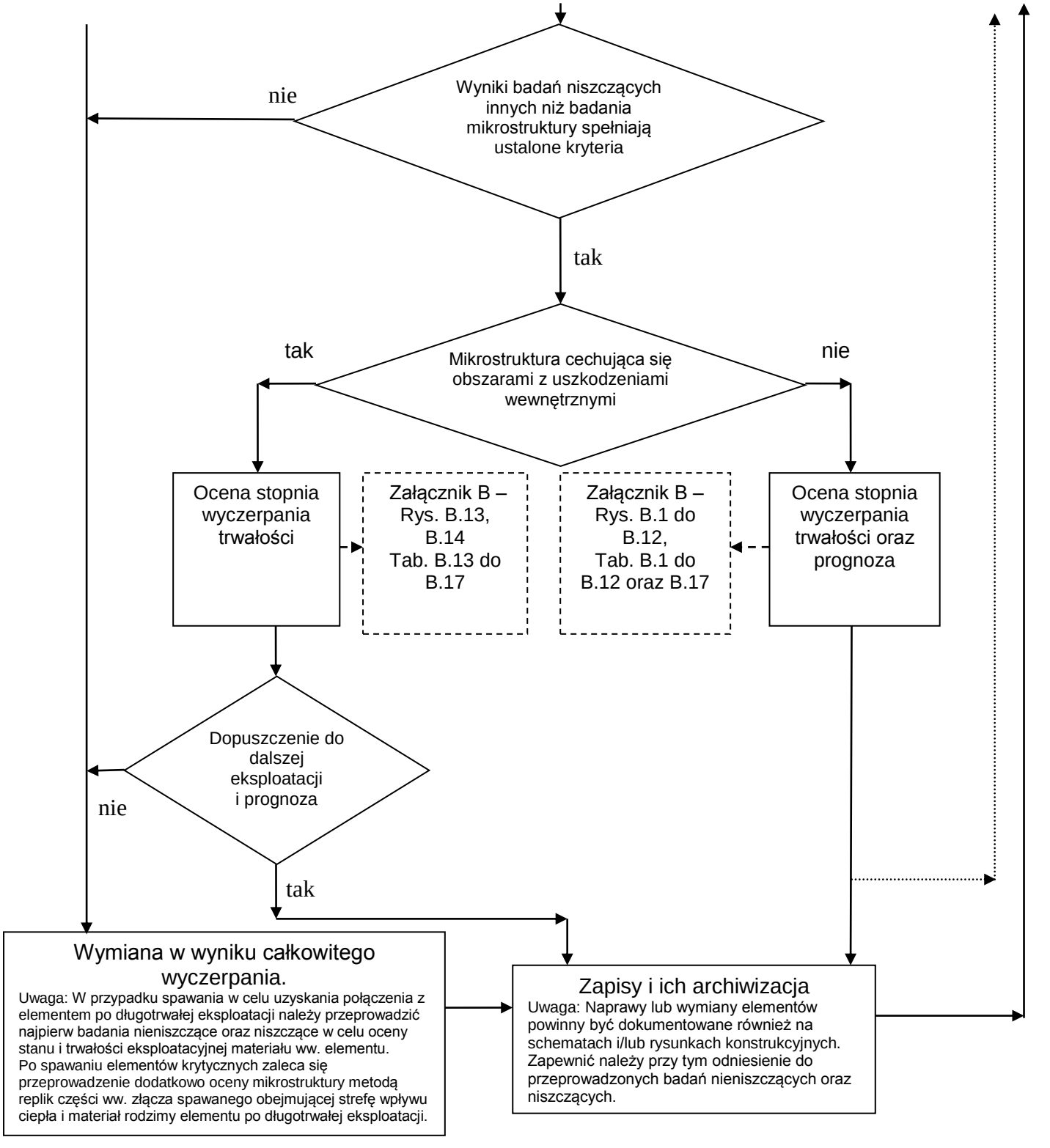
Podczas analizy trybu postępowania uwzględnić należy, że szacowanie stopnia wyczerpania elementu za pomocą metody obliczeniowej opartej na regule ułamków trwałości nie jest wymagane w każdym przypadku. Zastosowanie tej procedury może wynikać z:

- opracowanych szczegółowych instrukcji, programów lub planów dotyczących diagnostyki i oceny trwałości elementów,
- konieczności spełnienia wymagań norm, np. PN-EN 12952-4.

W Załączniku A niniejszego opracowania zamieszczono propozycję doboru metod badawczych i częstotliwości badań dla wybranych elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania od początku eksploatacji. Dotyczy to jednak trybu nadzoru standardowego, w którym wykorzystanie algorytmu postępowania wg rys. 12 ma miejsce na etapie wyznaczenia kolejnych terminów badań wynikających z określenia czasu bezpiecznej eksploatacji, po wykonaniu badań nieniszczących i niszczących w celu oceny stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej.



cd. na stronie następnej



Rys. 12. Główne etapy oceny stanu elementu.

4.2. Wybór miejsc do badań [1, 2].

Wybór elementów i miejsc do badań ma niebagatelne znaczenie, decyduje bowiem o doborze odpowiednich metod badań, czasochłonności, trafności decyzji i ekonomiczności przedsięwzięć.

Zasadniczo o wyborze miejsc do badań decyduje naprężeniowy stan elementu. Na ogół są to obszary charakteryzujące się najwyższym stopniem wytężenia i występowaniem spiętrzeń naprężeń wewnętrznych, np.: kolana, mostki, otwory czy złącza spawane.

Wybór reprezentatywnych miejsc do badań materiałowych jest istotnym elementem wiarygodności przeprowadzanej oceny stanu materiału. Przeprowadzany jest na podstawie:

- analizy dokumentacji technicznej,
- analizy danych eksploatacyjnych oraz wyników pomiarów rzeczywistych parametrów pracy w czasie eksploatacji, dostarczonych przez użytkownika obiektu,
- zebrania i analizy doświadczeń eksploatacyjnych,
- wizji lokalnej i przeprowadzenia badań wizualnych,
- oceny wstępnej elementu i materiału metodą obliczeniową,
- sporządzenia mapy występowania defektów na podstawie badań, defektoskopowych i pomiarów,
- analizy stanu naprężeń, odkształceń i temperatury metodą elementów skończonych (MES),
- badań wstępnych (przesiewowych) i analizy porównawczej stanu wytężenia na podstawie pomiaru wybranych własności fizycznych.

W przypadku, gdy istnieje konieczność bardzo precyzyjnego wyznaczenia obszaru do badań diagnostycznych, to wówczas zaleca się wykonanie, na podstawie badań defektoskopowych, mapy występowania nieciągłości materiałowych oraz przeprowadzenie analizy stanu naprężeń np. metodą elementów skończonych (MES) lub z wykorzystaniem badań tensometrycznych.

Dla wyznaczenia miejsc najbardziej wytężonych, będących potencjalnymi obszarami dla wykonania nieniszczących badań mikrostruktury, zaleca się zastosowanie nieniszczących badań właściwości fizycznych. Spośród wielu metod, zweryfikowaną w praktyce przemysłowej jest metoda WIT polegająca na równoczesnym wykorzystaniu w ocenie zmierzonego w badaniach ultradźwiękowych współczynnika intensywności tłumienia oraz twardości wyznaczonej za pomocą zmodyfikowanego młotka Poldiego. Inną metodą jest pomiar wielkości szumu Berkhausena.

Wyznaczone ww. metodami porównawczymi obszary, w których uzyskano najbardziej niekorzystne wyniki stanowią potencjalne miejsca występowania największego wytężenia, reprezentatywne dla badanego elementu.

Zarówno doświadczenia eksploatacyjne, analiza pomiarów rzeczywistych parametrów pracy oraz czasu eksploatacji odniesionego do obliczeniowego, interpretacja wyników badań wizualnych i dokonanych pomiarów cech geometrycznych a także określenie metodami porównawczymi wybranych własności fizycznych, stanowią podstawę wyboru rodzaju badań diagnostycznych oraz wstępnie obszarów badań w elemencie.

Sporządzanie map obszarów o największym natężeniu występowania defektów jest etapem poprzedzającym opracowanie modelu stanu naprężeń wybranych elementów krytycznych pracujących w warunkach pełzania. Do sporządzania takich map wykorzystywane są wyniki badań diagnostycznych prowadzonych podczas planowanych, okresowych przeglądów kotłów. Sporządzona analiza mapy zdefektowanych obszarów dla wytypowanych elementów krytycznych pozwala przyjąć, że przyczyn ich uszkodzeń należy upatrywać w trzech głównych grupach czynników: eksploatacyjnych, wynikających z wadliwej konstrukcji oraz niewłaściwej technologii wykonania.

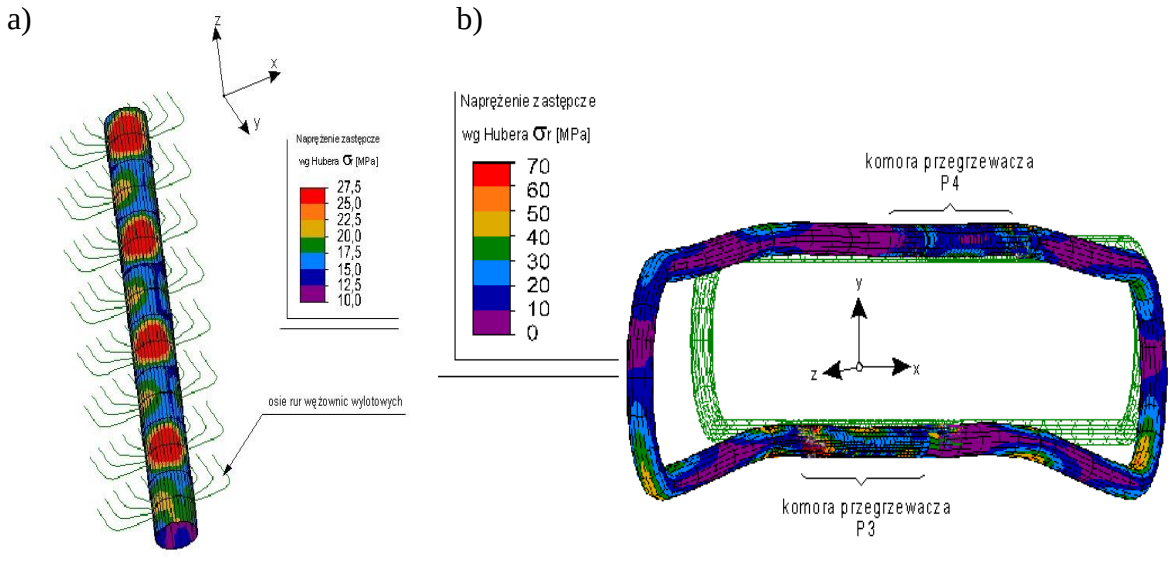
W celu prawidłowego zidentyfikowania przyczyn uszkodzeń niezbędne jest precyzyjne odwzorowanie warunków pracy, a szczególnie rozkładu temperatury panującej w elemencie i jej gradientu. Umożliwia to wyznaczenie pola wytężeń w poszczególnych miejscach elementów, w różnych warunkach pracy. Ze względu na złożoność zjawisk decydujących o wytężeniu, a jednocześnie o trwałości elementów, nie jest możliwe analityczne ujęcie zagadnienia rozkładu naprężeń w ściankach obiektów. W związku z tym w analizie wytężenia materiału wykorzystywana jest metoda elementów skończonych (MES). Ze względu na złożoność obiektów, obliczenia rozkładu naprężeń w ściankach elementów krytycznych przeprowadza się najczęściej w dwóch etapach. W etapie pierwszym określa się wielkości sił wewnętrznych (wynikających z rozszerzalności cieplnej) obciążających składowe części elementu i wywołane nimi naprężenia na przekroju jego ścianki. W etapie drugim badany jest wpływ zmienności obciążeń termicznych wynikających z nieustalonych warunków pracy analizowanego obiektu na wytężenie materiału w wybranych węzłach konstrukcyjnych.

Wybrane fragmenty takiej analizy wytężenia na przykładzie komory wylotowej przegrzewacza pary pierwotnej wyższego stopnia kotła o dużej wydajności pokazano w postaci graficznej na rys. 13.

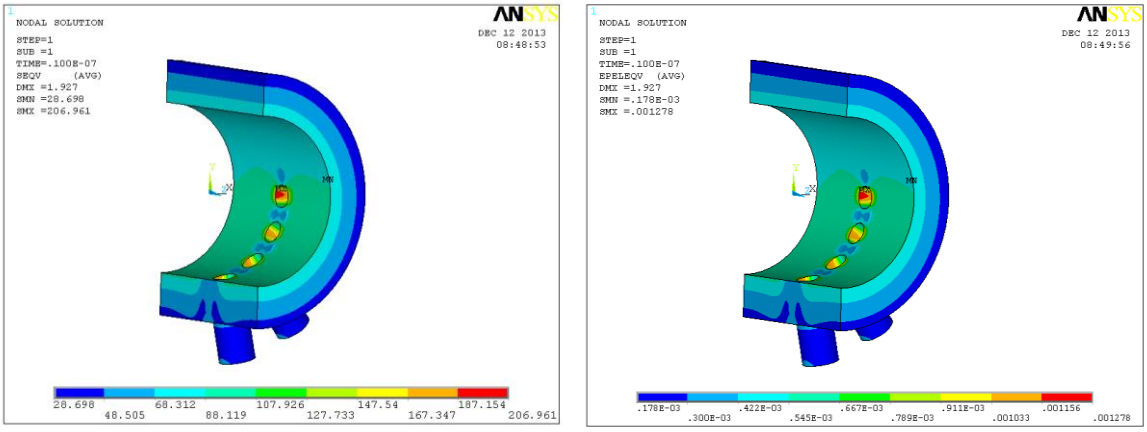
Na rys. rys. 13a przedstawiono część komory przegrzewacza z rozkładami naprężeń zastępczych obliczonych wg hipotezy Hubera a na rys 13b. wynik analizy wpływu sposobu mocowania komór przegrzewaczy do belek nośnych, z zaznaczeniem lokalnego spiętrzenia naprężeń jako skutku ograniczonej rozszerzalności cieplnej zespołu przegrzewaczy na wytężenie materiału w wybranych węzłach konstrukcyjnych.

Natomiast na rys. 14 pokazano przykład analizy wytężenia materiału płata komory przegrzewacza, przeprowadzonej w obszarze mostków na wewnętrznych krawędziach otworów, w zakresie sumarycznych naprężeń zredukowanych i zredukowanych odkształceń.

W przypadku rurociągów, po przeprowadzeniu pomiarów geodezyjnych (patrz pkt. 4.4), oraz opracowaniu modelu instalacji, przeprowadzić należy analizę naprężeń wywołanych przez kombinację obciążeń (np. termicznych, pełzaniowych czy obwodowych) działających na rurociąg w stanie zimnym, gorącym i podczas próby wodnej. Do obliczeń konstrukcyjnych zaleca się wykorzystywanie wartości wyników badań rzeczywistych własności mechanicznych. W przypadku braku możliwości wykonania badań niszczących dopuszcza się stosowanie odpowiednich wartości normatywnych. Naprężenia wyznaczone zgodnie z wymaganiami stosownych dokumentów odniesienia nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnej. Najbardziej narażone na pęknięcia są zazwyczaj takie elementy instalacji jak: trójniki, czwórniki, kolana, zwężki oraz złącza spawane.



Rys. 13. Rozkład naprężeń zastępczych: a) w komorze przegrzewacza pary, b) zespołu komór przegrzewaczy po odkształceniu cieplnym oraz jego postać geometryczna przy założeniu sztywnego mocowania komór do belek nośnych.



Rys.14. Rozkład na wewnętrznej powierzchni komory wylotowej pary pierwotnej: a) sumarycznych naprężeń zredukowanych w MPa, b) zredukowanych odkształceń pełzania w %.

4.3. Badania nieniszczące defektoskopowe [1, 2].

4.3.1. Wybór metody badań.

W celu ujawnienia pęknięć powierzchniowych oraz wad wewnętrznych stosowane są następujące metody:

- badania wizualne bezpośrednie,
- badania wizualne pośrednie endoskopowe z użyciem elastycznej sondy o małej średnicy, do oględzin niedostępnych powierzchni wewnętrznych,
- badania penetracyjne - do wykrywania pęknięć powierzchniowych ,
- badania magnetyczno–proszkowe - do wykrywania pęknięć powierzchniowych,
- badania ultradźwiękowe (objętościowe) - do wykrywania wad wewnętrznych w materiale i złączach spawanych oraz do określenia głębokości pęknięć jak również pomiaru rzeczywistej grubości ścianki elementu,
- badania radiograficzne - do wykrywania wad wewnętrznych w materiale i złączach spawanych,

Badania defektoskopowe: penetracyjne, magnetyczno–proszkowe, ultradźwiękowe i radiograficzne są dobierane indywidualnie dla każdego elementu, w zależności od jego rodzaju, charakteru pracy, dostępności z punktu widzenia wykonania danego rodzaju tych badań oraz czasu eksploatacji odniesionego do przyjętego czasu obliczeniowego.

Badania wizualne bezpośrednie stosuje się dla wszystkich dostępnych powierzchni elementów natomiast badania wizualne pośrednie endoskopowe stosuje się obligatoryjnie dla

wszystkich grubościennych elementów ciśnieniowych, jeżeli istnieje możliwość wsunięcia sondy z wziernikiem przez istniejące otwory wszelkiego rodzaju króćców po ich odcięciu.

W przypadku badania elementu ciśnieniowego nie zawierającego złączy spawanych stosować należy normy i kryteria występujące w specyfikacji projektowej.

Podczas wyboru metody badań złączy spawanych spełnić należy wymagania normy PN-EN ISO 17635. Technikę i klasę badania ustala się na podstawie Załącznika A ww. normy na podstawie wymaganego poziomu jakości złącza określonego w dokumentacji urządzenia.

4.3.2. Charakterystyka metod badań.

Badania wizualne bezpośrednie

Każde badania należy rozpocząć od oględzin wizualnych obiektu, które dostarczają istotnych informacji w skali makro o ogólnym stanie elementu. W szczególności ujawniają obecność przebarwień, pęknięć na powierzchni, morfologii przełomu, trwałych odkształceń, a także skutków procesów niszczenia korozyjnego i erozyjnego materiału. Umożliwiają analizę nieciągłości powierzchniowych o długości większej od 1 mm.

W przypadku wężownic oględziny zewnętrzne są wykonywane w celu ujawnienia:

- przebarwienia i/lub uszkodzenia oraz odkształcenia poszczególnych wężownic,
- stanu powierzchni zewnętrznej, w tym osadzania się produktów spalania,
- stanu elementów mocowania.

Dla komór, kolektorów zbiorczych i regulatorów temperatury, oględziny zewnętrzne stosuje się aby wykazać czy:

- nie nastąpiło przebarwienie i/lub uszkodzenie części składowych ocenianego elementu,
- element posiada swobodę przemieszczania się w projektowym i rzeczywistym oczekiwanym zakresie,
- nie nastąpiło uszkodzenie lub zerwanie elementów zamocowań,

W przypadku rurociągów oględziny zewnętrze są wykonywane na całej ich trasie aby wykazać czy:

- nie występują uszkodzenia poszczególnych elementów,
- są zachowane założone w projekcie kierunki spadków rurociągów,
- podpory stałe lub przesuwne przylegają do podłoża na całej jej powierzchni,
- rurociąg ma swobodę przemieszczania się w projektowym i rzeczywistym oczekiwanym zakresie,
- nie nastąpiło zerwanie cięgien w zamocowaniach,
- obejmy rurociągu, belki wsporcze i uchwyty cięgien nie są uszkodzone,

- ugięcia robocze sprężyn obydwu cięgien zamocowania dwucięgnowego są jednakowe,
- sprężyny lub cięgna nie stykają się z rurociągiem, elementem konstrukcyjnym lub czy nie są trwale odkształcone.

Wyniki tych badań są wykorzystywane w analizie oceny stanu elementów oraz przy podejmowaniu decyzji o wyznaczeniu reprezentatywnych miejsc do nieniszczących badań mikrostruktury metodą replik i miejsc pobrania materiału do badań niszczących.

Badania wizualne pośrednie endoskopowe

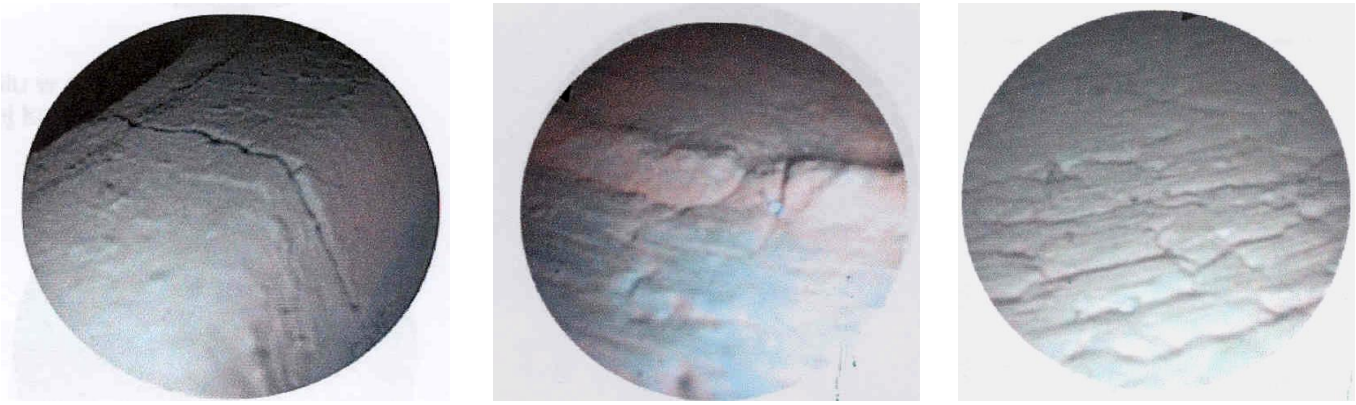
Badania endoskopowe, jako pośrednie badania wizualne, służą do ujawniania uszkodzeń elementów od ich strony wewnętrznej. Stosowane są w celu ujawnienia stanu powierzchni wewnętrznej: płaszczy komór i regulatorów temperatury, wtrysków i koszulek ochronnych regulatorów temperatury, otworów króćców, korpusów i innych części składowych zasuw i zaworów, złączy spawanych od strony grani.

Najczęściej ujawnianymi uszkodzeniami od strony powierzchni wewnętrznej badanych elementów są:

- pęknięcia ‘słoneczkowe’ na krawędziach otworów króćców i propagujące w obszary mostków elementów grubościennych,
- pęknięcia mostkowe,
- pęknięcia wzdłużne i poprzeczne w grani spoin obwodowych,
- pęknięcia i wypłukania materiału wzdłuż grani spoin obwodowych w strefie wpływu ciepła,
- pęknięcia w materiale płaszcza komór, regulatorów temperatury oraz elementów rurociągów.

Przykłady uszkodzeń powierzchni wewnętrznej ujawnianych w badaniach endoskopowych pokazano na rys.15.

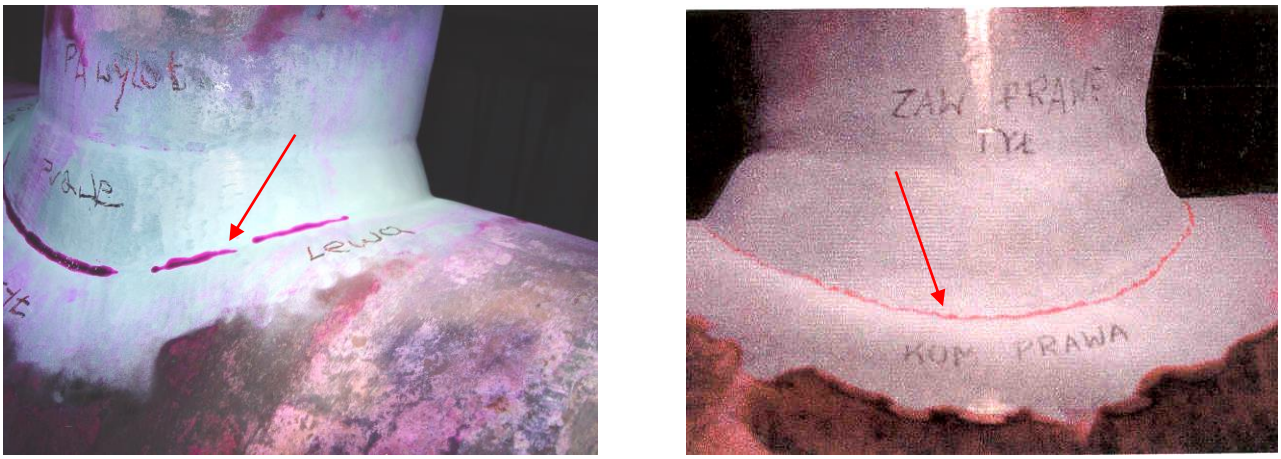
Pęknięcia mostkowe w komorze	Pęknięcia poprzeczne w grani spoiny obwodowej	Pęknięcia w materiale płaszcza komory



Rys. 15. Przykłady najczęściej występujących uszkodzeń powierzchni wewnętrznej elementów części ciśnieniowej kotłów i rurociągów parowych ujawnianych w badaniach endoskopowych.

Badania penetracyjne umożliwiają wykrywanie wad różnie zorientowanych otwartych do powierzchni. Stosowane są np. do badania złączy spawanych i kontroli stanu powierzchni elementu.

Nieciągłości wykrywane tą metodą to przede wszystkim: pęknięcia gorące i zimne, przyklejenia powierzchniowe, braki przetopu, pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia wywołane korozją naprężeniową, zawalcowania itp. Badania penetracyjne umożliwiają kontrolę obiektów wykonanych z materiałów nieferromagnetycznych, które nie mogą być badane metodami magnetycznymi. Umożliwiają wykrywanie nieciągłości znajdujących się w miejscach nagłych zmian przekroju obiektu, których wykrycie jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe innymi metodami badań, a także nieciągłości w obiektach o małych wymiarach - w tym przypadku badania penetracyjne stanowią często jedyną możliwą do zastosowania metodą badawczą. Na rys. 16 przedstawiono przykład zastosowania badań penetracyjnych w celu ujawnienia pęknięć obwodowych złączy kątowych zamocowań komór wylotowych przegrzewacza pary pierwotnej.



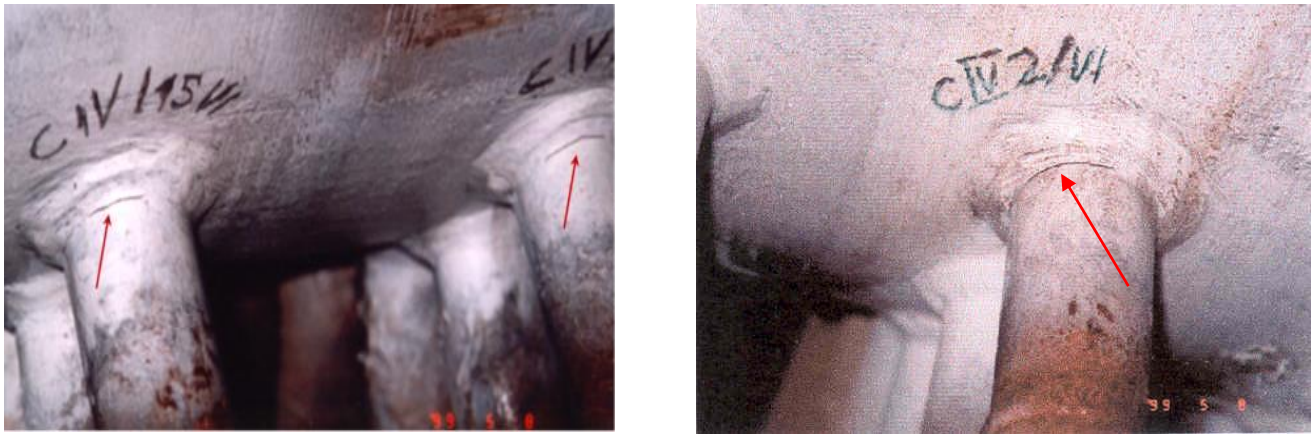
Rys. 16. Pęknięcie w obwodowym złączu kątowym zawieszenia komór wylotowych przegrzewacza pary ujawnione za pomocą badań penetracyjnych.

Badania magnetyczno – proszkowe umożliwiają wykrywanie nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych. Stosuje się je wyłącznie dla materiałów ferromagnetycznych. Czułość badania zależy od zastosowanej techniki badania. Badania magnetyczno – proszkowe są stosowane głównie do badania kątowych i doczołowych złączy spawanych.

Przykład pęknięć w złączach kątowych króćców ujawnionych metodą magnetyczno-proszkową w komorze wlotowej przegrzewacza pary pierwotnie przegrzanej kotła o dużej wydajności pokazano na rys.17.

Komory wlotowe i wylotowe przegrzewaczy pary należą do najbardziej obciążonych elementów kotłów. Stanowią tzw. elementy krytyczne, pracujące w najtrudniejszych warunkach oraz przy najwyższych parametrach temperaturowo–naprężeniowych. W wielu przypadkach ulegają uszkodzeniu lub zniszczeniu wcześniej niż inne elementy. Szczególnie narażone na uszkodzenia są komory pracujące powyżej temperatury granicznej, w warunkach pełzania oraz w wyniku oddziaływania gradientów temperatury i ciśnienia, występujących w trakcie odstawiania i uruchamiania kotła.

Wieloletnie doświadczenia i wyniki nieniszczących badań diagnostycznych przegrzewaczy pary kotłów dowodzą, że największa częstość uszkodzeń ma miejsce w komorach wylotowych przegrzewaczy ostatnich stopni pary pierwotnej oraz pary wtórnej i to często nieznacznie poniżej lub nieznacznie powyżej obliczeniowego czasu pracy. Uszkodzenia ujawnia się zarówno na powierzchni wewnętrznej jak i na powierzchni zewnętrznej komór. Najczęściej miejscami występowania pęknięć na powierzchni zewnętrznej są złącza doczołowe obwodowe, a także złącza kątowe króćców oraz elementy zamocowań.



Rys. 17. Przykłady pęknięć obwodowych złączy kątowych na powierzchni zewnętrznej króćców komór przegrzewacza pary ujawnione metodą magnetyczno-proszkową.

Objętościowe metody badań nieniszczących

Badania ultradźwiękowe umożliwiają ujawnienie nieciągłości wewnętrznych oraz określenie ich wielkości i lokalizacji. Badania te pozwalają szczególnie na ujawnienie nieciągłości płaskich korzystnie zorientowanych (najlepiej prostopadle) względem wiązki fal ultradźwiękowych. Wykorzystywane są głównie do kontroli złączy spawanych elementów ciśnieniowych oraz do kontroli ciągłości materiału kolan, króćców i rur wężownic

Badania ultradźwiękowe zapewniają wykrywanie nieciągłości objętościowych usytuowanych wewnątrz ale również na powierzchni. Możliwa jest lokalizacja i ocena wymiarów głębokości i długości od około 0,7 mm.

Metoda ultradźwiękowa stosowana jest także do pomiaru grubości elementów ciśnieniowych (płaszczy , króćców, rur wężownic itp.).

Badania radiograficzne umożliwiają ujawnienie wewnętrznych nieciągłości materiałowych, głównie przestrzennych. Nieciągłości płaskie mogą być wykrywane, gdy zorientowane są korzystnie do kierunku rozchodzenia się promieniowania jonizującego. Stosowane są głównie w badaniach doczołowych złączy spawanych.

4.3.3. Zakres badań.

Badania defektoskopowe elementów kotłów i rurociągów należy przeprowadzać zgodnie z opracowanym planem badań uzgodnionym i zaakceptowanym przez UDT.

Ustalony zakres musi uwzględniać badania:

a) doczołowych oraz kątowych złączy spawanych, a w szczególności;

- złączy króćców do komór przegrzewacza pary, gdzie pęknięcia występują najczęściej w obszarze przejścia spoiny w króciec lub płaszcz. Umiejscowione są zazwyczaj jednostronnie lub naprzeciw siebie, sporadycznie na całym obwodzie. Lokalizacja tych pęknięć zależna jest od przyczyn ich powstania (np. trwałe odkształcenie płaszcza komory, występowanie momentu zginającego na króćcach, itp.),
- doczołowych złączy spawanych płaszcza komór przegrzewacza pary, gdzie pęknięcia najczęściej występują w miejscach przejścia spoiny w materiał rodzimy oraz w strefie wpływu ciepła. Są to zazwyczaj pęknięcia wzdłużne, które swój początek mają na powierzchni zewnętrznej, a ich głębokość zależy od lokalizacji złącza,
- doczołowych złączy spawanych elementów rurociągów parowych, gdzie pęknięcia występują najczęściej przy połączeniu rurociągu z wszelkiego rodzaju kształtkami. Mają najczęściej charakter obwodowy i występują głównie w samej spoinie lub w strefie wpływu ciepła. Miejscem inicjacji pęknięć jest zazwyczaj powierzchnia zewnętrzna rurociągu. Pęknięcia poprzeczne występują rzadko i obejmują część lub całość lica spoiny, czasem wraz z przejściem w materiał rodzimy,
- złączy spawanych króćców rur obejściowych, odwodnień i odpowietrzeń elementów rurociągów parowych. Uszkodzenia najczęściej występują w miejscach przejścia spoiny w króciec lub materiał rodzimy rurociągu i mają zazwyczaj charakter obwodowy.

W przypadku ujawnienia pęknięć, należy rozważyć przeprowadzenie naprawy, która może być wykonana wyłącznie po przeprowadzeniu badań stanu mikrostruktury metodą replik dla złącza na okoliczność ewentualnych uszkodzeń pełzaniowych (materiał rodzimy, strefa wpływu ciepła, spoina, strefa wpływu ciepła, materiał rodzimy), dokonaniu oceny i wydaniu orzeczenia dotyczącego stanu materiału.

Naprawę przeprowadza się poprzez szlifowanie w miejscu pęknięć aż do ich całkowitego zaniku. W przypadku powstania ubytków poniżej grubości obliczeniowej należy dokonać naprawy z zastosowaniem spawania. W złączach doczołowych, gdy długość pęknięcia przekracza połowę jego obwodu to naprawie należy poddać całe złącze spawane.

Obszar podlegający naprawie należy poddać ponownie badaniom defektoskopowym. W przypadku elementów krytycznych kotła oraz rurociągów parowych zaleca się również przeprowadzenie oceny mikrostruktury metodą replik dla części złącza obejmującej strefę wpływu ciepła oraz materiał rodzimy elementu po długotrwałej eksploatacji. Naprawie nie poddaje się elementów, które uległy trwałemu odkształceniu o wielkości przekraczającej wartości dopuszczalne oraz których stan mikrostruktury to uniemożliwia, zgodnie z wydanym orzeczeniem.

b) otworów pod króćce rurociągów parowych, wężownic, odpowietrzeń, odwodnień, wtrysku wody, gdzie pęknięcia mogą występować na wewnętrznej powierzchni otworów. Przyjmują kierunek promieniowy tzw. ‘słoneczka’, a ich inicjacja i rozwój następuje zawsze od krawędzi otworu przy powierzchni wewnętrznej.

Przy otworach odpowietrzeń, odwodnień i wtrysku wody pęknięcia powstają najczęściej bez odkształceń samego otworu. Natomiast, gdy trwałemu odkształceniu ulega płaszcz komory lub schładzacza, to wówczas pęknięcia występują we wszystkich otworach. Ich kierunek najczęściej jest zgodny z kierunkiem osi komory.

W celu ujawnienia pęknięć otworu należy przeprowadzić badania endoskopowe po uprzednim odcięciu króćca w odległości około 100 mm od płaszcza komory. Obserwacji należy poddać wewnętrzną powierzchnię samego króćca, tworzącą otworu, jak również krawędź i powierzchnię wewnętrzną płaszcza komory w okolicy badanego otworu. Przy otworach wężownic przegrzewaczy króćce do badań należy obcinać na początku, w środku i na końcu komory. Przez takie otwory należy również prowadzić badanie otworów rurociągów w obrębie kotła.

Pęknięcia promieniowe (tzw. ‘słoneczka’) na powierzchni otworów należy usunąć (tylko w przypadku, gdy otwór nie uległ deformacji) przez rozwiercenie (aż do zaniku pęknięć) oraz przyspawanie nowego króćca o zwiększonej średnicy i grubości. Maksymalną średnicę otworu oraz wymiary króćca należy wyliczyć zgodnie z odpowiednimi dokumentami odniesienia. W przypadku, gdy nie ma możliwości rozwiercenia otworu aż do zaniku pęknięcia to wówczas komorę należy wymienić na nową. Jeżeli występują pęknięcia w otworach, które cechuje deformacja, to naprawa przez rozwiercanie jest niedopuszczalna.

Króćce, w których wykryto pęknięcia poprzeczne na powierzchni wewnętrznej, należy wymienić na nowe.

c) kolan i łuków

W rurociągach parowych, pęknięcia występują w strefie rozciągania kolana zawsze od powierzchni zewnętrznej oraz w strefach obojętnych na powierzchni wewnętrznej. Strefy rozciągania kolan należy sprawdzić metodą magnetyczno – proszkową, natomiast strefy obojętne

metodą ultradźwiękową. Ponadto na kolanach i łukach, z uwagi na erozję i korozję, należy przeprowadzić pomiar grubości ścianki.

W przypadku wykrycia nieciągłości w strefie rozciągania lub w strefie obojętnej o wymiarach większych od dopuszczalnych (wyznaczonych na podstawie odpowiedniego dokumentu odniesienia) należy dokonać wymiany kolan. Jeżeli pomierzona grubość ścianki jest mniejsza od grubości obliczeniowej to kolano należy także wymienić na nowe.

d) zasuw, zaworów, trójników i czwórników

Pęknięcia występują najczęściej w trójnikach i czwórnikach a niekiedy w zaworach rurociągów parowych i zwężkach. Zlokalizowane są najczęściej w złączach spawanych oraz w obszarach nagłych zmian średnic. Przyjmują kierunek obwodowy i poprzeczny.

W zasuwach pęknięcia występują zazwyczaj na powierzchni wewnętrznej i wywołane są naprężeniami cieplnymi. W celu wykrycia uszkodzeń w ww. elementach należy przeprowadzić badania magnetyczno - proszkowe. W przypadku ujawnienia pęknięć, naprawę należy przeprowadzić tak jak dla złączy spawanych.

e) ścianki płaszcza

Erozja od powierzchni zewnętrznej płaszcza występuje jako zjawisko wtórne od dmuchania pary przez nieszczelne króćce lub rury i jest usytuowana w ich okolicy. Czasem spotyka się erozję na powierzchniach wewnętrznych. Występuje przeważnie w schładzaczach pary, w okolicy wtrysku wody.

Do określenia wielkości powstałych ubytków stosuje się grubościomierz ultradźwiękowy, a odczytane wyniki porównuje się z wartością obliczeniowej grubości ścianki elementu. Jeżeli pomierzona grubość ścianki jest mniejsza od grubości obliczeniowej i ma charakter miejscowy, to płaszcz należy poddać naprawie przez spawanie ubytków. Przy znacznych ubytkach materiału i dużej ich powierzchni wskazana jest częściowa lub całkowita wymiana płaszcza komory.

4.4. Pomiary cech geometrycznych i wielkości odkształceń trwałych [1, 2].

Pomiary umożliwiają wyznaczenie:

- grubości ścianki,
- ugięcia komory,
- trwałego odkształcenia denek komór,
- przemieszczeń oraz kierunków nachylenia rurociągów
- wielkości i prędkości trwałego odkształcenia.

Pomiary grubości ścianki

Do pomiaru grubości lub określenia wielkości powstałych ubytków ścianki elementu zazwyczaj stosuje się grubościomierz ultradźwiękowy. Pomiar ten przeprowadza się w punktach wyznaczonych siatką pomiarową, dlatego stosuje się go głównie do wyznaczenia stopnia korozji oraz erozji o charakterze ogólnym. Punkty siatki pomiarowej powinny być rozmieszczone dostatecznie gęsto, tak aby uwzględniały miejsca o minimalnej grubości ścianki. W przypadku, gdy największe ubytki znajdują się w obszarach między punktami siatki pomiarowej i jest mało prawdopodobne, aby w tak przeprowadzonym badaniu zostały wykryte, to wtedy pomiar należy uzupełnić o punkty nie objęte siatką pomiarową.

W przypadku, gdy w ocenianym elemencie występuje erozja lub korozja o charakterze lokalnym to o stopniu degradacji elementu i możliwości jego dalszej eksploatacji decyduje nie tyle uśredniona grubość ścianki co głębokość poszczególnych ubytków.

Uzyskane wyniki pomiarów (g_r) grubości płaszcza komór i elementów rurociągów należy porównać z wartością obliczeniową grubości ścianki tych elementów (g_o). Komory i rurociągi dopuszcza się do dalszej eksploatacji, gdy wyniki pomiarów grubości nie są mniejsze od grubości obliczeniowej tj.: gdy spełniony jest warunek $g_r \geq g_o$. Jeżeli zmierzona grubość ścianki elementu jest mniejsza od grubości obliczeniowej i ma charakter miejscowy, to tak naruszony element należy poddać naprawie poprzez spawanie ubytków (napawanie). Przy znacznych i rozległych ubytkach materiału wskazana jest, w zależności od stopnia zniszczenia, częściowa lub całościowa wymiana danego elementu.

Wężownice dopuszcza się do dalszej eksploatacji, gdy wyniki pomiaru nie są mniejsze od grubości obliczeniowej (g_o). W przeciwnym przypadku wężownice należy poddać częściowej lub całościowej wymianie.

Pomiar ugięcia komory

Pomiar ugięcia komory określa wielkość jej skrzywienia i wykonywany jest głównie dla komór poziomych przegrzewaczy pary świeżej i wtórnej. Za poziom odniesienia przyjmuje się rozciągniętą na całej długości komory strunę. Pomiar należy wykonać w punktach oddalonych od siebie o 1/10 długości komory (rys. 18). Ponieważ ugięcie komory ma wpływ na wielkość trwałego odkształcenia otworów w płaszczu, dlatego należy wykonać pomiar ich odkształcenia, szczególnie w miejscach o największym stopniu ugięcia.

Komory, dla których strzałka ugięcia przekracza wartość graniczną, nie należy dopuszczać do dalszej eksploatacji Natomiast w przypadku, gdy strzałka ugięcia przyjmuje akceptowalne wartości, ale ze względów technologicznych (brak możliwości odwodnienia) nie może być dłużej eksploatowana, to można komorę poddać naprawie poprzez prostowanie metodą relaksacji po uprzednim usunięciu przyczyn ugięcia.

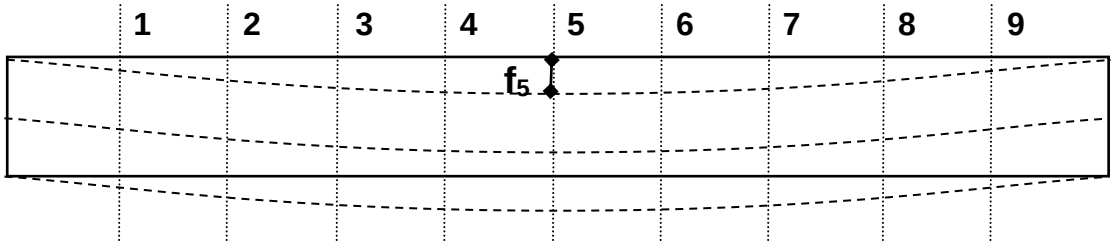
Dopuszczalną krzywiznę komory oblicza się wg wzorów 1) i 2):

$$f_{dop} = 10^{-3} \cdot \frac{l^2}{D_Z} \cdot K \text{ , dla komory z otworami po stronie krzywizny} \qquad 1)$$

$$f_{dop} = 3{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l^2}{D_Z} \cdot K \text{ , dla komory z otworami po stronie przeciwnej do krzywizny} \qquad 2)$$

gdzie:

l – długość komory,
D_z – średnica zewnętrzna komory,
K – współczynnik uwzględniający sposób podparcia. Dla komór zamocowanych K = 0,75÷1 (w zależności od sposobu zamocowania). Dla komór swobodnych K = 1.



punkt pomiaru	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
strzałka ugięcia	f_1	f_2	f_3	f_4	$f_5 \leq f_{dop}$	f_6	f_7	f_8	f_9

Rys. 18. Sposób dokonywania pomiaru ugięcia komory.

Ze względu na istotny wpływ ugięcia komory na wielkość odkształcenia otworów, należy wykonać pomiar ich deformacji, szczególnie w miejscach o największym stopniu ugięcia. Sposób pomiaru podano w niniejszym punkcie.

Nadmierna deformacja płaszcza komory powoduje odkształcenie otworów aż do wystąpienia pęknięć:

– na powierzchni zewnętrznej,

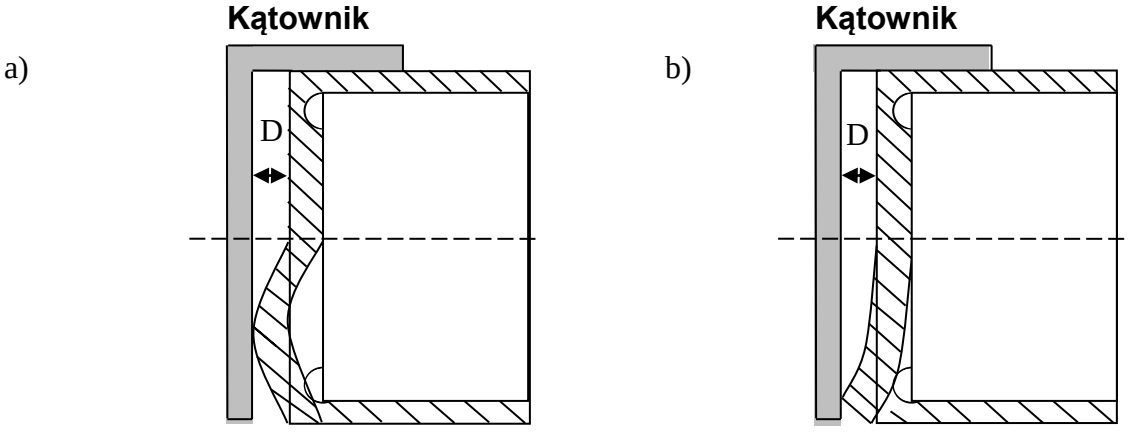
– w obszarze złączy kątowych króćców,
– na tworzącej otworów, oraz
– na mostkach od strony wewnętrznej.

Badania trwałego odkształcenia denek komór

Trwałe odkształcenie denek na powierzchniach zewnętrznych komór może przyjmować postać wklęśnięć, wypukłości i ewentualnie pęknięć w okolicy przejścia denka w promień na wewnętrznej jego powierzchni oraz w rowku odciążającym.

Wykrycie trwałego odkształcenia denka polega na przyłożeniu kątownika w czterech miejscach na obwodzie i zaobserwowaniu ewentualnych wklęśnięć lub wybrzuszeń (rys. 19). Dla denek, w których mogą występować pęknięcia rozprzestrzeniające się od powierzchni wewnętrznych (denka bez rowka odciążającego) należy wykonać badania ultradźwiękowe. Natomiast dla denek z rowkiem odciążającym wewnętrzną powierzchnię należy zbadać metodą endoskopową.

Trwałe odkształcenie denka (*D*) o wielkości większej niż 1 mm na 100 mm średnicy komory jest niedopuszczalne, podobnie jak nieakceptowana jest obecność pęknięć. W takich przypadkach denka należy wymienić na nowe. Przy trwałym odkształceniu mniejszym od podanej powyżej wartości granicznej, denka dopuszcza się do dalszej eksploatacji zwiększając częstość pomiaru odkształcenia.



Rys. 19. Sposób pomiaru a) wybrzuszenia denka, b) wklęśnięcia denka

Pomiar wielkości trwałego odkształcenia

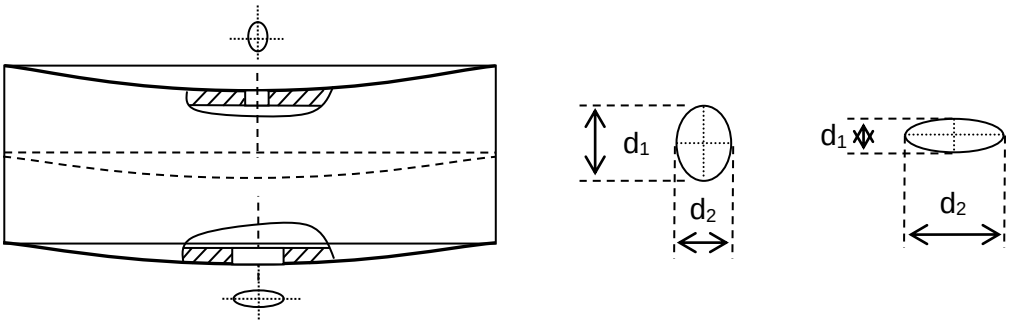
Komory

Pomiar wielkości trwałego odkształcenia dokonywany jest na czopach pomiarowych umieszczonych na powierzchni zewnętrznej płaszcza komory usytuowanych co 90˚ na jej

obwodzie. Do obliczenia wartości całkowitego trwałego odkształcenia niezbędny jest pomiar zerowy wykonany na czopach pomiarowych w dwóch prostopadłych kierunkach. Wartość całkowitego trwałego odkształcenia wynika z różnicy zmierzonych średnic pomiędzy pomiarem po znanym czasie eksploatacji a pomiarem zerowym. Natomiast dla wyznaczenia szybkości pełzania wykonuje się dwa pomiary w dowolnym czasie pracy elementu, jednak odstęp czasu między tymi pomiarami nie może być mniejszy niż 30 000 godzin.

Dotychczasowe doświadczenia diagnostyczne wskazują jednak, że wiarygodność uzyskiwanych pomiarów jest dyskusyjna. Wynika to z subiektywności sposobu dokonywania pomiaru, różnej temperatury otoczenia w czasie dokonywania pomiaru i wpływu współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału narzędzia, a także kultury technicznej w zakresie stanu właściwego utrzymania czopów pomiarowych w stosunku do subtelności oczekiwanych wyników pomiarów średnicy komory.

Miarodajny w odniesieniu do odkształceń trwałych jest natomiast pomiar owalizacji otworów płaszcza komory. Pomiary średnicy otworów należy wykonać, po uprzednim odcięciu króćca na spoinie doczołowej, w dwóch jego osiach tak, aby jeden pomiar był prostopadły do osi wzdłużnej komory (kierunek obwodowy), a drugi równoległy do jej osi (kierunek osiowy). Sposób pomiaru średnic otworów płaszcza komory pokazano w postaci graficznej na rys. 20.



Rys. 20. Sposób pomiaru trwałych odkształceń płaszcza komory.

Odkształcenie otworu oblicza się wg wzoru 3):

$$\varepsilon_k = \frac{2 \cdot (d_{\max} - d_{\min})}{d_{\max} + d_{\min}} \cdot 100\% \qquad 3)$$

gdzie: ε_k –trwałe odkształcenie otworu, d_{max} - maksymalna średnica otworu, d_{min} - minimalna średnica otworu

Do dalszej eksploatacji dopuszcza się komory, dla których odkształcenie otworów (ε_k) nie przekracza 2%. W przypadku wystąpienia większych wartości odkształceń, badany element należy częściowo lub w całości wymienić.

Znając wielkość trwałego odkształcenia można wyznaczyć szybkość pełzania odnosząc uzyskaną wartość do czasu, po którym dokonano pomiaru tego odkształcenia.

Wężownice przegrzewaczy pary

Pomiar wielkości odkształcenia trwałego należy przeprowadzić na dwóch prostopadłych średnicach wewnętrznych rur. Odkształcenie oblicza się wg wzoru 4):

$$\varepsilon_w = \frac{2 \cdot (dw_{\max} - dw_{\min})}{dw_{\max} + dw_{\min}} \cdot 100\% \qquad 4)$$

gdzie:

ε_w – odkształcenie średnicy wewnętrznej,

dw_{max} – maksymalna średnica wewnętrzna,

dw_{min} – minimalna średnica wewnętrzna.

Do dalszej eksploatacji dopuszcza się rury wężownic, których odkształcenie średnic wewnętrznych nie przekracza 2%.

Rurociągi

Wielkość odkształcenia rurociągu wyznacza się za pomocą pomiaru:

– owalizacji otworów (odpowietrzeń i odwodnień). Pomiar ten jest najbardziej miarodajny dla oceny wielkości odkształcenia rurociągu. Pomiar odkształcenia otworów polega na zmierzeniu dwóch prostopadłych średnic (prostopadłej i równoległej do głównej osi rurociągu). Odkształcenie rurociągu oblicza się wg wzoru:

$$\varepsilon_{ro} = \frac{2 \cdot (dw_{\max} - dw_{\min})}{dw_{\max} + dw_{\min}} \cdot 100\% \qquad 5)$$

gdzie:

ε_{ro} – odkształcenie średnicy otworu,

dw_{max} – maksymalna średnica otworu,

dw_{min} – minimalna średnica otworu.

Do dalszej eksploatacji dopuszcza się rurociągi, których owalizacja otworów nie przekracza:

– 2% dla stali molibdenowych i chromowo – molibdenowych,

– 1,5% dla stali chromowo – molibdenowo – wanadowych oraz wysokochromowych stali martenzytycznych.

– owalizacji średnic rurociągu.

Pomiar polega na zmierzeniu dwóch prostopadłych średnic w przekroju rurociągu, w miejscu gdzie grubość ścianki jest najmniejsza. Odkształcenie rurociągu oblicza się wg wzoru 6):

$$\varepsilon_{rs} = \frac{2 \cdot (D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} \cdot 100\% \qquad 6)$$

gdzie:

ε_{rs} – odkształcenie średnicy,

D_{max} – maksymalna średnica rurociągu,

D_{min} – minimalna średnica rurociągu.

Kolana i łuki o owalizacji większej od 8 % nie powinny być dopuszczone do dalszej eksploatacji, a w przypadku stopnia owalizacji od 5 % do 8% należy uwzględnić jej wpływ w obliczeniach rzeczywistego czasu pracy.

W przypadku, gdy wartość dopuszczalna owalizacji przy wytwarzaniu wg odpowiednich norm przedmiotowych przekracza 4%, to wartość graniczną dla tych elementów podczas eksploatacji należy wyznaczyć na podstawie analizy jej wpływu na trwałość eksploatacyjną.

– na czopach pomiarowych (reperach).

Pomiar ten przeprowadzany okresowo stanowi wraz z innymi badaniami diagnostycznymi podstawę do oceny przydatności elementu do dalszej eksploatacji. Zwykle do tych pomiarów używane są specjalne mikrometry, pozwalające kontrolować osiągane przez element odkształcenia. Z reguły czopy instalowane są na rurociągach w dwóch, prostopadłych do siebie kierunkach, usytuowanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi rury. Komplet czopów, tworzących układ pomiarowy, zaleca się umieszczać w takich miejscach rurociągu, w których występują największe obciążenia, lub w których grubość ścianki jest najmniejsza. Nie powinny być one montowane w okolicach spoin, podparć czy zawieszeń. Zazwyczaj instalowane są na prostych odcinkach rurociągów i na prostkach elementów giętych. Rzadko można je spotkać

w miejscach przegięć rur lub na środku łuków i kolan, chociaż właśnie tam odkształcenia są największe. W kotłach czopy pomiarowe instaluje się w szczególności: na komorze wylotowej z kotła i dalej na każdej zmianie jej średnicy, a także w obszarach przekroju o najmniejszych grubościach ścianki. Czopów pomiarowych nie należy spawać do materiałów skłonnych do pęknięć hartowniczych (np. wysokochromowych stali martenzytycznych), w takim przypadku pomiar powinien zostać wykonany bezpośrednio na rurze z nakiełkowanymi punktami pomiarowymi.

Dokładność pomiaru zależy od poprawnego wykonania i zainstalowania czopów pomiarowych, od dokładności przyrządu pomiarowego i miernika temperatury oraz od staranności przeprowadzanych pomiarów.

W celu uniknięcia wpływu rozszerzalności cieplnej badanego materiału na dokładność pomiaru, należy kolejne pomiary przeprowadzać w tej samej temperaturze co pomiar początkowy.

Do obliczenia wartości odkształcenia niezbędny jest pomiar zerowy wykonany nie wcześniej niż po 20 000 godzin pracy rurociągu od pierwszego uruchomienia. Do wyznaczenia prędkości pełzania wystarczą dwa pomiary w dowolnym czasie pracy rurociągu. W tym przypadku do obliczeń niezbędna jest znajomość czasu pracy między pomiarami, który nie może być krótszy niż 20 000 godzin.

Do dalszej eksploatacji dopuszcza się rurociągi, których odkształcenie trwałe nie przekracza:

- 2 % dla stali molibdenowych i chromowo – molibdenowych,
- 1% dla stali chromowo – molibdenowo – wanadowych oraz wysokochromowych stali martenzytycznych.

Dysponując wynikami pomiarów wielkości owalizacji otworów lub średnicy rurociągów można na ich podstawie wyznaczyć prędkość pełzania. W tych przypadkach dopuszczalna prędkość pełzania (V_p) wynosi:

- 1 % na 100 000 godzin dla stali molibdenowych i chromowo – molibdenowych,
- 0,75 % na 100 000 godzin dla stali chromowo – molibdenowo – wanadowych oraz wysokochromowych stali martenzytycznych.

W przypadku pomiaru prędkości pełzania na czopach pomiarowych, dopuszczalna prędkość wynosi:

- 2 % na 100 000 godzin dla stali molibdenowych i chromowo – molibdenowych,

- 1 % na 100 000 godzin dla stali chromowo – molibdenowo – wanadowych oraz wysokochromowych stali martenzytycznych.

Różne wartości prędkości dopuszczalnej wynikają z niejednakowej prędkości pełzania w różnych obszarach elementu.

Dla obydwóch metod pomiaru prędkości pełzania, w przypadku wystąpienia większych prędkości od wartości dopuszczalnej, przy odkształceniach mniejszych od wielkości krytycznej, należy zwiększyć częstość pomiaru prędkości pełzania.

Pomiary przemieszczeń rurociągu, analiza naprężeń, zmiana ustawień i regulacja zamocowań

Pomiar położenia rurociągów wykonuje się metodą geodezyjną na specjalnie zamocowanych reperach. Pomiary przeprowadza się w stanie zimnym i gorącym (5 dni postoju, 5 dni pracy) w okresach remontowych w trzech kierunkach (x, y, z), a z otrzymanych danych oblicza się histerezę przemieszczeń.

Dla każdego punktu pomiarowego wyznacza się przemieszczenie Δ (w mm) dla trzech kierunków wg wzorów 7):

$$\Delta x = x_z - x_t,\ \Delta y = y_z - y_t,\ \Delta z = z_z - z_t, \qquad 7)$$

gdzie:

z - stan zimny, t - stan gorący.

Przemieszczenie to należy porównać z wartościami obliczeniowymi: Δx_0, Δy_0, Δz_0, a następnie należy obliczyć histerezę wg wzoru:

$$h_x = \frac{\Delta x_0 - \Delta x}{\Delta x_0} \cdot 100\%,\ h_y = \frac{\Delta y_0 - \Delta y}{\Delta y_0} \cdot 100\%,\ h_z = \frac{\Delta z_0 - \Delta z}{\Delta z_0} \cdot 100\% \qquad 8)$$

Obliczona w ten sposób histereza nie powinna przekraczać ± 10%, a kierunki przemieszczeń powinny być zgodne z kierunkami obliczeniowymi. W przypadku niezgodności należy znaleźć i usunąć przyczynę tego stanu. Najczęściej przyczynami przekroczenia wartości granicznej histerezy przemieszczeń są niewłaściwa praca zamocowań lub blokada rurociągu.

Na podstawie pomiarów geodezyjnych oraz po dokonaniu oceny stanu technicznego i jakości pracy zamocowań należy przeprowadzić analizę naprężeń z zastosowaniem programu wykorzystującego metodę MES. Analiza powinna uwzględniać odpowiednie kombinacje obciążeń działających na rurociąg w stanie zimnym, gorącym i podczas próby wodnej. Do obliczeń zaleca się wykorzystywanie wartości wyników badań rzeczywistych własności mechanicznych. W przypadku braku możliwości wykonania badań niszczących dopuszcza się stosowanie odpowiednich wartości normatywnych. Naprężenia wyznaczone zgodnie z wymaganiami stosownych dokumentów

odniesienia, nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych. Wytrzymałość rurociągów uzależniona jest zazwyczaj w największym stopniu od obciążeń cieplnych wywołanych ograniczeniami swobody dylatacji. Podczas eksploatacji rurociągu, gdy nie ma możliwości zmian konstrukcyjnych, w celu zmniejszenia ograniczeń swobody dylatacji można oddziaływać wyłącznie na układ zamocowań. Korekta ustawień lub regulacja zamocowań jest możliwa wyłącznie pod warunkiem posiadania wiedzy w zakresie możliwych wielkości i kierunków przemieszczeń rurociągów w różnych stanach pracy. Dokonywanie zmian w układzie zamocowań możliwe jest po przeprowadzeniu analizy wytrzymałościowej obejmującej istniejące w danym momencie warunki oraz modelowanie i weryfikację zamierzonych operacji. W pewnych przypadkach wystąpić może konieczność zmiany zamocowania w zakresie jego charakterystyki lub rodzaju. Dopuszczenie rurociągów do eksploatacji może nastąpić po uzyskaniu odpowiedniego zmniejszenia poziomu naprężeń poniżej wartości dopuszczalnych.

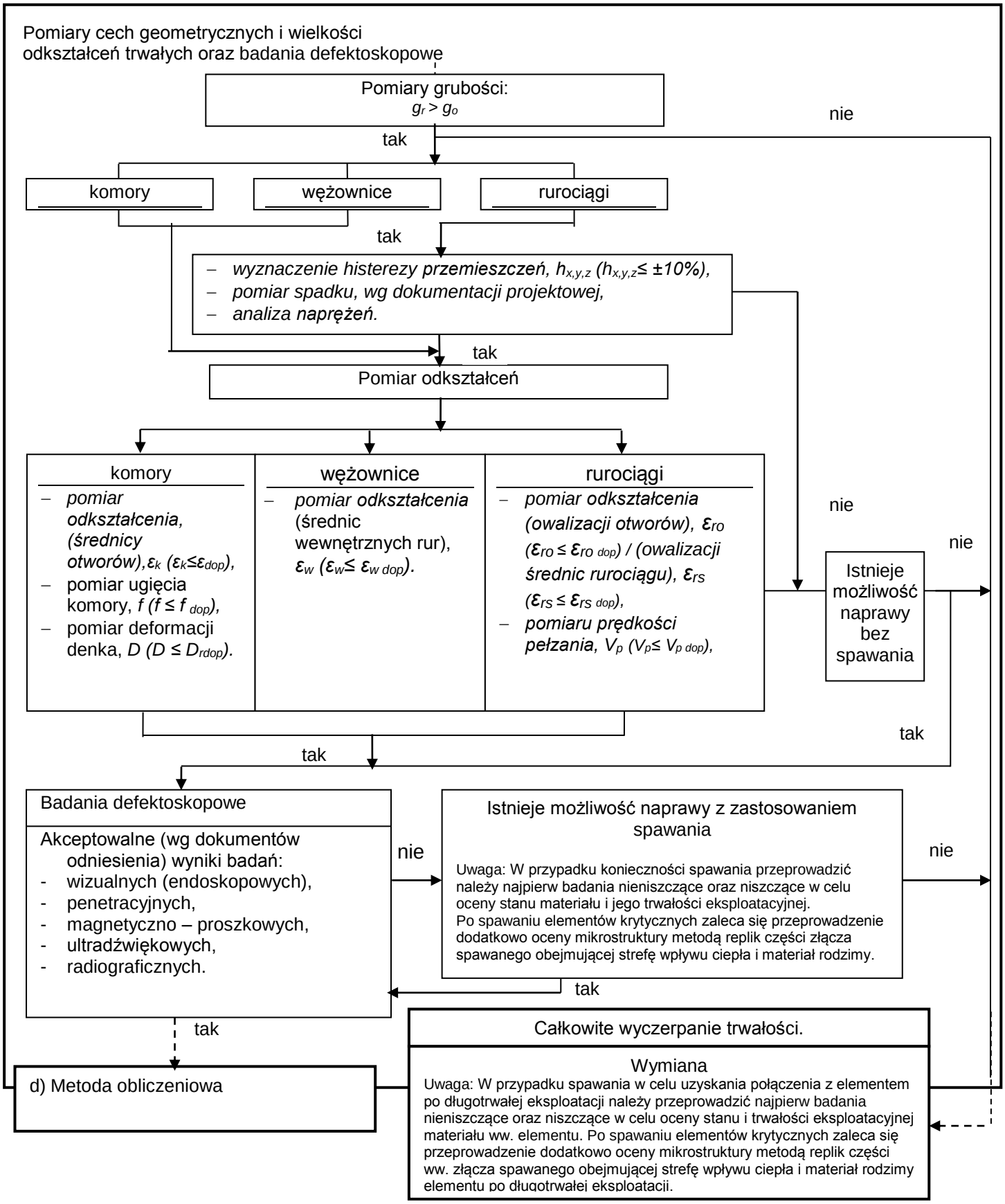
Analiza naprężeń odgrywa również dużą rolę w wyznaczaniu obszarów do badań diagnostycznych.

Pomiar spadku rurociągu

Wartość spadków w stanie zimnym nie może być mniejsza niż wartość określona w dokumentacji projektowej. W przypadku wystąpienia ww. niezgodności należy, przeprowadzić analizę przyczyn jej powstania i przeprowadzić czynności naprawcze. Pomiary powinny być przeprowadzane regularnie nie rzadziej niż w terminach rewizji głównych rurociągów.

Sposób postępowania w zależności od uzyskanych wyników

Poniżej przedstawiono uogólniony sposób postępowania przyjmowany w zależności od uzyskanych wyników pomiarów cech geometrycznych, odkształceń trwałych oraz wyników badań nieniszczących defektoskopowych (rys.21).



Rys. 21. Uogólniony sposób postępowania przyjmowany w zależności od uzyskanych wyników pomiarów cech geometrycznych oraz wyników badań nieniszczących.

4.5. Obliczeniowa ocena stanu elementu [1, 2].

4.5.1. Podstawowe oznaczenia:

p_o [MPa] – ciśnienie obliczeniowe wg dokumentacji projektowej,

t_o [°C] – temperatura obliczeniowa wg dokumentacji projektowej,

D_z [mm] – średnica zewnętrzna elementu,

z – obliczeniowy współczynnik wytrzymałościowy wg przepisów lub dokumentacji projektowej,

k [MPa] – naprężenie dopuszczalne,

g_o [mm] – obliczeniowa grubość ścianki elementu wg danych dokumentacji projektowej,

g_{o2} [mm] – wymagana grubość ścianki elementu przy pracy do 200 000 godzin wg danych dokumentacji projektowej

σ_o [MPa] – naprężenie obliczeniowe w elemencie wg danych dokumentacji projektowej,

$R_{z/\tau/\tau}$ – wartość średnia czasowej wytrzymałości na pełzanie materiału w czasie τ i w temperaturze t,

τ_{Bo} [h] – czas pracy elementu obliczony wg danych dokumentacji projektowej,

τ_o [h] – teoretyczny czas pracy elementu wg danych dokumentacji projektowej, po przekroczeniu, którego należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu,

τ_s [h] – rzeczywisty czas pracy elementu uwzględniany w obliczeniach sprawdzających,

p_r [MPa] – rzeczywiste ciśnienie pracy elementu,

t_r [°C] – rzeczywiste temperatura pracy elementu,

g_r [mm] – rzeczywista grubość ścianki elementu,

g_{r2} [mm] – wymagana minimalna grubość ścianki elementu dla parametrów rzeczywistych i czasu pracy do 200 000 godzin,

σ_r [MPa] – naprężenia rzeczywiste w elemencie,

ε [%] – stopień odkształcenia ścianki elementu,

τ_{Br} [h] – czas pracy elementu obliczony dla parametrów rzeczywistych,

τ_r [h] – czas pracy elementu ciśnieniowego dla parametrów rzeczywistych, po przekroczeniu którego należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu,

d_{max} [mm] – zmierzona maksymalna średnica otworu,

d_{min} [mm] – zmierzona minimalna średnica otworu.

4.5.2. Ocena elementu ciśnieniowego w oparciu o dane dokumentacji projektowej

W celu wstępnej oceny trwałości elementu przeprowadza się obliczenia sprawdzające w oparciu o dane zawarte w dokumentacji projektowej.

a) obliczenie wymaganej grubości ścianki

Obliczenie wymaganej grubości ścianki (g_{02}) elementu ciśnieniowego pracującego w warunkach pełzania przy pracy do 200 000 h, wg dokumentacji projektowej, należy przeprowadzić zgodnie z wzorem 9):

$$g_{02} = \frac{D_Z \cdot p_0}{(2 \cdot k - p_0) \cdot z + 2 \cdot p_0} \qquad 9)$$

gdzie naprężenie dopuszczalne wynosi:

$$k = 0{,}8 \cdot R_{Z/200000/t_0} \qquad 10)$$

b) obliczenie naprężeń w elemencie

Obliczenie naprężeń, wg danych dokumentacji projektowej, należy przeprowadzić wg wzoru 11):

$$\sigma_0 = \frac{p_0\left[D_Z - g_0\left(2 - z\right)\right]}{2 \cdot z \cdot g_0} \qquad 11)$$

c) wyznaczenie teoretycznego czasu pracy τ_{Bo} i τ_o metodą obliczeniową

Aby wyznaczyć wartości $R_{z\ min/\tau/t_o}$ należy odczytać z norm przedmiotowych dla danego materiału średnie wartości $R_{z/100000/t_o}$ i $R_{z/200000/t_o}$ i obliczyć $R_{z\ min/\tau/t_o}$ według zależności: $R_{z\ min/100000/t_o} = 0{,}8\ R_{z/100000/t_o}$ i $R_{z\ min/200000/t_o} = 0{,}8\ R_{z/200000/t_o}$. Następnie na podstawie obliczeń algebraicznych należy obliczyć z wzorów 12), 13) i 14) teoretyczny czas pracy τ_{Bo} i teoretyczny czas pracy τ_o elementu wg danych dokumentacji projektowej, po przekroczeniu którego należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu:

$$\lg \tau_{B0} = 5 + 0{,}30103 \cdot \frac{\lg\left[\dfrac{R_{Z\min/100000/t_0}}{\sigma_0}\right]}{\lg\left[\dfrac{R_{Z\min 100000/t_0}}{R_{Z\min 200000/t_0}}\right]} \qquad 12)$$

stąd:

$$\tau_{B0} = 10^A \qquad 13)$$

gdzie:

$$A = 5 + 0{,}30103 \cdot \frac{\lg\left[\dfrac{R_{Z\,\min/100000/t_0}}{\sigma_0}\right]}{\lg\left[\dfrac{R_{Z\,\min 100000/t_0}}{R_{Z\,\min 200000/t_0}}\right]} \qquad 14)$$

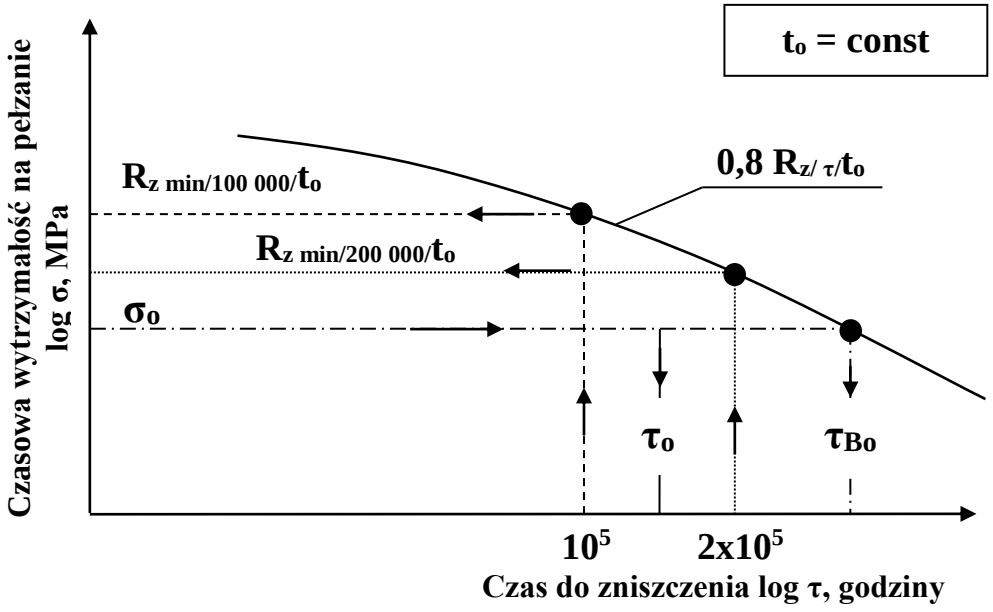
Teoretyczny czas pracy można wyznaczyć na podstawie wykresu czasowej wytrzymałości na pełzanie materiału. Uzyskane wartości czasów τ_{Bo} i τ_o są jednak obarczone pewną niedokładnością i mają głównie charakter poglądowy. Dlatego do określenia teoretycznego czasu pracy τ_{Bo} i τ_o zaleca się stosowanie metody obliczeniowej i wykorzystywanie jej wyniku w podejmowaniu decyzji o przystąpieniu do badań diagnostycznych na obiekcie.

W celu wyznaczenia teoretycznego czasu pracy τ_{Bo} i τ_o należy sporządzić wykres zależności minimalnych wartości $R_{z\,min/100\,000/t_o}$ i $R_{z\,min/200\,000/t_o}$ w skali podwójnie logarytmicznej (rys. 22)

Czas τ_{BO} wyznacza się wg krzywej wykresu czasowej wytrzymałości materiału, który to czas jest odciętą punktu o rzędnej odpowiadającej obliczeniowemu naprężeniu σ_0. Natomiast czas τ_O wyznacza się wg zależności 15):

$$\tau_0 = 0{,}6 \cdot \tau_{B0} \qquad 15)$$

Wielkość 0,6 została ustalona w taki sposób, aby pozostawić zapas wytrzymałości elementu na działania naprężeń zmiennych i dodatkowych.



Rys. 22. Wykres czasowej wytrzymałości na pełzanie materiału.

4.5.3. Ocena elementu ciśnieniowego w oparciu o parametry rzeczywiste

a) obliczenie wymaganej grubości ścianki (g_{r2})

W oparciu o rzeczywiste wartości temperatury i ciśnienia, należy obliczyć wymaganą grubość ścianki elementu przy pracy do 200 000 godzin zgodnie ze wzorem 16):

$$g_{r2} = \frac{D_Z \cdot p_r}{(2 \cdot k - p_r) \cdot z + 2 \cdot p_r} \qquad 16)$$

gdzie: $k = 0{,}8 \cdot R_{Z/200000/t_r}$

b) obliczenie rzeczywistych naprężeń w elemencie (σ_r)

$$\sigma_r = \frac{p_r \left[D_Z - g_r (2 - z) \right]}{2 \cdot z \cdot g_r} \qquad 17)$$

c) obliczenie czasu pracy τ_{Br} i τ_r w oparciu o parametry rzeczywiste

Należy odczytać z norm przedmiotowych dla danego materiału średnie wartości $R_{z/100\,000/t_r}$ i $R_{z/200000/t_r}$ i obliczyć R_{zmin} według poniższych zależności $R_{z\ min/100000/t_r} = 0{,}8\ R_{z/100000/t_r}$ i $R_{z\ min/200\,000/t_r} = 0{,}8\ R_{z/200\,000/t_r}$

- wyznaczenie czasu pracy (τ_{Br} i τ_r) na podstawie obliczeń algebraicznych z wzorów18), 19) i 20):

$$\lg \tau_{Br} = 5 + 0{,}30103 \cdot \frac{\lg\left[\dfrac{R_{Z\min 100000/t_r}}{\sigma_r}\right]}{\lg\left[\dfrac{R_{Z\min 100000/t_r}}{R_{Z\min 200000/t_r}}\right]} \qquad 18)$$

skąd:

$$\tau_{Br} = 10^{A} \qquad 19)$$

gdzie:

$$A = 5 + 0{,}30103 \cdot \frac{\lg\left[\dfrac{R_{Z\min 100000/t_r}}{\sigma_r}\right]}{\lg\left[\dfrac{R_{Z\min 100000/t_r}}{R_{Z\min 200000/t_r}}\right]} \qquad 20)$$

4.5.4. Ocena stanu elementu ciśnieniowego w oparciu o obliczeniowe dane projektowe zawarte w dokumentacji i rzeczywiste parametry eksploatacji.

Ocena stanu elementu w oparciu o dane obliczeniowe

Ocenę stanu elementu w oparciu o dane obliczeniowe przeprowadza się za pomocą wzorów 9) do 15). W zależności od otrzymanych wyników obliczeń rozróżnia się trzy klasy obliczeniowe. Przyporządkowanie badanego elementu do danej klasy uwarunkowane jest relacją uzyskanej wartości obliczeniowej grubości g_{o2} odniesionej do wymaganej grubości obliczeniowej g_o oraz relacji rzeczywistego czasu pracy elementu τ_s uwzględnianego w obliczeniach sprawdzających do teoretycznego czas pracy elementu wg danych dokumentacji projektowej τ_o, po przekroczeniu, którego należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu.

Obliczeniowe klasy trwałości badanego elementu odniesione do wartości grubości g_o i g_{o2} oraz czasu τ_s i τ_o oraz odpowiadający im szacowany czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji zestawiono w tablicy 5.

Dla poszczególnych klas trwałości podano czas dopuszczenia badanego elementu do dalszej eksploatacji. Ocena stanu elementów w oparciu o dane obliczeniowe jest metodą szacunkową. Należy ją traktować jako ocenę wstępną za pomocą, której można wyznaczać elementy i obszary o największym stopniu wyczerpania i podjąć decyzję o przeprowadzeniu badań diagnostycznych. Niemniej prognoza ta dostarcza bardzo istotnej informacji dotyczącej wyboru elementów i miejsc do pomiaru i badań nieniszczących.

Tablica 5. Szacowany czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji na podstawie metody obliczeniowej w oparciu o wymagane dane obliczeniowe.

	Klasa obliczeniowa I	**Klasa obliczeniowa II**	**Klasa obliczeniowa III**
<u>warunek</u> grubość ścianki / czas eksploatacji	$\leq g_0$ / $\geq$ +30 000 h	$g_{02} > g_0$ / $\tau_0 < \tau_s$ +30 000 h	$g_{02} \geq g_0$ / $\tau_0 < \tau_s$
Czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji	Dopuszcza się do dalszej eksploatacji do czasu τ_0, po czym należy przeprowadzić ocenę w oparciu o parametry rzeczywiste.	Dopuszcza się do dalszej eksploatacji do czasu 7000 h, po czym należy przeprowadzić ocenę w oparciu o parametry rzeczywiste.	Należy natychmiast przeprowadzić ocenę w oparciu o parametry rzeczywiste

Ocena stanu elementu w oparciu o dane rzeczywiste

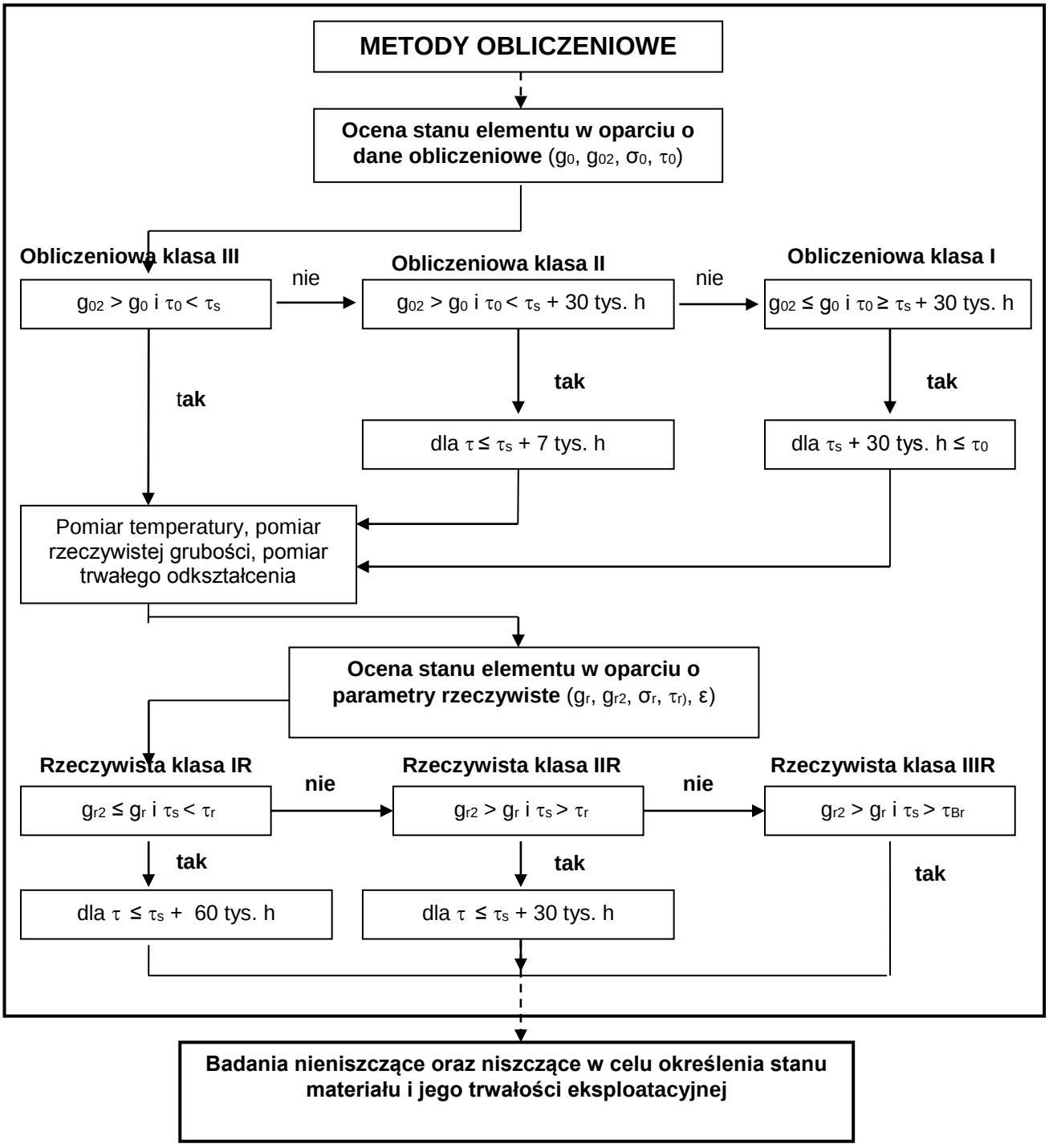
Niezależnie od oszacowania czasu dopuszczenia do dalszej eksploatacji na podstawie danych obliczeniowych, należy przeprowadzić ocenę stanu elementu również w oparciu o parametry rzeczywiste. Wymaga to wykonania pomiarów temperatury, rzeczywistej grubości ścianki i pomiaru wielkości trwałego odkształcenia ścianki elementów pracujących w warunkach pełzania.

Ocena stanu elementu w oparciu o parametry rzeczywiste przeprowadzona jest za pomocą wzorów 16) do 20). W zależności od relacji uzyskanej wartości obliczeniowej grubości ścianki elementu g_{r2} dla parametrów rzeczywistych i czasu pracy do 200 000 godzin, odniesionej do rzeczywistej grubości ścianki elementu g_r oraz relacji rzeczywistego czasu pracy elementu τ_s uwzględnianego w obliczeniach sprawdzających do czasu pracy elementu ciśnieniowego dla parametrów rzeczywistych τ_r, po przekroczeniu którego należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu, wyznacza się klasę rzeczywistą elementu. Rzeczywiste klasy trwałości badanego elementu odniesione do wartości grubości g_r i g_{r2} oraz czasu τ_s i τ_r oraz odpowiadający im szacowany czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji zestawiono w tablicy 6.

Tablica 6. Szacowany czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji na podstawie metody obliczeniowej w oparciu o dane rzeczywiste.

	Klasa rzeczywista IR	**Klasa rzeczywista IIR**	**Klasa rzeczywista IIIR**
<u>warunek</u> grubość ścianki / czas eksploatacji	$\leq$ / $\tau_s < \tau_r$	$g_{r2} > g_r$ / $\tau_s > \tau_r$	$g_{r2} > g_r$ / $\tau_s = \tau_{Br}$
czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji	Należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu tzn. należy przeprowadzić badania diagnostyczne co 60 tys. h	Należy przeprowadzić badania diagnostyczne co 30 tys. h	Należy natychmiast przeprowadzić badania diagnostyczne

Algorytm szacowania czasu dopuszczenia do dalszej eksploatacji elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania na podstawie grubości ścianki i wymaganych danych obliczeniowych oraz rzeczywistej grubości ścianki i rzeczywistego czasu eksploatacji pokazano w postaci graficznej na rys. 23.



Rys. 23. Algorytm szacowania czasu dopuszczenia do dalszej eksploatacji elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania metodą obliczeniową.

Reguła ułamków trwałości

Najczęściej stosowanym sposobem oszacowania stopnia wyczerpania dla elementów pracujących w warunkach pełzania jest reguła ułamków trwałości zaproponowana przez E. L. Robinsona. Reguła ta polega na założeniu, że zmiany temperatury T lub naprężenia σ podczas eksploatacji można podzielić na stopnie charakteryzujące się określoną temperaturą T_i i naprężeniem σ_i. Regułę ułamków trwałości wg Robinsona ujęto w formie wzoru 21):

$$D_p = \sum\left(\frac{t_1}{t_{r1}} + \frac{t_2}{t_{r2}} + \frac{t_3}{t_{r3}} + \ldots\right) = \sum_i \frac{t_i}{t_{ri}} = \int \frac{1}{t_r} dt = 1 \qquad 21)$$

gdzie:

D_p – trwałość (stopień wyczerpania)

t – czas działania naprężenia σ w temperaturze T,

t_r – czas do zniszczenia przy naprężeniu σ w temperaturze T,

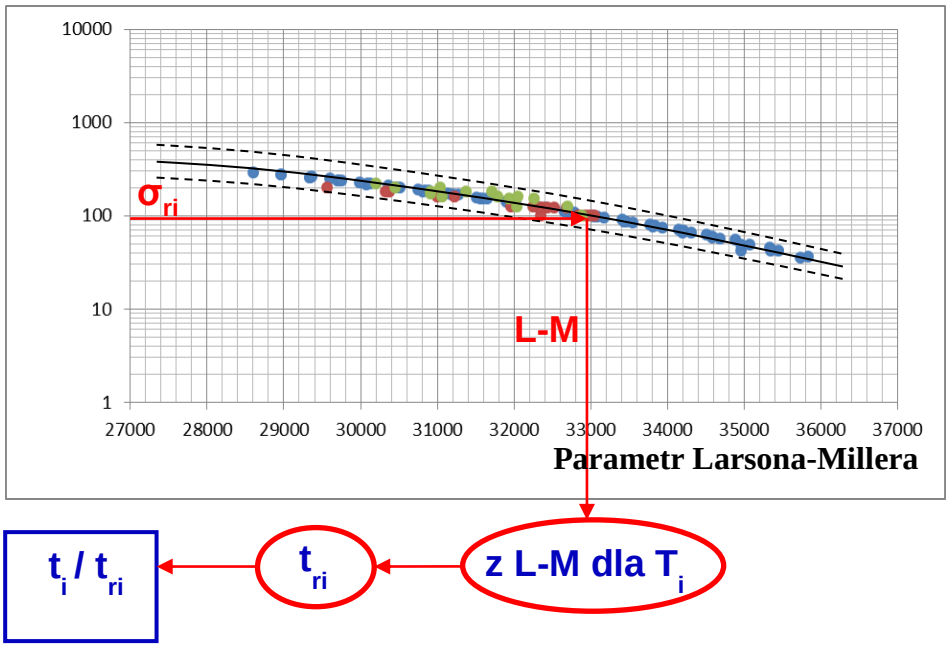
i – liczba stopni naprężenia σ i temperatury T od początku eksploatacji do zniszczenia materiału.

Zniszczenie materiału następuje, gdy suma wszystkich ułamkowych części stopnia zużycia w różnych stanach naprężenia i temperatury osiągnie wartość jeden.

Stosowanie tej metody jest przydatne, gdy dokonuje się wstępnej oceny stanu elementów krytycznych kotła pracujących w warunkach pełzania poprzez oszacowanie stopnia wyczerpania materiału w oparciu o zarejestrowane metodą on-line rzeczywiste parametry temperaturowo-naprężeniowe i podejmuje decyzję o celowości wykonania badań diagnostycznych, których wykonanie rokuje dopuszczenie elementu do dalszej eksploatacji.

Sposób wyznaczania czasu do zniszczenia z parametrycznej krzywej czasowej wytrzymałości na pełzanie pokazano na rys. 24.

Błędy w szacowaniu stopnia wyczerpania są głównie związane z odniesieniem się do czasu zniszczenia w danej temperaturze i przy danym poziomie naprężenia wyznaczanym z parametrycznej krzywej wartości średnich czasowej wytrzymałości na pełzanie oraz wiarygodnością parametrów rzeczywistych.



Rys.24. Sposób wyznaczania czasu do zniszczenia z parametrycznej krzywej czasowej wytrzymałości na pełzanie.

4.6. Badania nieniszczące i niszczące w celu określenia stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej [1, 2].

4.6.1. Uwagi ogólne dotyczące wyboru rodzaju badań.

Przyjęty w opracowaniu sposób podejścia do wykonywania oceny stanu materiału oraz oszacowania lub wyznaczenia stopnia wyczerpania oraz trwałości resztkowej opiera się na łącznym wykorzystywaniu wiedzy teoretycznej i praktycznej. Wykonanie badań nieniszczących i niszczących, dobieranych w zależności od czasu eksploatacji, dostępności do elementu i możliwości pobrania wycinka (do badań niszczących), stwarza możliwość dokonywania obiektywnej oceny stanu elementu oraz oszacowania lub wyznaczenia trwałości resztkowej i czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji.

Najistotniejszym problemem pojawiającym się przy określaniu (wyznaczaniu) trwałości resztkowej jest brak wielu istotnych danych dotyczących historii eksploatacji i rzeczywistych warunków pracy. Dlatego w opracowaniu zaproponowano metodę wyznaczenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji opartą na wynikach pomiarów i badań diagnostycznych, w głównej mierze badań struktury i właściwości mechanicznych, w tym badań pełzania materiałów elementów po długotrwałej eksploatacji powyżej temperatury granicznej.

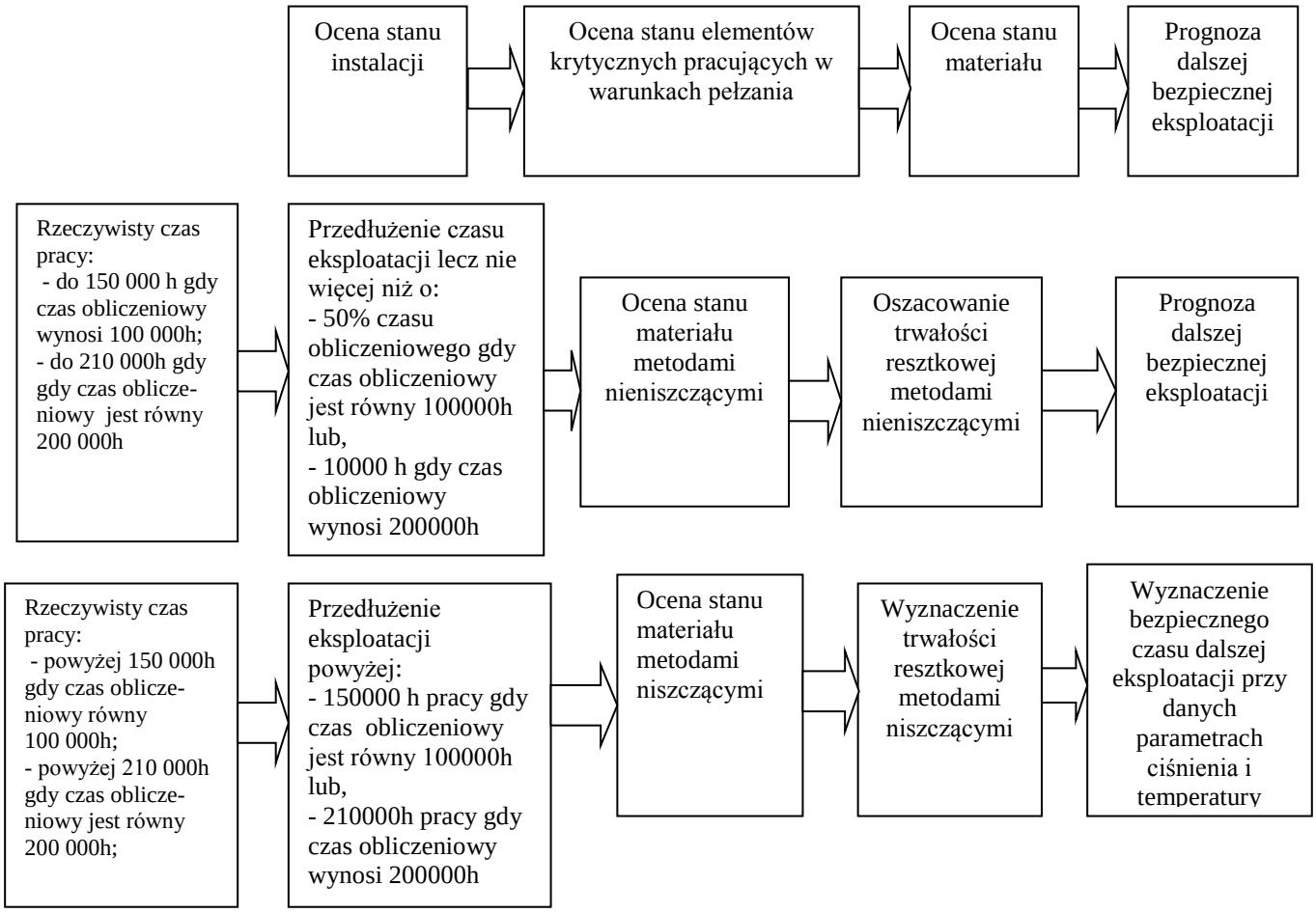
Tworząc system oceny stanu materiału przyjęto, że znajomość stanu wyjściowego, jak również znajomość historii eksploatacji, nie jest decydująca. Skutki działania tych dwóch głównych czynników, powodujących zmiany w mikrostrukturze materiału i w rezultacie obniżenie parametrów określających właściwości mechaniczne i odporność na pełzanie, zakodowane są w materiale będącym przedmiotem oceny. Ujawnienie zakodowanych zmian w materiale wymaga właściwego doboru odpowiednich narzędzi i metod badawczych, które umożliwią zidentyfikowanie cech badanego materiału niezbędnych w ocenie jego stanu, stopnia wyczerpania i określeniu przydatności do dalszej eksploatacji w oparciu o jego charakterystyki po eksploatacji.

Metody oceny trwałości resztkowej zastosowane w opracowaniu wymagają bezpośredniego dostępu do elementu oraz ewentualnego pobrania wycinków do badań niszczących. Uzupełnienie stanowią metody obliczeniowe, wymagające posiadania danych dotyczących odpowiednich parametrów obliczeniowych i rzeczywistych urządzenia.

W praktyce ocenę stanu materiału elementów konstrukcyjnych, pracujących w warunkach pełzania przeprowadza się na podstawie badań nieniszczących lub niszczących. W zależności od rodzaju elementu, charakteru jego pracy i czasu dotychczasowej eksploatacji, dostępności do elementu i możliwości pobrania materiału do badań dokonuje się wyboru zespołu metod badawczych. Stosowanie wyłącznie badań nieniszczących jest możliwe jeżeli czas eksploatacji nie przekroczył

odpowiednich wartości określonych na rys. 25. Po porównaniu uzyskanych wyników badań z posiadanymi charakterystykami materiałów po eksploatacji można dokonać oceny stanu materiału. Na jego podstawie oszacowuje się bezpieczny czas eksploatacji dla parametrów dalszej pracy. W przypadku elementów, dla których czas eksploatacji przekroczył wartości określone na rys. 25, wymagane jest nie tylko oszacowanie trwałości resztkowej ale jej wyznaczenie na podstawie zespołu badań niszczących na pobranych reprezentatywnych wycinkach do badań.

W załączniku A zamieszczono propozycję doboru metod badawczych i częstotliwości badań dla elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania począwszy od początku eksploatacji. Dotyczy to jednak trybu nadzoru standardowego, w którym wykorzystanie algorytmu postępowania wg rys. 12 ma miejsce na etapie wyznaczenia kolejnych terminów badań wynikających z określenia czasu bezpiecznej eksploatacji, po wykonaniu badań nieniszczących i niszczących w celu oceny stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej.



Rys. 25. Ocena stanu materiału i prognoza trwałości eksploatacyjnej elementów części ciśnieniowej kotłów parowych pracujących w warunkach pełzania w zależności od czasu ich dotychczasowej eksploatacji.

4.6.2. Badania nieniszczące.

4.6.2.1. Badania metalograficzne metodą replik.

4.6.2.1.1. Wybór techniki badań.

Podczas oceny stanu materiału wykorzystywane są wszystkie znane i stosowane metody badań metaloznawczych. Dużą przydatność i praktyczne znaczenie przypisuje się badaniom mikrostruktury techniką replik z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego oraz dyfraktometru rentgenowskiego. Oprócz oceny stanu materiału umożliwiają także porównywanie wyników uzyskiwanych na eksploatowanych obiektach przemysłowych z wynikami otrzymanymi w trakcie laboratoryjnych badań nieniszczących lub niszczących, przeprowadzanych na próbkach pobranych z wyeksploatowanych lub uszkodzonych elementów.

Spośród znanych i dostępnych metod badań nieniszczących, zapewniających obiektywną ocenę stanu materiału i oszacowanie jego stopnia wyczerpania, w praktyce przemysłowej należy stosować:

- metodę replik matrycowych,
- metodę replik ekstrakcyjnych,
- rentgenowską analizę fazową izolatu węglikowego.

Każda z tych metod pozwala na ujawnienie różnych elementów mikrostruktury badanego materiału niezbędnych w dokonywaniu oceny.

Metodą do obligatoryjnego stosowania jest metoda replik matrycowych. Pozostałe dwie metody uznać należy za uzupełniające. Ich wybór do stosowania w praktyce przemysłowej jest uzależniony przede wszystkim od czasu dotychczasowej eksploatacji, a ponadto od rodzaju elementu oraz jego dostępności do badań.

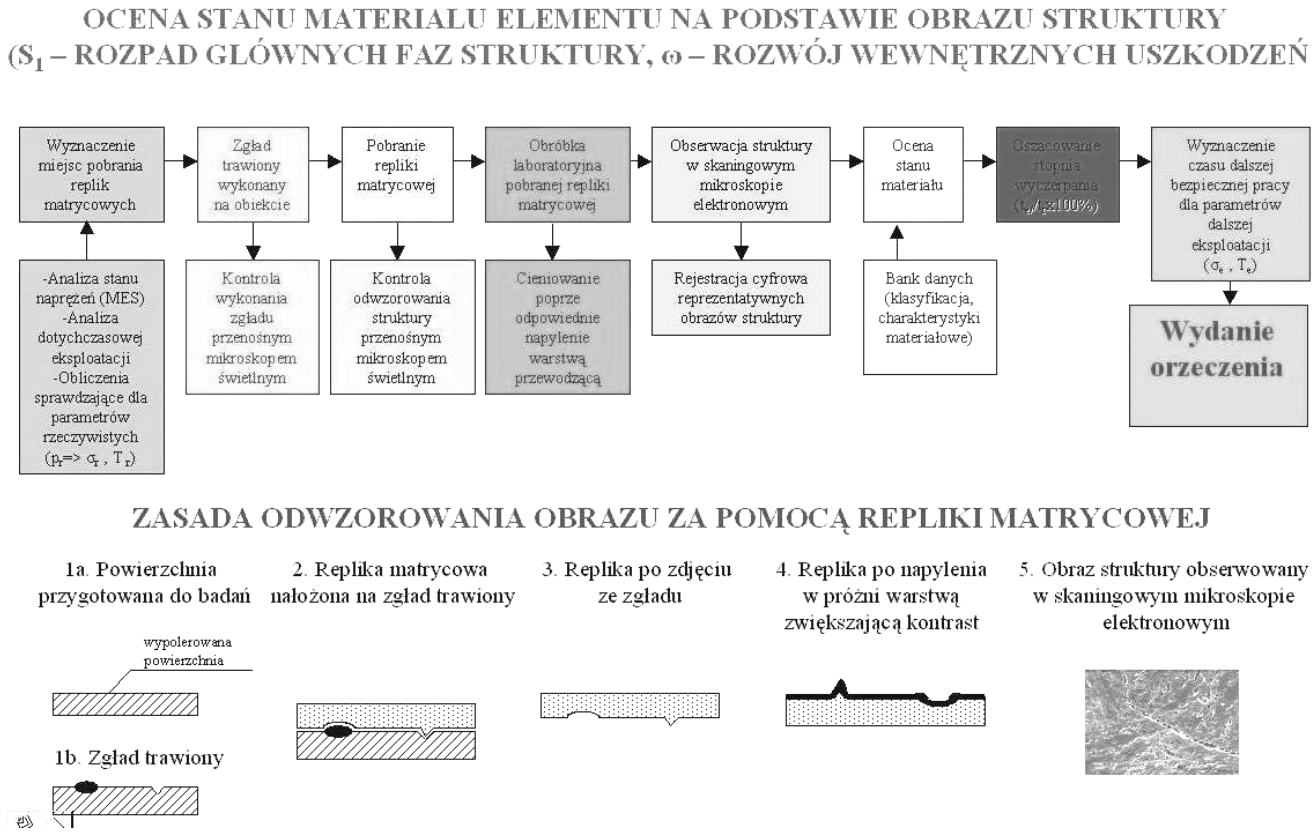
4.6.2.1.2. Charakterystyka technik badania.

Badania z zastosowaniem replik matrycowych.

Metodą ujawniającą w sposób nieniszczący obraz struktury jest metoda replik matrycowych, zapewniająca uzyskanie odwzorowania mikrostruktury o odpowiednio wysokiej rozdzielczości przy powiększeniach od 500 do 5000x, dobieranych w zależności od gatunku materiału oraz rodzaju i stanu mikrostruktury np. rozdrobnienia ziarna czy wydzieleń faz wtórnych. Podstawowym urządzeniem w prowadzeniu obserwacji mikrostruktury umożliwiającym ujawnienie niezbędnych szczegółów dla dokonania jej klasyfikacji i oszacowania stopnia wyczerpania jest skaningowy mikroskop elektronowy z równoczesnym zastosowaniem napylania próżniowego replik dla zwiększenia kontrastu obserwowanego obrazu.

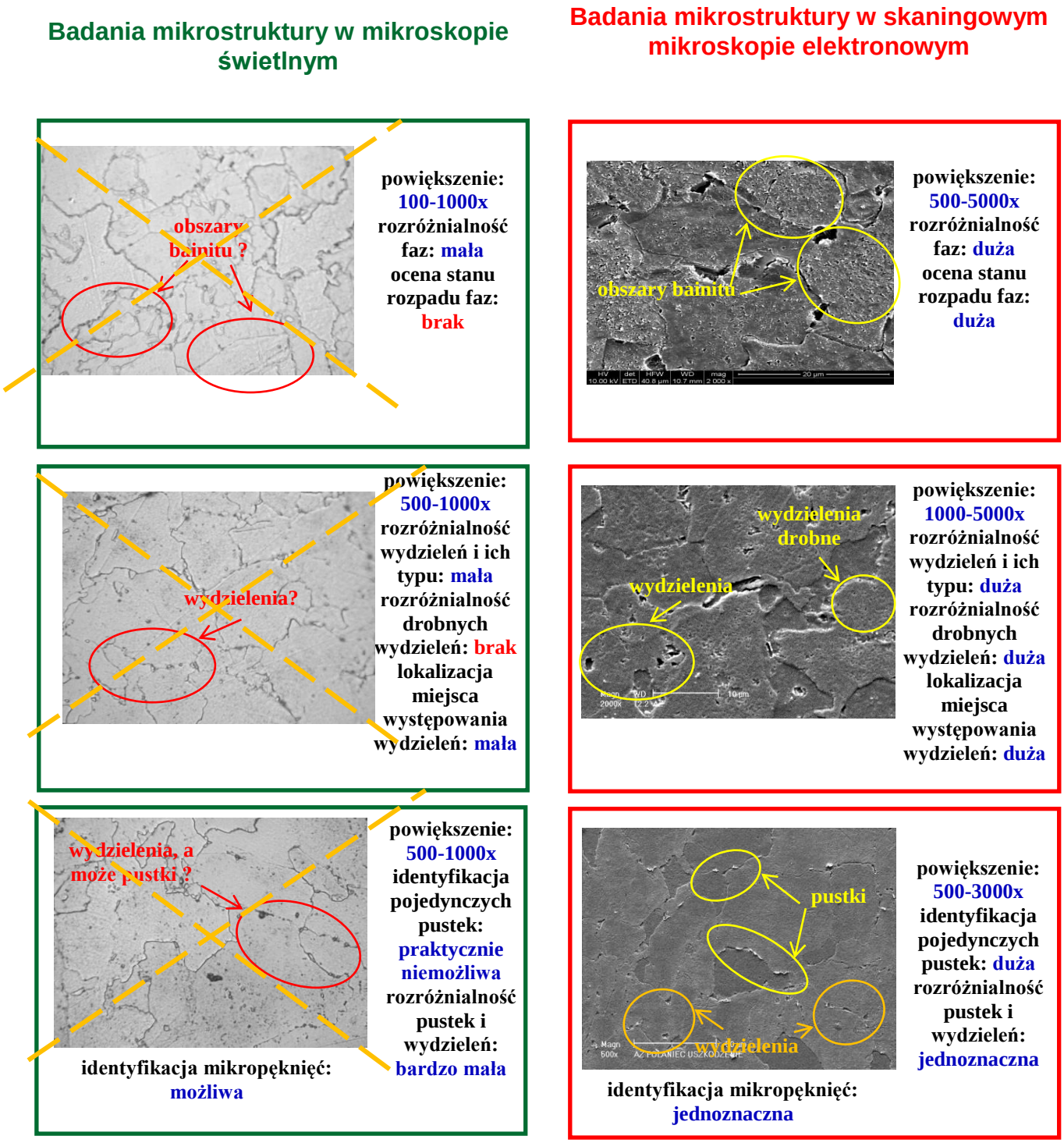
Mikroskop świetlny może być wykorzystany w przypadku ujawnienia ogólnego stanu degradacji mikrostruktury, a także uszkodzeń wewnętrznych na poziomie mikroszczelin i mikropęknięć, przy zastosowaniu powiększenia 500 – 1000 x. Badania replik przy użyciu mikroskopu świetlnego cechuje mała obiektywność i często trudność w ujawnianiu wcześniejszych stadiów generacji izolowanych pustek pełzaniowych. Użycie przenośnego mikroskopu świetlnego bezpośrednio na obiekcie służy głównie do kontroli jakości wykonanych zgładów pod repliki matrycowe oraz zdjętych replik matrycowych. Umożliwia ponadto ujawnienie występujących mikropęknięć.

Sposób oceny stanu materiału na podstawie ujawnionego obrazu mikrostruktury (rozpadu głównych składników fazowych, stanu morfologii wydzieleń i uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczonej klasy mikrostruktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania oraz zasady odwzorowania mikrostruktury za pomocą repliki matrycowej pokazano na rys. 26.



Rys. 26. Procedura oceny stanu materiału oraz zasada odwzorowania obrazu za pomocą repliki matrycowej.

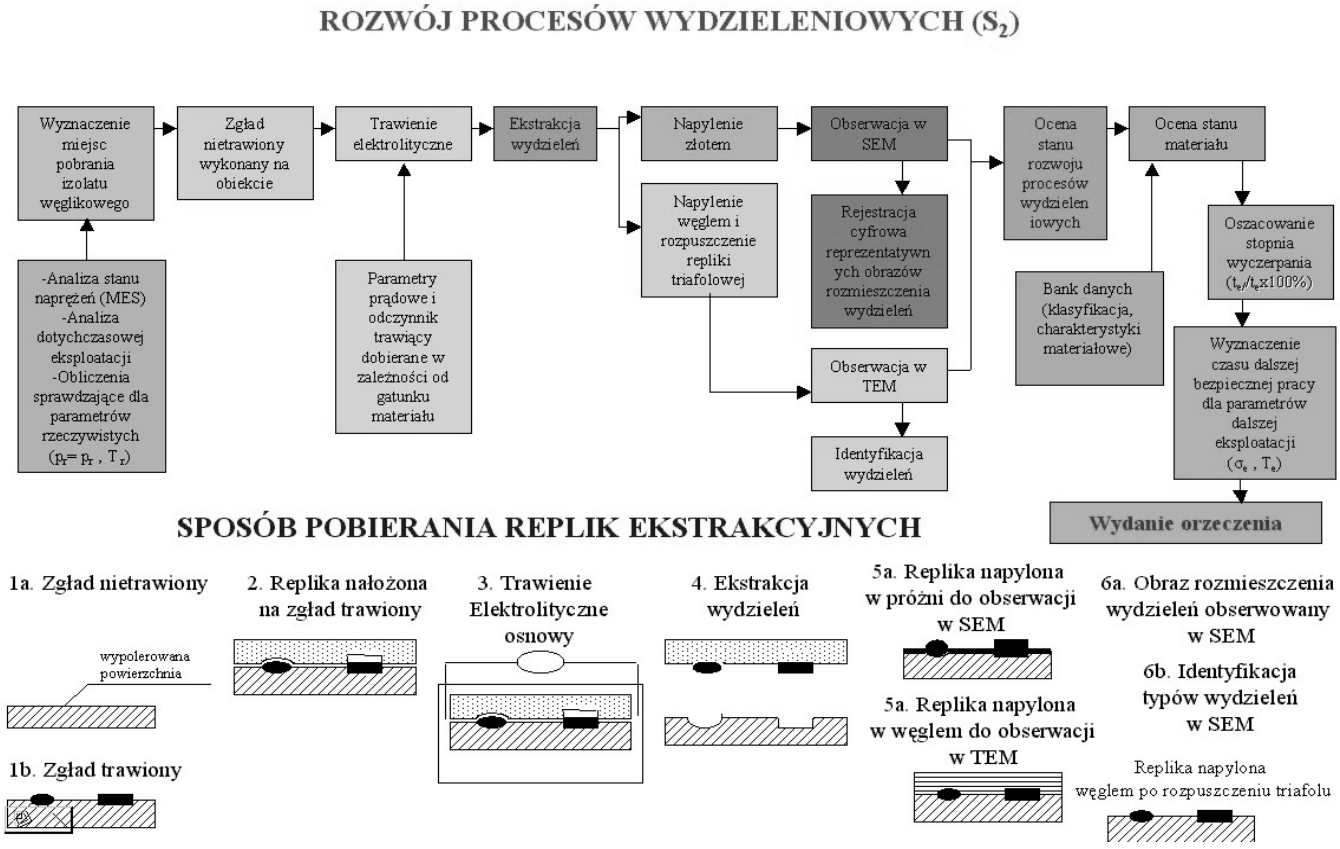
Przykłady aplikacji opisanych powyżej zasad ujawniania elementów mikrostruktury umożliwiających dokonywanie oceny jej stanu oraz stopnia wyczerpania zilustrowano przykładami na rys. 27 dającymi możliwość porównania obrazów obserwowanych w mikroskopie świetlnym z obrazami ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).



Rys. 27. Porównanie możliwości ujawniania szczegółów mikrostruktury niezbędnych w ocenie jej stanu po procesie pełzania na podstawie obserwacji w mikroskopie świetlnym i skaningowym elektronowym.

Metoda replik ekstrakcyjnych

Metoda ta wymaga wykonania zgładu metalograficznego bezpośrednio na materiale badanego elementu, na którym wykonywana jest replika triafolowa. Następnie należy napylić replikę węglem, a osnowę triafolową rozpuścić za pomocą specjalnie do tego przystosowanej elektropolerki z głowicą polerująco-trawiącą (rys. 28). Identyfikację występujących wydzieleń oraz obserwację cech morfologicznych takich jak: wielkość, kształt, miejsca występowania i rozmieszczenie węglików, wykonuje się w skaningowym i/lub transmisyjnym mikroskopie elektronowym.

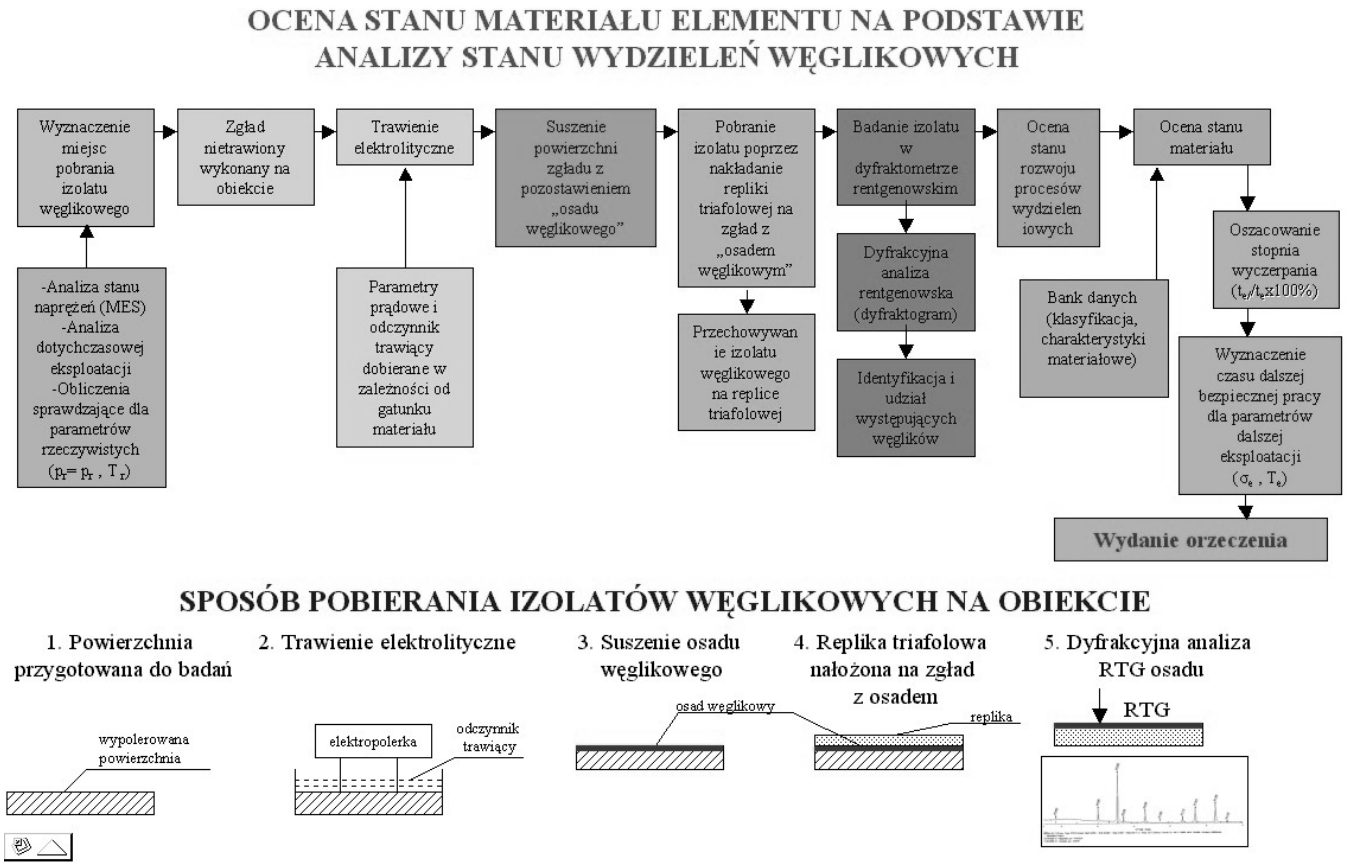


Rys. 28. Sposób dokonywania oceny i zasada odwzorowania obrazu za pomocą repliki ekstrakcyjnej.

Metoda rentgenowskiej analizy fazowej izolatu węglikowego

Metoda rentgenowskiej analizy fazowej wyizolowanych elektrolitycznie węglików bezpośrednio na materiale badanego obiektu, różni się od stosowanej w warunkach laboratoryjnych sposobem pobierania wyizolowanego osadu węglikowego. Wydzielenia pobierane są bezpośrednio z powierzchni badanego elementu z wykorzystaniem elektropolerki wyposażonej w głowicę

polerująco-trawiącą. Osad zgromadzony na folii adhezyjnej jest badany za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego w laboratorium. Wyniki dyfrakcyjnej analizy rentgenowskiej przedstawiane są w postaci dyfraktogramów (rys. 29). Istotną zaletą tej metody jest nie tylko identyfikacja rodzaju występujących węglików, ale również możliwość określania ich udziałów w osadzie wyizolowanym elektrolitycznie.



Rys. 29. Sposób dokonywania oceny i zasada analizy wydzieleń węglikowych.

4.6.2.2. Badania twardości.

Pomiary twardości należy wykonać w miejscu wykonania repliki. Jeżeli zmierzona twardość jest niższa od podanej w odpowiednich dokumentach odniesienia to nastąpił spadek właściwości wytrzymałościowych materiału w wyniku degradacji jego struktury,

Gdy zmierzona twardość jest wyższa od podanej w odpowiednich dokumentach odniesienia to jej zmianę można wiązać ze wzrostem umocnienia i tym samym kruchości materiału.

Spadek twardości po długotrwałej eksploatacji nie oznacza, że równocześnie w każdym przypadku, nastąpił wzrost ciągliwości (udarności).

Pomiary twardości dostarczają również istotnych informacji o stanie materiału, szczególnie w obszarze złączy spawanych, kolan i elementów kształtowych. Za pomocą wyników pomiarów

można określić z pewnym przybliżeniem wartość doraźnej wytrzymałości na rozciąganie (R_m), poprzez odpowiednie przeliczenie wg zależności wyszczególnionych w normach PN-/H-04357 lub PN-EN ISO 18265. Pomiary twardości są także pomocne przy wyborze obszaru do badań mikrostrukturalnych oraz właściwej interpretacji obrazów struktur uzyskanych podczas tych badań. Należy jednak zwrócić uwagę, że dokładność pomiaru twardości urządzeniami przenośnymi jest mniejsza niż uzyskiwana z zastosowaniem twardościomierzy stacjonarnych w warunkach laboratoryjnych.

4.6.3. Badania niszczące.

4.6.3.1. Uwagi ogólne.

Dla elementów pracujących w warunkach pełzania, dla których rzeczywisty czas eksploatacji przekroczył czas obliczeniowy - to = 100000h o więcej niż 50% lub to = 200000h o więcej niż 10000h - należy przeprowadzić badania niszczące. Zakres tych badań zależy w głównej mierze od możliwości pobrania odpowiedniej ilości materiału, co wynika z rodzaju oraz cech konstrukcyjnych elementu będącego przedmiotem oceny.

Planowane badania wymagają bezpośredniego dostępu do elementu w celu pobrania reprezentatywnych próbek do badań. Obszary, z których pobiera się wycinki do badań niszczących, wyznacza się w oparciu o historię pracy, doświadczenia eksploatacyjne, oględziny wizualne i inne badania defektoskopowe, pomiary grubości ścianki metodą ultradźwiękową oraz porównawcze badania własności fizycznych (np. metoda WIT, szum Berkhausena, i in.).

W przypadku wężownic przegrzewacza pary należy pobierać wycinki rur o długości od ok. 500 do 1000 mm. Zazwyczaj ich pobranie nie stanowi większego problemu ponieważ istnieje możliwość szybkiego zastąpienia pobranych wycinków elementami nowymi. W przypadku głównych rurociągów parowych pobierany jest wycinek będący pełnym obwodem rury o długości od ok. 300 do ok 500 mm. Natomiast badania niszczące komór, kolektorów lub regulatorów temperatury należy wykonywać w oparciu o tzw. „korki" o średnicy do ok. 50 mm pobierane metodą trepanacji z płaszcza elementu.

Badania te umożliwiają dokładną ocenę stopnia wyczerpania i stopnia uszkodzenia badanego materiału bez znajomości historii warunków dotychczasowej eksploatacji (liczba i rodzaj odstawień, rzeczywiste warunki uruchamiania i odstawiania kotła), a zwłaszcza rzeczywistych naprężeń roboczych i temperatury pracy. Wyznaczenie na podstawie uzyskanych wyników badań czasu dalszej bezpiecznej pracy wymaga jednoznacznego zadeklarowania przez użytkownika obiektu parametrów dalszej eksploatacji (temperatury i ciśnienia).

Na podstawie wieloletnich krajowych doświadczeń z badań diagnostycznych potwierdzono przydatność w praktyce wyników badań:

- struktury i twardości na zgładach litych próbek.
- właściwości mechanicznych, w tym prób pełzania,
- procesów niszczenia korozyjnego.

4.6.3.2. Badania właściwości mechanicznych.

Badania właściwości mechanicznych wymagają pobrania próbek metodami niszczącymi, co skutkuje powstaniem ubytku w materiale badanego elementu i koniecznością przeprowadzenia naprawy.

Badania właściwości mechanicznych w pełnym zakresie wykonywane są w przypadku wężownic, głównych oraz komunikacyjnych rurociągów parowych i obejmują:

- statyczną próbę rozciągania w temperaturze pokojowej i podwyższonej zbliżonej do roboczej temperatury pracy,
- próbę udarności w celu określenia pracy łamania z wyznaczeniem progu kruchości (dla materiału rurociągów parowych),
- pomiary twardości,
- skrócone próby pełzania - celem wyznaczenia trwałości resztkowej i czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji dla przewidywanej temperatury i ciśnienia dalszej pracy.

Natomiast badania właściwości mechanicznych materiału płaszcza komór, kolektorów i regulatorów temperatury wykonywane są w ograniczonym zakresie i obejmują:

- badania własności wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej,
- próby pełzania z pomiarem wydłużenia dla wyznaczenia prędkości pełzania.

Badania właściwości wytrzymałościowych

Badania właściwości wytrzymałościowych przeprowadza się zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie normami PN-EN ISO lub PN-EN. W próbach rozciągania wyznacza się wytrzymałość na rozciąganie R_m, granicę plastyczności R_e i wydłużenie A w temperaturze pokojowej oraz granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze R_e^t. Uzyskane wartości porównuje się z wymaganymi w normach przedmiotowych na wyroby hutnicze z badanego gatunku stali. W przypadku gdy uzyskane w wyniku badań wartości nie spełniają wymagań odpowiednich dokumentów odniesienia przeprowadza się analizę dotyczącą następujących zagadnień:

- zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń eksploatacyjnych, w tym zdolności do odkształceń,
- konieczności i możliwości doboru parametrów w procesie uruchamiania i odstawiania kotła,
- konieczności i możliwości zmiany procedur przeprowadzania wodnych prób ciśnieniowych

Praca łamania z wyznaczeniem progu kruchości

Badania udarności przeprowadza się zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie normami PN-EN ISO lub PN-EN. Pracę łamania wyznacza się dla różnych poziomów temperatury w zakresie od -60 do + 100˚C. Zakres temperaturowy wyznacza się każdorazowo na podstawie wartości pracy łamania uzyskanych w temperaturze pokojowej. Z zależności pracy łamania od temperatury badania wyznacza się temperaturę przejścia w stan kruchy oznaczanej w literaturze jako FATT/50 (*failure area toughnes temperature*). Temperatura ta jest charakterystyczną dla równoważnych udziałów przełomu ciągliwego i kruchego (50%/50%).

Uzyskane informacje są niezbędne w analizie poprawności doboru parametrów: uruchamiania i odstawiania kotła oraz prób ciśnieniowych.

Badania pełzania

Wyznaczanie trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzalnej dokonuje się na podstawie prób pełzania materiału będącego w eksploatacji.

Skrócone próby pełzania

Sposób wyznaczania trwałości resztkowej z zastosowaniem długotrwałych prób pełzania wymaga wyników badań trwających minimum od 2 do 3 lat. Dlatego w praktyce inżynierskiej stosowane są tzw. skrócone próby pełzania o czasie trwania od kilkudziesięciu godzin do kilku tysięcy godzin. Zapewniają uzyskanie wyników badań w okresie do kilkunastu miesięcy. Przeprowadzenie tych badań uwarunkowane jest możliwością pobrania niezbędnej ilości materiału w celu wykonania minimum pięciu próbek. Badania mogą zrealizowane w oparciu o pobrane wycinki rurociągu lub wężownic przegrzewacza pary.

Skrócone próby pełzania zapewniają przyspieszenie procesu pełzania oraz skrócenie okresu wykonywania badań. Prowadzone są w następujących warunkach:

- badania przy stałym naprężeniu odpowiadającemu eksploatacyjnemu i różnych poziomach temperatury znacznie wyższej od temperatury eksploatacyjnej,

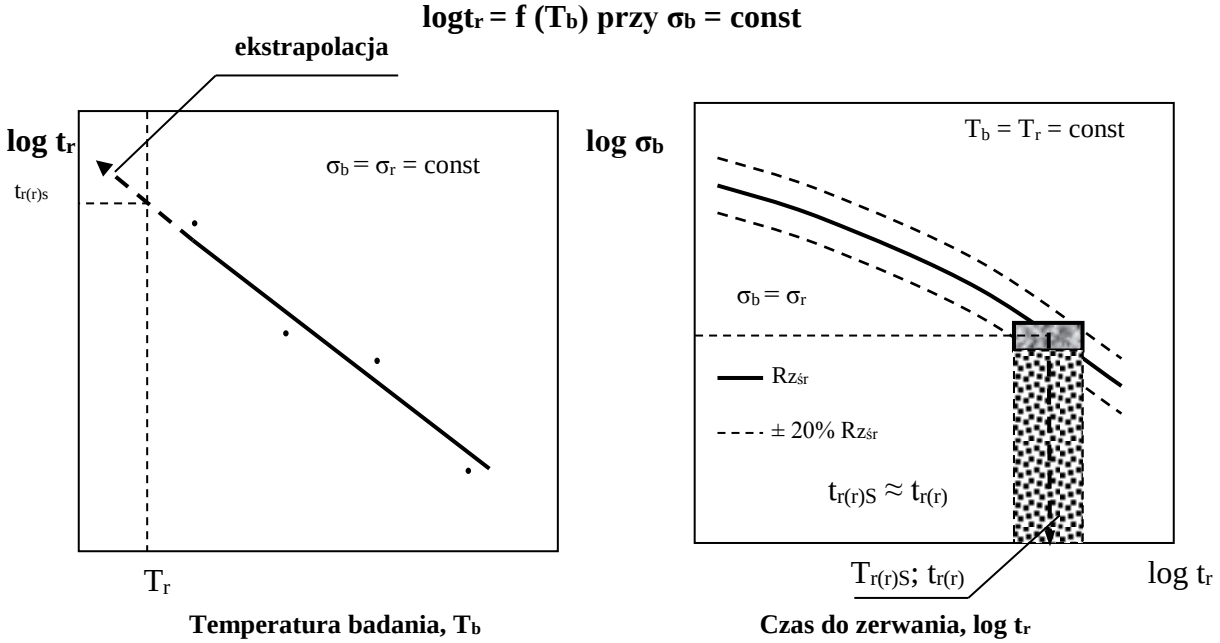
- badania w stałej temperaturze odpowiadającej eksploatacyjnej i przy różnych poziomach naprężenia, znacznie wyższych od naprężeń roboczych.

Stosowanie skróconych prób pełzania w warunkach stałej temperatury odpowiadającej temperaturze roboczej i stałym naprężeniu, ale o różnych wartościach, znacznie wyższych od naprężeń roboczych, nie jest zalecane. Metoda została zweryfikowana wynikami prób pełzania do 100 000 godzin przeprowadzonymi w temperaturze i przy naprężeniu odpowiadającym warunkom eksploatacyjnym dla tego samego materiału. Wyznaczanie przez ekstrapolację trwałości (trwałości resztkowej) w tak prowadzonych skróconych próbach pełzania jest mało obiektywne, gdyż uzyskuje się wyniki wyraźnie zawyżone, z błędem przekraczającym znacznie wartości górnej granicy dopuszczalności pasma rozrzutu wyników prób długotrwałych. Czyni to powyższą metodę nieprzydatną w praktyce inżynierskiej, gdyż posługiwanie się jej wynikami stwarza zagrożenie powstania nieprzewidywalnych awarii. Wyklucza to stosowanie tej metody w badaniach diagnostycznych.

Duża zbieżność wyników uzyskiwanej ekstrapolacji trwałości (trwałości resztkowej) na podstawie wyników skróconych prób pełzania prowadzonych przy stałym naprężeniu odpowiadającemu roboczemu i różnych poziomach temperatury, z wynikami z długotrwałych prób pełzania do 100 000 godzin przy parametrach temperaturowo-naprężeniowych odpowiadającym ekstrapolowanym została pozytywnie zweryfikowana w badaniach wykonanych w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach.

Sposób przedstawiania wyników skróconych prób pełzania dający dobrą wiarygodność oszacowania, to znaczy prowadzonych przy stałym naprężeniu badania odpowiadającemu roboczemu ($\sigma_b=\sigma_r=const$), dla różnych poziomów temperatury badania T_b, pokazano graficznie na rys.30.

Czas do zerwania wyznaczony w oparciu o ekstrapolację prostej w kierunku temperatury eksploatacji, jest wyznaczony z błędem nieprzekraczającym 20% w stosunku do czasu wyznaczonego na podstawie wyników długotrwałych prób pełzania wynoszących ok. 100 000 godzin. Szacowanie to jest nieco zaniżone, tym niemniej mieści się w obszarze dopuszczalnego rozrzutu prób długotrwałych.



Rys. 30. Wiarygodność ekstrapolacji czasu do zerwania t_r dla parametrów roboczych w oparciu o wyniki skróconych prób pełzania przy stałym naprężeniu badania odpowiadającym roboczemu

$\sigma_b = \sigma_r$ = const.

T_b – temperatura badania, T_r – temperatura robocza, σ_b – naprężenie badania, σ_r – naprężenie robocze, t_r – czas do zerwania, $R_{zśr}$ – średnia czasowa wytrzymałość na pełzanie (wynik długotrwałych prób pełzania), $t_{r(r)S}$ – czas do zerwania dla parametrów roboczych uzyskany w skróconych próbach pełzania jako wynik ekstrapolacji, $t_{r(r)}$ – czas do zerwania dla parametrów roboczych uzyskany w długotrwałych próbach pełzania.

W praktyce diagnostycznej dla wyznaczenia trwałości resztkowej materiałów elementów pracujących w warunkach pełzania (rurociągów, wężownic przegrzewaczy pary) należy zatem stosować wyłącznie skrócone próby pełzania przy stałym naprężeniu i różnych poziomach temperatury badania znacznie wyższej od temperatury eksploatacyjnej. Badania takie są zalecane do stosowania po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy 100000h. W przypadku przekroczenia czasu obliczeniowego pracy: to = 100000h o więcej niż 50% oraz to = 200000h o więcej niż 10000h, badania takie są obligatoryjne (pkt. 4.6.1, rys.25).

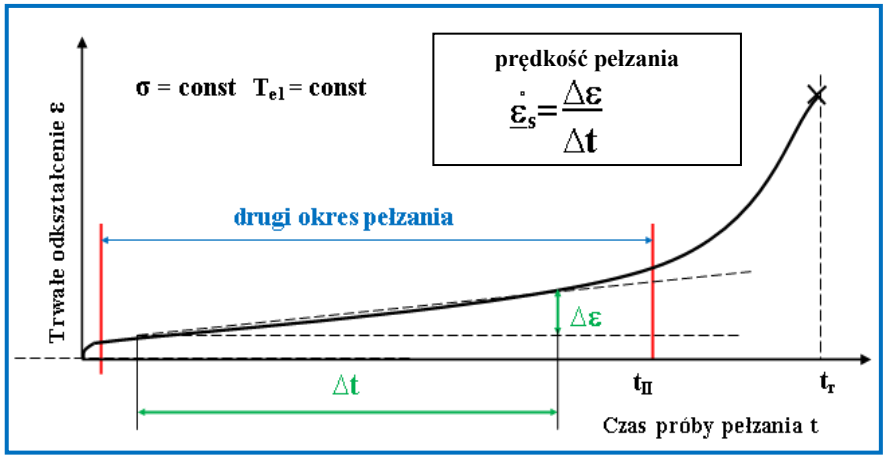
Wiarygodność uzyskiwanych wyników skróconych prób pełzania jest uzależniona od wymagań dotyczących dochowania stałości poziomu zadanej temperatury badania T_b na długości pomiarowej próbki w czasie trwania próby. Wyznaczenie trwałości resztkowej z błędem nieprzekraczającym 20% w stosunku do czasu wyznaczonego na podstawie wyników długotrwałych prób pełzania gwarantuje prowadzenie skróconych prób pełzania w temperaturze badania T_b (znacznie wyższej od eksploatacyjnej) z dokładnością ±0,5˚C na długości pomiarowej próbki, niezależnie od poziomu temperatury badania.

Próby pełzania z pomiarem wydłużenia

Próby pełzania z pomiarem wydłużenia służą do wyznaczenia krzywej pełzania w postaci zależności wielkości trwałego odkształcenia ε od czasu trwania próby t przy stałym naprężeniu badania σ_b odpowiadającym eksploatacyjnemu σ_e ($\sigma_b = \sigma_e$) i w temperaturze badania T_b odpowiadającej eksploatacyjnej T_e ($T_b = T_e$). Próby pełzania z pomiarem wydłużenia należy prowadzić przy stabilnym pomiarze wydłużenia z zastosowaniem ekstensometrów wyposażonych w czujniki umożliwiające ciągły pomiar wydłużenia z dokładnością do 0,005 mm. Ponadto odchylenie od zadanej temperatury badania T_b na długości pomiarowej próbki w czasie trwania próby niezależnie od poziomu temperatury badania nie może być większe niż ±0,5˚C.

Na podstawie wyznaczonej krzywej prędkości pełzania w stanie ustalonym dla zdefiniowanych parametrów dalszej eksploatacji można wyznaczyć czas do osiągnięcia zadanej wielkości trwałego odkształcenia zapewniającej dalszą bezpieczną eksploatację. Sposób wyznaczenia prędkości pełzania z krzywej pełzania pokazano na rys.31.

Sposób wyznaczania czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji z wykorzystaniem wyników takich prób pełzania znajduje zastosowanie dla materiałów płaszcza komór/schładzaczy, dla których możliwe jest wyznaczenie wielkości trwałego odkształcenia na podstawie pomiarów średnic wewnętrznych otworów pod króćce i pobranie metodą trepanacji materiału do badań niszczących z płaszcza.



Rys. 31. Sposób wyznaczenia prędkości pełzania z krzywej pełzania

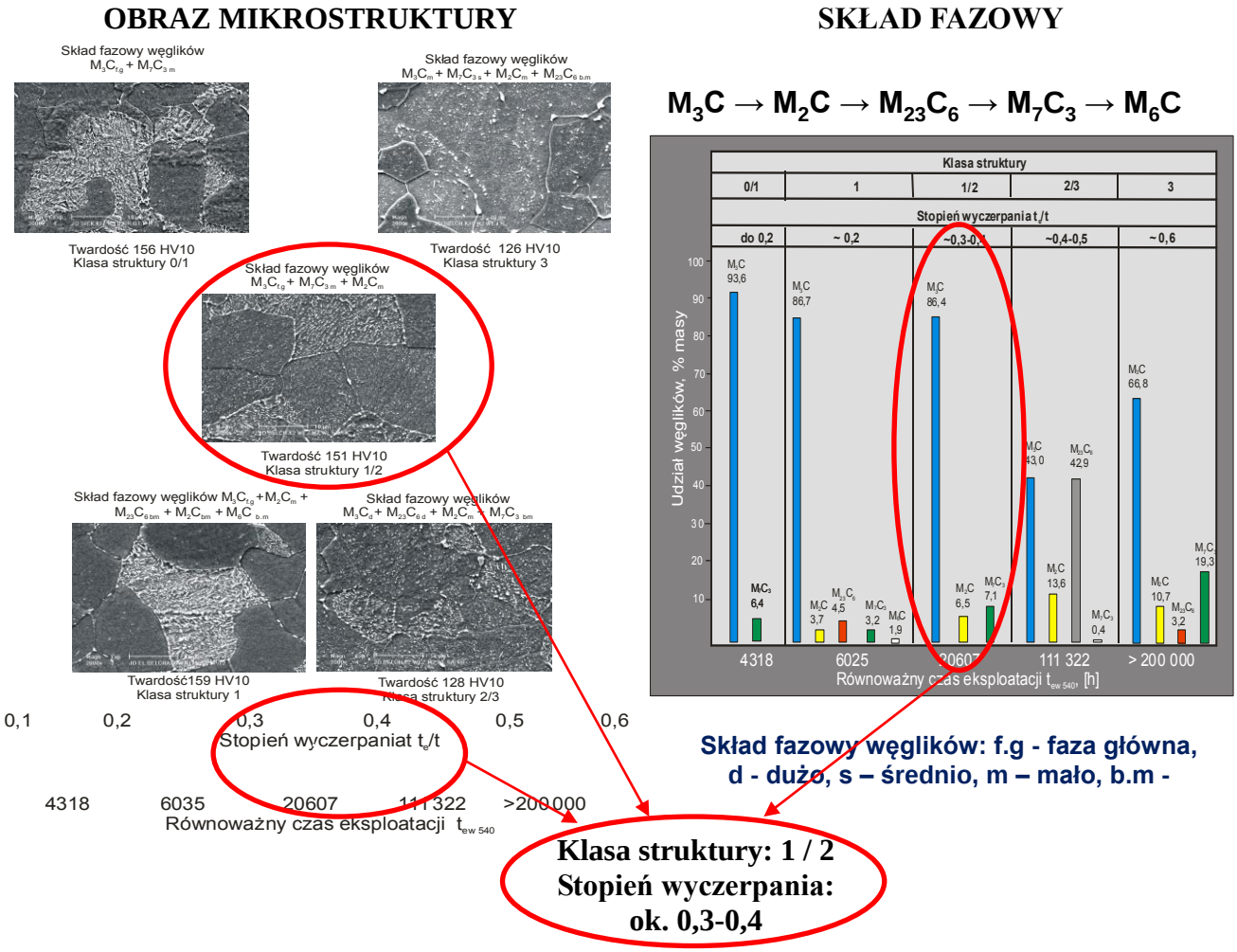
4.6.3.3. Badania metalograficzne

Wśród współczesnych metod badań metaloznawczych w badaniach niszczących największe znaczenie praktyczne mają badania z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego oraz dyfraktometru rentgenowskiego. Wynik obserwacji obrazu mikrostruktury i jej elementów w skaningowym mikroskopie elektronowym w sposób jednoznaczny daje możliwość dokonania jej oceny z punktu widzenia stanu głównych składników fazowych, rozwoju procesów wydzieleniowych oraz wewnętrznych uszkodzeń. Podobnie jak w badaniach nieniszczących realizowanych poprzez ocenę stanu mikrostruktury metodą replik matrycowych, mikroskopia świetlna ma ograniczone zastosowanie i nie umożliwia dokonywania właściwej oceny. Szczególnie odnosi się to do przypadków znaczącej liczby występujących typów mikrostruktury w stalach stosowanych w energetyce, w których ocena stopnia rozpadu drobno-płytkowego perlitu, perlitu stopowego, bainitu czy martenzytu oraz występujących pustek i nieciągłości w praktyce w większości przypadków może nie być obiektywna.

Dokonywanie oceny stanu materiału i oszacowania jego stopnia wyczerpania na podstawie niszczących metod badań powinno być realizowane w praktyce w oparciu o:

- badania w skaningowym mikroskopie elektronowym na zgładach metalograficznych celem sklasyfikowania występującej struktury i oszacowania stopnia wyczerpania,
- badania osadów wyizolowanych węglików z ich identyfikacją metodą rentgenowskiej analizy fazowej celem określenia stadium rozwoju procesów wydzieleniowych odniesionych do stopnia wyczerpania.

Sposób oceny stanu materiału na podstawie ujawnionego obrazu mikrostruktury (rozpadu głównych składników fazowych, morfologii wydzieleń i uszkodzeń wewnętrznych) na zgładach litych próbek, wyznaczonej klasy mikrostruktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania z zastosowaniem powyższych metod pokazano na rys. 32.



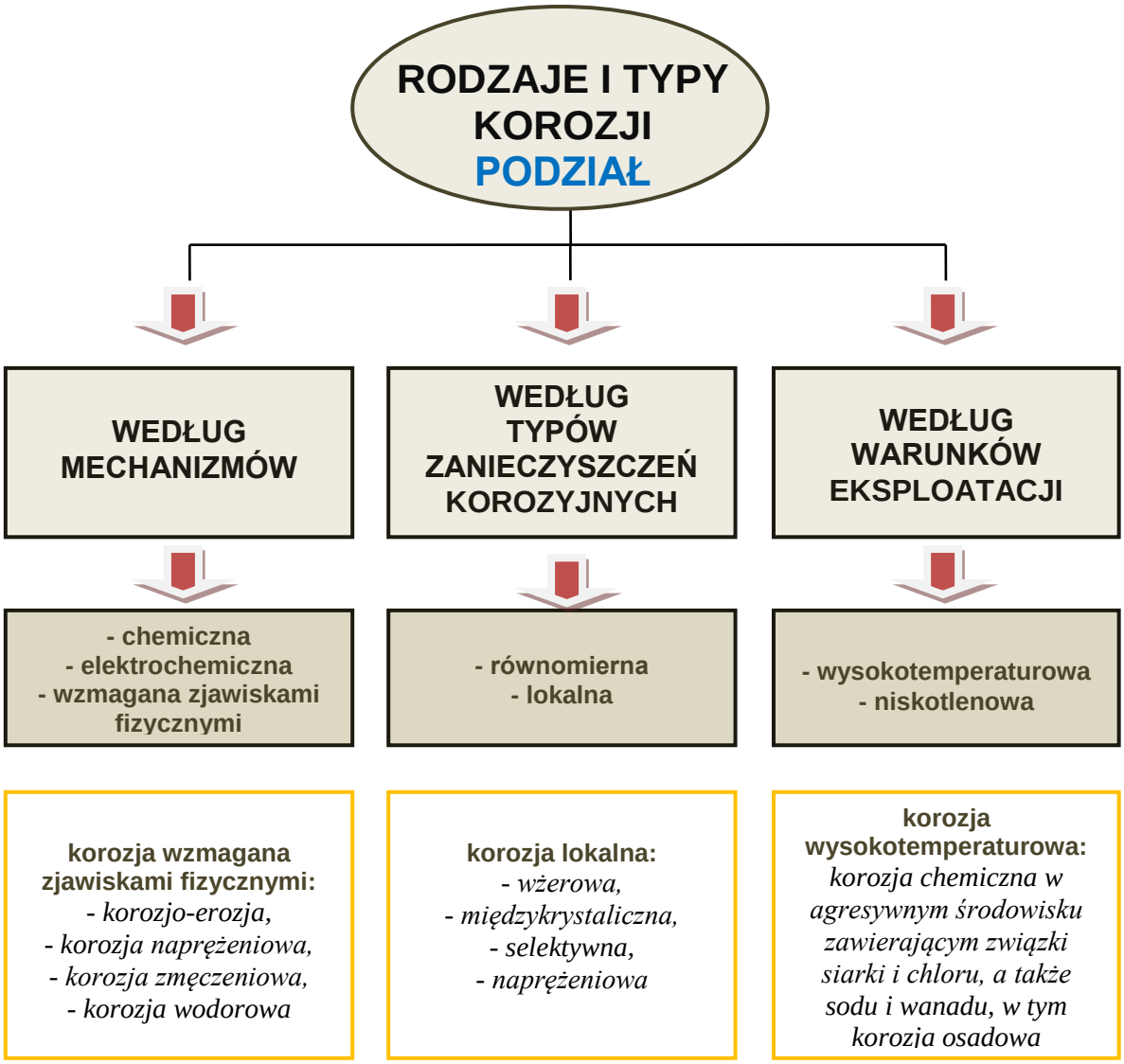
Rys. 32. Sposób oceny stanu materiału na podstawie ujawnionego obrazu mikrostruktury na zgładach litych próbek.

4.6.3.4. Analiza jakościowa i ilościowa procesów korozyjnych.

Grupą istotnych wymagań stawianych materiałom do pracy w podwyższonej temperaturze pod działaniem naprężenia w długotrwałym czasie w środowisku kotła parowego i rurociągów są ich właściwości fizyko-chemiczne w tym głównie:

- odporność na korozję w środowisku spalin oraz mieszanki parowo-wodnej i pary,
- przewodnictwo cieplne i współczynnik rozszerzalności cieplnej.

Elementy konstrukcyjne części ciśnieniowej kotła parowego i rurociągów narażone są na prawie wszystkie rodzaje i typy korozji. Umowny podział ze względu na typ i rodzaj procesów niszczenia korozyjnego w zależności od rodzaju definiowanych mechanizmów, typu występujących zniszczeń korozyjnych i warunków eksploatacji pokazano w postaci graficznej na rys. 33.



Rys. 33. Umowny podział typu i rodzaju procesów niszczenia korozyjnego elementów instalacji energetycznej.

W wielu przypadkach eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych kotła występuje niszczenie korozyjne wspomagane czynnikami fizycznymi. Najczęściej są to procesy korozjo-erozji, korozji naprężeniowej, korozji zmęczeniowej oraz korozji wodorowej.

Najmniej niekorzystna jest korozja równomierna w przeciwieństwie do korozji lokalnej zachodzącej w uprzywilejowanych miejscach ze względu na lokalnie występujące warunki sprzyjające jej inicjacji i rozwojowi. Dotyczy to korozji wżerowej, międzykrystalicznej, selektywnej, wodorowej i naprężeniowej.

W długotrwale eksploatowanych elementach konstrukcyjnych kotła i rurociągów procesy niszczenia korozyjnego mają istotny wpływ na ich trwałość. Obniżenie trwałości eksploatacyjnej jest skutkiem pocienienia ścianki lub perforacji i pęknięć oraz pogarszania się wymiany ciepła.

Dynamika przebiegu procesów niszczenia korozyjnego zależy od wielu czynników, w szczególności:

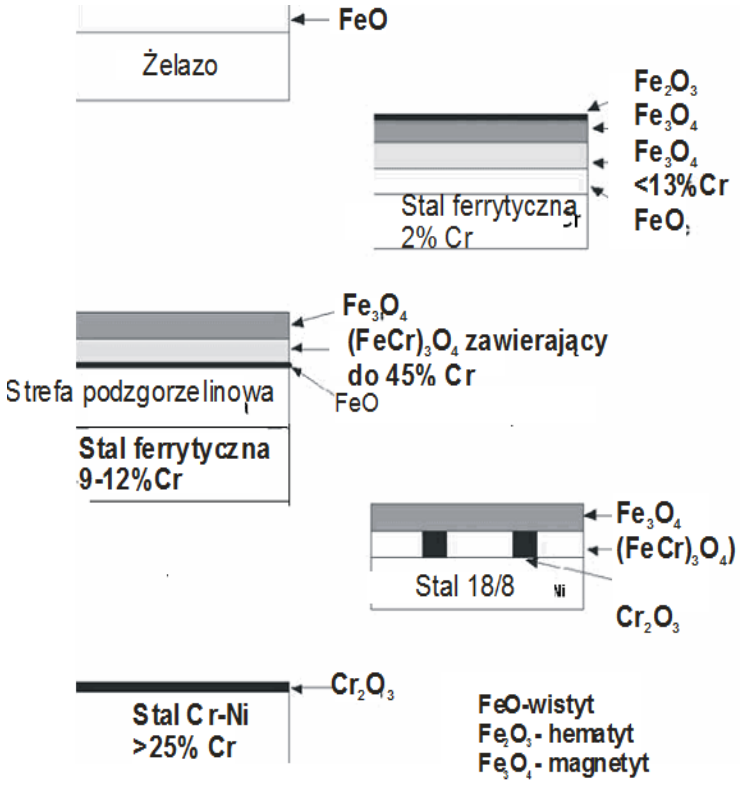
- składu chemicznego materiału, w tym głównie zawartości chromu, decydującej o rodzaju powstającego tlenku i jego pasywującego działania,
- struktury materiału; stale austenityczne wykazują odporność korozyjną wyższą od stali o osnowie ferrytycznej,
- rozdrobnienia ziarna oraz zmiany struktury przez odkształcenie warstwy wierzchniej rur poprzez obróbkę mechaniczną, co zwiększa przyczepność i ogranicza łuszczenie się tlenków,
- agresywności środowiska, przy czym znaczenie mają nie tylko związki siarki lub chloru ale również obecność w spalinach CO_2 i pary wodnej,
- czynników konstrukcyjnych oraz warunków i parametrów technicznych eksploatacji.

W stalach żarowytrzymałych procesy utleniania zależą głównie od temperatury oraz stężenia chromu i rodzaju struktury stali. Reakcje pary wodnej i spalin podczas eksploatacji mogą skutkować powstaniem trzech rodzajów tlenków żelaza: hematytu (Fe_2O_3), magnetytu (Fe_3O_4) i wistytu (FeO). Wymienione tlenki mają różne zakresy trwałości zależnie od temperatury ścianki. W temperaturze poniżej 570 ^oC trwały jest tylko tlenek Fe_3O_4 (magnetyt), który spełnia rolę warstwy ochronnej, natomiast w stalach o osnowie ferrytycznej powyżej 570 ^oC trwały jest tlenek FeO (wistyt), którego niekorzystna obecność w zgorzelinie informuje o rzeczywistej temperaturze ścianki wężownicy. W stalach austenitycznych, wysokochromowych FeO nie występuje.

W zależności od stężenia chromu w stali oraz temperatury warstwy wierzchniej może powstawać następująca sekwencja tlenków: Fe_2O_3 /Fe_3O_4 → Fe_3O_4 /$Fe(Cr)_3O_4$ → Cr_2O_3. W stalach wysokostopowych o odporności korozyjnej decyduje głównie tlenek chromu Cr_2O_3, jego zwartość budowy i przyczepność do podłoża. Sekwencje powstawania tlenków w zależności od zawartości chromu w stali pokazano na rys.34.

Ważnym parametrem opisującym proces niszczenia (szczególnie korozji równomiernej) jest szybkość narastania warstwy tlenku na powierzchni metalu, którą można opisać zależnością liniową, paraboliczną lub logarytmiczną. Poznanie mechanizmów i analiza niszczenia korozyjnego sprzyja działaniom zapobiegawczym związanym z trwałością elementów konstrukcyjnych, szczególnie wężownic przegrzewaczy pary, które pracują w najtrudniejszych eksploatacyjnych warunkach temperaturowych. Ulegają niszczeniu korozyjnemu zarówno od strony spalin jak i od strony pary co oprócz pocienienia ścianki pogarsza również wymianę ciepła. Uogólniony sposób

przeprowadzania analizy procesów korozyjnych elementów części ciśnieniowej kotła i rurociągów pokazano w postaci graficznej na rys.35.

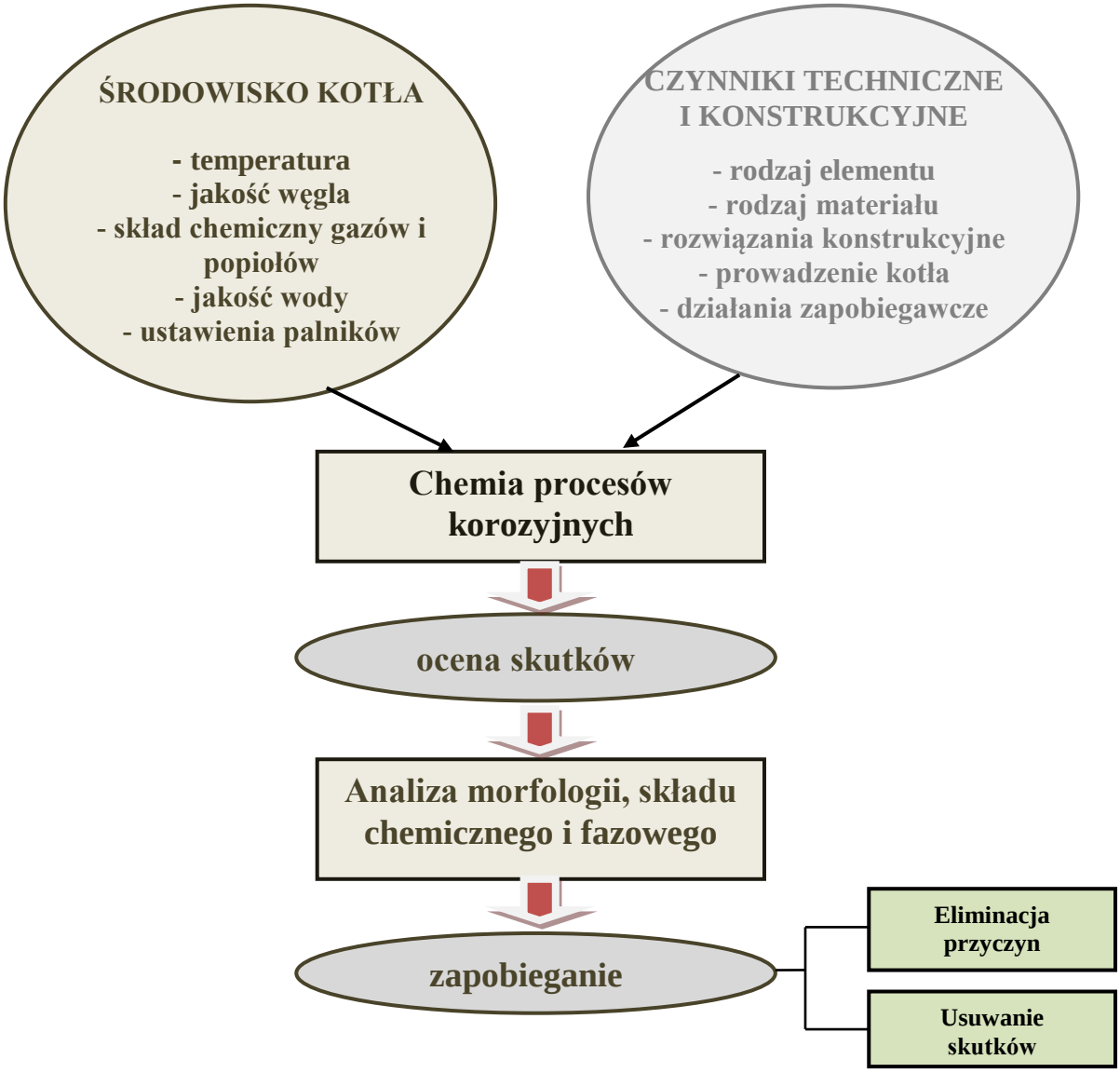


Rys. 34. Sekwencja tlenków zależnie od stężenia chromu w stali

W badaniach diagnostycznych elementów części ciśnieniowej kotła i rurociągów pracujących w warunkach pełzania niezbędnym jest przeprowadzenie badań osadów po stronie wewnętrznej i zewnętrznej na pobranych wycinkach do badań niszczących. Badania po stronie zewnętrznej są wykonywane dla wężownic przegrzewaczy pary, a po stronie wewnętrznej dla wężownic przegrzewaczy pary, komór/schładzaczy oraz elementów rurociągów.

Dla wężownic przegrzewaczy pary obligatoryjnym zakresem badań niszczących na pobranych wycinkach jest :

- określenie ilości tlenków i osadów,
- wyznaczenie składu chemicznego tlenków i osadów,
- określenie składu fazowego,
- wyznaczenie grubości tlenków i osadów na zgładach metalograficznych,
- określenie na zgładach metalograficznych stopnia zaawansowania procesów niszczenia korozyjnego i typów występującej korozji.



Rys. 35. Uogólniony sposób przeprowadzania analizy procesów korozyjnych

Na podstawie grubości tlenków i osadów oraz ich składu fazowego po stronie pary dokonywane jest szacowanie równoważnej temperatury pracy odniesionej do dotychczasowego czasu eksploatacji, a na podstawie ilości występujących osadów - określenie ich wpływu na obniżenie zdolności wężownic przegrzewacza pary do przewodzenia ciepła celem podejmowania decyzji o konieczności trawienia tych elementów kotła.

Dla komór/schładzaczy i rurociągów, w przypadku wykonywania badań niszczących, należy:

- wyznaczyć skład fazowy osadów występujących na powierzchni wewnętrznej,
- wyznaczyć grubość osadów na zgładach metalograficznych,

- określić na zgładach metalograficznych stopień rozwoju procesów niszczenia korozyjnego osadów po stronie wewnętrznej elementu.

Równoważna temperatura eksploatacji

Temperaturę eksploatacji badanych stali można wyznaczyć, znając rzeczywistą grubość warstwy tlenków po stronie wewnętrznej badanych rur po długotrwałej eksploatacji. Korozja parowo-wodna materiału elementów przegrzewaczy pary ma charakter równomierny. W zależności od czasu i temperatury w elementach konstrukcyjnych ze stali nisko- i wysokostopowych powstaje odpowiednia grubość warstwy tlenków żelaza, która jest skutkiem korozji parowo-wodnej. Jej prędkość jest zależna od stałej utleniania K, temperatury eksploatacji T_e oraz czasu eksploatacji t_e. Została opisana równaniem 22):

$$(\Delta g_w)^2 = K \cdot t_e \qquad 22)$$

gdzie:

Δg_w – przyrost grubości warstwy tlenków,

K – stała utleniania,

t_e – czas eksploatacji.

Doświadczenie eksploatacyjne i badania laboratoryjne potwierdziły ścisłe oddziaływanie temperatury i czasu eksploatacji na przyrost grubości warstwy tlenków Δg_w po stronie parowo-wodnej elementów przegrzewaczy pary. W oparciu o te doświadczenia wyznaczono dla niskostopowych stali dla energetyki empiryczną zależność pomiędzy stałą utleniania K a temperaturą eksploatacji T_e opisaną zależnością 23):

$$\log K = -\frac{9856}{T_e} + 5{,}20. \qquad 23)$$

Znając grubość warstwy tlenków i czas pracy elementów przegrzewacza pary można wyznaczyć równoważną temperaturę dotychczasowej eksploatacji T_e z równania 24):

$$T_e = 9856/[5{,}20 - \log(g^2/t_e)] \qquad 24)$$

gdzie:

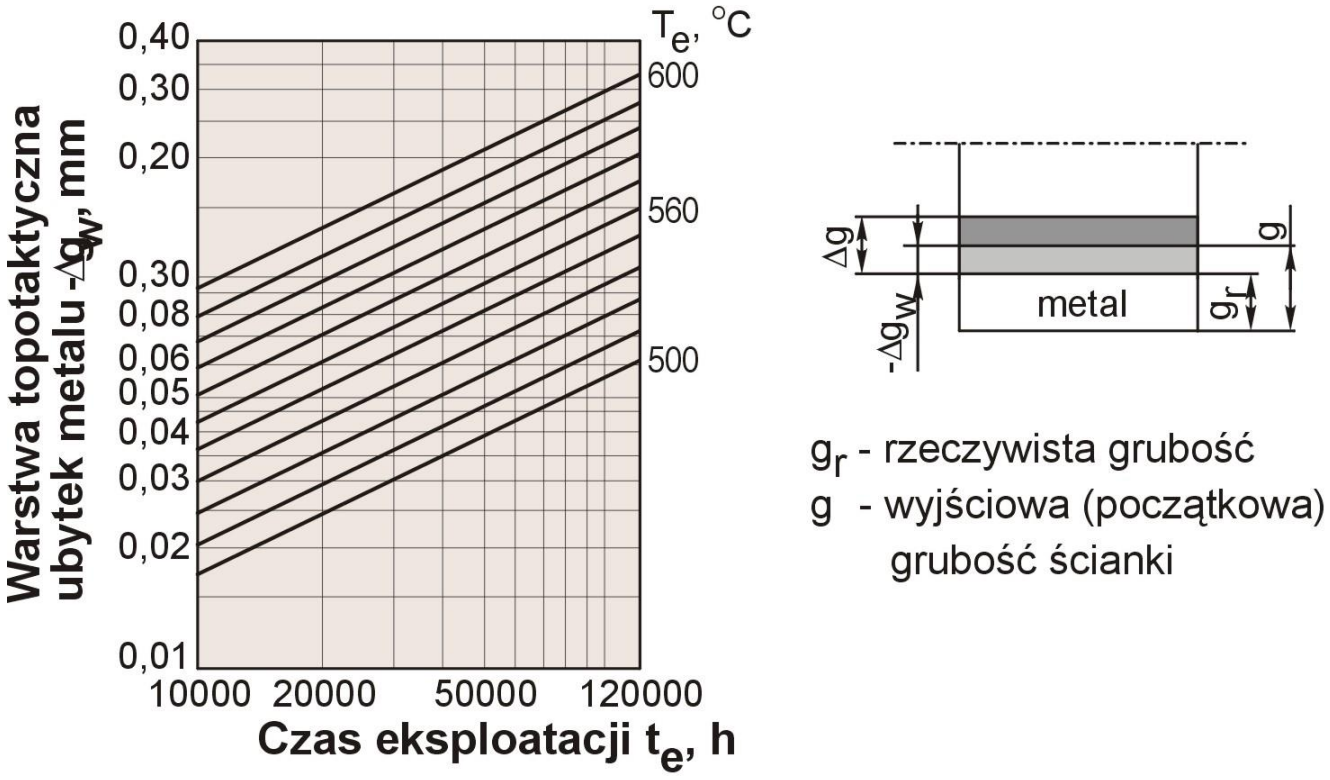
T_e – równoważna temperatura eksploatacji,

g – grubość warstwy tlenków,

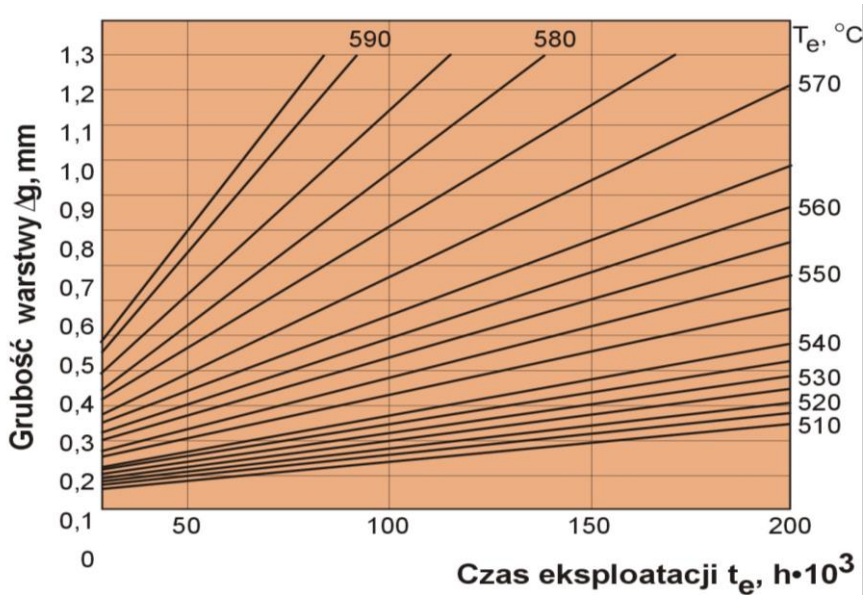
t_e – czas eksploatacji,

bądź z nomogramu będącego zależnością grubości warstwy tlenków od strony parowo-wodnej Δg_w od czasu eksploatacji t_e dla różnych wartości temperatury eksploatacji T_e w zakresie od 500 do 600°C.

Wpływ temperatury i czasu pracy na ubytek grubości ścianki po stronie wewnętrznej Δg_w, w wyniku tworzenia się warstwy tlenków zwanej topotaktyczną, pokazano na rys. 36. Natomiast wpływ temperatury i czasu pracy na całkowitą grubość warstwy Δg przedstawiono na rys. 37.



Rys. 36. Wpływ temperatury i czasu pracy na ubytek grubości ścianki Δg_w (warstwa topotaktyczna) elementów z niskostopowych stali chromowo-molibdenowych stosowanych w energetyce.



Rys. 37. Wpływ temperatury i czasu pracy na całkowitą grubość warstwy tlenków Δg od strony pary dla elementów z niskostopowych stali chromowo-molibdenowych dla energetyki.

Skład chemiczny i ilość osadów

Ilość osadów, po stronie wewnętrznej i zewnętrznej badanych wycinków rur wyznacza się w jednostce masy odniesionej do powierzchni wyrażonej w g/m^2. Ilość osadów jest różnicą masy badanych wycinków rur w stanie po eksploatacji i rur w stanie po eksploatacji i wytrawieniu warstwy osadów odpowiednio dobranym odczynnikiem trawiącym. Na podstawie stwierdzonej ilości osadów podejmuje się decyzję o konieczności trawienia zmniejszającego ich ilość, skutkując poprawą przewodzenia ciepła w badanych wężownicach przegrzewacza pary.

Skład fazowy osadów

Rodzaj związków chemicznych i ich udział w osadzie po stronie wewnętrznej i zewnętrznej badanych wycinków rur wyznacza się z zarejestrowanych dyfraktogramów uzyskanych w dyfraktometrze rentgenowskim. Identyfikację występujących związków chemicznych przeprowadzać należy w odniesieniu do wyznaczonego ich składu chemicznego. Na podstawie składu osadów i udziału poszczególnych rodzajów tlenków żelaza można wnioskować o poziomie temperatury pracy wężownic przegrzewacza pary.

Grubości osadów

Pomiaru grubości warstwy tlenków dokonuje się na zgładach metalograficznych wykonanych na przekrojach poprzecznych badanych odcinków rur przeprowadzanych w mikroskopie świetlnym lub w elektronowym mikroskopie skaningowym. Ich grubość odniesiona do czasu eksploatacji pozwala wyznaczyć równoważną temperaturę dotychczasowej eksploatacji.

Stopień rozwoju procesów niszczenia korozyjnego

Stopień rozwoju procesów niszczenia korozyjnego ocenia się na podstawie obserwacji stanu osadów i występującej mikrostruktury w odniesieniu do czasu eksploatacji. Szczególnie należy zwracać uwagę na obszary struktury bezpośrednio przylegające do warstwy tlenków. Obserwacje należy prowadzić w mikroskopie świetlnym i w skaningowym mikroskopie elektronowym. W ocenie należy również wykorzystywać wyniki analizy składu chemicznego mikroobszarów, wykonywanej w skaningowym mikroskopie elektronowym.

4.6.4. Uwagi dotyczące zakresu i sposobu realizacji badań.

Materiał elementów części ciśnieniowej kotła i rurociągów pracujących w warunkach pełzania jest oceniany metodami nieniszczącymi i niszczącymi. Dobór metod diagnostycznych dla oceny stanu materiału jest każdorazowo dokonywany w zależności od rodzaju elementu, czasu jego eksploatacji odniesionego do przyjętego obliczeniowego i charakteru jego pracy. Niezależnie od czasu eksploatacji wymagana jest ocena mikrostruktury materiału. Dokonywana jest w celu wyznaczenie klasy mikrostruktury, oszacowanie stopnia wyczerpania materiału co decyduje o jego zdolności do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych umożliwiając wyznaczenie czasu pracy do następnego przeglądu, będącego bezpiecznym czasem dalszej eksploatacji.

Wymagany zakres badań mikrostruktury elementów krytycznych kotła i rurociągów pracujących w warunkach pełzania w odniesieniu do celu badań definiowanego dla każdej grupy elementów zestawiono w tablicy 7.

Jeżeli stwierdzono podczas badań defektoskopowych nieciągłości w złączu spawanym, które wymagają naprawy niezbędna jest najpierw ocena stanu materiału elementów złącza. Umożliwia to podjęcie decyzji o możliwości wykonania naprawy. W przypadku konieczności naprawy poprzez wykonanie dodatkowego obwodowego złącza spawanego łączącego materiał po eksploatacji z materiałem po eksploatacji lub materiał po eksploatacji z materiałem nowym, również wymagana jest ocena stanu materiału, potwierdzająca że jego stan umożliwia przeprowadzenie naprawy poprzez spawanie.

Liczba wymaganych miejsc badań mikrostruktury nieniszczącą metodą replik matrycowych z elementów pracujących w warunkach pełzania jest uzależniona od wielkości i części składowych elementu, i w szczególności wynosi:

- dla komór i schładzaczy - po min. 2 dla każdego segmentu,
- dla kolan rurociągów głównych i komunikacyjnych - od 3 do 6 w zależności od wymiarów elementów i kąta gięcia,
- dla elementów armatury - od 3 do 5 w zależności od rodzaju i wielkości elementu (trójniki, czwórniki, korpusy zaworów, zasuwy parowe).

Doświadczenia w ocenie stanu technicznego elementów rurociągów wskazują na konieczność prowadzenia badań mikrostruktury nie tylko w miejscu największego rozciągania kolan ale również w obszarze przejścia kolana w prostkę. W przypadku wystąpienia w poszczególnych węzłach rurociągu ograniczeń w swobodnym przemieszczaniu się rurociągu pojawia się złożony stan naprężeń ze znacznym udziałem skręcania i/lub zginania obniżając znacznie rzeczywistą trwałość eksploatacyjną. Uzyskiwane wyniki badań stanu mikrostruktury

poszczególnych elementów rurociągu pozwalają identyfikować niewłaściwie pracujące węzły rurociągu. Są również podstawą do zbadania stanu elementów zawieszeń i podparć w tych węzłach oraz analizy ich funkcjonowania związanej z prawidłowością ich zaprojektowania, wykonania i ustawienia.

Tablica 7. Wymagany zakres badań mikrostruktury krytycznych elementów kotła i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.

Element	Miejsce badania	Technika badań mikrostruktury	Cel badania[3), 4)]
Komory przegrzewacza pary	materiał płaszcza na powierzchniach zewnętrznych w miejscach największego wytężenia	repliki matrycowe (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury (stan podstawowych składników fazowych, stan rozwoju procesów wydzieleniowych, stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczenie klasy mikrostruktury i oszacowanie stopnia wyczerpania, wyznaczenie czasu bezpiecznej eksploatacji materiału do następnego przeglądu
	obwodowe złącza spawane płaszcza [1)]	repliki matrycowe (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury materiału rodzimego (klasa struktury) stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych SWC i spoiny (klasa uszkodzeń)
	materiał płaszcza w postaci ‘korków’ pobranych techniką trepanacji	zgłady metalograficzne (SEM/LM) [2)], osady wyizolowanych wydzieleń	jak wyżej oraz wyznaczenie składu fazowego wydzieleń
Schładzacze	materiał płaszcza w dowolnych miejscach na odcinkach przed i za wtryskiem	repliki matrycowe (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury(stan podstawowych składników fazowych, stan rozwoju procesów wydzieleniowych, stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczenie klasy mikrostruktury i oszacowanie stopnia wyczerpania, wyznaczenie czasu bezpiecznej eksploatacji materiału do następnego przeglądu
	obwodowe złącza spawane płaszcza [1)]	repliki matrycowe (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury materiału rodzimego (klasa struktury) stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych SWC i spoiny (klasa uszkodzeń)
Główne rurociągi parowe	materiał wszystkich kolan ‚trójników, czwórników i wybranych odcinków prostych	repliki matrycowe (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury(stan podstawowych składników fazowych, stan rozwoju procesów wydzieleniowych, stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczenie klasy mikrostruktury i oszacowanie stopnia wyczerpania, wyznaczenie czasu bezpiecznej eksploatacji materiału do następnego przeglądu
	obwodowe złącza spawane [1)]	repliki matrycowe (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury materiału rodzimego (klasa struktury) stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych SWC i spoiny (klasa uszkodzeń)

Główne rurociągi parowe	na pobranych do badań niszczących wycinkach rurociągu	zgłady metalograficzne (SEM/LM) [2)], osady wyizolowanych wydzieleń	jak wyżej oraz wyznaczenie składu fazowego wydzieleń
Rurociągi komunikacyjne	materiał najbardziej wytężonych kolan i wybranych odcinków prostych	repliki matrycowe (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury(stan podstawowych składników fazowych, stan rozwoju procesów wydzieleniowych, stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczenie klasy mikrostruktury i oszacowanie stopnia wyczerpania, wyznaczenie czasu bezpiecznej eksploatacji materiału do następnego przeglądu
Wężownice przegrzewacza pary	na wlocie do komory wylotowej i poniżej obwodowego złącza różnoimiennego łączącego dwa różne gatunki materiału (jeśli użyto innego materiału)	zgłady metalograficzne (SEM/LM) [2)], osady wyizolowanych wydzieleń	określenie stopnia degradacji struktury(stan podstawowych składników fazowych, stan rozwoju procesów wydzieleniowych, stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczenie klasy mikrostruktury i oszacowanie stopnia wyczerpania, wyznaczenie czasu bezpiecznej eksploatacji materiału do następnego przeglądu, wyznaczenie składu fazowego wydzieleń, grubości warstwy tlenków i ich składu fazowego na powierzchni wewnętrznej, wyznaczenie równoważnego czasu dotychczasowej eksploatacji
Korpusy zaworów szybko-zamykających, regulacyjnych, główne zasuwy parowe, zawory bezpieczeństwa oraz stacje zabezpieczające i obejściowe	w części wlotowej i wylotowej, w miejscach możliwego dostępu ze względów konstrukcyjnych	repliki lub zgłady metalograficzne (SEM/LM) [2)]	określenie stopnia degradacji struktury(stan podstawowych składników fazowych, stan rozwoju procesów wydzieleniowych, stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczenie klasy mikrostruktury i oszacowanie stopnia wyczerpania, wyznaczenie czasu bezpiecznej eksploatacji materiału do następnego przeglądu,

Uwagi:

[1)] Podczas badań złączy spawanych analiza struktury powinna obejmować spoinę, strefy wpływu ciepła oraz materiały rodzime po obydwu stronach złącza;

[2)] SEM - skaningowy mikroskop elektronowy, LM-mikroskop świetlny; w przypadku nie zaobserwowania w LM mikropęknięć wymagany SEM do oceny stanu mikrostruktury i wyznaczenia jej klasy. Ponadto niezależnie od zastosowanej techniki badawczej należy wykonać pomiary twardości,

[3)] W przypadku konieczności wykonania naprawy przez spawanie polegające na wykonaniu nowego złącza spawanego (materiał po eksploatacji/materiał po eksploatacji, materiał po eksploatacji/ materiał nowy) wymagana jest również ocena stanu materiału pod względem możliwości wykonania złącza spawanego,

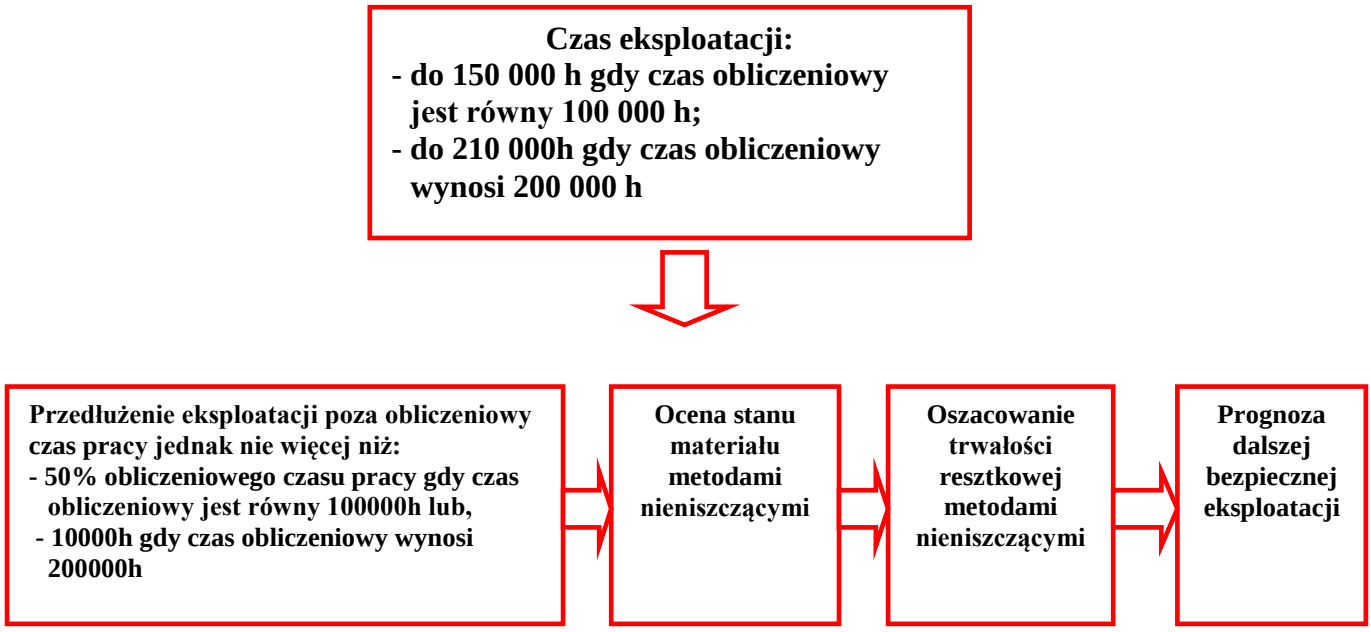
[4)] W przypadku konieczności wykonania naprawy istniejącego złącza spawanego konieczne jest wykonanie oceny stanu materiału elementów złącza (materiał rodzimy-strefa wpływu ciepła-spoina- strefa wpływu ciepła- materiał rodzimy) pod względem możliwości wykonania naprawy przez spawanie.

Doświadczenia w ocenie stanu technicznego komór przegrzewaczy pary, jako elementów grubościennych wykazały natomiast, że niektóre spośród nich, są naprawiane lub wymieniane w związku z ich uszkodzeniami będącymi skutkiem równoczesnego działania pełzania i zmęczenia cieplnego wynikającego z występowania termoszoków. Inicjacja i wzrost pęknięć są identyfikowane na powierzchni wewnętrznej płaszcza zwłaszcza w obszarze krawędzi otworów i mostków między otworami. Ponieważ największe zmiany w strukturze materiału płaszcza na jego grubości występują po stronie wewnętrznej niezbędna jest znajomość różnicy w klasie struktury materiału na powierzchni wewnętrznej i przy powierzchni zewnętrznej. Przeprowadzane są dlatego badania niszczące w celu określenia zmian mikrostruktury na grubości ścianki elementu. Ocena stanu mikrostruktury w obszarach najbardziej wytężonych daje możliwość oceny zdolności materiału elementu do przenoszenia wymaganych obciążeń eksploatacyjnych z uwzględnieniem charakteru i głębokości występujących pęknięć.

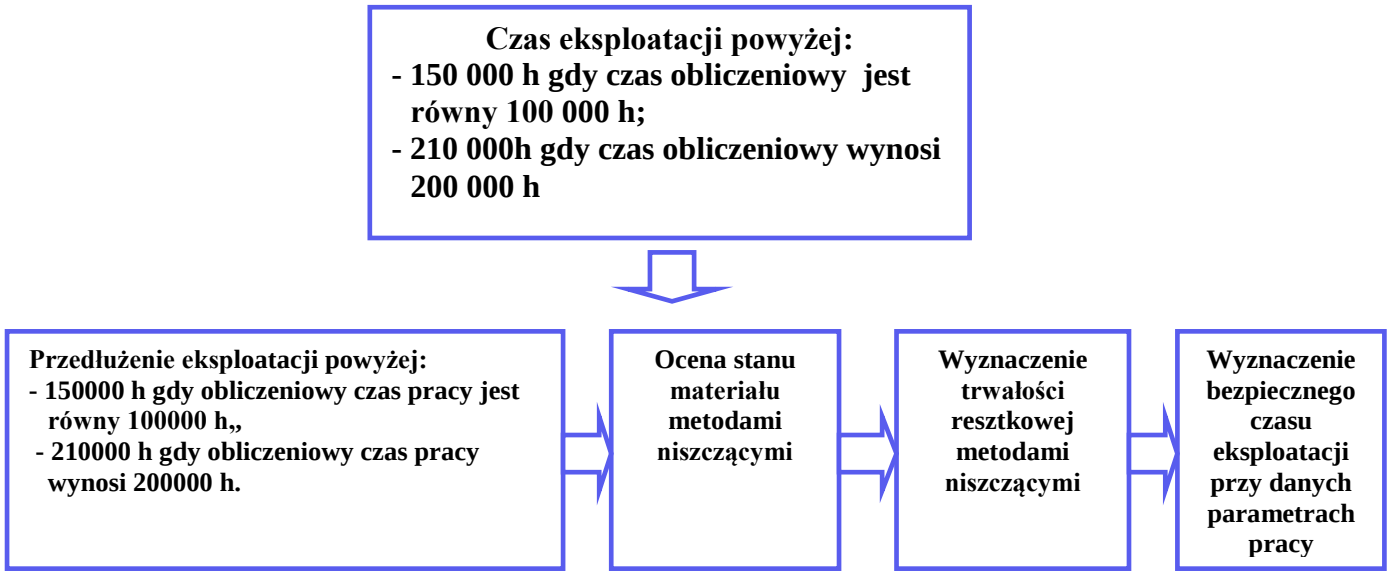
Uogólniony sposób oceny stanu materiału i określenie bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji jako zasadniczy element oceny stanu elementów głównych rurociągów parowych, komór przegrzewaczy oraz schładzaczy pary pracujących w warunkach pełzania na podstawie badań nieniszczących pokazano na rys. 38.

Uogólniony sposób oceny stanu materiału i wyznaczenie bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji jako podstawowy element oceny stanu elementów głównych rurociągów parowych, komór przegrzewaczy i schładzaczy pary pracujących w warunkach pełzania na podstawie nieniszczących i niszczących badań materiałowych pokazano na rys. 39.

Badania niszczące na materiale korka pobranego metodą trepanacji należy ograniczyć tylko do komór wylotowych wyższych stopni przegrzewaczy pracujących w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych.



Rys. 38. Uogólniony sposób oceny stanu materiału i określenie bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji na podstawie nieniszczących badań materiałowych:
a) głównych rurociągów parowych, b) komór przegrzewacza pary i schładzaczy



GŁÓWNE RUROCIĄGI PAROWE

1. Badania materiałowe nieniszczącą metodą replik matrycowych na pracujących w warunkach pełzania elementach rurociągu..
a. wyznaczenie elementów najbardziej wytężonych w oparciu o łączną analizę: dotychczasowej eksploatacji, wyników obliczeń dla parametrów roboczych, oględziny na obiekcie;
b. badania dla min. 2/3 elementów; na każdym elemencie min. 3-6 replik w zależności od wielkości i rodzaju elementu (materiał rodzimy i obwodowe złącza spawane);
2. Ocena stanu materiału i oszacowanie stopnia wyczerpania.
3. Wybór reprezentatywnego wycinka do niszczących badań materiałowych w oparciu o wyniki badań metodą replik wspomagane analizą: dotychczasowej eksploatacji, wyników obliczeń dla parametrów roboczych, oględzin na obiekcie
4. Pobranie wycinka do badań.
5. Badania mikrostruktury (obraz struktury, identyfikacja wydzieleń) oraz właściwości mechanicznych (R_m, R_e, R_e^t, KV, próg kruchości, resztkowa wytrzymałość na pełzanie w próbach skróconych).
6. Wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji dla zdefiniowanych parametrów pracy w oparciu o wyznaczoną trwałość resztkową i rozporządzalną oraz stopień wyczerpania.

KOMORY PRZEGRZEWACZA PARY SCHŁADZACZE

1. Badania materiałowe nieniszczącą metodą replik matrycowych na płaszczu elementu pracującego w warunkach pełzania .
a. wyznaczenie miejsc najbardziej wytężonych w oparciu o łączną analizę: dotychczasowej eksploatacji, wyników obliczeń dla parametrów roboczych, oględziny na obiekcie;
b. badania dla min. 2 obszarów każdego segmentu płaszcza elementu; na każdym segmencie min. 2 repliki;
c. badania złączy spawanych łączących segmenty;
2. Ocena stanu materiału i oszacowanie stopnia wyczerpania.
3. Wybór reprezentatywnego miejsca do pobrania „korka" metodą trepanacji w oparciu o wyniki badań metodą replik wspomagane analizą: dotychczasowej eksploatacji, wyników obliczeń dla parametrów roboczych, oględzin na obiekcie ;
4. Pobranie „korka" do niszczących badań materiałowych..
5. Badania mikrostruktury (obraz struktury, identyfikacja wydzieleń) oraz prędkości pełzania w próbie pełzania z pomiarem wydłużenia..
6. Wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji dla zdefiniowanych parametrów pracy w oparciu o wyznaczoną prędkość pełzania odniesioną do rzeczywistej wielkości trwałego odkształcenia.

Rys. 39. Uogólniony sposób oceny stanu materiału i wyznaczenie bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji na podstawie nieniszczących i niszczących badań materiałowych: a) głównych rurociągów parowych, b) komór przegrzewacza pary i schładzaczy

4.7. Metalograficzna interpretacja stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej [1].

W celu oszacowania stopnia wyczerpania na podstawie badań strukturalnych, najczęściej metodami nieniszczącymi, niezbędna jest znajomość zachowania się badanych materiałów w czasie pracy w warunkach pełzania. Zmiany w strukturze zachodzą w jej podstawowych składnikach fazowych oraz występujących wydzieleniach, powodując powstawanie i rozwój wewnętrznych uszkodzeń. Udział poszczególnych rodzajów procesów i ich intensywność zależy od typu struktury stanu wyjściowego i stopnia wyczerpania. W pierwszym okresie największe zmiany są związane z rozpadem obszarów perlitu i/lub bainitu w stalach niskostopowych oraz martenzytu w stalach wysokochromowych. Ze wzrostem stopnia wyczerpania intensywność tych zmian maleje, a rośnie intensywność procesów wydzieleniowych. Zaawansowany stan rozwoju procesów wydzieleniowych sprzyja zapoczątkowaniu i rozwojowi wewnętrznych uszkodzeń powodując powstawanie nieciągłości. Inicjacja nieciągłości najczęściej następuje pod koniec drugiego lub z początkiem trzeciego okresu pełzania. Zależy to od rodzaju struktury i parametrów eksploatacji.

Na podstawie wieloletnich badań i doświadczeń diagnostycznych przeprowadzonych w IMŻ w Gliwicach ujawniono, że zmiany zachodzące w mikrostrukturze są związane z:

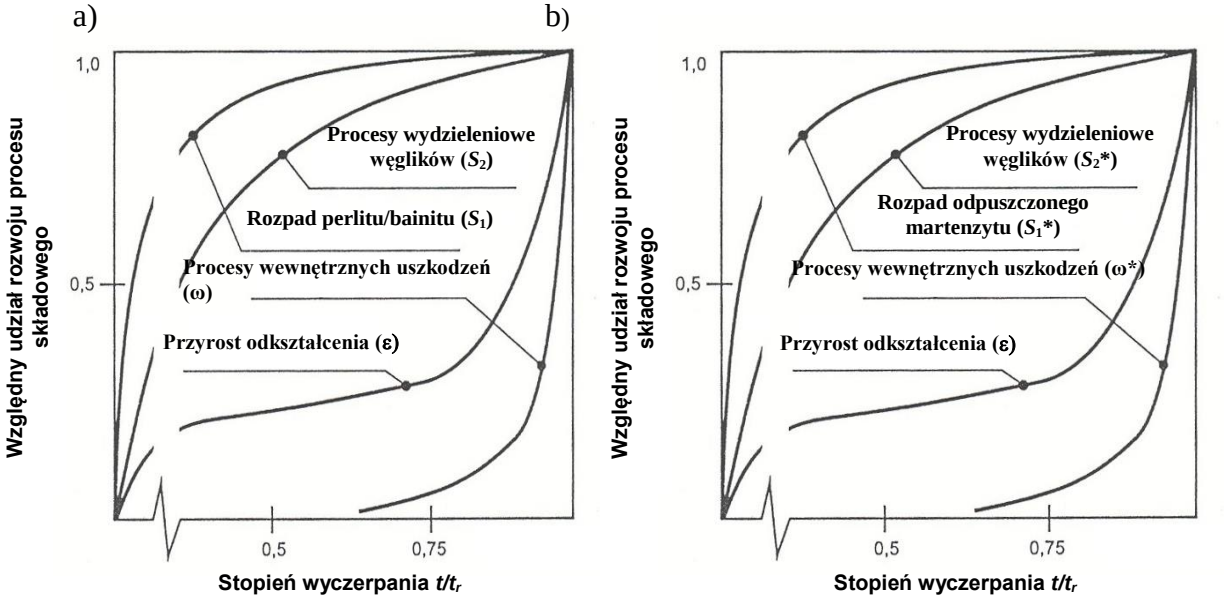
a) rozpadem podstawowych składników mikrostruktury (perlitu, bainitu, martenzytu) w miejsce których w wyniku długotrwałej eksploatacji powstaje struktura składająca się z ziarn ferrytu z węglikami wewnątrz i po granicach ziarn, przy wzroście podziarn i równoczesnym ich zaniku,
b) rozwojem procesów wydzieleniowych węglików do zaniku typów węglików występujących w stanie wyjściowym, tworzeniem nowych, ich wzrostem, koagulacją i koalescencją,
c) rozwojem wewnętrznych uszkodzeń od inicjacji i powstawania pojedynczych pustek, poprzez ich wzrost, koalescencję, powstawanie nieciągłości po granicach ziarn i granicach międzyfazowych aż do makropęknięć włącznie.

Względne udziały wyżej zdefiniowanych procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania w zależności od stopnia wyczerpania w niskostopowych stalach ferrytyczno-perlitycznych i ferrytyczno-bainitycznych pokazano schematycznie na rys.40a, a w stalach o strukturze odpuszczonego martenzytu na rys 40b.

Poszczególne krzywe ilustrują dynamikę zmian w zależności od stopnia wyczerpania, a w szczególności:

- zmian mikrostruktury w odniesieniu do stanu wyjściowego (S_1, S_2),
- przyrost trwałych odkształceń w wyniku pełzania(ε),

- rozwój uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania(ω).



Rys. 40. Względne udziały procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania:

a) w stalach niskostopowych o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym,

b) w stalach wysokochromowych o strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym.

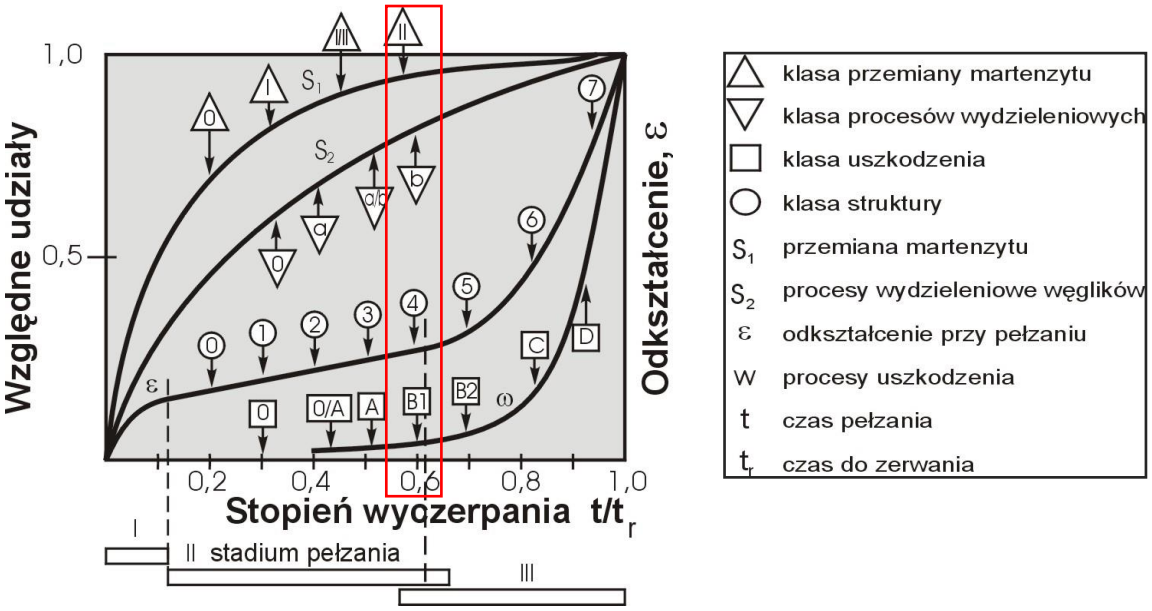
W oparciu o zdefiniowane powyżej procesy składowe mające wpływ na zmiany w mikrostrukturze skutkujące obniżaniem się odporności na pełzanie w wyniku długotrwałej eksploatacji, odniesione do stopnia wyczerpania materiału opracowano system oceny jego stanu i przydatności do dalszej eksploatacji. Ocena stanu struktury dokonywana jest na podstawie jej obrazu, stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych oraz procesów wewnętrznych uszkodzeń.

Tworząc system oceny stanu materiału przyjęto, że znajomość stanu wyjściowego jak również znajomość historii eksploatacji nie jest wymagana. Założono jednak, że są to dwa główne czynniki mające istotny wpływ na stan struktury materiału po eksploatacji, a ich skutki są zakodowane w materiale będącym przedmiotem oceny. Ich znajomość nie jest niezbędna do oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji. Istotnym jest jednak dobór odpowiednich narzędzi i metod badawczych, które umożliwiają ujawnienie cech badanego materiału niezbędnych dla oceny. Znajomość warunków eksploatacji jest jednak pomocna w definiowaniu warunków i prognozowaniu czasu dalszej eksploatacji.

W systemie oceny przyjęto, że stopień wyczerpania materiałów pracujących w warunkach pełzania jest skutkiem nakładania się zmian w strukturze, zarówno w zakresie jej składników fazowych, procesów wydzieleniowych jak i uszkodzeń wewnętrznych. Zmianom struktury wszystkich badanych stali przypisano odpowiadający im stopień wyczerpania. Przypisanemu stopniowi wyczerpania z kolei przyporządkowano główne klasy struktury. Główne klasy struktury ujmują klasy procesów składowych zmian w strukturze badanych stali. Na tej podstawie opracowano klasyfikację stanu materiału pracującego w warunkach pełzania w oparciu o stan mikrostruktury wyrażony w odpowiadającym jej stopniu wyczerpania. Znając stopień wyczerpania badanego materiału można oszacować bezpieczny czas dalszej eksploatacji elementów z badanych stali dla zdefiniowanych parametrów roboczych dalszej pracy. W szczególności w opracowanej klasyfikacji ujęto następujące elementy zmian w strukturze związane z:

- rozpadem perlitu S_1 dla stali o strukturze: ferrytyczno-perlitycznej w stanie wyjściowym,
- rozpadem bainitu S_1* dla stali o strukturze: ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym,
- rozpadem odpuszczonego martenzytu S_1** dla stali o strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym,
- rozwojem procesów wydzieleniowych węglików S_2,
- rozwojem wewnętrznych uszkodzeń ω dla stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym,
- rozwojem wewnętrznych uszkodzeń ω* dla stali o strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym.

Opracowany schemat zmian struktury stali po eksploatacji w warunkach pełzania obejmujący klasy rozpadu jej głównych faz, rozwój procesów wydzieleniowych oraz uszkodzeń wewnętrznych, w zależności od stopnia wyczerpania w odniesieniu do głównej klasy struktury przedstawiony na tle krzywej pełzania, pokazano na rys. 41. Zmianom struktury przypisano odpowiadający im stopień wyczerpania. Natomiast stopniowi wyczerpania przyporządkowano główną klasę struktury, ujmującą klasy procesów składowych zmian w strukturze.



Rys.41. Sposób klasyfikacji w oparciu o zmiany struktury, uszkodzeń wewnętrznych i stopień wyczerpania na przykładzie stali o strukturze odpuszczonego martenzytu po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania.

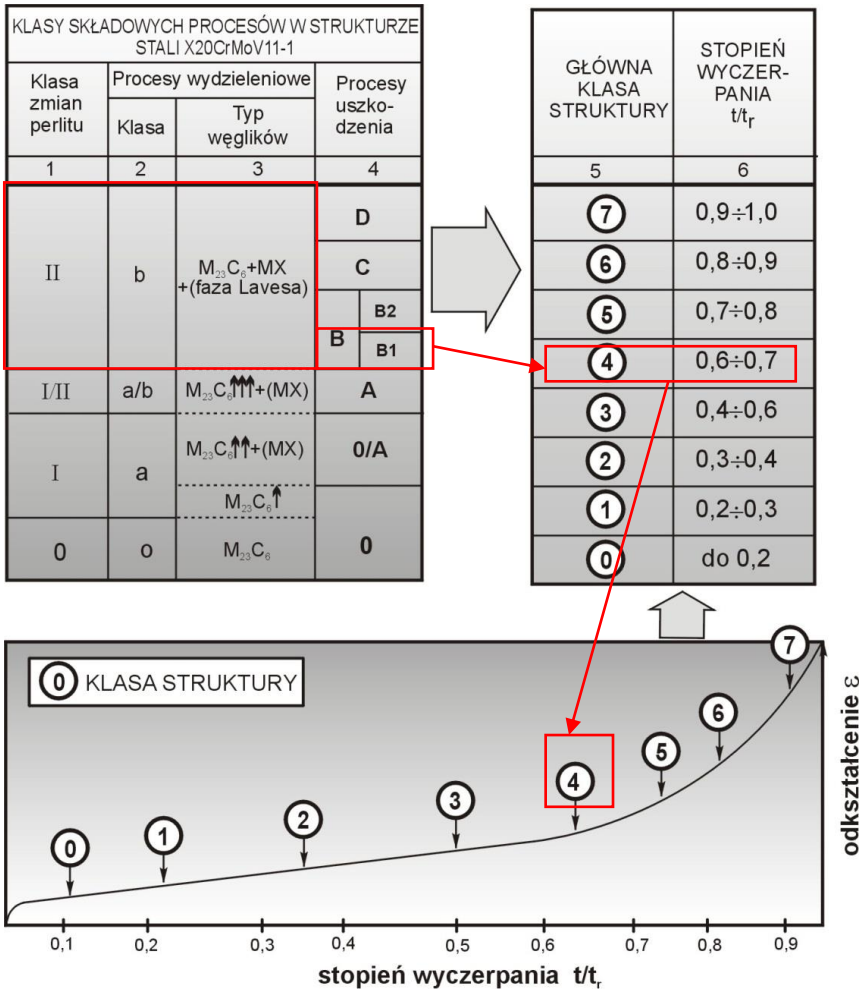
Przyjętą metodologię oceny stanu badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych tzn.: zmian w strukturze perlitu, bainitu lub martenzytu, zmian w zakresie rozwoju procesów wydzieleniowych oraz uszkodzeń wewnętrznych odniesionych do stopnia wyczerpania przedstawiono na rys. 42.

Poprzez dokonanie oceny wyżej wymienionych elementów składowych struktury, przypisując odpowiadające im klasy ujawnione na podstawie badań strukturalnych, wyznacza się główną klasę struktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania. Znając stopień wyczerpania i dotychczasowy czas eksploatacji można oszacować bezpieczny czas dalszej eksploatacji dla dotychczasowych warunków pracy.

Opracowana klasyfikacja dla każdej z badanych stali składa się dwóch części. Pierwsza część klasyfikacji obejmuje stale po eksploatacji w warunkach pełzania bez wewnętrznych uszkodzeń. Natomiast część druga klasyfikacji obejmuje stale po eksploatacji w warunkach pełzania z wewnętrznymi uszkodzeniami.

Sposób oceny materiału eksploatowanego w warunkach pełzania nie wykazującego uszkodzeń wewnętrznych oparty jest na klasyfikacji struktury obejmującej stan głównych faz mikrostruktury i stopień rozwoju procesów wydzieleniowych.

Na podstawie ujawnionego obrazu mikrostruktury obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym, zidentyfikowanych typów występujących wydzieleń i ich udziałów w strukturze, wyznacza się klasę mikrostruktury oraz odpowiadający jej stopień wyczerpania.



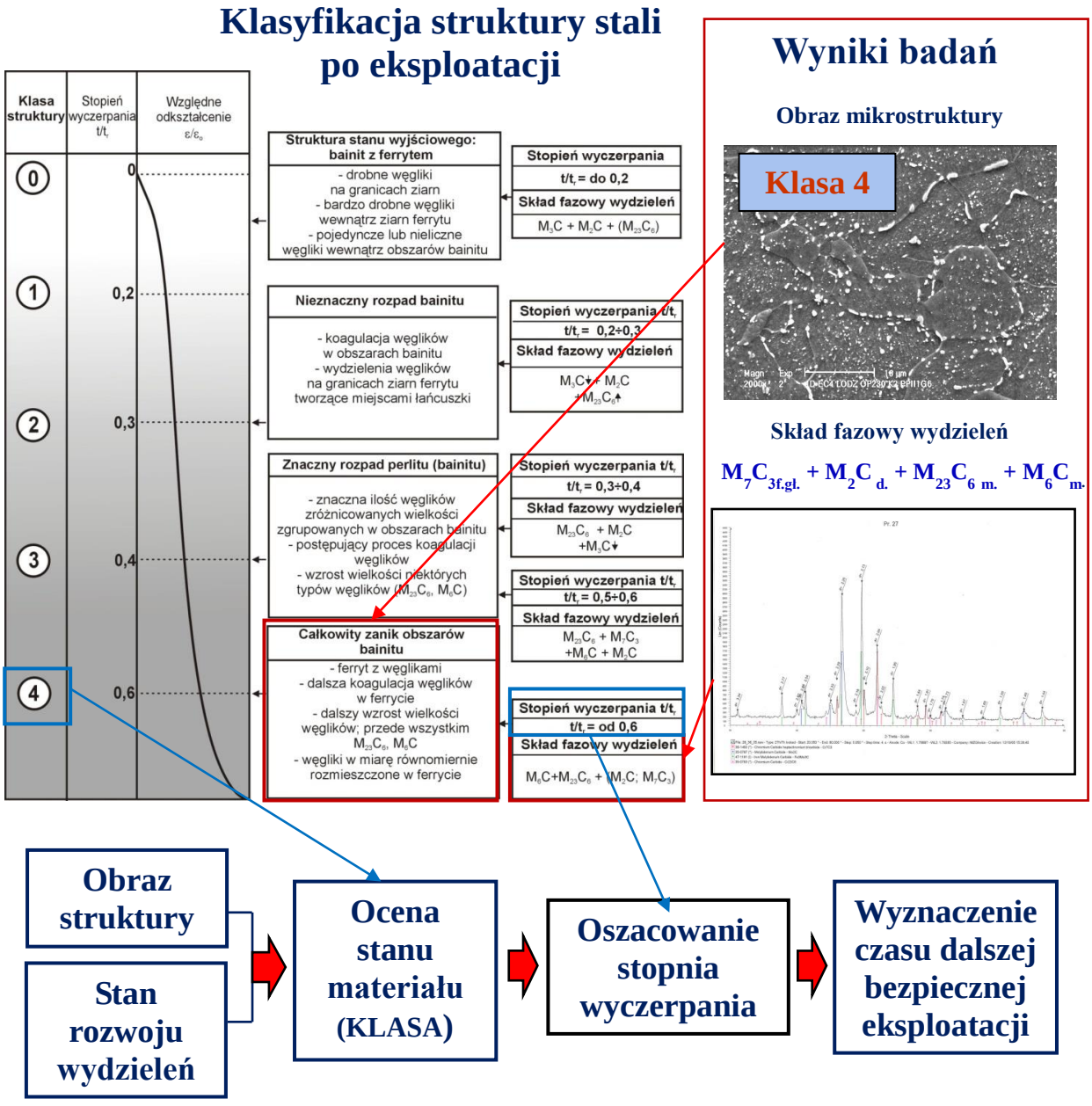
Rys. 42. Zasady klasyfikacji w oparciu o składowe procesy zmian struktury odniesione do stopnia wyczerpania materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania.

Znając stopień wyczerpania można wyznaczyć bezpieczny czas dalszej eksploatacji. Przykładową klasyfikację dla wybranej stali niskostopowej pokazano na rys. 43. Dla ujawnionego obrazu mikrostruktury i składu wydzieleń materiał sklasyfikowano jako odpowiadający klasie 4. Klasie 4 odpowiada stopień wyczerpania t_e/t_r = ok.0,6. Czas dalszej bezpiecznej eksploatacji dla materiału o takim stopni wyczerpania nie może być dłuższy niż 30 tys. godzin.

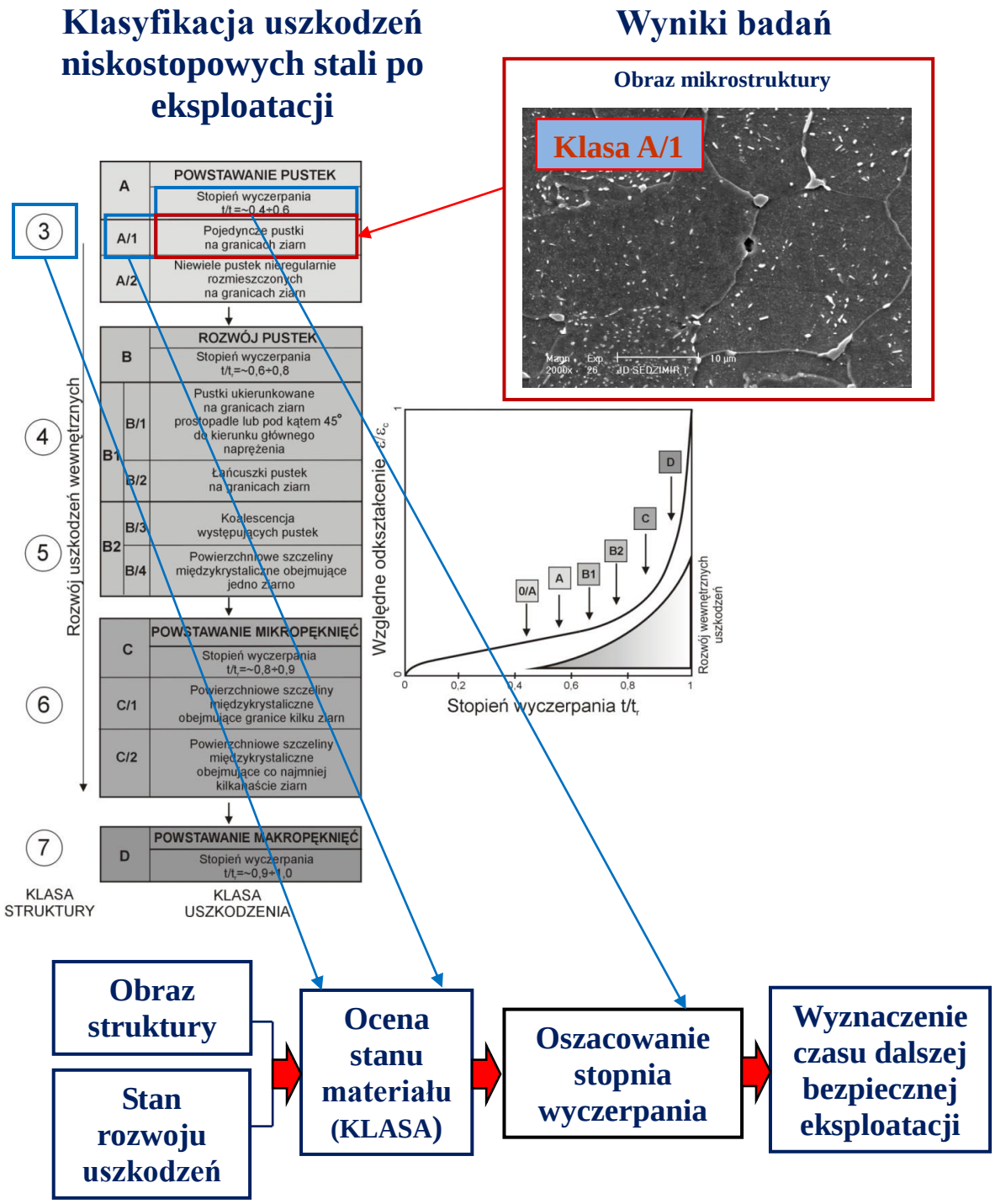
Sposób oceny materiału eksploatowanego w warunkach pełzania wykazującego uszkodzenia wewnętrzne oparty jest na klasyfikacji struktury obejmującej stan rozwoju procesów uszkodzenia. Na podstawie ujawnionego obrazu mikrostruktury obserwowanej w skaningowym mikroskopie elektronowym i zidentyfikowanego stopnia rozwoju uszkodzeń wewnętrznych wyznacza się klasę mikrostruktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania.

Znając stopień wyczerpania można wyznaczyć bezpieczny czas dalszej eksploatacji. Przykładową klasyfikację dla stali niskostopowych pokazano na rys. 44. Dla ujawnionego obrazu mikrostruktury

materiał sklasyfikowano jako odpowiadający klasie 3. Klasie 3 odpowiada stopień wyczerpania t_e/t_r = ok.0,6. Czas dalszej bezpiecznej eksploatacji dla materiału o takim stopni wyczerpania i ujawnionych pojedynczych pustkach nie może być dłuższy niż 20 tys. godzin.



Rys.43. Oszacowanie stopnia wyczerpania materiału bez uszkodzeń wewnętrznych pracującego w warunkach pełzania na podstawie badań struktury.



Rys.44. Oszacowanie stopnia wyczerpania materiału z uszkodzeniami wewnętrznymi pracującego w warunkach pełzania na podstawie badań struktury.

W załączniku B niniejszego opracowania zamieszczono:

- rysunki opisujące modele degradacji struktury,
- tabele umożliwiające określenie okresu dopuszczenia do dalszej eksploatacji w zależności od klasy struktury,
- tabele zawierające przykłady oceny stanu struktur.

4.8. Przykłady oceny stanu elementów [1].

Ocena na podstawie zespołu wyników badań uzyskanych metodami nieniszczącymi

Do elementów, z których zazwyczaj nie jest możliwe pobranie wycinków do badań niszczących należy zaliczyć: komory i kolektory zbiorcze, schładzacze, kolana, trójniki. Rodzaj metod, liczbę i sposób przeprowadzenia badań nieniszczących i pomiarów ustala się każdorazowo dla konkretnego badanego elementu w zależności od charakteru pracy elementu i jego konstrukcji, zgodnie z opracowaną procedurą.

Na podstawie łącznej analizy:

- parametrów obliczeniowych i roboczych odniesionych do 100 i 200 tys. godzin pracy celem porównania minimalnej rzeczywistej grubości ścianki z wartościami obliczonymi w oparciu o charakterystyki materiału w stanie wyjściowym,
- uzyskanych wyników badań nieniszczących,
- pomiary trwałego odkształcenia, strzałki ugięcia i prędkości pełzania,
- wyników badań struktury metodą replik matrycowych i twardości celem określenia klasy struktury i oszacowania stopnia wyczerpania,
- wyznaczonej trwałości resztkowej i rozporządzalnej resztkowej z charakterystyk wytrzymałości na pełzanie materiału po eksploatacji dla zadeklarowanych parametrów dalszej pracy,

określa się maksymalny dopuszczalny czas dalszej bezpiecznej pracy materiału i elementu dla zdefiniowanych przez użytkownika parametrów dalszej eksploatacji. Przykład sposobu takiej oceny elementu części ciśnieniowej kotła o dużej wydajności w oparciu o dane dokumentacji projektowej, parametry rzeczywiste, nieniszczące badania defektoskopowe, badania metaloznawcze oraz charakterystyki materiału po eksploatacji zestawiono w tablicy 8.

Tablica 8. Przykład sposobu oceny elementu pracującego w warunkach pełzania w oparciu o dane dokumentacji projektowej, parametry rzeczywiste, nieniszczące badania defektoskopowe oraz badania metaloznawcze.

Termin badania: **Nr arkusza:**

1	**Nazwa elementu**		**KOMORA WLOTOWA P.P. IV° (P4WLP) (STRONA PRAWA) SEGMENT I, II**
2	Materiał		10H2M
3	Średnica zewnętrzna elementu D_z (g_n), mm		355,6 (45)
4	Ciśnienie obliczeniowe p_o, MPa		21,0
5	Temperatura obliczeniowa t_o, °C		505
6	Obliczeniowy współczynnik wytrzymałościowy, Z		0,837
7	Obliczeniowa grubość ścianki g_o, mm		41,58
8	Naprężenie wg danych dokumentacji projektowej σ_o, MPa		90,49
9	$R_{z\ min/10^5/to}$, MPa		106,4
10	$R_{z\ min/2x10^5/to}$, MPa		95,2
11	Wymagana grubość ścianki dla 200 tys. h wg dokumentacji projektowej g_{02}, mm		39,79
12	Czas pracy wg dokumentacji projektowej τ_{Bo}, h x 10^{-3}		274
13	Czas specjalnego nadzoru τ_o, h x 10^{-3}		165
14	Rzeczywiste ciśnienie pracy elementu p_r , MPa		19,2
15	Rzeczywista temperatura pracy elementu t_r, °C		490
16	Rzeczywista grubość ścianki elementu $g_{r\ min}$, mm		50,2
17	Rzeczywiste naprężenie elementu σ_r, MPa		67,91
18	$R_{z\ min/10^5/tr}$, MPa		131,2
19	$R_{z\ min/2x10^5/tr}$, MPa		119,2
20	Grubość ścianki elementu dla 200 tys. h dla parametrów rzeczywistych g_{r2}, mm		30,86
21	Czas pracy wg parametrów rzeczywistych τ_{br}, h x 10^{-3}		pow. 200
22	Czas specjalnego nadzoru wg parametrów rzeczywistych t_r, h x 10^{-3}		pow. 100
23	Rzeczywisty czas pracy elementu τ_s, h		147 973
24	Badania defektoskopowe i endoskopowe	Badania penetracyjne	badań nie wykonywano
		Badania magnetyczne – proszkowe	Badania magnetyczne: **wynik pozytywny** (prot. nr MT 441/06/S)
		Badania ultradźwiękowe	Badania ultradźwiękowe spoin obwodowych: - **wynik pozytywny** (prot. 153B-UT-S-B-06)
		Badania endoskopowe	Badania endoskopowe: **wynik pozytywny** (prot. nr VT 440/06/S)
25	Trwałe odkształcenie, %		0,52
26	Strzałka ugięcia, mm		badań nie wykonywano
27	Prędkość pełzania s^{-1} x 10^{-8}		brak danych
28	Twardość HV		164÷170
29	Stan materiału Klasa/stopień wyczerpania		**KLASA 0/1** **~ 0,2**
30	**Okres dopuszczenia materiału elementu do dalszej eksploatacji, h x 10^{-3}**		**maks. 60**
31	Trwałość resztkowa wg charakterystyk τ_e, h x 10^{-3}		pow. 100
32	Rozporządzalna trwałość resztkowa wg charakterystyk $\tau_{0,6e}$, h x 10^{-3}		pow. 200
33	**Okres dopuszczenia elementu do dalszej eksploatacji, h x 10^{-3}**		**maks. 60**

Ocena na podstawie zespołu wyników badań uzyskanych metodami niszczącymi

Dla niektórych elementów możliwe jest pobranie materiału do badań niszczących. Dotyczy to przede wszystkim wężownic przegrzewaczy pary. W oparciu o historię ich pracy i doświadczenia eksploatacyjne, przeprowadzone oględziny, badania nieniszczące oraz pomiary grubości ścianki metodą ultradźwiękową wyznacza się reprezentatywne miejsca, z których pobiera się wycinki do badań niszczących. Wykonuje się najczęściej następujące rodzaje badań:

- badania właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej i podwyższonej zbliżonej do roboczej temperatury pracy,
- badania pracy łamania często z wyznaczeniem progu kruchości,
- badania metalograficzne z pomiarem twardości wykonywane na zgładach metalograficznych celem sklasyfikowania występującej struktury i oszacowania stopnia wyczerpania,
- badania osadów po stronie wewnętrznej i zewnętrznej poprzez określenie ich ilości, wyznaczenie ich składu chemicznego oraz składu fazowego i oszacowanie na tej podstawie równoważnej temperatury pracy odniesionej do dotychczasowego czasu eksploatacji,
- skrócone próby pełzania na mini próbkach celem wyznaczenia trwałości resztkowej oraz czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji dla przewidywanej temperatury i ciśnienia dalszej pracy.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań wyznacza się maksymalny dopuszczalny czas dalszej bezpiecznej pracy poszczególnych badanych wycinków wężownic przegrzewaczy pary dla zdefiniowanych przez użytkownika parametrów dalszej eksploatacji. Najkrótszy wyznaczony czas dalszej bezpiecznej pracy jest czasem eksploatacji dla danego rodzaju wężownic. Prawidłowe przeprowadzenie takiej analizy, najczęściej wykonywanej bez przeprowadzenia badań pełzania, wymaga posiadania charakterystyk materiałów po różnym okresie eksploatacji. Przykład wyniku analizy wykonanych badań oraz oceny stanu materiału i wyznaczenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji na podstawie wyników badań metodami niszczącymi wycinków rur wężownic wybranych przegrzewaczy pary po eksploatacji w warunkach pełzania pokazano w tablicy 9.

Tablica 9. Przykład sposobu oceny stanu materiału i wyznaczenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji na podstawie wyników badań metodami niszczącymi wycinków rur wężownic przegrzewacza pary po eksploatacji w warunkach pełzania

Nazwa elementu	Gatunek Stali wg DIN (PN) Wymiary mm	Oznaczenie wycinka nr	Własności wytrzymałościowe				Stan struktury materiału			Stopień (degradacji) wyczerpania Twardość HV	Całkowita grubość warstwy tlenków Δg_w [µm]/T [°C]	Dopuszczenie materiału do dalszej eksploatacji tys.h
			R_m	R_e	A_5	R_e^t						
			MPa	MPa	%	MPa	Zmiany w strukturze	(nieciągłości struktury) stopień wyczerpania	Stan materiału (klasa)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Przegrzewacz pary II°	15HM ϕ 32x3	ozn. nr 3	399	275	36	241	I/II; o/a	(O)	**2**	0,3÷0,4 152÷176	156	**maks. 30**
		ozn. nr 4	539	387	30	258	0/I; a		**1**	0,2÷0,3 187÷194	121	**maks. 40**
		ozn. nr 5	540	391	27	230	I/II; a/b		**2/3**	0,4 154÷176	189	**maks. 30**
wymagania dla materiału w stanie wyjściowym wg PN-74/H-74252			440÷570	min 295	min 22	min 193 [2.)]	0; o	O	0	0 ~120÷150	Wymagania dla materiału w stanie wyjściowym wg klasyfikacji własnej IMŻ	

Uwagi: temperatura badania R_e^t [1)] 315°C, [2.)] 430°C, [3.)] 500°C

- nie spełnia wymagań norm

5. Przykłady sposobu postępowania w diagnostyce technicznej elementów pracujących w warunkach pełzania [1].

Poniżej przedstawiono przykłady sposobów postepowania w diagnostyce technicznej, w tym rodzaj diagnostycznych badan materiałowych, dla wybranych elementów krytycznych części ciśnieniowej kotła i rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania. Dla poszczególnych elementów krytycznych rodzaj wymaganych badań jest uzależniony od dotychczasowego czasu eksploatacji odniesionego do przyjętego czasu obliczeniowego.

Na rys. 45, 46, 47 i 48 przedstawiono w postaci graficznej przykłady sposób postępowania, w tym wymagany rodzaj diagnostycznych badań materiałowych, w zależności od czasu eksploatacji odniesionego do czasu obliczeniowego dla następujących rodzajów elementów i złączy spawanych pracujących w warunkach pełzania:

- rur wężownic przegrzewacza pary,
- odcinków prostych i kolan głównych rurociągów parowych,
- płaszcza komory przegrzewacza pary,
- obwodowych złączy spawanych płaszcza komory przegrzewacza pary.

Przykłady dotyczą trybu nadzoru standardowego wg Załącznika A niniejszego opracowania.

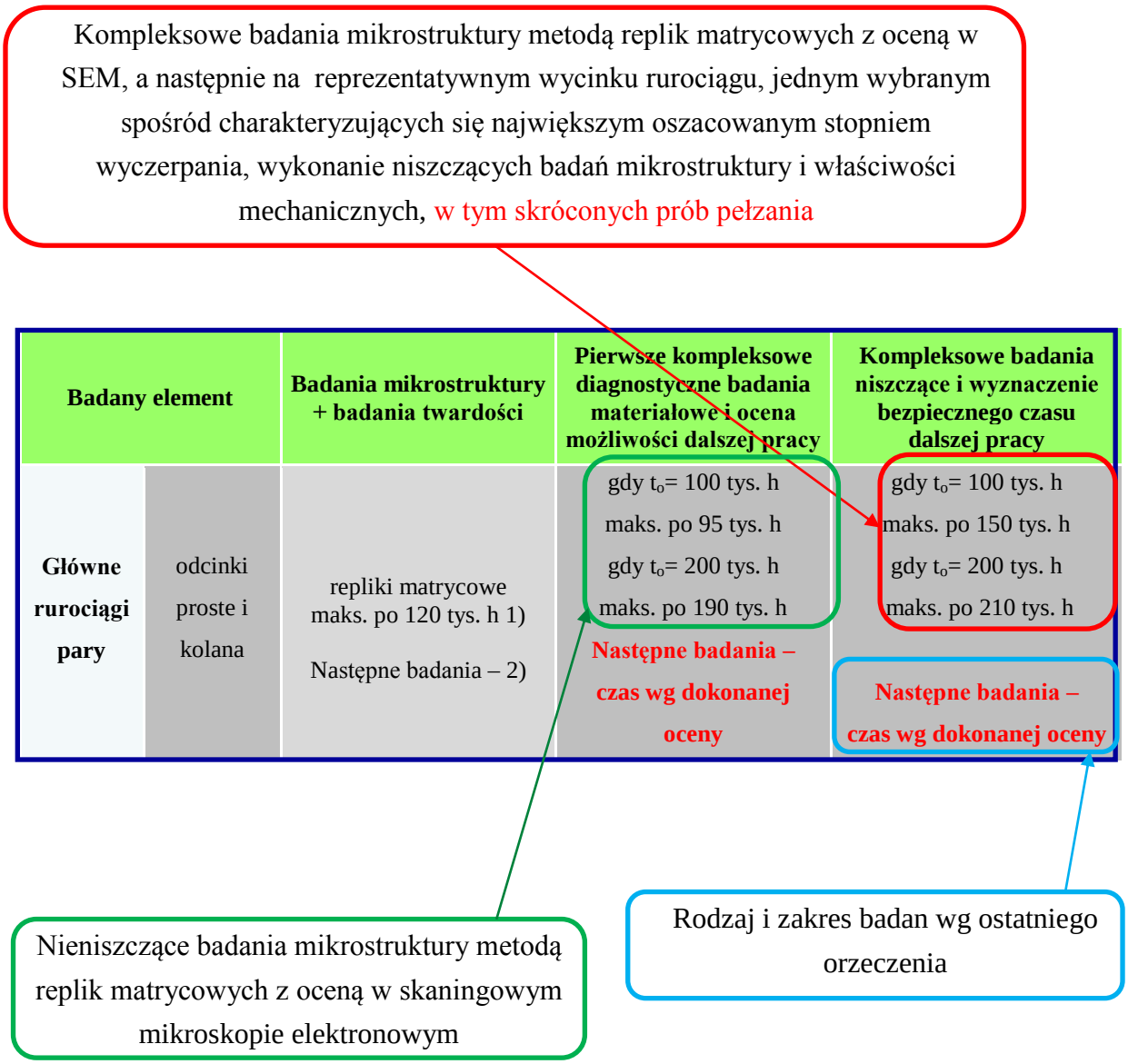
Badania mikrostruktury, osadów i właściwości mechanicznych (niszczące)

Badany element		**Badania mikrostruktury + badania twardości**	**Pierwsze kompleksowe diagnostyczne badania materiałowe i ocena możliwości dalszej pracy**	**Kompleksowe badania niszczące i wyznaczenie bezpiecznego czasu dalszej pracy**
Wężownice przegrzewaczy pary ($T_o > T_g$)	odcinki proste i kolana	Zgłady metalograficzne maks. po 95 tys. h 1) Następne badania – 2)	gdy t_o= 100 tys. h maks. po 95 tys. h gdy t_o= 200 tys. h maks. po 190 tys. h **Następne badania – czas wg dokonanej oceny**	gdy t_o= 100 tys. h maks. po 150 tys. h gdy t_o= 200 tys. h maks. po 210 tys. h **Następne badania – czas wg dokonanej oceny**
	króćce	-	gdy t_o= 100 tys. h maks. po 95 tys. h gdy t_o= 200 tys. h maks. po 190 tys. h Następne badania- czas wg dokonanej oceny	
	spoiny	-	gdy t_o= 100 tys. h maks. po 95 tys. h gdy t_o= 200 tys. h maks. po 190 tys. h Następne badania- czas wg dokonanej oceny	

Na reprezentatywnych wycinkach wężownic badania: osadów, mikrostruktury i właściwości mechanicznych, w tym skrócone próby pełzania dla jednego wybranego wycinka spośród nich o największym oszacowanym stopniu wyczerpania dla każdego gatunku stali (niszczące**)**

1) Dotyczy przypadku obliczeniowego czasu pracy to = 200 tys. h;
2) W zależności od uzyskanych wyników - podczas pierwszych kompleksowych badań diagnostycznych lub po czasie krótszym wg dokonanej oceny;

Rys.45. Przykład sposobu postepowania w diagnostyce technicznej, w tym wymagany rodzaj badań materiałowych dla rur wężownic przegrzewacza pary pracujących w warunkach pełzania.



1) Dotyczy przypadku obliczeniowego czasu pracy to = 200 tys. h;
2) W zależności od uzyskanych wyników - podczas pierwszych kompleksowych badań diagnostycznych lub po czasie krótszym wg dokonanej oceny;

Rys.46. Przykład sposobu postepowania w diagnostyce technicznej, w tym wymagany rodzaj badań materiałowych dla odcinków prostych i kolan głównych rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania.

Kompleksowe badania mikrostruktury metodą replik matrycowych z oceną w SEM, a następnie w reprezentatywnym obszarze materiału płaszcza, o najmniej korzystnej mikrostrukturze, wykonanie (na korku pobranym metodą trepanacji) niszczących badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych, w tym próby pełzania z pomiarem wydłużenia

Badany element		**Badania mikrostruktury + badania twardości**	**Pierwsze kompleksowe diagnostyczne badania materiałowe i ocena możliwości dalszej pracy**	**Kompleksowe badania niszczące i wyznaczenie bezpiecznego czasu dalszej pracy**
komory przegrzewaczy pary ($T_o > T_g$)	płaszcz	repliki matrycowe maks. po 120 tys. h 2) Następne badania – 3)	gdy t_o= 100 tys. h maks. po 95 tys. h gdy t_o= 200 tys. h maks. po 190 tys. h **Następne badania – czas wg dokonanej oceny**	gdy t_o= 100 tys. h maks. po 150 tys. h gdy t_o= 200 tys. h maks. po 210 tys. h **Następne badania – czas wg dokonanej oceny**

Nieniszczące badania mikrostruktury metodą replik matrycowych z oceną w SEM oraz pomiar trwałego odkształcenia na otworach w płaszczu pod króćce

Rodzaj i zakres badan wg ostatniego orzeczenia

1) Dotyczy przypadku obliczeniowego czasu pracy to = 200 tys. h;
2) W zależności od uzyskanych wyników - podczas pierwszych kompleksowych badań diagnostycznych lub po czasie krótszym wg dokonanej oceny;

Rys.47. Przykład sposobu postepowania w diagnostyce technicznej, w tym wymagany rodzaj badań materiałowych dla płaszcza komory przegrzewacza pary pracującej w warunkach pełzania.

Badany element		Badania mikrostruktury + badania twardości	Pierwsze kompleksowe diagnostyczne badania materiałowe i ocena możliwości dalszej pracy	Kompleksowe badania niszczące i wyznaczenie bezpiecznego czasu dalszej pracy
komory przegrzewaczy pary ($T_o > T_g$)	Złącza obwodowe	repliki matrycowe maks. po 120 tys. h 2) Następne badania – 3)	gdy t_o= 100 tys. h maks. po 95 tys. h gdy t_o= 200 tys. h maks. po 190 tys. h **Następne badania – czas wg dokonanej oceny**	-

Nieniszczące badania mikrostruktury metodą replik matrycowych z oceną w SEM oraz pomiar trwałego odkształcenia na otworach w płaszczu pod króćce

1) Dotyczy przypadku obliczeniowego czasu pracy to = 200 tys. h;
2) W zależności od uzyskanych wyników - podczas pierwszych kompleksowych badań diagnostycznych lub po czasie krótszym wg dokonanej oceny;

Rys.48. Przykład sposobu postepowania w diagnostyce technicznej, w tym wymagany rodzaj badań materiałowych dla obwodowych złączy spawanych płaszcza komory przegrzewacza pary pracującej w warunkach pełzania.

6. Wytyczne dotyczące próby ciśnieniowej oraz uruchamiania i odstawienia urządzenia z materiałem wykazującym obecność obszarów dekohezyjnych [2].

Dla kotłów posiadających elementy konstrukcyjne o grubościach ≥ 50 mm obowiązują ustalenia zgodne z Decyzją nr 25/95 Prezesa UDT z dnia 10 listopada 1995r.

Dla pozostałych urządzeń instrukcję wykonania próby ciśnieniowej należy uzgodnić indywidualnie. Powinna zawierać informacje dotyczące w szczególności:

– szybkości narastania ciśnienia próbnego,

– temperatury medium próbnego (szczególną uwagę należy zwrócić w przypadku materiałów mogących przechodzić w stan kruchy, dla których Re/Rm > 0,65),

– wartości ciśnienia próbnego.

Nie zaleca się wykonywania prób ciśnieniowych przy wartości ciśnienia próbnego, jaka była stosowana przy wytwarzaniu urządzenia.

Każdy przypadek próby ciśnieniowej należy rozpatrywać indywidualnie.

Dla kotłów parowych i rurociągów pracujących w temperaturze pełzania, w szczególności tych, które znajdują się w II stadium pełzania należy przewidzieć weryfikację istniejącej instrukcji dotyczącej uruchamiania i odstawiania.

W szczególności, dla kotłów parowych instrukcja powinna zawierać informacje uruchamiania ze stanu zimnego i gorącego.

Za stan zimny urządzenia można przyjąć urządzenie w stanie bezciśnieniowym, w którym woda ma temperaturę poniżej 100°C, a temperatura najbardziej nagrzanych części nie przekracza 150°C.

Instrukcja powinna w szczególności zawierać informacje dotyczące:

- prędkości narastania / spadku ciśnienia,
- czasu wygrzewania,
- przepływu czynnika.

Dla rurociągów pracujących w warunkach pełzania oraz wykazujących oznaki znacznego wyczerpania trwałości materiału zaleca się, aby przyrost temperatury nie przekraczał wartości 50°C/min, a ciśnienia 0,2 MPa/min w zakresie do 300°C, natomiast w zakresie temperatur powyżej 300°C przyrost temperatury nie powinien przekraczać 20°C/min, a ciśnienia 0,2 ÷ 0,3 MPa/min.

Podczas uruchamiania rurociągów nie należy dopuszczać do występowania uderzeń hydraulicznych, co może być spowodowane zbyt szybkim nagrzewaniem przy powolnym odwadnianiu rurociągu.

Dla kotłów walczakowych szybkość podnoszenia temperatury nasycenia w walczaku nie powinna przekraczać 1,5°C / min w zakresie całego procesu uruchamiania kotła.

Ponieważ podczas nagrzewania oraz studzenia w ściance urządzenia mogą występować naprężenia przekraczające wartości dopuszczalne należy przewidzieć wykonywanie pomiarów parametrów rzeczywistych temperatury ścianki elementów ciśnieniowych.

Dodatkowo parametry związane z uruchamianiem i odstawianiem takich urządzeń powinny być poddane rejestracji.

Literatura

[1] J. Dobrzański, A. Hernas: Sprawozdanie nr P/XII-2/2014: ‘Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania – Etap I’;

[2] J. Dobrzański, A. Hernas: Sprawozdanie nr P-2/III-1/2015: ‘Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania – Etap II’;

[3] Praca zbiorowa: Materiały Techniczne Urzędu Dozoru Technicznego nr 3/2013: ‘Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania’.

[4] Praca zbiorowa: Materiały stosowane w energetyce cieplnej, wyd. Politechniki Częstochowskiej, 2003.