



URZĄD DOZORU
TECHNICZNEGO

WYTYCZNE URZĘDU DOZORU TECHNICZNEGO NR 1/UC/2015/2 - AKTUALIZACJA 2025

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



eUDT

PORTAL INTERNETOWY

Urzędu Dozoru Technicznego

Załącz konto na portalu eUDT.

Wypełnij formularz rejestracyjny
dostępny na <https://eudt.gov.pl/>
i korzystaj z usług oferowanych przez

UDT on-line!



- Wygodny i szybki dostęp do informacji o Twoich urządzeniach, terminach badań i rozliczeniach finansowych z UDT
- Darmowy dostęp do portalu 24/7/365
- Łatwe i proste śledzenie zdarzeń związanych z Twoimi urządzeniami
- Możliwość ustawienia własnego kalendarza wydarzeń oraz alertów
- Możliwość wyświetlania i pobierania dokumentów UDT
- Elektroniczna korespondencja z UDT, więcej spraw, które załatwisz on-line
- Decyzje i protokoły w formie elektronicznej
- Płatności on-line



W razie dodatkowych pytań skontaktuj się z Infolinią UDT pod numerem 22 57 22 100.

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	4
2. POJĘCIA I DEFINICJE	6
3. ELEMENTY KOTŁÓW I RUROCIĄGÓW PRACUJĄCE W WARUNKACH PEŁZANIA	11
3.1 Podział elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania	11
3.2 Stale i staliwa stosowane na elementy ciśnieniowe kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania	14
3.3 Procesy niszczenia zachodzące w elementach kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania	16
4. OCENA STANU ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA	22
4.1 Główne etapy oceny stanu elementów pracujących w warunkach pełzania	22
4.2 Wybór miejsc do badań	23
4.3 Badania nieniszczące	25
4.3.1 Wybór metody badań	25
4.3.2 Charakterystyka metod badań	26
4.3.3 Zakres badań	30
4.4 Pomiarów cech geometrycznych i wielkości odkształceń trwałych	32
4.5 Obliczeniowa ocena stanu elementu	41
4.5.1 Podstawowe oznaczenia:	41
4.5.2 Ocena elementu ciśnieniowego w oparciu o dane dokumentacji projektowej	41
4.5.3 Ocena elementu ciśnieniowego w oparciu o parametry rzeczywiste	43
4.5.4 Ocena stanu elementu ciśnieniowego w oparciu o obliczeniowe dane projektowe zawarte w dokumentacji i rzeczywiste parametry eksploatacji	44
4.6 Badania nieniszczące i niszczące w celu określenia stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej	47
4.6.1 Uwagi ogólne dotyczące wyboru rodzaju badań	47
4.6.2 Badania nieniszczące	49
4.6.2.1 Badania metalograficzne metodą replik	49
4.6.2.1.1 Wybór techniki badań	49
4.6.2.1.2 Charakterystyka technik badania	49
4.6.2.2 Badania twardości	52
4.6.3 Badania niszczące	53
4.6.3.1 Uwagi ogólne	53
4.6.3.2 Badania właściwości mechanicznych	54
4.6.3.3. Badania metalograficzne	58
4.6.3.4. Analiza jakościowa i ilościowa procesów korozyjnych	59
4.6.4 Badania z wykorzystaniem mikroprobek	65
4.6.5 Uwagi dotyczące zakresu i sposobu realizacji badań.	67
4.7 Metalograficzna interpretacja stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej	70
4.8 Przykłady oceny stanu elementów	77
5. DIAGNOSTYKA ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH W OPARCIU O MONITOROWANIE STANU ELEMENTÓW KRYTYCZNYCH W PROGRAMIE ET INSPEKTOR LUB INNYM ZWALIDOWANYM PRZEZ UDT	80
6. PRZYKŁADY SPOSOBU POSTĘPOWANIA W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA	82
7. WYTYCZNE DOTYCZĄCE PRÓBY CIŚNIENIOWEJ ORAZ URUCHAMIANIA I ODSZTAWIENIA URZĄDZENIA Z MATERIAŁEM WYKAZUJĄCYM OBECNOŚĆ OBSZARÓW DEKOHEZYJNYCH	84
LITERATURA	85

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.

Załącznik C:

Karty zakresu badań diagnostycznych.

1. WPROWADZENIE

W poniższych wytycznych przedstawione zostały zasady diagnostyki oraz sposób dokonywania oceny stanu elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania, w celu określenia ich trwałości eksploatacyjnej. Podczas prognozowania bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji tych elementów stosowane są metody, które można podzielić na dwie następujące grupy:

- a) związane z wykonywaniem obliczeń, głównie na podstawie dostępnych rejestrów parametrów pracy: 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 i niszczące w celu oceny stanu materiału elementów.

W praktyce inżynierskiej wykorzystuje się metody kwalifikowane do obydwu grup przy czym metody obliczeniowe stosuje się zazwyczaj do prognozowania dalszej eksploatacji oraz przy podejmowaniu decyzji o przystąpieniu do badań diagnostycznych oraz pomiarów.

W wytycznych przyjęto, że pomiary oraz badania nieniszczące i niszczące w celu oceny stanu materiału, uzupełnione wynikami obliczeń przeprowadzonych dla rzeczywistych warunków pracy, stanowią podstawę rzetelnej oceny stanu technicznego elementów pracujących w warunkach pełzania, co umożliwi oszacowanie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji.

Wytyczne zostały opracowane na podstawie:

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

Głównym celem opracowania niniejszych wytycznych jest przedstawienie jednolitej metodologii oceny stanu materiału i sposobu oszacowania pozostałej bezpiecznej trwałości eksploatacyjnej elementów części ciśnieniowej kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania. Zaproponowany sposób postępowania wykorzystuje dostępne współczesne 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.

Wytyczne są przeznaczone dla:

- inspektorów UDT: stanowią podstawę do przygotowania niezbędnego zakresu badań i metod oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji. W efekcie mają pomóc w określeniu możliwości dalszej eksploatacji elementów konstrukcyjnych, zarówno przed jak i po osiągnięciu obliczeniowego czasu pracy. Wytyczne mogą być również wykorzystane w przypadku wystąpienia awarii związanej z nadmierną utratą

- trwałości eksploatacyjnej czy powstaniem nieciągłości materiału,
- służb remontowych i jednostek utrzymania ruchu w zakładach przemysłowych, eksploatujących urządzenia ciśnieniowe pracujące w podwyższonej temperaturze,
 - firm wykonujących diagnostyczne badania materiałowe, dla których wytyczne mogą stanowić dokument odniesienia przy doborze metod badawczych i narzędzi do oceny stanu elementu czy materiału i określania ich przydatności do dalszej eksploatacji.

Wytyczne przedstawiają wymagania, które należy uwzględnić podczas wyboru reprezentatywnych miejsc do badań, rodzajów pomiarów, nieniszczących oraz niszczących metod badawczych, zakresu badań, a także liczby miejsc do badań, uwzględniając czas eksploatacji oraz w odniesieniu do obliczeniowego czasu eksploatacji.

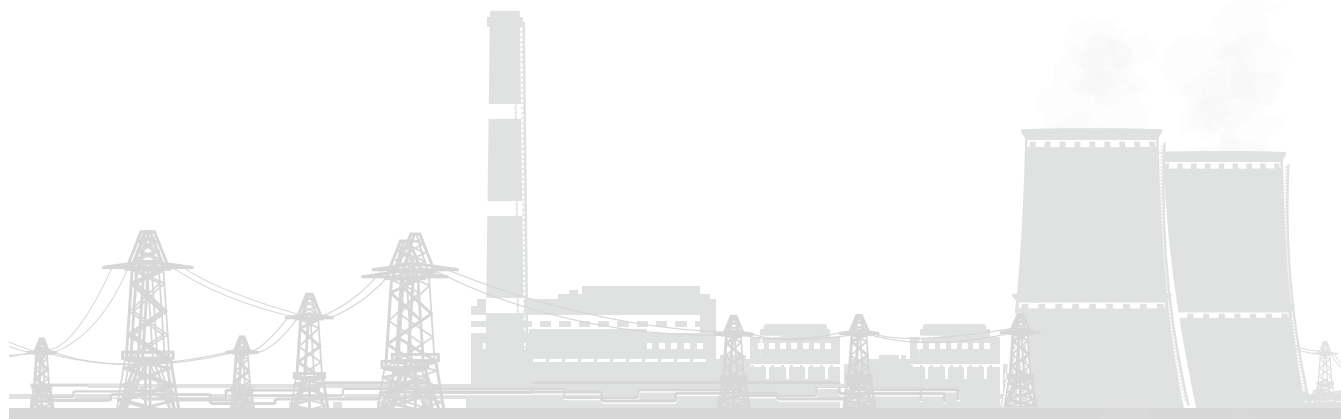
Wytyczne mogą być stosowane jako dokument odniesienia podczas określania stanu oraz trwałości eksploatacyjnej elementów ciśnieniowych. Stanowią także podstawę do opracowania szczegółowych instrukcji, planów lub programów badań, które powinny być zatwierdzone przez Urząd Dozoru Technicznego.

Zakres wytycznych obejmuje elementy wykonane z:

- stali niskostopowych np.: 15Mo3 (16M), 13CrMo4-5 (15HM), 10CrMo9-10 (10H2M), 14MoV6-3 (13HMF), 17HMF, 21HMF, 7CrMoVTiB10-10 (T24), 7CrWVMoNb9-6 (T23), które wykazują strukturę ferrytyczno-perlityczną, ferrytyczno-perlityczno-bainityczną, bainityczno-ferrytyczną oraz perlityczno-bainityczną,
- stali w 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), X10CrMoVNb9-1 (P91), X10CrWVMoVNb9-2 (P92), X12CrCoWVNb12-2-2 (VM12SHC),
- przeznaczonych do pracy w warunkach pełzania.

Przedstawioną w dokumencie 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 aktualizowane, wraz z rozwojem nowych metod badawczych oraz rodzajów materiałów stosowanych do wytwarzania elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania.



2. POJĘCIA I DEFINICJE

Poniżej zamieszczono definicje następujących głównych pojęć:

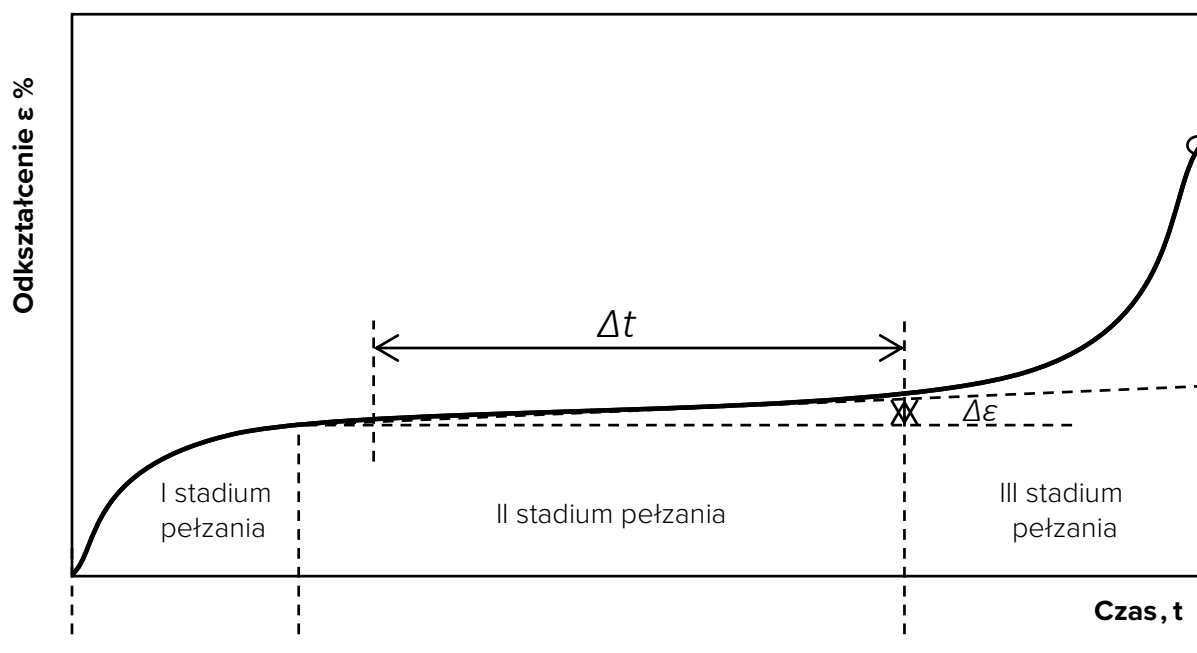
Pełzanie jest to proces ciągłego trwałego odkształcania się materiału poddanego równoczesnemu działaniu naprężenia i podwyższonej temperatury w długim czasie o szybkości odkształcania w zakresie od 10^{-8} do 10^{-12} s^{-1} (rys. 1).

I stadium pełzania charakteryzuje się znacznym przyrostem trwałego odkształcania w bardzo krótkim czasie.

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

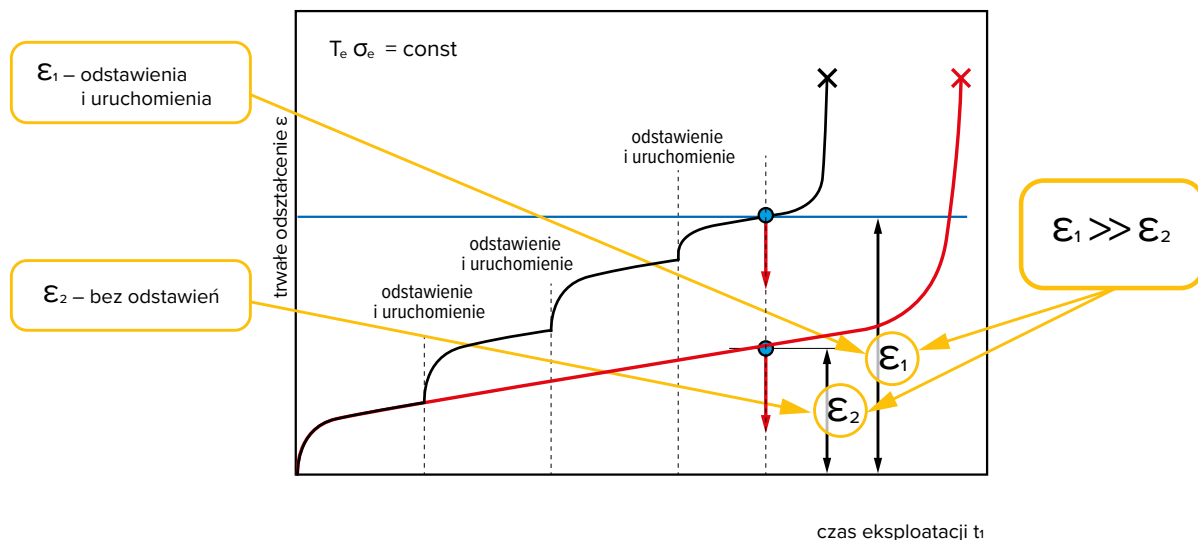
III stadium pełzania charakteryzuje się gwałtownym przyrostem odkształcania w stosunkowo krótkim czasie, prowadząc do utraty ciągłości materiału i zniszczenia.

Szybkość pełzania jest to stosunek przyrostu odkształcania $\Delta\epsilon$ w czasie Δt w II stadium pełzania (w stanie ustalonym) co przedstawia rys. 1.



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

Cykliczne pełzanie: Próby te symulują wpływ odstawień i uruchomień ze stanu zimnego na zmiany zachodzące w materiale elementów kotła pracujących w warunkach pełzania. Odstawienia te powodują wzrost wielkości trwałego odkształcania w wyniku pełzania w stosunku do eksploatacji bez odstawień w tym samym czasie pracy, istotnie obniżając rzeczywistą trwałość eksploatacyjną (Rys. 1a).



Rys. 1a. Krzywa pełzania cyklicznego w porównaniu do standardowej próby pełzania – wpływ na wielkość trwałego odkształcenia

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 tj. perlitu, bainitu i martenzytu, w zależności od gatunku materiału;
- przemianie i powstawaniu wydzielen (węglików, węgliko-azotków, faz międzymeta-licznych), 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.

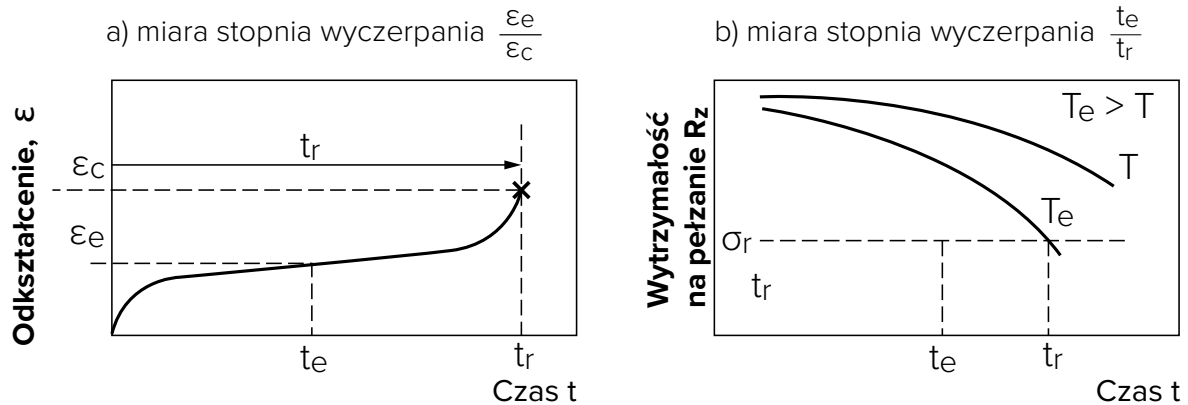
Degradacja właściwości w wyniku pełzania obejmuje:

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

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.

Wyczerpanie – obejmuje zmiany następujące w strukturze $\dot{\epsilon}_i \neq 0$, gdy nie występuje proces dekohezji $\dot{\omega} = 0$. 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.

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).

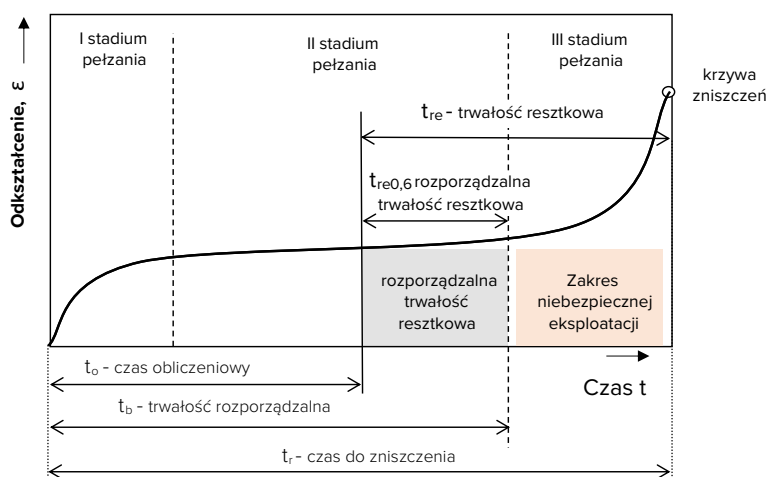


Rys. 2. Graficzne ujęcie wyczerpania materiału, definiowane w oparciu o stosunek odkształcenia $\frac{\epsilon_e}{\epsilon_c}$ lub stosunek czasu $\frac{t_e}{t_r}$, gdzie: ϵ_e - trwałe odkształcenie odpowiadające czasowi eksploatacji t_e
 ϵ_c - całkowite trwałe odkształcenie odpowiadające czasowi do zniszczenia t_r
 t_e - czas eksploatacji, t_r - czas do zniszczenia

Wyczerpanie i uszkodzenie to rodzaje zmian w materiale prowadzące do zwiększenia szybkości pełzania. W praktyce zwykle oba te procesy przebiegają równolegle, a tylko jeden z nich jest dominującym w danym stadium pełzania. W zależności od stadium pełzania różny jest również stopień wyczerpania materiału i różne jest nasilenie uszkodzeń. Od pojedynczych pustek, poprzez szczeliny międzykrystaliczne, aż po pęknięcia.

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 ($R_{z/100\ 000/t}$). Wartość t_g przedstawiono na rys. 3.

Czasowa wytrzymałość na pełzanie jest naprężeniem, które po upływie określonego czasu w danej temperaturze spowoduje utratę ciągłości materiału, np. $R_{z/100000/550} = 360\text{MPa}$ 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 $\pm 20\%$ (poziom naprężenia).



Rys. 3. Sposób wyznaczenia temperatury granicznej t_g

Granica pełzania jest to naprężenie, które po upływie określonego czasu działania w danej temperaturze spowoduje trwałe odkształcenie o określonej zdefiniowanej wartości, np. $R_{1/100000/550}=100$ MPa oznacza, że poddanie materiału działaniu naprężenia o wartości 100 MPa w temperaturze 550°C przez 100 000 godzin spowoduje trwałe jednoprocetowe wydłużenie. Podawane wartości są wartościami średnimi, a uzyskiwane rzeczywiste mogą się różnić o $\pm 20\%$ (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.

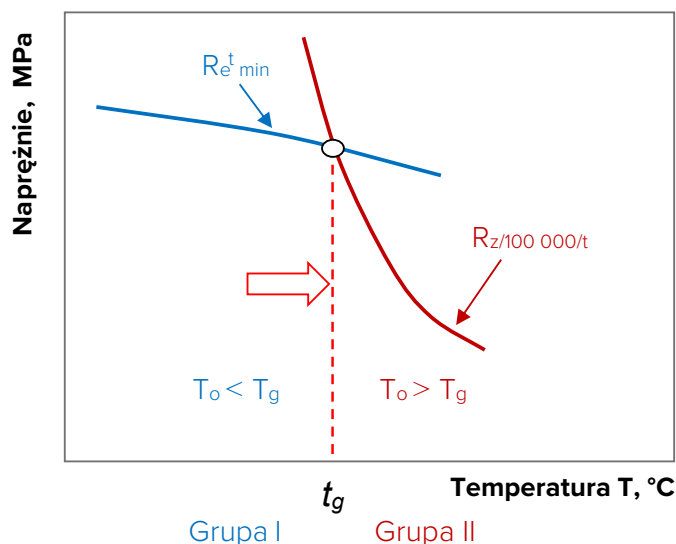
Trwałość obliczeniowa (t_0) jest trwałością wynikającą z czasowej wytrzymałości na pełzanie dla 100 000 lub 200 000 godzin oraz przyjętych parametrów obliczeniowych (rys. 4).

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 stadiuma 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 stadiuma 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 stadiumem 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 sposób 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 wyłącznie charakter pomocniczy. Zastosowanie metod obliczeniowych może mieć wpływ na decyzję dotyczącą zasadności przeprowadzenia badań diagnostycznych oraz określenia wymagań odnośnie zakresu i częstości ich przeprowadzania.

Wielkość trwałego odkształcenia ϵ w próbach cyklicznego pełzania, po tym samym łącznym czasie trwania próby może być większa nawet o ponad 100% w stosunku do uzyskiwanego w standardowej próbie pełzania prowadzonej w tej samej temperaturze i przy tym samym poziomie naprężenia. Natomiast czas do zerwania t_r , a więc trwałość, może być dla prób cyklicznego pełzania nawet kilkakrotnie mniejsza.

Na podstawie wyników badań pełzania oraz cyklicznego pełzania można przewidywać wpływ zmiany warunków pracy części ciśnieniowej bloku energetycznego na trwałość eksploatacyjną zastosowanych

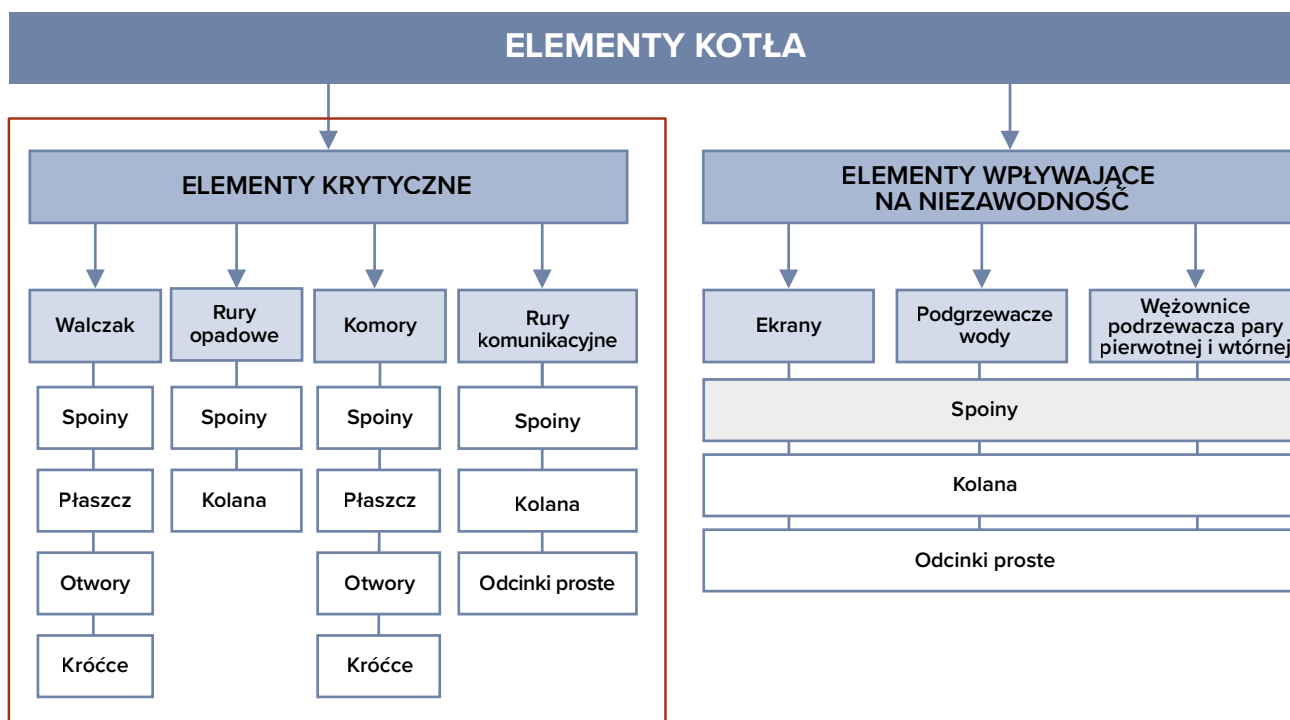
materiałów i wytworzonych z nich elementów, pamiętając, że cykliczne pełzanie powoduje znaczne przyspieszenie procesu degradacji struktury, wzrost wielkości trwałego odkształcenia ϵ_t , a rozporządzalna trwałość resztkowa (również czas do zniszczenia t_r) może być nawet kilkakrotnie mniejsza. Różnice tych wielkości są zależne od gatunku stali, a więc i od jej mikrostruktury, oraz parametrów temperaturowo-naprężeniowych prób.

3. ELEMENTY KOTŁÓW I RUROCIĄGÓW PRACUJĄCE W WARUNKACH PEŁZANIA

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 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 występowania uszkodzeń (awarii) czego konsekwencją są względnie bardzo wysokie koszty wynikające naprawy lub wymiany.

Podatność naprawcza to możliwości dokonywania naprawy w krótkim czasie. Szczególnie dotyczy to tzw. elementów krytycznych urządzenia, czyli tych, które decydują o funkcjonowaniu i bezpieczeństwie (elementu ciśnieniowego lub całego urządzenia). Z tych względów elementy kotła dzieli się na elementy krytyczne oraz elementy wpływające na niezawodność pracy kotła. Jednakże wszystkie elementy rurociągów parowych należy uznać za krytyczne. Podział taki przedstawiono na rysunku nr. 5. Na rysunku podano miejsca, w których w pierwszej kolejności wykonywane są diagnostyczne badania materiałowe.



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

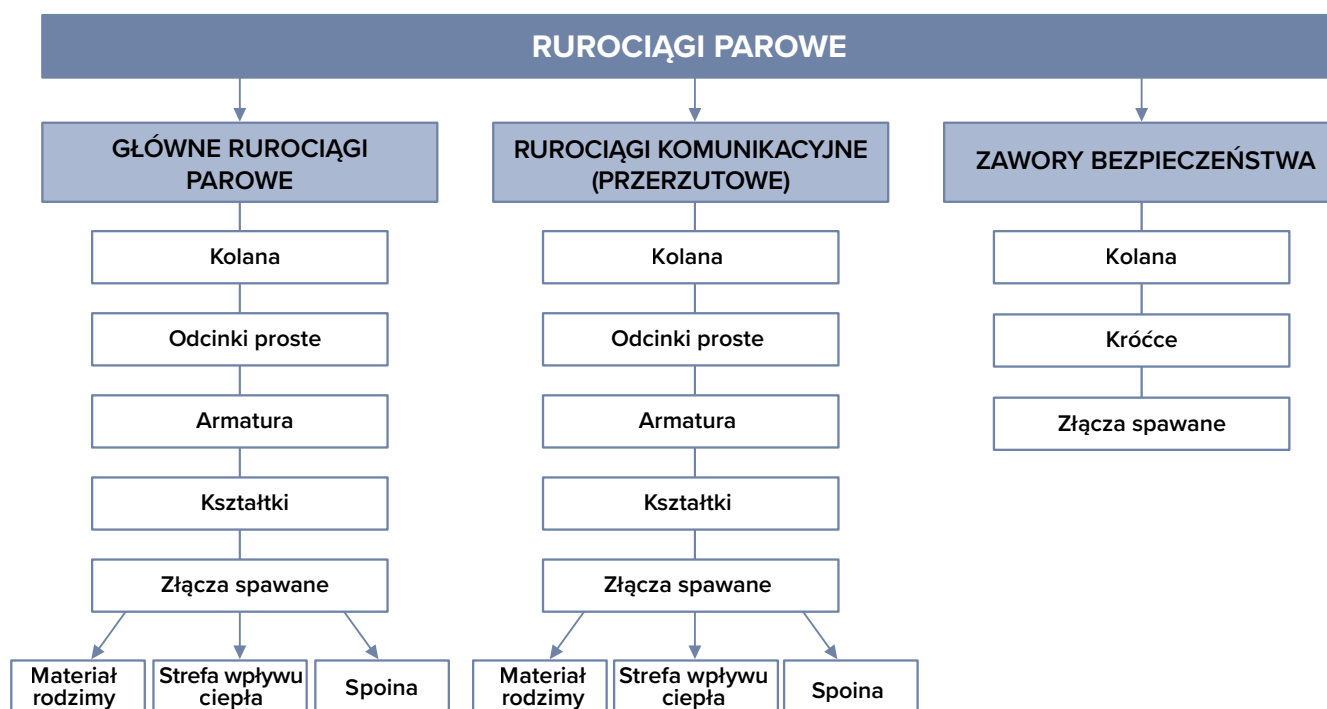
Elementy wpływające na niezawodność pracy kotła to elementy pracujące w podwyższonej temperaturze pod działaniem wysokiego ciśnienia, które:

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

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 przedstawiono na rys. 6.



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

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

Przyjmując za kryterium temperaturę pracy (rys. 7), elementy 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 , a więc pracujące w warunkach pełzania (Grupa II).

GRUPA I	GRUPA II
<p>$(T_e > T_g)$ projektowane w oparciu o R_e^t, teoretycznie na nieograniczony czas pracy:</p> <ul style="list-style-type: none"> • walczaki i wodooddzielacze, • komory i rury ekranowe, • komory i węzownice podgrzewacza wody, • komory przegrzewaczy niższych stopni, • rury opadowe, • przewody odwadniające, odpowietrzające i odmulające, • rurociągi wody zasilającej i do przegrzewu wtórnego, • niektóre schładzaczki, • niektóre komunikacyjne rurociągi parowe. 	<p>$(T_e > T_g)$ w oparciu o średnią wartość czasowej wytrzymałości na pełzanie $R_{Z/t/T}$ lub granicy pełzania $R_{X/t/T}$ na tzw. ograniczony czas pracy:</p> <ul style="list-style-type: none"> • schładzaczki przegrzewaczy pary wyższych stopni, • komory przegrzewaczy pary wyższych stopni, • komory przegrzewaczy pary wyższych stopni, • węzownice wyższych stopni przegrzewaczy pary, • komunikacyjne rurociągi parowe wyższych stopni przegrzewaczy pary, • główne rurociągi parowe.

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

Elementy Grupy I, pracujące poniżej temperatury granicznej ($T_0 < T_g$) 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 ($T_0 > T_g$), 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

$$k = \frac{R_{Z/t/T}}{X} \quad \text{lub} \quad k = \frac{R_{X/t/T}}{X}$$

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 wytyczne należą do II grupy tzn. do pracujących powyżej temperatury granicznej ($T_0 > T_g$), chociaż ogólny sposób postępowania 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°C do 590°C, natomiast wysokochromowe stale martenzytyczne przeznaczone są do pracy w temperaturze do 620°C.

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 udarność, wzrostu temperatury przejścia w stan kruchości) 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.

Wytyczne mają zastosowanie dla następujących rodzajów materiałów eksploatowanych przez długi okres w warunkach pełzania:

- 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), 7CrMoVTiB10-10 (T24), 7CrWVMoNb9-6 (T23),
- wybranych stali 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 (P91), X10CrWVMoVNb9-2 (P92), X12CrCoWVNb12-2-2 (VM12SHC),

które dotychczas najczęściej stosowano w Polsce na elementy instalacji energetycznych, pracujące w warunkach pełzania. W tabelicy 1 zamieszczono orientacyjne składy chemiczne wybranych stali stosowanych przez długi okres w energetyce krajowej. Rodzaj prawidłowej, oczekiwanej struktury stanu wyjściowego dla wybranych gatunków materiałów zestawiono w tabelicy 2. Natomiast w tabelicy 3 wyszczególniono rodzaje elementów, które były najczęściej wykonywane z wymienionych gatunków materiałów.

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

Zawartość głównych składników , [%]								
Znak stali/ staliwa ¹⁾	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	0,6	0,3	11,0-12,5	0,6	0,80-1,20	0,3	–
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	0,7	0,3	0,90-1,1	≤0,60	0,90-1,20	-	Al≤0,02
21HMF	0,17-0,25	0,4	0,5	1,2-1,5	≤0,60	1,0-1,2	0,3	-
T23	0,04-0,10	0,10-0,60	0,5	1,90-2,60	-	0,05-0,30	0,20-0,30	W: 1,45-1,75 Nb (Ti): 0,02-0,08
T24	0,05-0,10	0,30-0,70	0,15-0,45	2,20-2,60	-	0,90-1,10	0,20-0,30	Nb (Ti): 0,06-0,10
P91	0,08-0,12	0,30-0,60	0,20-0,50	8,0-9,5	-	0,85-1,05	0,18-0,25	Nb (Ti): 0,06-0,10
P92	0,07-0,13	0,30-0,60	0,5	8,0-9,5	-	0,30-0,60	0,15-0,25	W: 1,5-2,0 Nb (Ti): 0,04-0,09
VM12SHC	0,11-0,14	0,15-0,45	0,40-0,60	11,0-12,0	-	0,20-0,40	0,20-0,30	W: 1,30-1,70 Nb (Ti): 0,03-0,08

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
16M	struktura ferrytyczno-perlityczna
15HM	struktura ferrytyczno-perlityczna
10H2M	struktura ferrytyczno-bainityczna
13HMF	struktura ferrytyczno-bainityczna czasem z udziałem perlitu
20H12M1F	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
T23	struktura ferrytyczno-bainityczna
T24	struktura ferrytyczno-bainityczna
P91	struktura odpuszczonego martenzytu
P92	struktura odpuszczonego martenzytu
VM12SHC	struktura odpuszczonego martenzytu

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

Oznaczenie materiału	Rodzaj elementów pracujących w warunkach pełzania
16M	wężownice niższych stopni przegrzewacza pary
15HM	główne rurociągi pary pierwotnej
10H2M	wężownice przegrzewacza pary, komory wlotowe i wylotowe przegrzewacza pary, rurociągi komunikacyjne, regulatory temperatury
13HMF	wężownice przegrzewacza pary, komory wlotowe i wylotowe przegrzewacza pary, rurociągi komunikacyjne, główne rurociągi pary wtórnej, regulatory temperatury
20H12M1F	komory wylotowe wyższych stopni przegrzewacza pary, wężownice wyższych stopni przegrzewacza pary
P91	główne rurociągi pary pierwotnej i wtórnej, komory wylotowe wyższych stopni przegrzewacza pary, wężownice wyższych stopni przegrzewacza pary
P92	elementy kolektorów zbiorczych przegrzewaczy pary, rurociągi pary pierwotnej i wtórnej, rzadziej na wężownice przegrzewaczy pary
VM12	wężownice oraz kolektory zbiorcze przegrzewaczy pary, zbiorniki ciśnieniowe wg AD 2000-Merkblat W 4
T23	elementy ścian membranowych kotłów, rury wężownic przegrzewacza pary
T24	elementy ścian membranowych kotłów, rury wężownic 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

*w procesie technologicznym wytwarzania elementów konstrukcyjnych i urządzeń ciśnieniowych z tej stali, zwłaszcza podczas spawania, występuje wiele trudności, przejawiających się skłonnością do pęknięcia złączy spawanych.

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 nierozdzielnie związana z procesami ich niszczenia. Wśród procesów niszczenia występujących w elementach instalacji energetycznych można wyróżnić:

- pełzanie i pełzanie cykliczne,
- zmęczenie cieplno-mechaniczne,
- kruche pęknięcie i pęknięcie 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 oraz pełzanie cykliczne. Jednak ze względu na różne rzeczywiste warunki eksploatacyjne, elementy pracujące powyżej temperatury granicznej poddane są działaniu pełzania często z różnym udziałem występujących równocześnie 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 (pełzanie cykliczne).

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 wyężonych (miejsca koncentracji naprężeń) tj. na wewnętrznej powierzchni płaszczy komór przy wszelkiego rodzaju otworach. Przyjmują postać odkształceń obwodowych, aż do pęknięć włącznie. Spośród występujących pęknięć najgroźniejsze są te usytuowane równoległe do głównej osi komory. Uszkodzenia zmęczeniowe wywołane są przez termoszoki, powstające w czasie niestabilnych warunków pracy komór. Mogą wystąpić nawet przy 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. W praktyce natomiast 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.

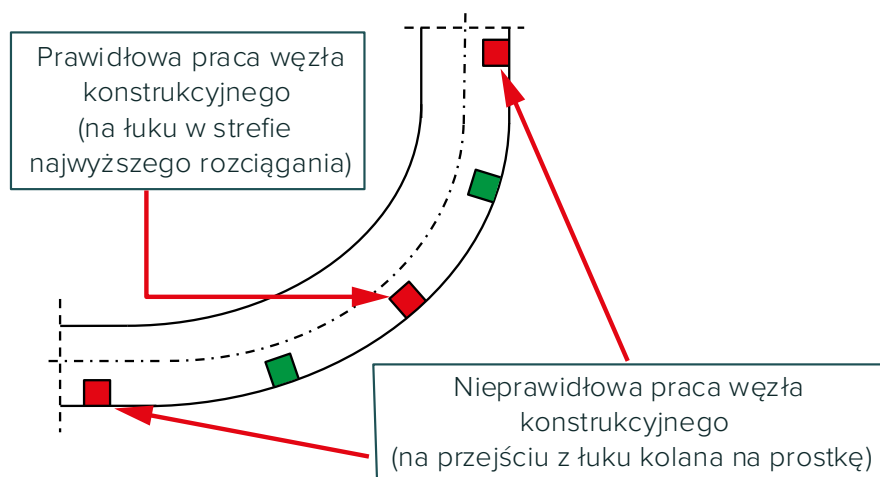
Komory regulatorów temperatury (schładzaczy) charakteryzują się podobnymi warunkami pracy i uszkodzeniami jak komory przegrzewaczy. Mogą jednak w nich dodatkowo wystąpić pęknięcia na powierzchniach wewnętrznych płaszcza wskutek działania termoszoków, w rejonie wtrysków w wyniku przesuniętych lub popękanych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

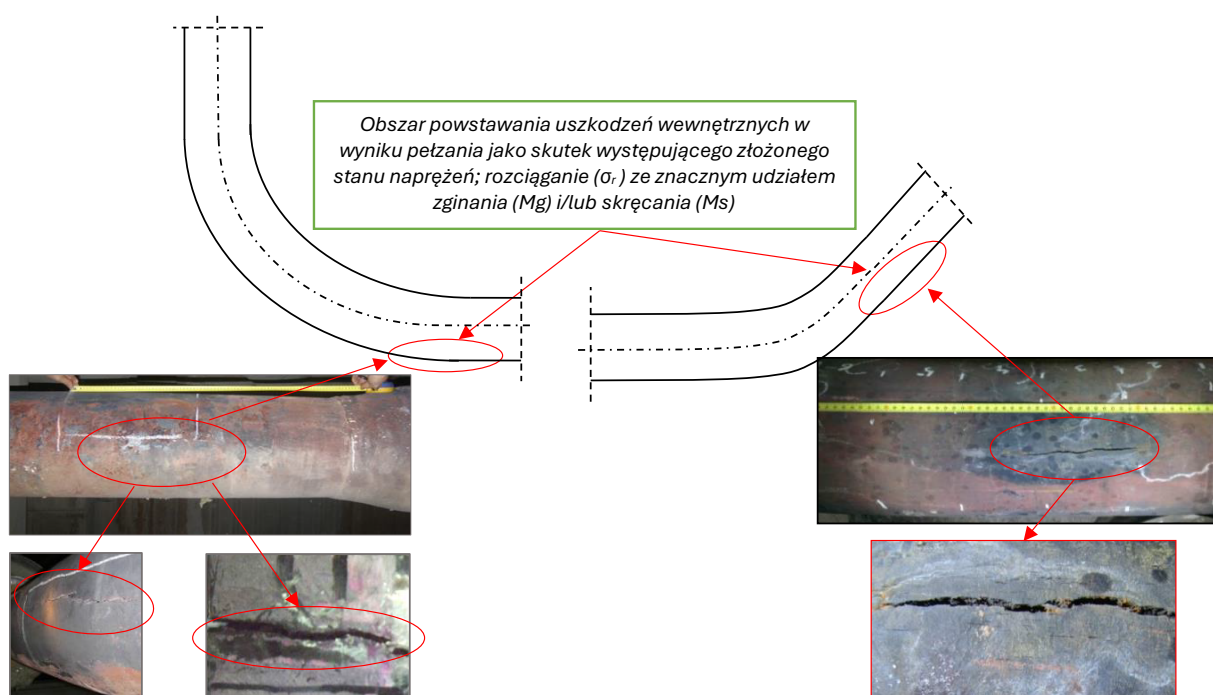
W rurociągach pracujących powyżej temperatury granicznej oprócz pełzania, które jest procesem dominującym, pojawia się czasem zmęczenie lub korozja zmęczeniowa. Przyczyną większości powstałych uszkodzeń jest niewłaściwa praca zamocowań, odchylenia od projektowej trasy oraz niewłaściwa kompensacja rozszerzalności 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 wyężenia w strefie rozciągania, pokazano na rys. 8.



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

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.



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

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 tabelicy 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 oraz zakres badań powinno wynikać z przeprowadzonej analizy oddzielnie dla każdego przypadku.

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

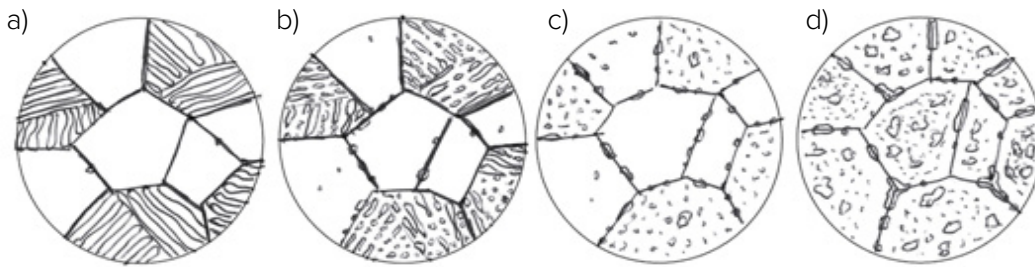
RODZAJ ELEMENTÓW	KOMORY I SCHŁADZACZE	WĘŻOWNICE PRZEGRZEWACZY PARY	RUROCIĄGI
Procesy niszczenia	<ul style="list-style-type: none"> ● pełzanie oraz cykliczne pełzanie ● zmęczenie cieplno-mechaniczne ● korozja postojowa ● erozja 	<ul style="list-style-type: none"> ● pełzanie, cykliczne pełzanie ● korozja wysokotemperaturowa od strony spalin ● korozja parowo-wodna od strony wewnętrznej ● korozja postojowa i dla kolan zmęczenie korozyjne ● erozyjne i korozyjne działania popiołu i spalin ● nieciągłości konstrukcyjne i technologiczne rur, kolan i złączy spawanych 	<ul style="list-style-type: none"> ● pełzanie, cykliczne pełzanie ● korozja zmęczeniowa ● niszczenie zmęczeniowe cieplno-mechaniczne ● 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 rekrytalizacji, 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.

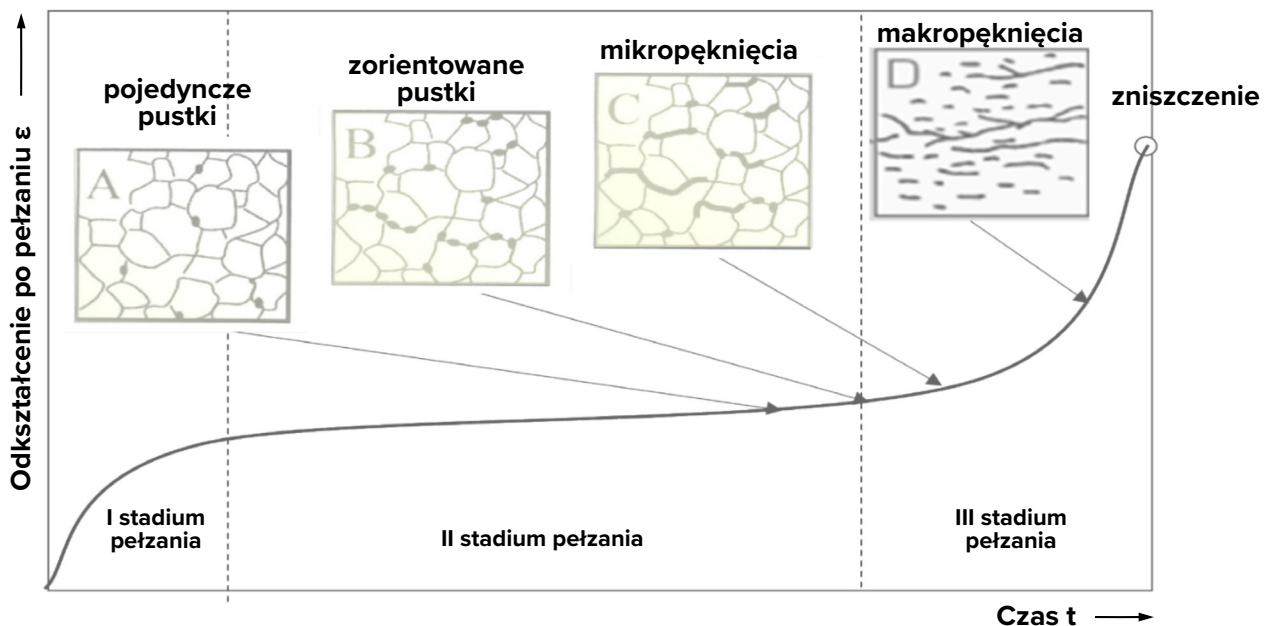
Przykładowy model ewolucji struktury w wyniku długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, od struktury perlitu z ferrytem do ferrytu z wydzieleniami węglików pokazano na rys. 10.



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_{eT}), przy równoczesnej utracie zdolności do odkształceń, której odzwierciedleniem są uzyskiwane wartości: wydłużenia w próbie rozciągania oraz pracy łamania w próbie uderzeniowej (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.

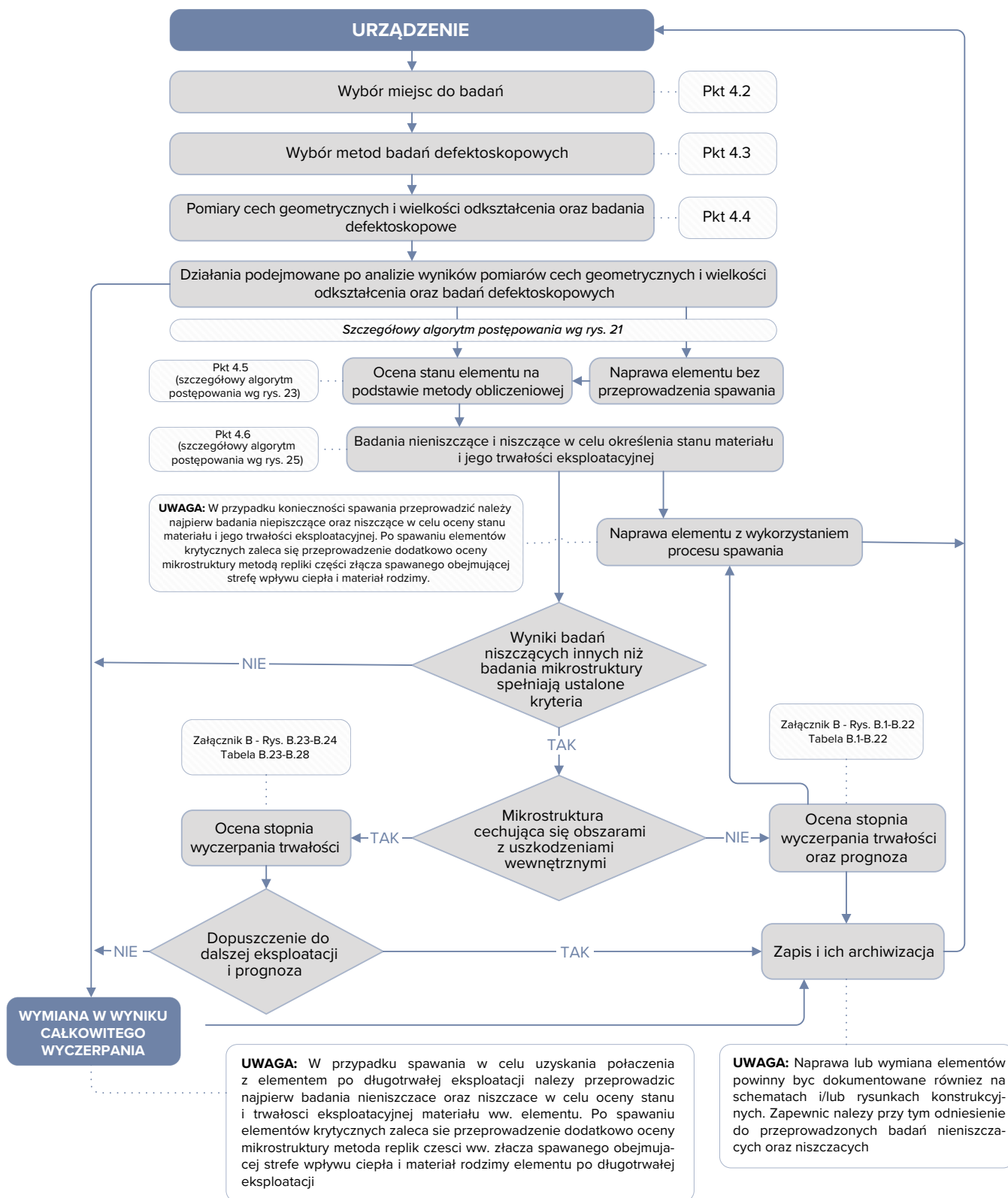
Dynamika zachodzących zmian zależy przede wszystkim od typu struktury, stanu wyjściowego materiału oraz od rzeczywistych, eksploatacyjnych warunków temperaturowo-naprężeniowych. Ponadto, występujące możliwe różnice w strukturze stanu wyjściowego dla danego gatunku stali mogą dodatkowo zwiększać lub zmniejszać 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

Ogólny algorytm postępowania przy ocenie stanu technicznego elementów pracujących w warunkach pełzania przedstawiono na rysunku nr 12.



Rys. 12. Główne etapy oceny stanu elementu

W Załączniku A niniejszych zamieszczono propozycję doboru metod badawczych i częstotliwości badań dla wybranych elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania od początku ich 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.

4.2 Wybór miejsc do badań

Wybór elementów i miejsc do badań jest bardzo ważny, ponieważ wpływa na wybór odpowiednich metod badawczych, czas trwania badań oraz trafność podejmowanych decyzji.

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

Wybór reprezentatywnych miejsc do badań materiałowych jest kluczowy dla wiarygodności oceny stanu materiału. Wyboru tego należy dokonać 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 wyężenia na podstawie pomiaru wybranych własności fizycznych.

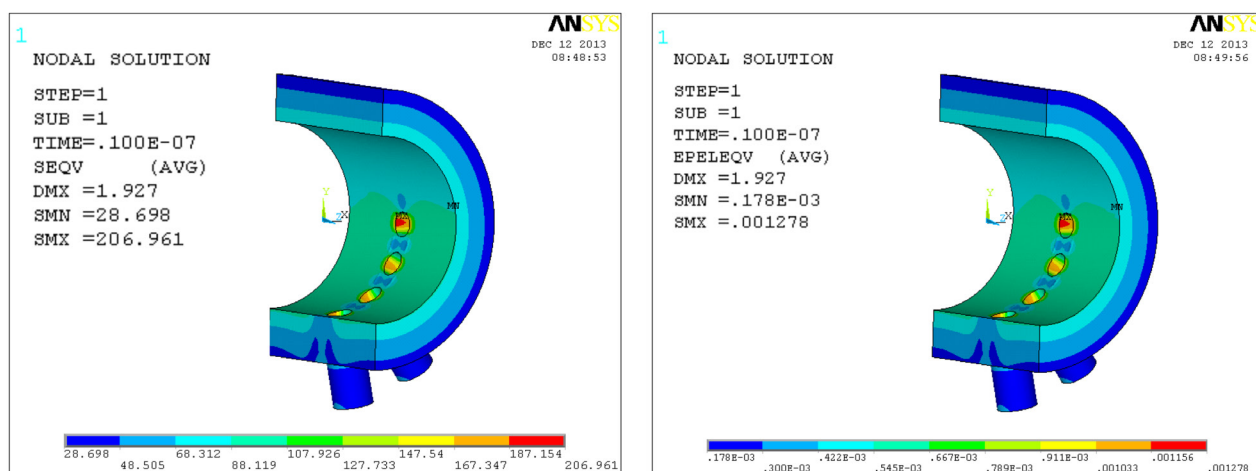
Jeśli konieczne jest bardzo precyzyjne wyznaczenie obszaru do badań diagnostycznych, zaleca się wykonanie mapy występowania nieciągłości materiałowych na podstawie badań materiałowych oraz przeprowadzenie analizy stanu naprężeń, np. metodą elementów skończonych (MES) lub za pomocą badań tensometrycznych.

Aby wyznaczyć najbardziej wyężone miejsca, w których można przeprowadzić badania mikrostruktury metodą nieniszczącą, zaleca się zastosowanie badań właściwości fizycznych. Alternatywną metodą może być pomiar szumu Barkhausena.

Obszary wyznaczone powyższymi metodami porównawczymi, w których uzyskano najbardziej niekorzystne wyniki, są potencjalnymi miejscami największego wyężenia i stanowią obszar reprezentatywny badanego elementu.

Doświadczenia eksploatacyjne, analiza rzeczywistych parametrów pracy i czasu eksploatacji w porównaniu do obliczeniowego, interpretacja wyników badań wizualnych i pomiarów cech geometrycznych oraz określenie wybranych właściwości fizycznych metodami porównawczymi stanowią podstawę do wyboru rodzaju badań diagnostycznych i wstępnego określenia obszarów badań w elemencie.

zaleca się wykorzystywanie wyników badań rzeczywistych własności mechanicznych. W przypadku braku możliwości wykonania badań niszczących dopuszcza się zastosowanie odpowiednich wartości normatywnych, w uzgodnieniu z UDT. Naprężenia nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnej. Najbardziej narażone na pęknięcia są elementy takie jak: trójniki, czwórniki, kolana, zwężki oraz złącza spawane.



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

4.3.1 Wybór metody badań

Aby wykryć pęknięcia powierzchniowe oraz wewnętrzne nieciągłości stosuje się 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 i płytko zalegających podpowierzchniowych,
- badania ultradźwiękowe (objętościowe) - do wykrywania nieciągłości wewnętrznych w materiale i złączach spawanych oraz do określenia głębokości pęknięć, jak również pomiaru rzeczywistej grubości ścianki elementu,
- badania radiograficzne - do wykrywania nieciągłości wewnętrznych w materiale i złączach spawanych,
- badania metodą emisji akustycznej - metoda objętościowa pozwalająca na ujawnienie i zlokalizowanie źródła emisji akustycznej, które jest następstwem występowania aktywnych uszkodzeń.

Badania nieniszczące takie jak badania penetracyjne, magnetyczno-proszkowe, ultradźwiękowe, emisji akustycznej czy radiograficzne, dobierane są indywidualnie dla każdego elementu. Wybór zależy od typu elementu, jego charakteru pracy, dostępu do niego (z punktu widzenia możliwości wykonania danego badania) oraz czasu eksploatacji odniesionego do założonego czasu użytkowania.

Badania wizualne bezpośrednie wykonuje się na wszystkich powierzchniach elementów, do których jest dostęp. Natomiast badania wizualne z użyciem endoskopu stosuje się obowiązkowo dla grubościennych elementów ciśnieniowych – o ile istnieje możliwość wsunięcia sondy przez istniejące otwory.

W przypadku badania elementu ciśnieniowego nie zawierającego złączy spawanych należy stosować normy oraz kryteria wskazane w dokumentacji projektowej.

Podczas wyboru metody badań złączy spawanych spełnione muszą być wymagania normy PN-EN ISO 17635. Technikę i klasę badania ustala się na podstawie załącznika A tej normy z uwzględnieniem wymaganego poziomu jakości złącza, określonego w dokumentacji technicznej urządzenia. Nie należy również zapominać o ograniczeniach przeprowadzenia danego badania związanych z: temperaturą, stanem powierzchni, rodzajem materiału, grubością elementu oraz dostępem do badanego obszaru.

4.3.2 Charakterystyka metod badań

Badania wizualne bezpośrednie

Każde badanie należy zaczynać od oględzin wizualnych, które dają ogólny obraz stanu technicznego elementu. Pozwalają zauważyć m.in. przebarwienia, pęknięcia, odkształcenia, ślady korozji i erozji, a także ocenić ogólny stan powierzchni. W takim badaniu można wykryć nieciągłości większe niż 1 mm.

Dla węzownic oględziny zewnętrzne są wykonywane w celu:

- wykrywania przebarwień i uszkodzeń oraz odkształceń poszczególnych węzownic,
- oceny ogólnego stanu powierzchni zewnętrznej, w tym osadzania się produktów spalania,
- oceny stanu elementów mocowania.

Dla komór, kolektorów zbiorczych i regulatorów temperatury, badania wizualne stosuje się, aby upewnić się czy:

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

W przypadku rurociągów badania wizualne są wykonywane na całej ich długości, 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,
- obejmmy 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 pomagają ocenić, w jakim stanie są badane elementy. Na ich podstawie można też zdecydować:

- gdzie dokładnie przeprowadzić dalsze, nieniszczące badania mikrostruktury np. za pomocą odcisków zwanych replikami (wyznaczenie miejsc reprezentatywnych);
- oraz gdzie pobrać próbki do dokładniejszych badań (niszczących), które wymagają wycięcia kawałka materiału.

Badania wizualne endoskopowe

Badania endoskopowe służą do wykrywania uszkodzeń wewnętrznych elementów. Wykonuje się je, aby ocenić stan powierzchni wewnętrznych takich części jak:

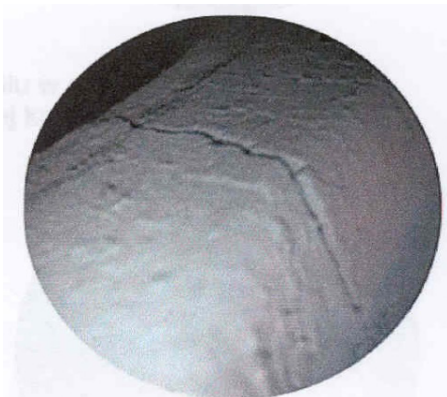
- płaszcze komór i regulatory temperatury,
- wtryski i koszulki ochronne regulatorów temperatury,
- otwory króćców, korpusów,
- elementy zasuw i zaworów,
- spoiny od strony grani (czyli od wewnętrznej strony złącza spawanego).

Najczęściej wykrywanymi uszkodzeniami od strony powierzchni wewnętrznej badanych elementów są:

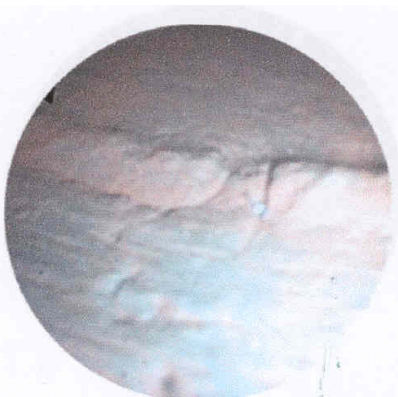
- pęknięcia 'słoneczkowe' na krawędziach otworów króćców i propagujące w obszary mostków elementów grubościennych,
- pęknięcia mostkowe,
- pęknięcia wzdłużne i poprzeczne w grani spoin obwodowych,
- pęknięcia i wypłukania materiału wzdłuż grani spoin obwodowych w strefie wpływu ciepła,
- pęknięcia w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

Przykładowe uszkodzenia powierzchni wewnętrznej wykrytych w badaniach endoskopowych pokazano na rys. 15. Ponadto należy pamiętać, że badania zawiesznień i podparć powinny być przeprowadzane wg. Wytycznych Urzędu Dozoru Technicznego nr 2/UC/2019/1.

Pęknięcia mostkowe
w komorze



Pęknięcia poprzeczne
w grani spoiny obwodowej



Pęknięcia
w materiale płaszcza komory

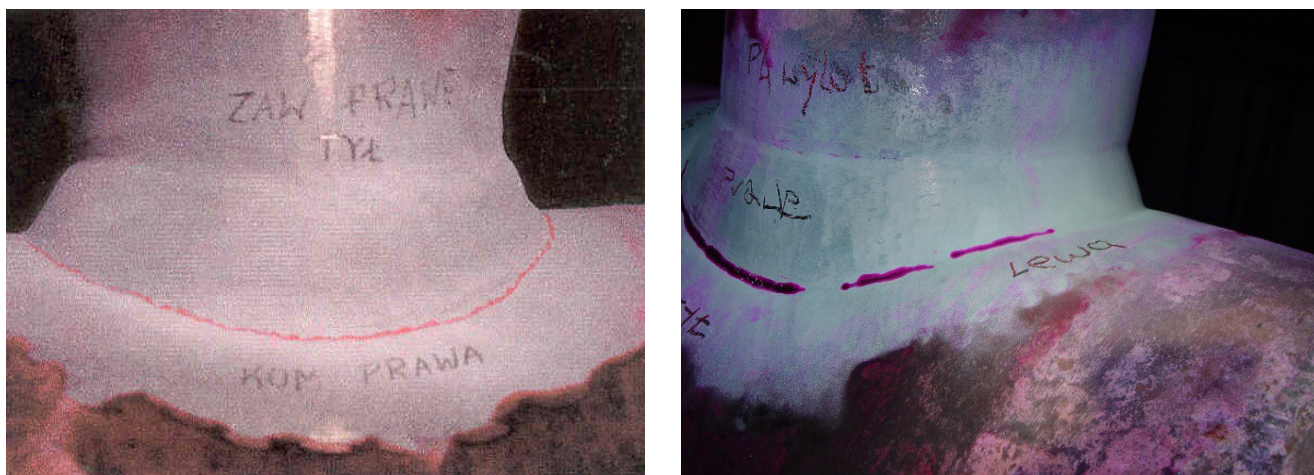


Rys. 15. Przykłady najczęściej występujących uszkodzeń powierzchni wewnętrznej elementów części ciśnieniowej kotłów i rurociągów parowych ujawnianych w badaniach endoskopowych

Badania penetracyjne (PT) umożliwiają wykrywanie powierzchniowych nieciągłości materiałowych, otwartych na powierzchnię i zorientowanych w dowolnym kierunku względem niej. Metoda ta znajduje zastosowanie w ocenie jakości złączy spawanych elementów, w szczególności tych, które nie mogą być badane metodami magnetycznymi. Umożliwiają wykrywanie nieciągłości znajdujących się w miejscach nagłych zmian przekroju elementu, których wykrycie jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe innymi metodami, a także nieciągłości w elementach o małych wymiarach. W tym przypadku badania penetracyjne stanowią często jedyną możliwą do zastosowania metodą badawczą.

Nieciągłości wykrywane tą metodą to przede wszystkim: pęknięcia gorące i zimne, przyklejenia powierzchniowe, braki przetopu, pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia wywołane korozją naprężeniową, zawalcowania itp.

Na rys. 16 przedstawiono przykład zastosowania badań penetracyjnych w celu ujawnienia pęknięć obwodowych złączy kątowych zamocowań komór wylotowych przegrzewacza pary pierwotnej.

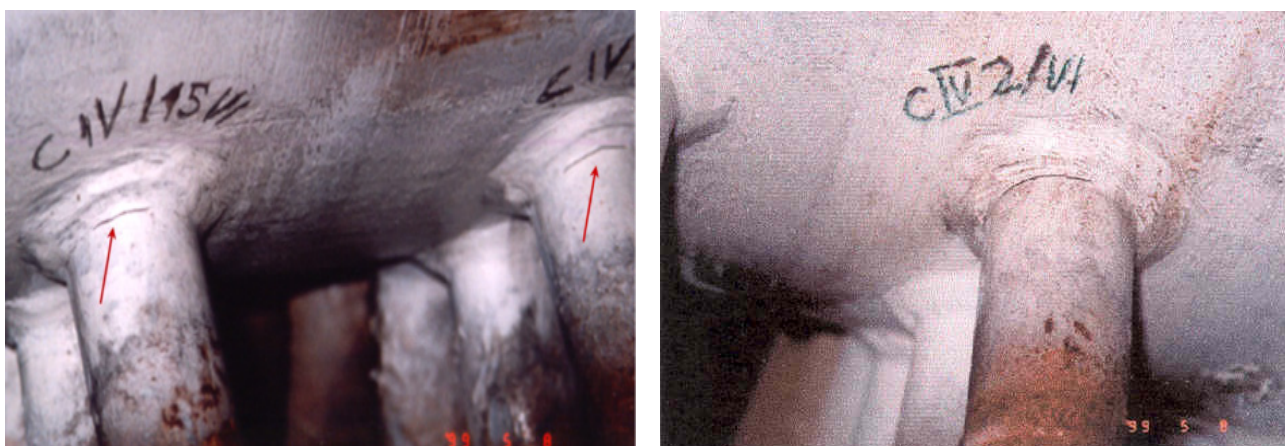


Rys. 16. Pęknięcie w obwodowym złączu kątowym zawieszenia komór wylotowych przegrzewacza pary ujawnione za pomocą badań penetracyjnych

Badania magnetyczno-proszkowe (MT) umożliwiają wykrywanie nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych. Mają one zastosowanie wyłącznie dla materiałów ferromagnetycznych. Czułość badania zależy od zastosowanej techniki badania. Badania magnetyczno-proszkowe są stosowane głównie do badania kątowych i doczołowych złączy spawanych. Przykłady pęknięć w złączach kątowych króćców wykrytych metodą magnetyczno-proszkową w komorze wlotowej przegrzewacza pary pierwotnie przegrzanej kotła, o dużej wydajności przedstawiono na rys. 17.

Komory wlotowe i wylotowe przegrzewaczy pary należą do najbardziej obciążonych elementów kotłów. Stanowią one tzw. elementy krytyczne, pracujące w najtrudniejszych warunkach oraz przy najwyższych parametrach temperaturowo-naprężeniowych. Często ulegają uszkodzeniu lub zniszczeniu szybciej niż inne elementy. Szczególnie narażone na uszkodzenia są komory pracujące powyżej temperatury granicznej materiału, w warunkach pełzania oraz poddawane działaniu gradientów temperatury i ciśnienia, zwłaszcza podczas cykli odstawiania i ponownego uruchamiania kotła.

Wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne oraz wyniki nieniszczących badań diagnostycznych przegrzewaczy pary kotłów pokazują, że największa liczba uszkodzeń występuje w komorach wylotowych przegrzewaczy ostatnich stopni pary pierwotnej i wtórnej. Uszkodzenia te pojawiają się często w okresie zbliżonym do obliczeniowego czasu pracy. Nieciągłości materiałowe ujawniane są zarówno na powierzchni wewnętrznej, jak i zewnętrznej komór. W przypadku powierzchni zewnętrznej, najczęściej obserwowane pęknięcia zlokalizowane w obrębie złączy spawanych doczołowych obwodowych, złączy kątowych króćców oraz w elementach mocujących.



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

Objętościowe metody badań nieniszczących

Badania ultradźwiękowe (UT) umożliwiają wykrywanie nieciągłości wewnętrznych, a także określenie ich wielkości i lokalizacji. Metoda ta jest szczególnie skuteczna w detekcji nieciągłości płaskich, które są korzystnie zorientowane względem wiązki ultradźwięków – najlepiej prostopadle do kierunku rozchodzenia fali.

Badania UT znajdują szerokie zastosowanie w diagnostyce elementów ciśnieniowych, w szczególności w:

- kontroli złączy spawanych,
- ocenie ciągłości materiałowej kolan, króćców, rur wężownic oraz innych elementów o złożonej geometrii.

Badania ultradźwiękowe umożliwiają również wykrywanie nieciągłości objętościowych i powierzchniowych. Oczywiście czułość badania jest zależna od wielu czynników takich jak np.: usytuowanie nieciągłości względem wiązki fal ultradźwiękowych, stanu powierzchni badanego elementu, zastosowanej techniki badawczej czy doświadczenie personelu badawczego. Metoda ta jest również często stosowana do pomiaru grubości elementów ciśnieniowych (płaszczki, króćców, rur wężownic itp.).

Badania radiograficzne (RT) pozwalają wykryć wewnętrzne nieciągłości materiału, głównie o charakterze przestrzennym. Nieciągłości płaskie również mogą być wykryte, ale tylko wtedy gdy zorientowane są korzystnie do kierunku rozchodzenia się promieniowania jonizującego. Metoda ta jest najczęściej stosowana do kontroli złączy spawanych, szczególnie złączy doczołowych, gdzie ważna jest dokładna ocena jakości spoiny.

Badania metodą emisji akustycznej (AE) umożliwiają ujawnianie i lokalizację źródeł emisji akustycznej, będących następstwem występowania nieciągłości i uszkodzeń aktywnych w trakcie obciążania, takich jak: wzrost pęknięcia, inne nieciągłości w strukturze materiału, lokalna deformacja plastyczna, degradacja materiału na skutek korozji powodującej miejscowe osłabienie struktury materiału urządzenia czy nieszczelność. Metoda pozwala na objęcie badaniem dużych urządzeń, jednak wymaga spełnienia warunku obciążenia obiektu w czasie badania.

4.3.3 Zakres badań

Badania nieniszczące elementów kotłów i rurociągów powinny być przeprowadzone zgodnie z opracowanym planem badań, który został uprzednio uzgodniony i zatwierdzony przez Urząd Dozoru Technicznego (UDT). Zakres uzgodniony z UDT powinien uwzględniać co najmniej 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 zależy 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 wykrycia pęknięć, należy rozważyć przeprowadzenie naprawy, która może być wykonana wyłącznie po wcześniejszym przeprowadzeniu badań mikrostrukturalnych metodą replik. Badania te powinny objąć złącze spawane, w tym: materiał rodzimy, strefy wpływu ciepła oraz samą spoinę – w celu oceny ewentualnych uszkodzeń pełzaniowych. Na podstawie wyników należy dokonać oceny stanu materiału i podjąć decyzję o dopuszczeniu lub wykluczającej możliwość przeprowadzenia naprawy.

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 naprawę należy przeprowadzić na całym złączu spawanym.

Obszar podlegający naprawie należy poddać ponownym badaniom materiałowym. 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.

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

Przy otworach odpowietrzeń, odwodnień i wtrysku wody powstają najczęściej pęknięcia bez odkształceń same-

go otworu. Natomiast, w sytuacji kiedy trwałemu odkształceniu ulega płaszcz komory lub schładzacza, wówczas pęknięcia występują we wszystkich otworach, a ich kierunek najczęściej zgodny jest z kierunkiem osi komory.

W celu ujawnienia pęknięć otworu należy przeprowadzić badania endoskopowe po uprzednim odcięciu króćca w odległości około 100 mm od płaszcz komory. Zbadać należy wewnętrzną powierzchnię samego króćca, tworzącą otworu, jak również krawędź i powierzchnię wewnętrzną płaszcz komory w okolicy badanego otworu. Przy otworach węzownic 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 usuwać wyłącznie w przypadku, gdy otwór nie wykazuje oznak deformacji geometrycznej. Usunięcie polega na rozwierceniu otworu do momentu całkowitego zaniku pęknięć, a następnie na przyspawaniu nowego króćca o zwiększonej średnicy i grubości ścianki, dostosowanej do aktualnych wymagań wytrzymałościowych. Maksymalną średnicę otworu oraz wymiary króćca należy określić na podstawie obowiązujących dokumentów odniesienia. W przypadku, gdy nie ma możliwości rozwiercenia otworu, aż do zaniku pęknięcia, konieczna jest wymiana całej komory na nową. Jeżeli pęknięcia występują w otworach, które wykazują deformację geometryczną, naprawa metodą rozwiercania jest niedopuszczalna, ze względu na ryzyko dalszej degradacji strukturalnej i utraty integralności elementu.

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

c) kolan i łuków

W rurociągach parowych pęknięcia najczęściej występują:

- w strefie rozciągania kolan – zawsze od strony zewnętrznej powierzchni,
- w strefach obojętnych – od strony wewnętrznej powierzchni.

Zaleca się następujące metody badań nieniszczących:

- strefy rozciągania kolan należy poddać kontroli metodą magnetyczno-proszkową (MT), w celu wykrycia powierzchniowych i podpowierzchniowych pęknięć w materiałach ferromagnetycznych.
- strefy obojętne należy zbadać metodą ultradźwiękową (UT), umożliwiającą wykrycie wewnętrznych nieciągłości materiałowych.

Dodatkowo, ze względu na możliwość występowania erozji i korozji, na kolanach i łukach rurociągów należy przeprowadzić pomiar grubości ścianki, w celu oceny stopnia zużycia materiału.

W przypadku wykrycia nieciągłości w strefie rozciągania lub w strefie obojętnej, których wymiary przekraczają wartości dopuszczalne określone w odpowiednich dokumentach odniesienia, konieczna jest wymiana kolana na nowe. Podobnie, jeśli zmierzona grubość ścianki kolana jest mniejsza od wymaganej grubości obliczeniowej, element również należy zakwalifikować do wymiany, niezależnie od obecności innych uszkodzeń.

d) zasuw, zaworów, trójników i czwórników

W elementach takich jak trójniki i czwórniki rurociągów parowych najczęściej obserwuje się występowanie pęknięć. Uszkodzenia tego typu mogą również pojawiać się, choć rzadziej, w zaworach oraz zwężkach. Uszkodzenia te lokalizują się przede wszystkim: w obrębie złączy spawanych oraz w strefach nagłych zmian średnicy przekroju. Pęknięcia przyjmują najczęściej kierunek obwodowy (równoległy do osi elementu) lub poprzeczny (prostopadły do osi).

W zasuwach pęknięcia najczęściej występują na powierzchni wewnętrznej i są wynikiem działania naprężeń cieplnych. W celu wykrycia tego typu uszkodzenia należy przeprowadzić badania magnetyczno-proszkowe. W przypadku ujawnienia pęknięć, naprawa powinna zostać przeprowadzona tak jak dla złączy spawanych.

e) ścianki płaszcz

Erozja od powierzchni zewnętrznej płaszcz występuje jako zjawisko wtórne od dmuchania pary przez nieszczelne króćce lub rury i jest najczęściej zlokalizowana 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 zmierzona 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 płaszcz komory.

f) badanie globalne

W sytuacji, gdy celem jest objęcie badaniem dużego urządzenia lub rozległej powierzchni, możliwe jest zastosowanie metody emisji akustycznej (AE). Umożliwia ona wykrycie aktywnych nieciągłości, czyli takich, które rozwijają się w trakcie działania obciążenia – na przykład podczas próby obciążeniowej.

W wyniku badania identyfikowane i lokalizowane są źródła emisji akustycznej, które mogą wskazywać na rozwijające się uszkodzenia materiałowe. W celu potwierdzenia ich charakteru i oceny stopnia zagrożenia, konieczna jest ich weryfikacja za pomocą innych metod badań nieniszczących (NDT). Należy pamiętać, że zakres badania powinien być dobierany indywidualnie dla danego elementu w oparciu o jego cechy konstrukcyjne, historię eksploatacji i aktywność mechanizmów degradacji.

4.4 Pomiary cech geometrycznych i wielkości odkształceń trwałych

Pomiary cech geometrycznych stanowią kolejny element oceny stanu technicznego urządzenia. Pomiary te 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 ścianek elementów oraz oceny wielkości powstałych ubytków materiału najczęściej stosuje się grubościomierze ultradźwiękowe. Pomiar wykonywany jest w punktach wyznaczonych zgodnie z wcześniej zaplanowaną siatką pomiarową. Metoda ta znajduje szczególne zastosowanie w ocenie stopnia korozji i erozji o charakterze ogólnym. Punkty siatki pomiarowej powinny być rozmieszczone dostatecznie gęsto, aby uwzględniły obszary 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 poszerzyć o punkty nie uwzględnione w zastosowanej siatce pomiarowej.

W przypadku występowania lokalnej erozji lub korozji w ocenianym elemencie, o stopniu jego degradacji oraz

możliwości dalszej eksploatacji decyduje nie tyle uśredniona grubość ścianki, co głębokość poszczególnych ubytków.

Uzyskane wyniki pomiarów grubości (g_r) płaszcza komór i elementów rurociągów należy porównać z wartością obliczeniową grubości ścianki tych elementów (g_o). Komory i rurociągi można dopuścić do dalszej eksploatacji, gdy wyniki pomiarów grubości nie są mniejsze od grubości obliczeniowej ($g_r \geq g_o$). Jeżeli zmierzona grubość ścianki elementu jest mniejsza od grubości obliczeniowej i ma charakter miejscowy, to taki element należy poddać naprawie poprzez spawanie ubytków (napawanie). W przypadku znacznych i rozległych ubytków materiału, w zależności od stopnia zniszczenia, zalecana jest częściowa lub całkowita wymiana danego elementu.

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

Należy pamiętać, że w przypadku występowania korozji wżerowej pomiar grubości należy przeprowadzić od strony oddziaływania czynnika korozyjnego, w warunkach badań wizualnych, z wykorzystaniem odpowiednich przyrządów pomiarowych lub mas plastycznych odwzorowujących ubytki materiału. W przypadku braku możliwości przeprowadzenia pomiarów bezpośrednich można stosować pomiary grubości metodą ultradźwiękową. W takiej sytuacji rekomenduje się przeprowadzenie pomiarów techniką mapowania powierzchni.

Pomiar ugięcia komory

Pomiar ugięcia komory pozwala określić stopień jej skrzywienia i jest wykonywany głównie dla komór poziomych przegrzewaczy pary świeżej i wtórnej. Poziomym odniesieniem jest rozciągnięta na całej długości komory struna. Pomiar taki należy wykonać w punktach oddalonych od siebie o 1/10 długości komory (rys. 18). Ze względu na wpływ ugięcia komory na wielkość trwałego odkształcenia otworów w płaszczu, wskazane jest wykonanie pomiarów odkształcenia, w miejscach o największym stopniu ugięcia.

Komory, w których strzałka ugięcia przekracza wartość graniczną, nie powinny być dopuszczone do dalszej eksploatacji. Natomiast jeśli strzałka ugięcia mieści się w dopuszczalnych granicach, lecz ze względów technologicznych (brak możliwości odwodnienia) komora nie może być dalej eksploatowana, dopuszcza się jej naprawę poprzez prostowanie metodą relaksacyjną po uprzednim usunięciu przyczyn ugięcia.

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

$$f_{dop} = 10^{-3} \cdot \frac{l^2}{D_z} \cdot K \quad (1)$$

- dla komory z otworami po stronie krzywizny

$$f_{dop} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l^2}{D_z} \cdot K \quad (2)$$

- dla komory z otworami po stronie przeciwnej do krzywizny

gdzie:

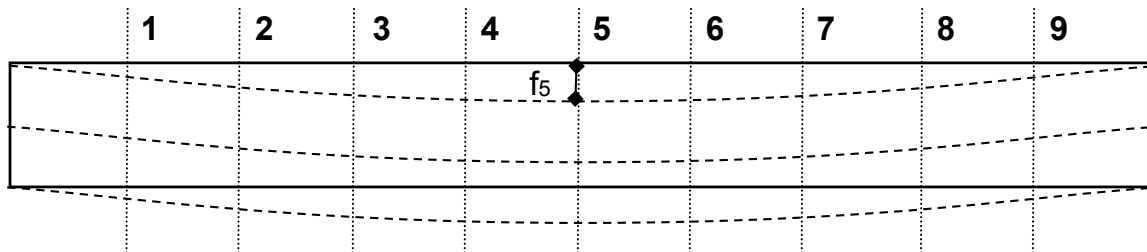
l – długość komory,

D_z – średnica zewnętrzna komory,

K – współczynnik uwzględniający sposób podparcia.

dla komór zamocowanych $K = 0,75 \div 1$ (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

Nadmierna deformacja płaszcza komory może prowadzić do odkształcenia otworów, a w konsekwencji do powstania pęknięć:

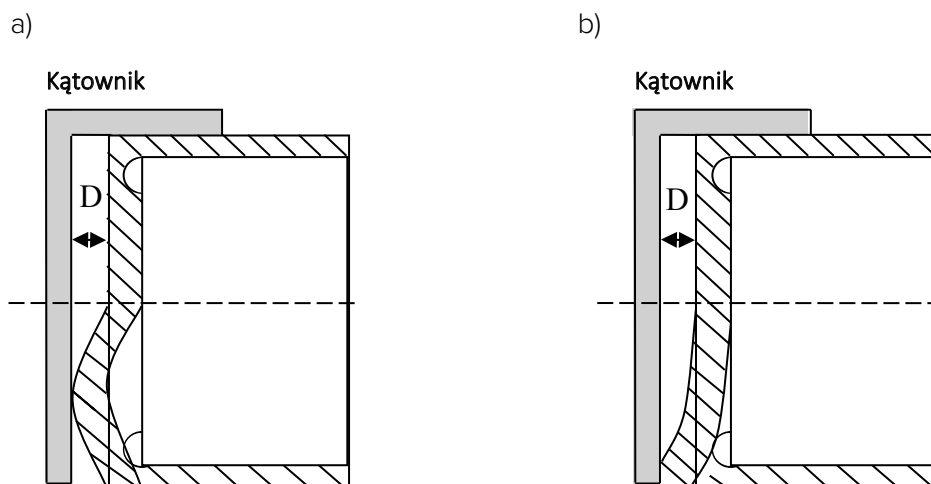
- na powierzchni zewnętrznej,
- w obszarze złączy kątowych króćców,
- na tworzącej otworów, oraz
- na mostkach od strony wewnętrznej.

Badania trwałego odkształcenia denek komór

Trwałe odkształcenie denek na zewnętrznych powierzchniach komór mogą przyjmować postać wklęsłości, wypukłości, a także pęknięć – szczególnie w rejonie przejścia denka w promień na jego wewnętrznej powierzchni oraz w obrębie rowka odciążającego.

Trwałe odkształcenie denka identyfikuje się poprzez przykładanie kątownika w czterech równomiernie rozmieszczonych miejscach na obwodzie i ocenę ewentualnych odchyień w postaci wklęsłości lub wybruszeń (rys. 19). W przypadku denek, w których mogą występować pęknięcia rozprzestrzeniające się od powierzchni wewnętrznych (czyli denka bez rowka odciążającego) należy przeprowadzić badania ultradźwiękowe. Natomiast denka 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 należy je wymienić na nowe. Przy trwałym odkształceniu mniejszym od podanej powyżej wartości granicznej, denka można dopuścić do dalszej eksploatacji, zwiększając częstość pomiaru odkształcenia.



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

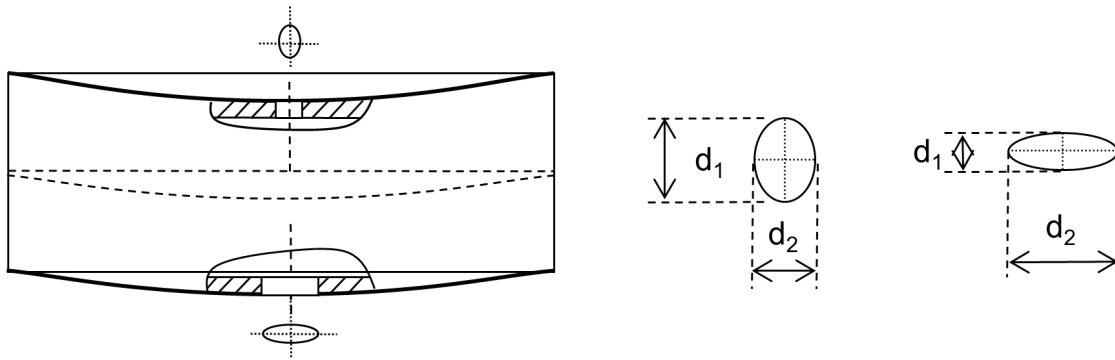
Pomiar wielkości trwałego odkształcenia

Komory

Pomiar trwałego odkształcenia przeprowadza się na czopach pomiarowych umieszczonych na zewnętrznej powierzchni płaszcza komory rozmieszczonych co 90° wokół jej obwodu. Do obliczenia wartości całkowitego trwałego odkształcenia niezbędny jest pomiar zerowy, który wykonuje się na czopach pomiarowych w dwóch prostopadłych kierunkach. Wartość całkowitego trwałego odkształcenia określa się jako różnicę średnic zmierzonych po określonym czasie eksploatacji względem wartości uzyskanych podczas pomiaru zerowego. Natomiast w celu wyznaczenia szybkości pełzania wykonuje się dwa pomiary w dowolnym momencie pracy elementu, jednak odstęp czasu pomiędzy tymi pomiarami nie może być krótszy niż 30 000 godzin.

Dotychczasowe doświadczenia diagnostyczne wskazują jednak, że wiarygodność uzyskiwanych pomiarów budzi wątpliwości. Wynika to z subiektywnego charakteru samego sposobu pomiaru, zmiennych warunków temperaturowych w trakcie jego wykonywania, wpływu współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału narzędzia pomiarowego, a także kultury technicznej w zakresie utrzymania właściwego stanu czopów pomiarowych, który często nie odpowiada wymaganej precyzji pomiaru średnicy komory.

Miarodajny w odniesieniu do odkształceń trwałych jest natomiast pomiar owalizacji otworów płaszcza komory. Pomiary średnic otworów wykonuje się, 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

Odształcenie otworu oblicza się wg wzoru (3):

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

gdzie:

ε_k – trwałe odkształcenie otworu

d_{max} – maksymalna średnica otworu

d_{min} – minimalna średnica otworu

Do dalszej eksploatacji można dopuścić komory, dla których odkształcenie otworów (ε_k) nie przekracza 2%. W przypadku wystąpienia większych odkształceń, badany element należy częściowo lub całkowicie wymienić.

Szybkość pęczania można obliczyć jako stosunek trwałego odkształcenia do czasu eksploatacji, który upłynął od momentu pomiaru zerowego do chwili rejestracji aktualnego stanu odkształcenia.

Wężownice przegrzewaczy pary

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

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

gdzie:

ε_w – odkształcenie średnicy wewnętrznej

dw_{max} – maksymalna średnica wewnętrzna

dw_{min} – minimalna średnica wewnętrzna

Do dalszej eksploatacji można dopuścić rury wężownic, dla których odkształcenie średnic wewnętrznych nie przekracza 2%.

Rurociągi

Wielkość odkształcenia rurociągu wyznacza się na podstawie pomiaru:

1. owalizacji otworów (odpowietrzeń i odwodnień): najbardziej miarodajny do oceny wielkości odkształcenia rurociągu. Pomiar polega na zmierzeniu dwóch prostopadłych średnic (prostopadłej i równoległej do głównej osi rurociągu). Na podstawie tych wartości oblicza się odkształcenie rurociągu według następującego wzoru:

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

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:

- o 2% dla stali molibdenowych i chromowo – molibdenowych,
- o 1,5% dla stali chromowo – molibdenowo – wanadowych oraz wysokochromowych stali martenzytycznych.

2. 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):

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

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 w przedziale od 5% do 8% należy uwzględnić jej wpływ w obliczeniach rzeczywistego czasu pracy rurociągu. W przypadku, gdy dopuszczalna owalizacja przy wytwarzaniu — zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi — przekracza 4%, wartość graniczną dla tych elementów w trakcie eksploatacji należy wyznaczyć na podstawie analizy jej wpływu na trwałość eksploatacyjną.

3. na czopach pomiarowych (reperach)

Okresowy pomiar na czopach pomiarowych przeprowadzany okresowo wraz z innymi badaniami diagnostycznymi, stanowi podstawę do oceny czy dany element nadaje się do dalszej eksploatacji. Zazwyczaj do tego celu wykorzystuje się specjalne mikrometry, umożliwiające precyzyjny pomiar odkształceń elementu. Z reguły czopy instalowane są na rurociągach w dwóch, wzajemnie prostopadłych do siebie kierunkach, w płaszczyźnie prostopadłej do osi rury. Komplet czopów, tworzących układ pomiarowy, zaleca się umieszczać w miejscach rurociągu, gdzie występują największe obciążenia, lub gdzie grubość ścianki jest najmniejsza. Nie powinny być one montowane w okolicach spoin, podparć czy zawiesznień. Najczęściej instaluje się je na prostych odcinkach rurociągów i na prostkach elementów giętych. Rzadko spotyka się je w miejscach przegięć rur lub na środku łuków i kolan, mimo że to właśnie tam odkształcenia zazwyczaj są największe. W kotłach czopy pomiarowe instaluje się przede wszystkim: na komorze wylotowej z kotła i na każdym odcinku, gdzie zmienia się średnica, a także w miejscach 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 montażu czopów pomiarowych, dokładności przyrządu pomiarowego i miernika temperatury, a także od staranności podczas wykonywania samych pomiarów.

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

Do obliczenia stopnia odkształcenia niezbędny jest pomiar zerowy wykonany nie wcześniej niż po 20 000 godzin pracy rurociągu od jego 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 można dopuścić 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, wykorzystując specjalnie zamocowane repery. Pomiary przeprowadza się zarówno w stanie zimnym, jak i gorącym zazwyczaj po 5 dniach postoju i 5 dniach pracy - w okresach remontowych. Dane zbierane są w trzech kierunkach (x, y, z), a na ich podstawie oblicza się histerezę przemieszczeń.

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

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

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:

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

Obliczone w ten sposób wartości histerezy nie powinny przekraczać $\pm 10\%$, a kierunki przemieszczeń powinny być zgodne z kierunkami przyjętymi w obliczeniach. W przypadku stwierdzenia niezgodności należy zidentyfikować i usunąć ich przyczynę. Najczęściej przekroczenie dopuszczalnej wartości histerezy przemieszczeń wynika z niewłaściwej pracy zamocowań lub blokady rurociągu.

Na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych oraz oceny stanu technicznego i jakości pracy zamocowań należy przeprowadzić analizę naprężeń z wykorzystaniem programu opartego na metodzie elementów skończonych (MES). Analiza ta powinna uwzględniać odpowiednie kombinacje obciążeń działających na rurociąg w stanie zimnym, gorącym oraz podczas próby wodnej. Do obliczeń zaleca się wykorzystywanie wyników badań rzeczywistych własności mechanicznych. W przypadku braku możliwości wykonania badań niszczących dopuszcza się zastosowanie odpowiednich wartości normatywnych. Wyznaczone, nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych. Wytrzymałość rurociągów zależy w największym stopniu od obciążeń cieplnych, wynikających z ograniczeń swobody dylatacji. Podczas eksploatacji, gdy nie ma możliwości wprowadzenia zmian konstrukcyjnych, jedynym sposobem na zmniejszenie tych ograniczeń jest odpowiednie oddziaływanie na układ zamocowań. Korekta ustawień lub regulacja zamocowań jest możliwa wyłącznie wtedy, gdy dysponujemy wiedzą na temat możliwych wartości i kierunków przemieszczeń rurociągów w różnych stanach pracy. Wprowadzenie zmian w układzie zamocowań jest możliwe dopiero po przeprowadzeniu analizy wytrzymałościowej, uwzględniającej aktualne warunki pracy oraz po przeprowadzeniu modelowania i weryfikacji zamierzonych działań. W niektórych przypadkach może zaistnieć konieczność zmiany charakterystyki lub rodzaju zamocowania. Dopuszczenie rurociągów do eksploatacji jest możliwe dopiero po uzyskaniu odpowiedniego zmniejszenia poziomu naprężeń poniżej wartości dopuszczalnych.

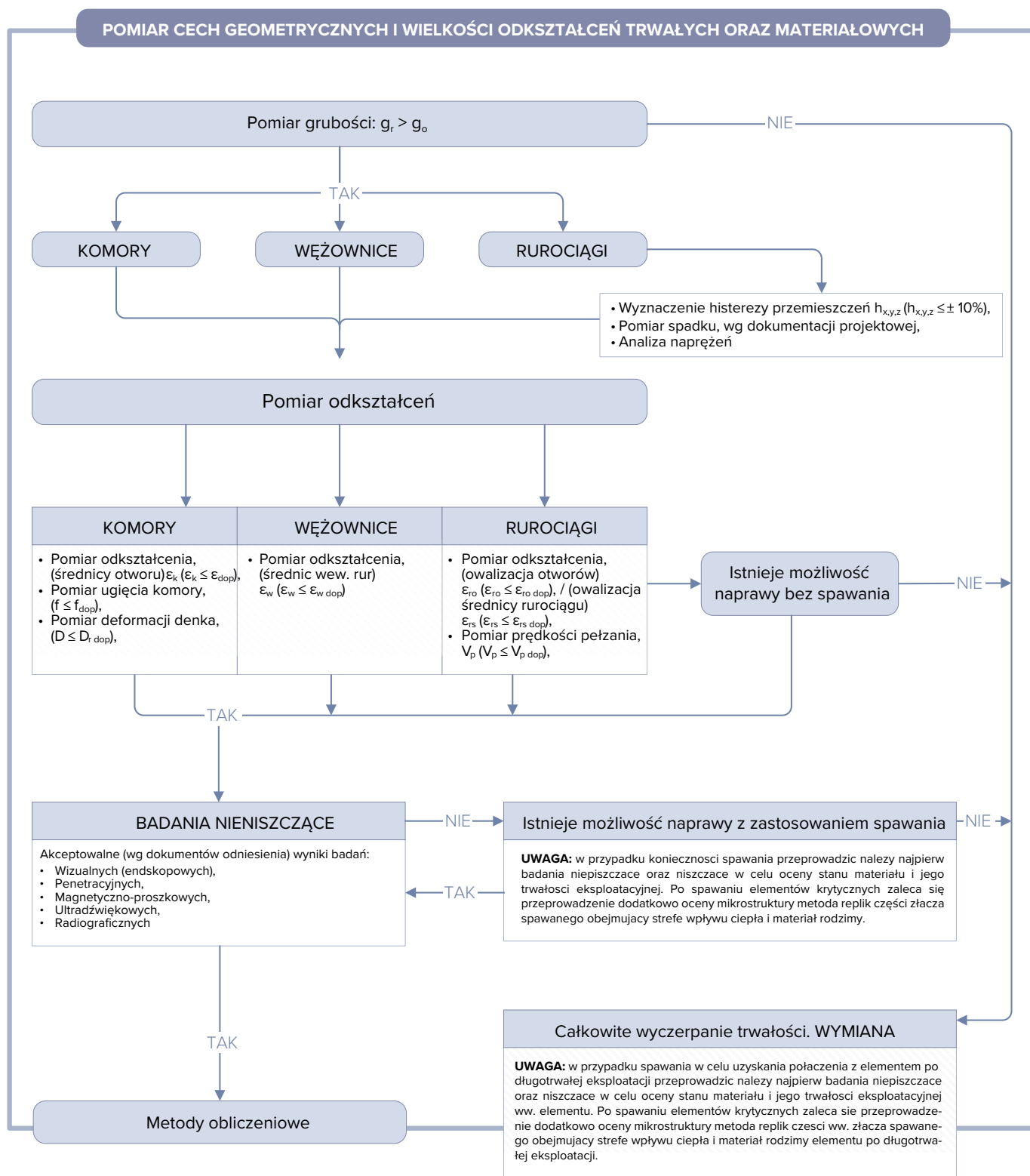
Analiza naprężeń odgrywa istotną rolę także przy typowaniu obszarów do badań diagnostycznych.

Pomiar spadku rurociągu

Wartość spadków w stanie zimnym nie może być mniejsza niż wartość określona w dokumentacji projektowej. W przypadku stwierdzenia ww. niezgodności należy przeprowadzić analizę jej przyczyn oraz podjąć odpowiednie czynności naprawcze. Pomiaru powinny być przeprowadzane regularnie, nie rzadziej niż w terminach rewizji głównych rurociągów.

Sposób postępowania w zależności od uzyskanych wyników

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



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

4.5 Obliczeniowa ocena stanu elementu

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,
$R_{z/\tau t}$		- 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]	- rzeczywista 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, bazując na danych zawartych w dokumentacji projektowej.

a) obliczenie wymaganej grubości ścianki

Obliczenie wymaganej grubości ścianki (g_{o2}) elementu ciśnieniowego pracującego w warunkach pełzania przy pracy do 200 tys. h, wg dokumentacji projektowej, należy przeprowadzić zgodnie z wzorem (9):

$$g_{o2} = \frac{D_z \cdot p_o}{(2 \cdot k - p_o) \cdot z + 2 \cdot p_o} \quad (9)$$

gdzie naprężenie dopuszczalne wynosi:

$$k = 0,8 \cdot R_{z/200000/t_o} \quad (10)$$

b) obliczenie naprężeń w elemencie

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

$$\sigma_0 = \frac{p_0[D_z - g_0(2-z)]}{2 \cdot z \cdot g_0} \quad (11)$$

c) wyznaczenie teoretycznego czasu pracy τ_{B0} i τ_0 metodą obliczeniową

Aby wyznaczyć wartości $R_{z \min/\tau/t_0}$ należy odczytać z przedmiotowych norm dla danego materiału, średnie wartości $R_{z/100000/t_0}$ i $R_{z/200000/t_0}$ i obliczyć $R_{z \min/\tau/t_0}$ według zależności: $R_{z \min/100000/t_0} = 0,8 \cdot R_{z/100000/t_0}$ i $R_{z \min/200000/t_0} = 0,8 \cdot R_{z/200000/t_0}$. Następnie na podstawie obliczeń należy wyznaczyć z wzorów (12), (13) i (14) teoretyczny czas pracy τ_{B0} i teoretyczny czas pracy τ_0 elementu wg danych dokumentacji projektowej, po przekroczeniu którego należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu:

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

stąd:

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

gdzie:

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

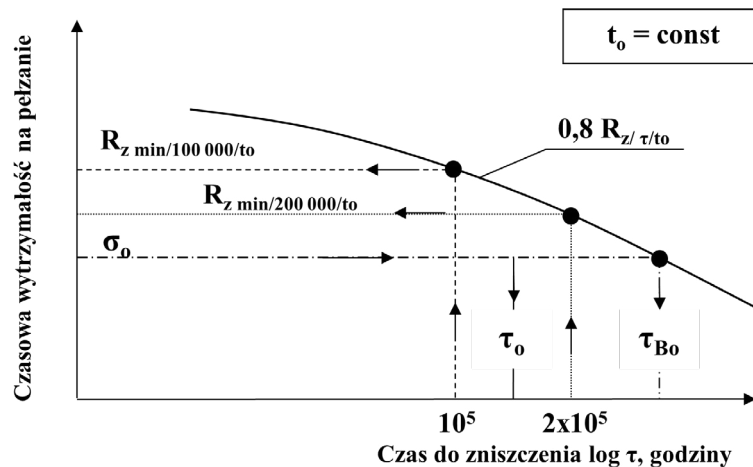
Teoretyczny czas pracy można wyznaczyć na podstawie wykresu czasowej wytrzymałości na pełzanie materiału. Jednak uzyskane wartości czasów τ_{B0} i τ_0 są obarczone pewną niedokładnością i mają głównie charakter poglądowy. Dlatego do określenia teoretycznego czasu pracy τ_{B0} i τ_0 zaleca się stosowanie metody obliczeniowej i wykorzystywanie tego wyniku w podejmowaniu decyzji o przeprowadzeniu badań diagnostycznych na obiekcie.

W celu wyznaczenia teoretycznego czasu pracy τ_{B0} i τ_0 należy sporządzić wykres zależności minimalnych wartości $R_{z \min/100\ 000/t_0}$ i $R_{z \min/200\ 000/t_0}$ w skali podwójnie logarytmicznej (rys. 22)

Czas τ_{B0} wyznacza się wg krzywej wykresu czasowej wytrzymałości materiału, który to czas jest odciętą punktu o rzędnej odpowiadającej obliczeniowemu naprężeniu. Natomiast czas τ_0 wyznacza się wg zależności (15):

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

Wielkość 0,6 została przyjęta w celu zapewnienia zapasu wytrzymałości elementu na działania zmiennych i dodatkowych naprężeń.



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})

Na podstawie rzeczywistych wartości temperatury i ciśnienia, należy obliczyć wymaganą grubość ścianki elementu dla pracy do 200 000 godzin, zgodnie ze wzorem (16):

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

gdzie:

$$k = 0,8 \cdot R_{z/200000/t_r} \quad (17)$$

b) obliczenie rzeczywistych naprężeń w elemencie (σ_r)

$$\sigma_r = \frac{p_r [D_z - g_r (2 - z)]}{2 \cdot z \cdot g_r}$$

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

Należy odczytać z norm przedmiotowych dla danego materiału średnie wartości $R_{z/100\,000/tr}$ i $R_{z/200\,000/tr}$ i obliczyć $R_{z\,min}$ według poniższych zależności $R_{z\,min/100\,000/tr} = 0,8 \cdot R_{z/100\,000/tr}$ i $R_{z\,min/200\,000/tr} = 0,8 \cdot R_{z/200\,000/tr}$, a następnie wyznaczyć czas pracy (τ_{Br} i τ_r) na podstawie wzorów (18), (19) i (20):

$$\lg \tau_{Br} = 5 + 0,30103 \cdot \frac{\lg \left[\frac{R_{z\,min\,100000/tr}}{\sigma_r} \right]}{\lg \left[\frac{R_{z\,min\,100000/tr}}{R_{z\,min\,200000/tr}} \right]} \quad (18)$$

skąd:

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

gdzie:

$$A = 5 + 0,30103 \cdot \frac{\lg \left[\frac{R_{z\,min\,100000/tr}}{\sigma_r} \right]}{\lg \left[\frac{R_{z\,min\,100000/tr}}{R_{z\,min\,200000/tr}} \right]} \quad (20)$$

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 można przeprowadzić przy pomocy wzorów od (9) do (15). W zależności od otrzymanych wyników obliczeń rozróżnia się trzy klasy obliczeniowe. Przyporządkowanie badanego elementu do odpowiedniej klasy zależy od dwóch relacji: stosunku uzyskanej wartości obliczeniowej grubości g_{02} do wymaganej grubości obliczeniowej g_0 oraz relacji rzeczywistego czasu pracy elementu τ_s uwzględnianego w obliczeniach sprawdzających do teoretycznego czasu pracy elementu określonego w dokumentacji projektowej τ_0 , po przekroczeniu, którego należy rozpocząć specjalny nadzór nad ocenianym elementem.

Obliczeniowe klasy trwałości badanego elementu odniesione do wartości grubości g_0 i g_{02} oraz czasu τ_s i τ_0 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 i należy ją traktować jako ocenę wstępną. Za jej pomocą, można wyznaczać elementy oraz obszary o największym stopniu wyczerpania i podjąć decyzję o konieczności przeprowadzenia badań diagnostycznych.

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
Warunek grubość ścianki czas eksploatacji	$g_{02} \leq g_0$ $\tau_0 \geq \tau_s + 30\ 000h$	$g_{02} > g_0$ $\tau_0 < \tau_s + 30\ 000h$	$g_{02} \geq g_0$ $\tau_0 < \tau_s$
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 7000h, po czym należy przeprowadzić ocenę w oparciu o parametry rzeczywiste	Należy natychmiast przeprowadzić ocenę w oparciu o parametry rzeczywiste

Ocena stanu elementu na podstawie danych rzeczywistych

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

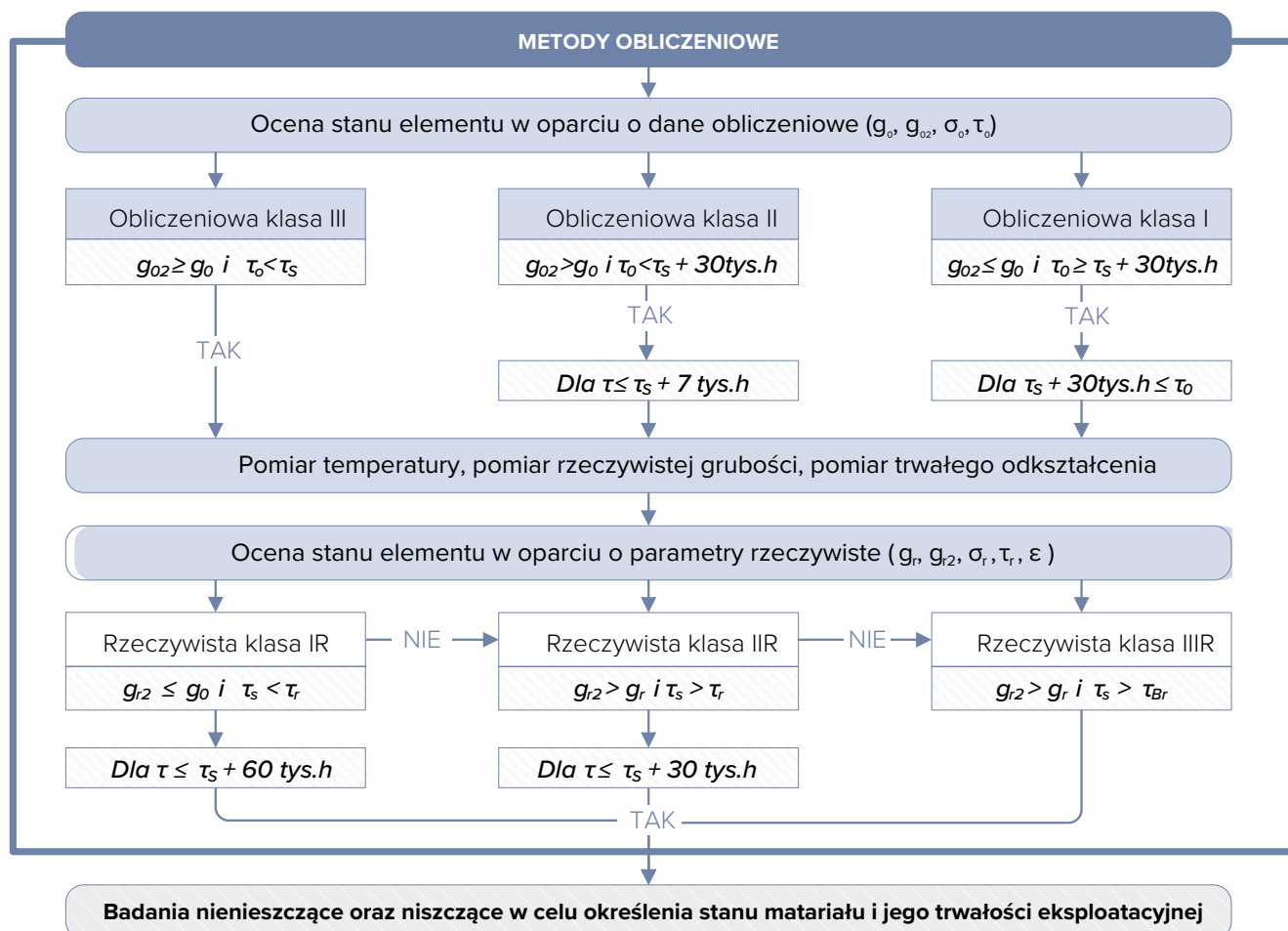
Ocena stanu elementu w oparciu o parametry rzeczywiste przeprowadzana jest przy pomocy wzorów od (16) do (20). W zależności od relacji uzyskanej wartości obliczeniowej grubości ścianki elementu g_{r2} dla parametrów rzeczywistych i czasu pracy do 200 000 godzin, odniesionej do rzeczywistej grubości ścianki 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_1 i g_{r2} oraz czasu τ_s i τ_r oraz odpowiadający im szacowany czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji zestawiono w tabelicy 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
Warunek grubość ścianki czas eksploatacji	$g_{r2} \leq g_r$ $\tau_s < \tau_r$	$g_{r2} > g_r$ $\tau_s > \tau_r$	$g_{r2} > g_r$ $\tau_s = \tau_{Br}$
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 bazuje 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):

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

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.

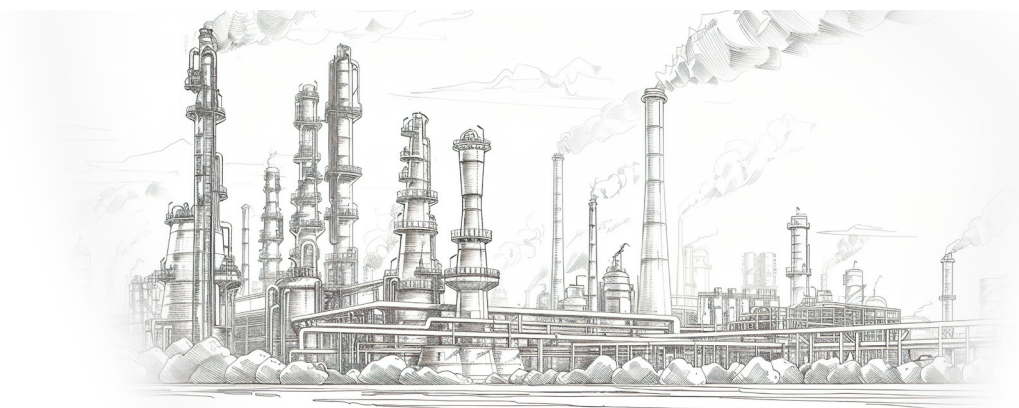
Warto zwrócić uwagę na fakt, iż szacowanie stopnia wyczerpania elementu za pomocą metody obliczeniowej opartej na regule ułamków trwałości nie jest wymagane w każdym przypadku. Zastosowanie tej procedury może wynikać z:

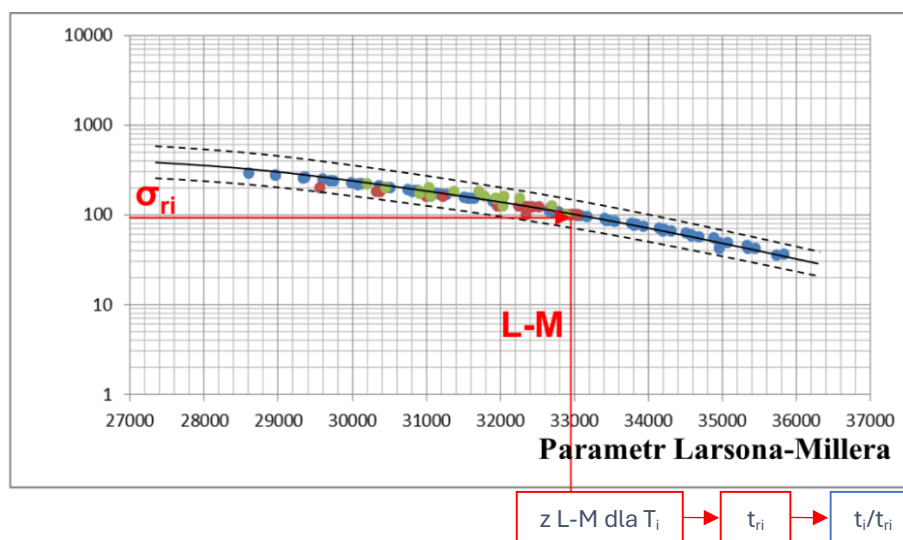
- opracowanych szczegółowych instrukcji, programów lub planów dotyczących diagnostyki i oceny trwałości elementów,
- konieczności spełnienia wymagań norm, np. PN-EN 12952-4.

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

Stosowanie tej metody jest przydatne podczas przeprowadzania wstępnej oceny stanu elementów krytycznych kotła pracujących w warunkach pełzania, poprzez wyznaczenie stopnia wyczerpania trwałości materiału, na podstawie zarejestrowanych on-line rzeczywistych parametrów temperaturowo-naprężeniowych. Na tej podstawie podejmowana jest decyzja o celowości przeprowadzenia badań diagnostycznych, których wyniki pozwalają określić możliwość dalszej eksploatacji danego elementu. 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

4.6.1 Uwagi ogólne dotyczące wyboru rodzaju badań

Przyjęty w wytycznych sposób podejścia do przeprowadzenia oceny stanu materiału oraz oszacowania stopnia wyczerpania i trwałości resztkowej, wykorzystuje wiedzę zarówno teoretyczną, jak i praktyczną. Wykonywanie badań nieniszczących i niszczących - odpowiednio dobieranych w zależności od czasu eksploatacji, dostępności do danego elementu oraz możliwości pobrania wycinka (badania niszczące), umożliwia obiektywną ocenę stanu technicznego elementu. Dzięki temu można wyznaczyć jego trwałość resztkową oraz czas dalszej bezpiecznej eksploatacji.

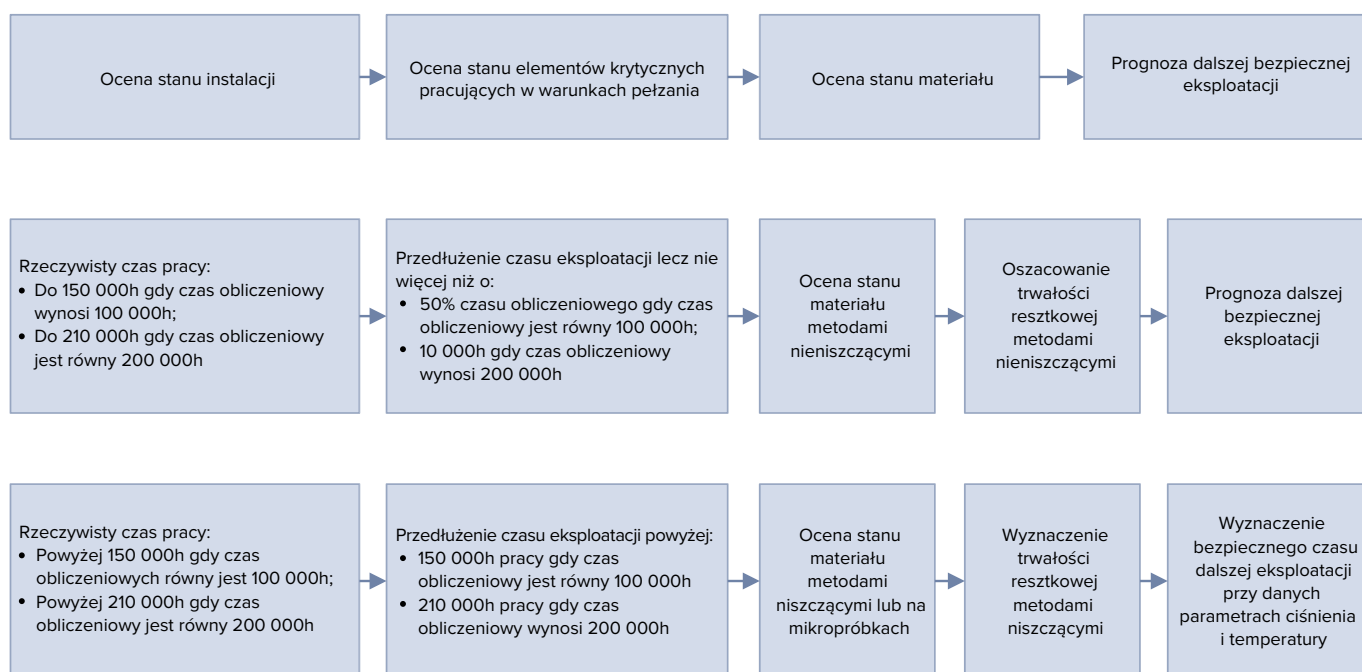
Największym wyzwaniem przy określaniu trwałości resztkowej elementu jest brak wielu istotnych informacji na temat historii jego eksploatacji i rzeczywistych warunków pracy. Dlatego w wytycznych zaproponowano metodę wyznaczenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji opartą na wynikach zarówno pomiarów, jak i badań diagnostycznych. W głównej mierze są to badania struktury i właściwości mechanicznych, w tym także badania pełzania materiałów (próba pełzania) elementów po długotrwałej eksploatacji powyżej temperatury granicznej.

Podczas opracowywania systemu oceny stanu materiału przyjęto założenie, że znajomość stanu wyjściowego, jak również historii eksploatacji, nie jest decydująca. Elementy te wpływające na mikrostrukturę, a przez to na parametry określające właściwości mechaniczne i odporność na pełzanie, zakodowane są w materiale będącym przedmiotem oceny. Aby ujawnić zakodowane w materiale zmiany, konieczny jest odpowiedni dobór narzędzi i metod badawczych w taki sposób, aby umożliwiły one zidentyfikowanie cech badanego materiału niezbędnych w ocenie jego stanu, stopnia wyczerpania i określeniu przydatności do dalszej eksploatacji na podstawie właściwości ujawnionych po okresie użytkowania.

Metody oceny trwałości resztkowej zastosowane w niniejszych wytycznych wymagają bezpośredniego dostępu do elementu oraz ewentualnego pobrania wycinków do badań niszczących lub badań z wykorzystaniem mikropróbek. Metody obliczeniowe mogą stanowić cenne uzupełnienie procesu tej oceny, jednak ich skuteczne zastosowanie wymaga posiadania danych dotyczących odpowiednich parametrów obliczeniowych oraz rzeczywistych warunków pracy elementu.

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, a także dostępności do elementu i możliwości pobrania materiału do badań, dokonuje się wyboru 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 badań niszczących lub badań na mikropróbkach, np. badania metodą SPT (Small Punch Test) na pobranych reprezentatywnych wycinkach do badań.

W załączniku A znajdują się propozycje doboru metod badawczych i częstotliwości badań dla elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania, począwszy od początku ich 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, niszczących lub na mikropróbkach 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

W procesie oceny stanu materiału wykorzystuje się wszystkie dostępne metody badań metaloznawczych. Szczególnie dużą wartość praktyczną mają badania mikrostruktury techniką replik z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego oraz dyfraktometru rentgenowskiego. Umożliwiają one również 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 stosuje się:

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

Każda z powyższych metod pozwala na wykrycie różnych elementów mikrostruktury badanego materiału niezbędnych w dokonywaniu oceny.

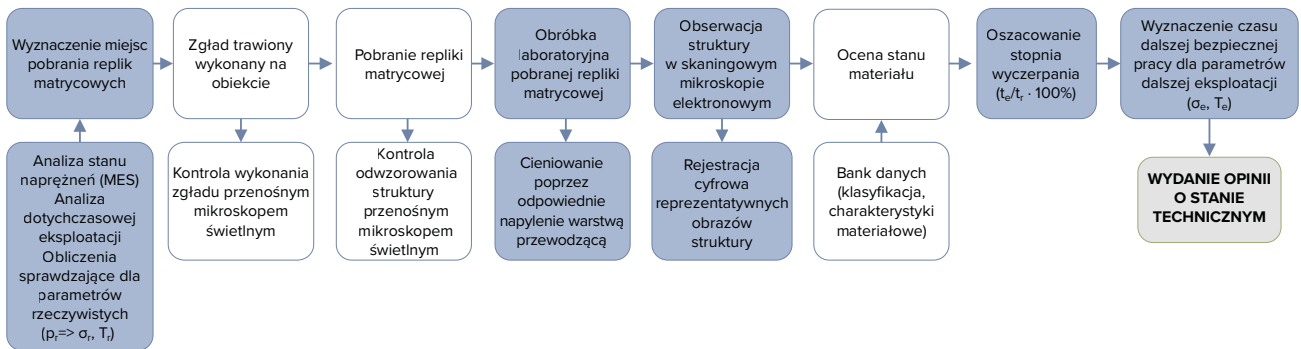
Badaniem, które należy wykonać obowiązkowo jest badanie metodą replik matrycowych. Pozostałe dwie metody należy uznać za uzupełniające. Ich wybór w praktyce jest uzależniony przede wszystkim od czasu dotychczasowej eksploatacji, a ponadto od rodzaju elementu oraz jego dostępności do badań.

4.6.2.1.2 Charakterystyka technik badania

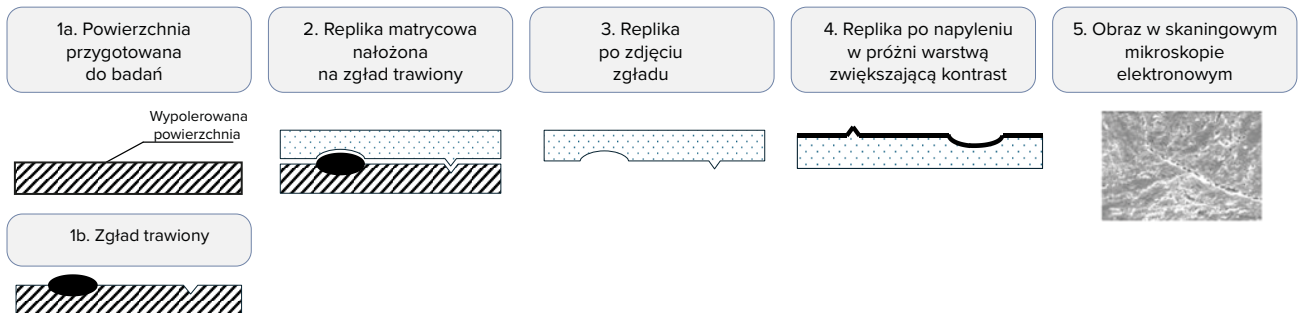
Badania z zastosowaniem replik matrycowych

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 wydzieleni faz wtórnych. Do prowadzenia obserwacji mikrostruktury, umożliwiających jej klasyfikację i ocenę stopnia wyczerpania, wykorzystuje się skaningowy mikroskop elektronowy. W celu poprawy kontrastu obrazu stosuje się technikę napyłania próżniowego replik. Mikroskop świetlny może być natomiast wykorzystany w przypadku ujawnienia ogólnego stanu degradacji mikrostruktury, a także uszkodzeń wewnętrznych na poziomie mikroszczelin czy mikropęknięć, przy zastosowaniu powiększenia w zakresie 500 – 1000x. Badania replik przy użyciu mikroskopu świetlnego cechuje się niską obiektywnością oraz często napotykają trudności w ujawnianiu wczesnych stadiów powstawania izolowanych pustek pełzaniowych. Użycie przenośnego mikroskopu świetlnego bezpośrednio na obiekcie służy głównie kontroli jakości wykonanych zglądów pod repliki matrycowe oraz zdjętych replik matrycowych. Dodatkowo umożliwia wykrycie występujących mikropęknięć. Sposób oceny stanu materiału na podstawie obrazu mikrostruktury (rozpadu głównych składników fazowych, stanu morfologii wydzieleni i uszkodzeń wewnętrznych), wyznaczonej klasy mikrostruktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania oraz zasady odwzorowania mikrostruktury za pomocą repliki matrycowej przedstawiono na rys. 26.

OCENA STANU MATERIAŁU ELEMENTU NA PODSTAWIE OBRAZU STRUKTURY (S_1 – ROZPAD GŁÓWNYCH FAZ STRUKTURY, ω - ROZWÓJ WEWNĘTRZNYCH USZKODZEŃ)



ZASADA ODWZOROWANIA OBRAZU ZA POMOCĄ REPLIKI MATRYCOWEJ



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

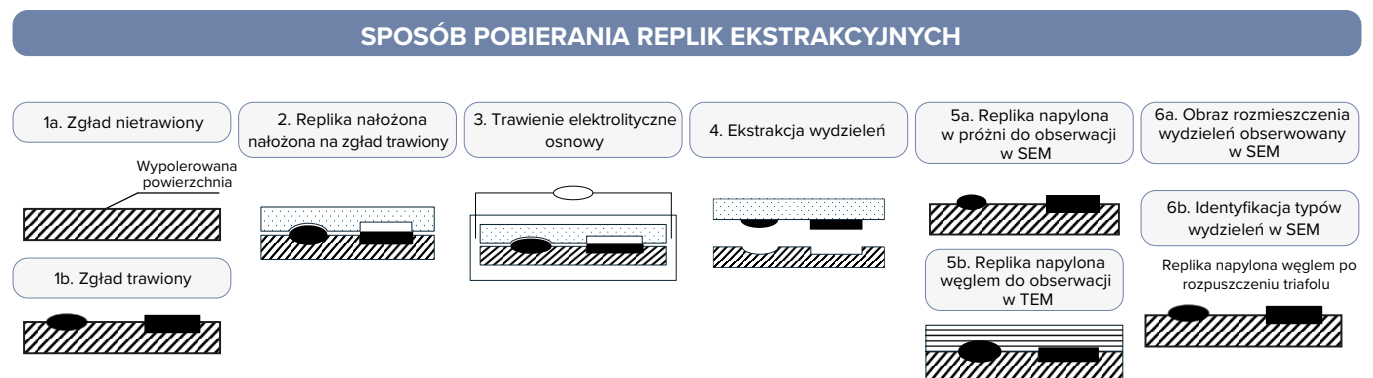
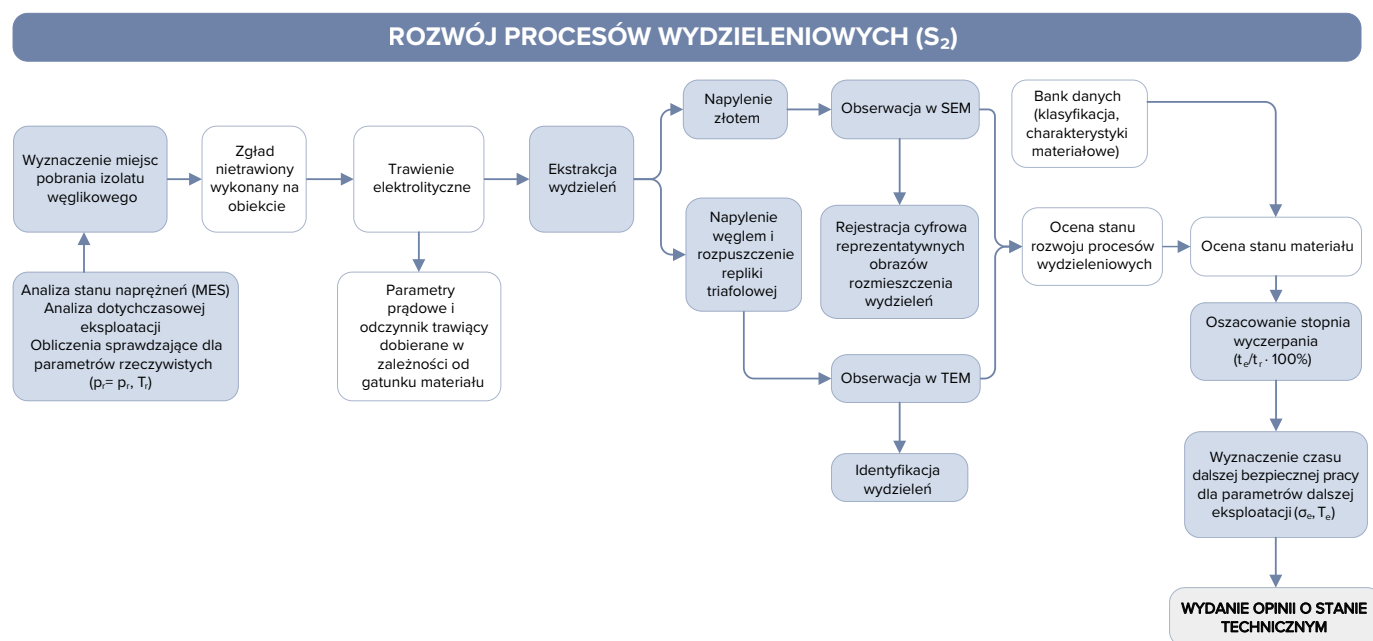
Przykłady zastosowania opisanych powyżej metod ujawniania elementów mikrostruktury, umożliwiających ocenę jej stanu oraz stopnia wyczerpania przedstawiono na rys. 27. Ilustrują one możliwość porównania obrazów uzyskanych za pomocą mikroskopu świetlnego z obrazami pochodzącymi ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

BADANIA MIKROSTRUKTURY W MIKROSKOPIE ŚWIETLNYM		BADANIA MIKROSTRUKTURY W SKANINGOWYM MIKROSKOPIE ELEKTRONOWYM	
	Powiększenie: 100-1000x Rozróżnialność faz: mała Ocena stanu rozpadu faz: brak		Powiększenie 500 - 5000x Rozróżnialność faz: duża Ocena stanu rozpadu faz: duża
	Powiększenie 500-1000x Rozróżnialność wydzieli i ich typów: mała Rozróżnialność drobnych wydzieli: brak Lokalizacja miejsca występowania wydzieli: mała		Powiększenie 1000 - 5000x Rozróżnialność wydzieli i ich typów: duża Rozróżnialność drobnych wydzieli: duża Lokalizacja miejsca występowania wydzieli: duża
	Powiększenie 500-1000x Identyfikacja pojedynczych pustek praktycznie niemożliwa Rozróżnialność pustek i wydzieli: bardzo mała Identyfikacja mikropęknięć: możliwa		Powiększenie 500 - 3000x Identyfikacja pojedynczych pustek: duża Rozróżnialność pustek i wydzieli: Identyfikacja mikropęknięć: jednoznaczna

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 zglądu 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 wydzieli oraz obserwację cech morfologicznych takich jak: wielkość, kształt, miejsca występowania i rozmieszczenie węglików, wykonuje się w skaningowym i/lub transmisyjnym mikroskopie elektronowym.

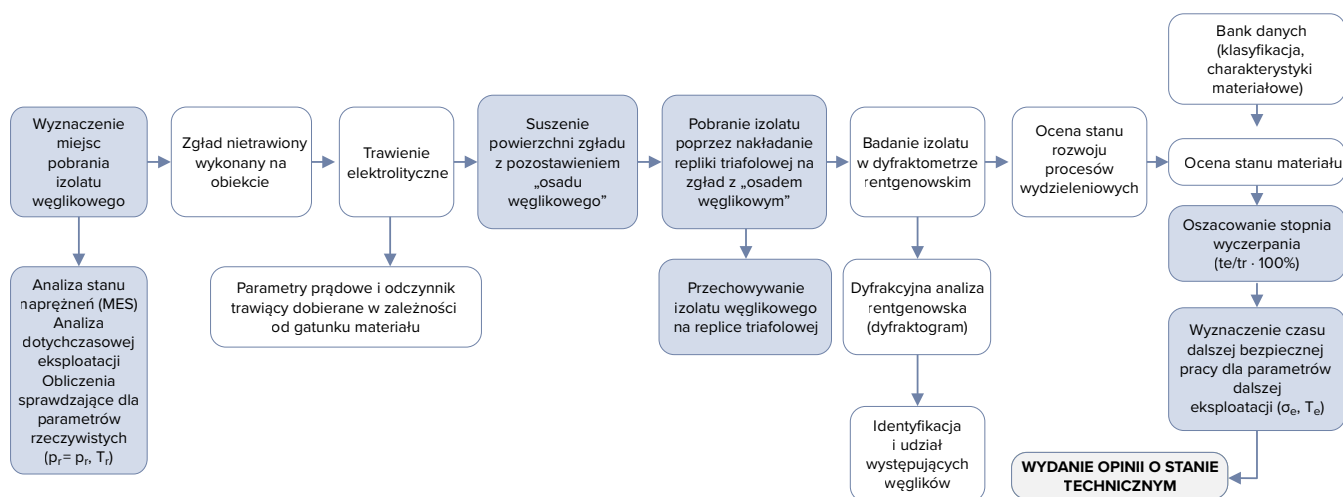


Rys. 28. Sposób dokonywania oceny i zasada odwzorowania obrazu za pomocą repliki ekstrakcyjnej

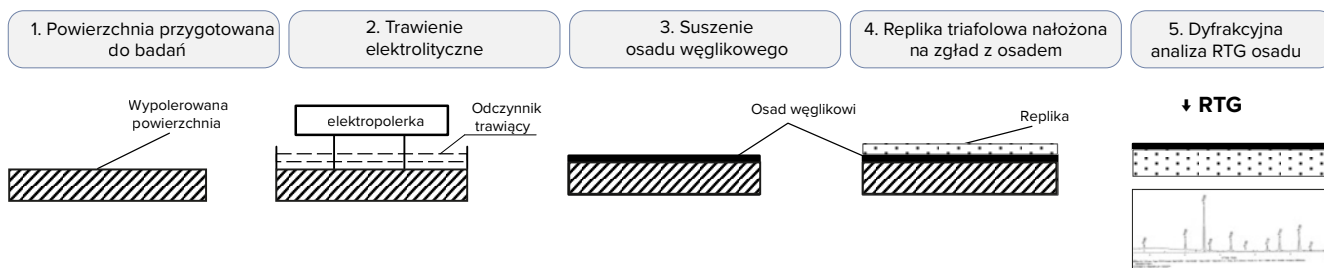
Metoda rentgenowskiej analizy fazowej izolatu węglkowego

Metoda rentgenowskiej analizy fazowej wyizolowanych elektrolitycznie węglików bezpośrednio na materiale badanego obiektu, różni się od stosowanej w warunkach laboratoryjnych sposobem pobierania wyizolowanego osadu węglkowego. Wydzielenia pobierane są bezpośredni 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 możliwość określenia rodzaju występujących węglików, ale również możliwość określania ich udziałów w wyizolowanym elektrolitycznie osadzie.

OCENA STANU MATERIAŁU ELEMENTU NA PODSTAWIE ANALIZY STANU WYDZIELEŃ WĘGLIKOWYCH



SPOSÓB POBIERANIA IZOLATÓW WĘGLIKOWYCH NA OBIEKCIE



Rys. 29. Sposób dokonywania oceny i zasada analizy wydzielań węglkowych

4.6.2.2 Badania twardości

Pomiary twardości należy przeprowadzać w miejscu wykonania repliki. Jeżeli zmierzona twardość jest niższa od wartości podanych w odpowiednich dokumentach odniesienia, oznacza to spadek właściwości wytrzymałościowych materiału, wynikający z degradacji jego mikrostruktury. Jeżeli zmierzona twardość jest wyższa od wartości podanych w odpowiednich dokumentach odniesienia, jej wzrost można wiązać ze wzrostem umocnienia materiału i tym samym ze wzrostem jego kruchości.

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

Pomiary twardości dostarczają również istotnych informacji o stanie materiału, szczególnie w obszarze złączy spawanych, kolan i elementów kształtowych. Za pomocą pomiarów można określić z pewnym przybliżeniem wartość doraźnej wytrzymałości na rozciąganie (R_m), poprzez odpowiednie przeliczenie wg zależności opisanych w normach PN-H-04357 lub PN-EN ISO 18265. Pomiary twardości są także pomocne przy wyborze obszaru do badań mikrostrukturalnych oraz przy właściwej interpretacji obrazów struktur uzyskanych podczas tych badań. Należy jednak pamiętać, że dokładność pomiaru twardości urządzeniami przenośnymi jest mniejsza niż w przypadku twardościomierzy stacjonarnych stosowanych w warunkach laboratoryjnych.

4.6.3 Badania niszczące

4.6.3.1 Uwagi ogólne

Dla elementów pracujących w warunkach pełzania, których czas eksploatacji przekroczył czas obliczeniowy: dla $t_0 = 100\ 000\text{h}$, o więcej niż 50% lub $t_0 = 200\ 000\text{h}$, o więcej niż 10 000h, należy przeprowadzić badania niszczące lub równoważne badania na mikropróbkach w oparciu o wytyczne istniejących norm. Zakres tych badań w dużej mierze zależy od możliwości pobrania odpowiedniej ilości materiału, co z kolei wynika z rodzaju oraz cech konstrukcyjnych ocenianego elementu.

Planowane badania wymagają bezpośredniego dostępu do elementu w celu pobrania reprezentatywnych próbek. Obszary, z których pobiera się wycinki do badań niszczących lub badań na mikropróbkach, wyznacza się na podstawie historii pracy, doświadczeń eksploatacyjnych, oględzin, oraz wyników badań nieniszczących, takich jak pomiary grubości ścianki metodą ultradźwiękową oraz porównawcze badania własności fizycznych (np. metoda WIT, szum Barkhausena i in.).

W przypadku węzownic przegrzewacza pary, do badań niszczących 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. W przypadku głównych rurociągów parowych pobierany jest wycinek elementu 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. W przypadku badań na mikropróbkach pobór materiału do badań z wykorzystaniem powierzchniowego poboru materiału często nie powoduje konieczności naprawy czy też odtwarzania elementu, z którego został pobrany wycinek do badań. Ilość pobranych wycinków zależy od zakresu badania i wymaganej ilości pomiarów dla danego rodzaju badania. Przykładowo dla wyznaczenia temperatury przejścia materiału w stan kruchy metodą SPT, wymagane jest zrealizowanie pomiaru na minimum 12 próbkach w różnych temperaturach. Należy zaznaczyć, że z jednego wycinka pobranego materiału z urządzenia, możliwe jest uzyskanie kilku próbek do badań.

Takie badania umożliwiają dokładną ocenę stopnia wyczerpania i stopnia uszkodzenia materiału bez znajomości historii 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 określenia przez użytkownika obiektu parametrów dalszej eksploatacji (temperatury i ciśnienia).

Na podstawie wieloletnich doświadczeń z badań diagnostycznych potwierdzono przydatność w praktyce wyników takich badań jak badanie:

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

4.6.3.2 Badania właściwości mechanicznych

Badania właściwości mechanicznych wymagają pobrania próbek, co wiąże się z powstaniem ubytku w materiale badanego elementu oraz koniecznością przeprowadzenia naprawy.

Badania właściwości mechanicznych w pełnym zakresie wykonuje się dla węzownic, rurociągów głównych oraz rurociągów komunikacyjnych parowych i obejmują:

- statyczną próbę rozciągania w temperaturze pokojowej i podwyższonej, zbliżonej do temperatury pracy elementu,
- próbę udarności,
- pomiary twardości,
- skrócone próby pełzania.

Próbę udarności wykonuje się w celu określenia pracy łamania z wyznaczeniem progu kruchości (dla materiału rurociągów parowych) natomiast skrócone próby pełzania pozwalają nam wyznaczyć trwałość resztkową oraz czas dalszej bezpiecznej eksploatacji dla założonych warunków 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. 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_{eT} . Uzyskane wyniki porównuje się z wartościami określonymi w odpowiednich normach dla wyrobów hutniczych z badanego gatunku stali. W przypadku, gdy wyniki badań nie spełniają wymagań odpowiednich dokumentów odniesienia, należy przeprowadzić analizę obejmującą następujące zagadnienia:

- zdolność 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. Pracę łamania wyznacza się dla różnych poziomów temperatury w zakresie od -60 do $+100^{\circ}\text{C}$. 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 toughness temperature*). Temperatura ta jest charakterystyczna dla równoważnych udziałów przełomu ciągliwego i kruchego (50%/50%).

Uzyskane informacje są niezbędne do analizy poprawności doboru parametrów uruchamiania i odstawiania kotła oraz przeprowadzania prób ciśnieniowych.

Próby pełzania - skrócone próby pełzania

Wyznaczania trwałości resztkowej na podstawie prób pełzania materiału będącego w eksploatacji wymaga uzyskania wyników długotrwałych badań trwających nawet 2 - 3 lata. Z tego względu w praktyce inżynierskiej stosuje się tzw. skrócone próby pełzania trwające od kilkudziesięciu godzin do kilku tysięcy godzin. Pozwala to na otrzymanie wyników badań po okresie do kilkunastu miesięcy.

Przeprowadzenie takich badań uwarunkowane jest możliwością pobrania niezbędnej ilości materiału w celu wykonania minimum pięciu próbek. Badania mogą być zrealizowane w oparciu o pobrane wycinki rurociągu lub węzownic przegrzewacza pary.

Skrócone próby pełzania mają na celu przyspieszenie procesu pełzania oraz skrócenie okresu wykonywania badań i 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. Metoda ta została zweryfikowana wynikami prób pełzania do 100 000 godzin przeprowadzonymi w temperaturze i przy naprężeniu odpowiadającym warunkom eksploatacyjnym dla tego samego materiału.

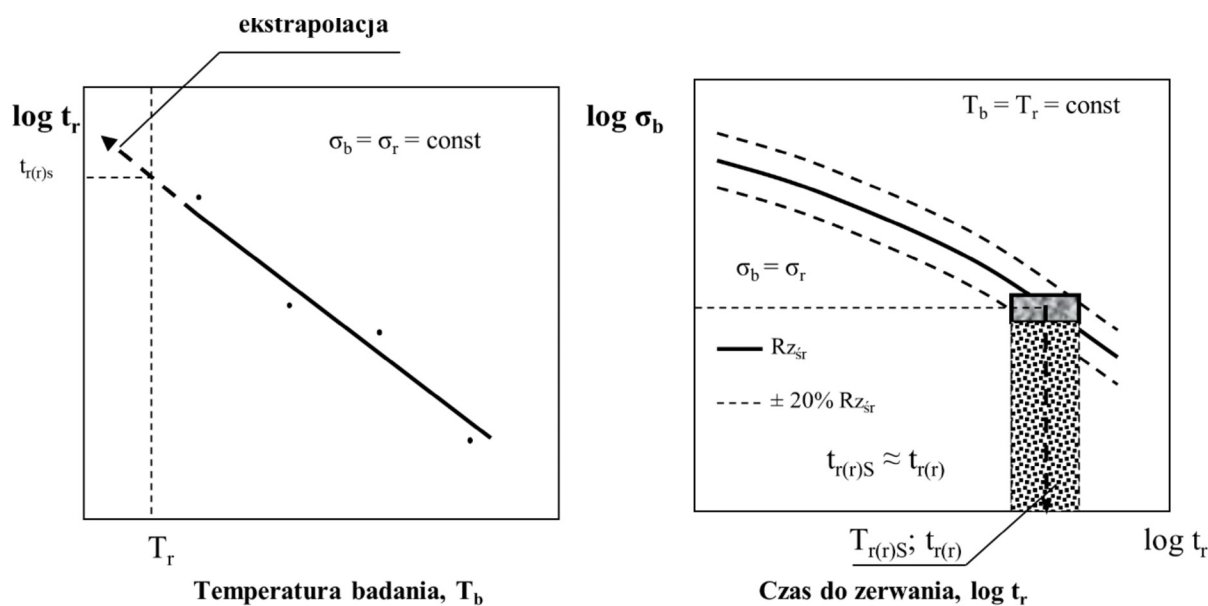
Wyznaczanie trwałości (trwałości resztkowej) podczas ekstrapolacji w tak przeprowadzonych skróconych próbach pełzania jest mało obiektywne, gdyż uzyskuje się wyniki zdecydowanie zawyżone, z błędem przekraczającym znacznie wartości górnej granicy dopuszczalności pasma rozrzutu wyników prób długotrwałych. 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 wyznaczania trwałości ekstrapolacji (trwałości resztkowej) na podstawie skróconych prób pełzania, prowadzonych przy stałym naprężeniu odpowiadającemu robocznemu 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, w związku z tym metoda ta została uznana za najbardziej wiarygodną.

Na rys. 30 przedstawiono sposób prezentacji wyników skróconych prób pełzania, prowadzonych przy stałym naprężeniu odpowiadającemu robocznemu ($s_b=s_r=const$), dla różnych poziomów temperatury T_b .

Czas do zerwania wyznaczony przez ekstrapolację prostej w kierunku temperatury eksploatacji, obarczony jest błędem nieprzekraczającym 20% względem czasu określonego na podstawie wyników długotrwałych prób pełzania trwających ok. 100 000 godzin. Taki szacowany czas do zerwania jest nieco zaniżony, jednak mieści się w granicach dopuszczalnego rozrzutu prób długotrwałych.

$$\log t_r = f(T_b) \quad \text{przy} \quad \sigma_b = \text{const.}$$



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 $\sigma_b = \sigma_r = \text{const}$.

T_b – temperatura badania,

T_r – temperatura robocza,

σ_b – naprężenie badania,

σ_r – naprężenie robocze,

t_r – czas do zerwania,

R_{zsr} – 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,

$t_{r(t)}$ – czas do zerwania dla parametrów roboczych uzyskany w długotrwałych próbach pełzania.

W praktyce dla wyznaczenia trwałości resztkowej materiałów elementów pracujących w warunkach pełzania (rurociągów, węzownic przegrzewaczy pary) należy stosować wyłącznie skrócone próby pełzania przy stałym naprężeniu i różnych poziomach temperatury, znacznie wyższej od temperatury eksploatacyjnej. Badania takie są zalecane po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy wynoszącego 100 000h. W przypadku przekroczenia czasu obliczeniowego pracy: $t_0 = 100\ 000\text{h}$ o więcej niż 50% oraz $t_0 = 200\ 000\text{h}$ o więcej niż 10 000h, badania takie są niezbędne (pkt. 4.6.1, rys. 25).

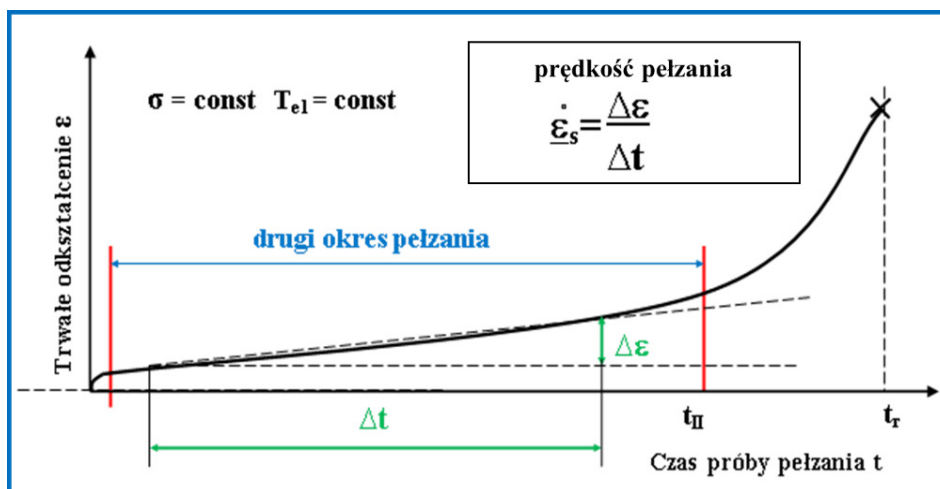
Wiarygodność wyników skróconych prób pełzania zależy od wymagań dotyczących utrzymania stabilnej temperatury badania T_b na całej długości pomiarowej próbki, podczas trwania próby. Wyznaczenie trwałości resztkowej z błędem nieprzekraczającym 20% w stosunku do czasu wyznaczonego na podstawie wyników długotrwałych prób pełzania, umożliwia przeprowadzenie skróconych prób pełzania w temperaturze badania T_b (znacznie wyższej od temperatury pracy) z dokładnością $\pm 0,5^\circ\text{C}$ na długości pomiarowej próbki, niezależnie od temperatury badania.

Próby pełzania z pomiarem wydłużenia

Próby pełzania z pomiarem wydłużenia służą do wyznaczenia krzywej pełzania jako zależność wielkości trwałego odkształcenia ϵ od czasu trwania próby t przy stałym naprężeniu badania 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 pomiar ciągły wydłużenia z dokładnością do 0,005 mm. Ponadto odchylenie od zadanej temperatury badania T_b na całej długości próbki pomiarowej w czasie trwania próby, niezależnie od temperatury badania, nie może być większe niż $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

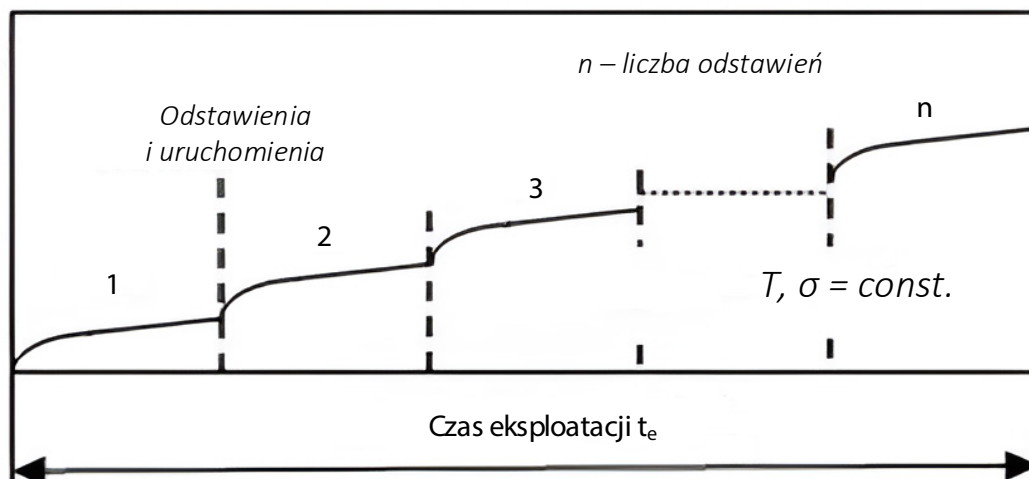
Na podstawie wyznaczonej krzywej prędkości pełzania w stanie ustalonym, dla zdefiniowanych parametrów dalszej eksploatacji, można wyznaczyć czas do osiągnięcia zadanej wielkości trwałego odkształcenia zapewniającej dalszą bezpieczną eksploatację. Sposób wyznaczenia prędkości pełzania z krzywej pełzania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

Sposób wyznaczania czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji z wykorzystaniem takich prób pełzania znajduje zastosowanie dla materiałów płaszczu komór i 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 płaszczu.



Rys. 31. Sposób wyznaczenia prędkości pełzania z krzywej pełzania

Długotrwała eksploatacja elementów pracujących w warunkach pełzania nie przebiega w sposób ciągły. Kotły często są odstawiane z konieczności przeprowadzania planowanych remontów, ograniczenia zapotrzebowania na energię elektryczną czy też na skutek awarii. Obecnie w dobie rozwoju odnawialnych źródeł energii i tworzenia nowego miksu energetycznego planuje się, aby kotły węglowe pracowały jako rezerwa w systemie energetycznym, czyli w trybie regulacyjnym. Kolejne uruchomienia kotła powodują ponowne przejście materiału w pierwszy okres pełzania. Okres ten charakteryzuje się znacznym przyrostem trwałego odkształcenia w krótkim czasie. Aby zbadać wpływ odstawień kotła i kolejnych jego uruchomień na trwałość eksploatacyjną materiału elementów pracujących w warunkach pełzania przeprowadzono próby pełzania w zmienianej cyklicznie temperaturze i przy stałej wielkości obciążenia, odpowiadającym rzeczywistym warunkom pracy (rys. 31a).



Rys. 31a. Dynamika procesu pełzania ze wzrostem liczby odstawień i uruchomień dla tego samego materiału i tych samych parametrów eksploatacyjnych (T, σ)

4.6.3.3. Badania metalograficzne

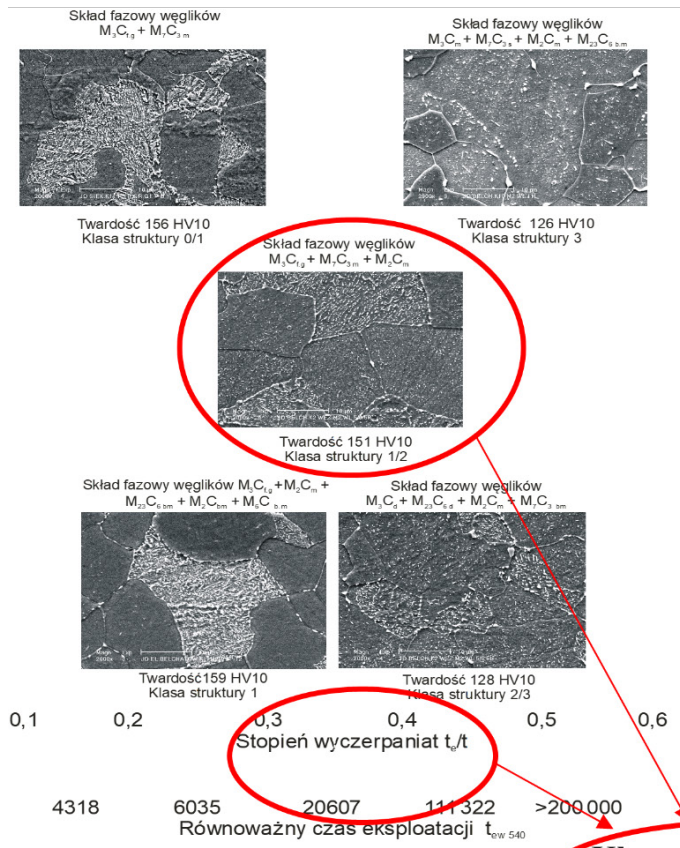
Wśród metod badań metaloznawczych w badaniach niszczących największe znaczenie mają badania z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego oraz dyfraktometru rentgenowskiego. Wynik obserwacji obrazu mikrostruktury i jego elementów w skaningowym mikroskopie elektronowym w sposób jednoznaczny daje możliwość dokonania 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 pozwala na dokonanie właściwej oceny stanu materiału. Odnosi się to do wielu przypadków typów mikrostruktury występujących w stalach stosowanych w energetyce, w których ocena stopnia rozpadu drobno-płytkowego perlitu, perlitu stopowego, bainitu czy martenzytu oraz występujących pustek i nieciągłości może nie być obiektywna.

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

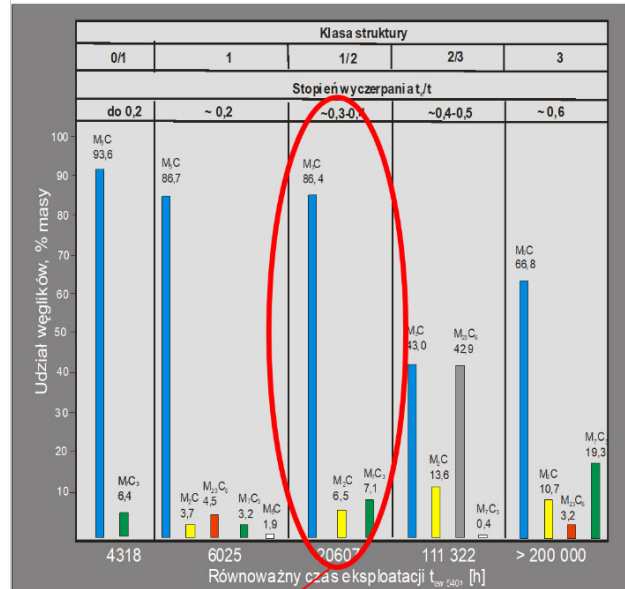
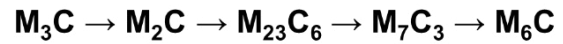
- badania w skaningowym mikroskopie elektronowym na zgładach metalograficznych, celem sklasyfikowania występującej struktury i oszacowania stopnia wyczerpania,
- badania osadów wyizolowanych węglików z ich identyfikacją metodą rentgenowskiej analizy fazowej, celem określenia stadium rozwoju procesów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

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

OBRAZ MIKROSTRUKTURY



SKŁAD FAZOWY



Klasa struktury: 1 / 2
Stożek wyczerpania:
ok. 0,3-0,4

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

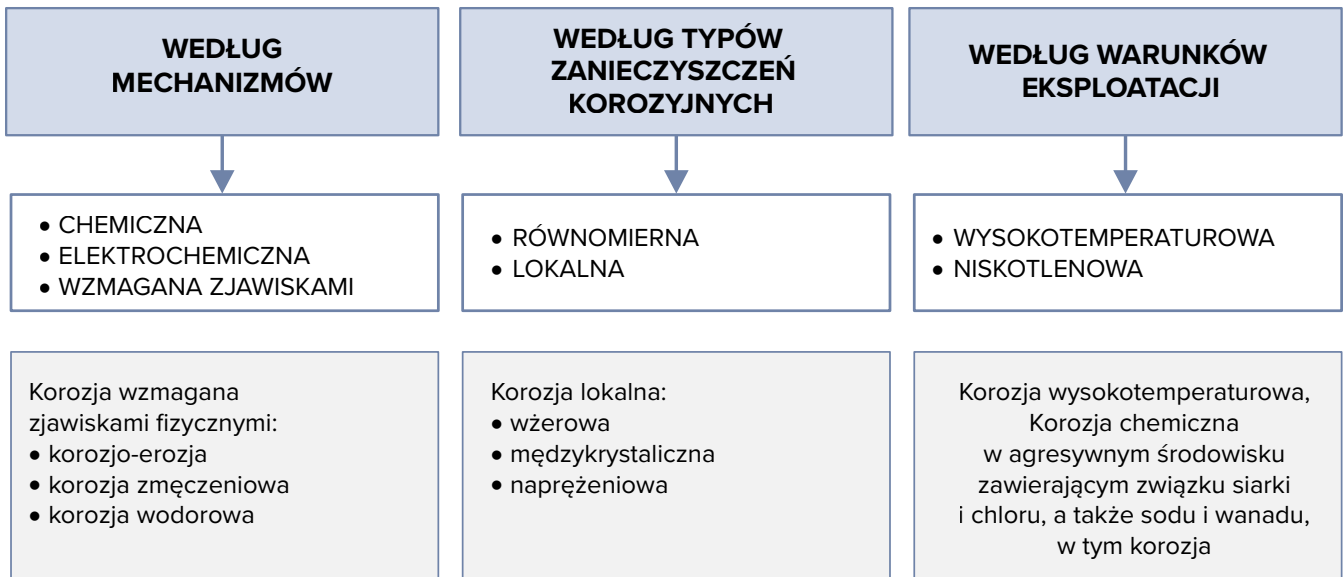
4.6.3.4. Analiza jakościowa i ilościowa procesów korozyjnych

Duże znaczenie dla materiałów pracujących w wysokich temperaturach, pod działaniem długotrwałego naprężenia, mają ich właściwości fizykochemiczne, w tym głównie:

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

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

RODZAJ I TYPY KOROZJI - PODZIAŁ



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

Dla wielu przypadków w kotłach dochodzi do niszczenia korozyjnego wspomaganego czynnikami fizycznymi. Najczęściej obserwowane mechanizmy to korozja erozyjna, korozja naprężeniowej, korozja zmęczeniowa oraz korozja wodorowa.

Korozja równomierna jest najmniej niekorzystną formą degradacji materiału, w przeciwieństwie do korozyj lokalnej, która zachodzi w uprzywilejowanych miejscach, gdzie lokalne warunki sprzyjają jej inicjacji i rozwojowi.

Dotyczy to korozyj wżerowej, międzykrystalicznej, selektywnej, wodorowej czy naprężeniowej.

W elementach konstrukcyjnych kotłów i rurociągów poddanych długotrwałej eksploatacji procesy niszczenia korozyjnego odgrywają istotną rolę, znacząco wpływając na ich trwałość. Obniżenie trwałości eksploatacyjnej wynika z pocienienia ścianki, perforacji i powstawania pęknięć oraz pogarszania się efektywności wymiany ciepła.

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

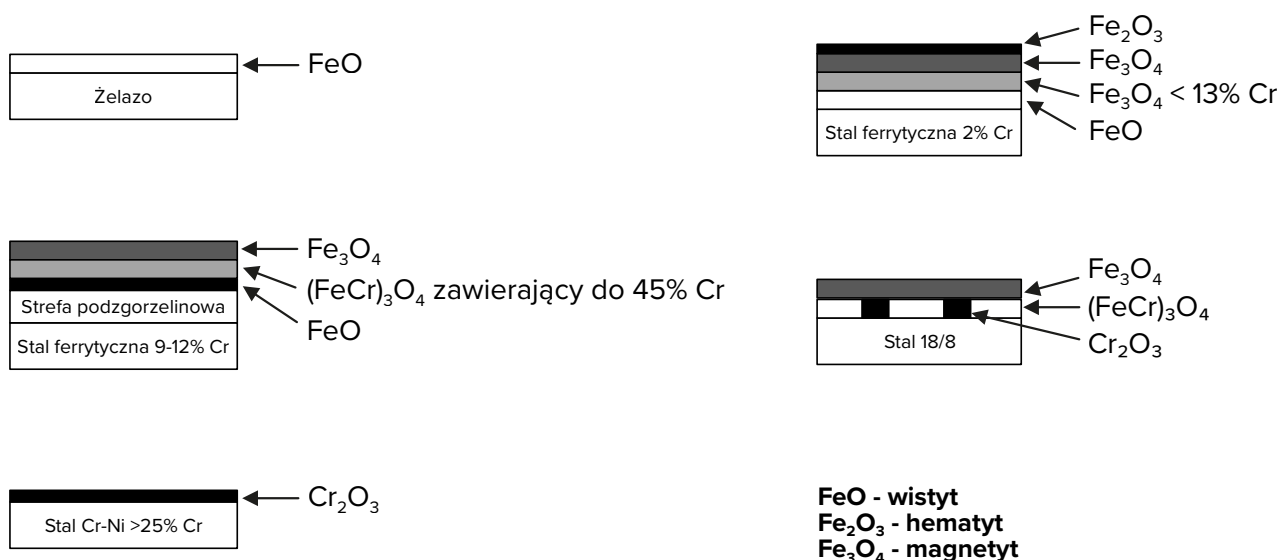
- składu chemicznego materiału, w tym głównie zawartości chromu, decydującej o rodzaju powstającego tlenku i jego pasywowującego działania,
- struktury materiału; stale austenityczne wykazują odporność korozyjną wyższą od stali o osnowie ferrytycznej,
- rozdrobnienia ziarna oraz zmiany struktury przez 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 CO₂ 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°C trwałą jest tylko tlenek Fe_3O_4 (magnetyt), który spełnia rolę warstwy ochronnej, natomiast w stalach o osnowie ferrytycznej powyżej 570°C trwałą jest tlenek FeO (wisty), którego niekorzystna obecność w zgorzelinie informuje o rzeczywistej temperaturze ścianki węzownicy. Natomiast w stalach austenitycznych, wysoko-chromowych FeO nie występuje.

W zależności od stężenia chromu w stali oraz temperatury warstwy wierzchniej może powstawać następująca sekwencja tlenków: $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 / \text{Fe}(\text{Cr})_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3$. W stalach wysokostopowych o odporności korozyjnej decyduje głównie tlenek chromu (III) Cr_2O_3 , jego zwartość budowy i przyczepność do podłoża. Sekwencje powstawania tlenków w zależności od zawartości chromu w stali przedstawiono na rys. 34.

Ważnym parametrem opisującym proces niszczenia (szczególnie korozji równomiernej) jest szybkość narastania warstwy tlenku na powierzchni metalu. Można ją opisać zależnością liniową, paraboliczną lub logarytmiczną. Zrozumienie mechanizmów oraz analiza niszczenia korozyjnego sprzyjają podejmowaniu działań zapobiegawczych, związanych ze zwiększeniem trwałości elementów konstrukcyjnych, szczególnie węzownic przegrzewaczy pary, które pracują w najtrudniejszych warunkach temperaturowych. Ulegają one niszczeniu korozyjnemu zarówno od strony spalin jak i od strony pary, co powoduje nie tylko pocienienie ścianki ale i pogarsza wymianę ciepła. Uogólniony sposób przeprowadzania analizy procesów korozyjnych elementów części ciśnieniowej kotła i rurociągów pokazano w postaci graficznej na rys. 35.

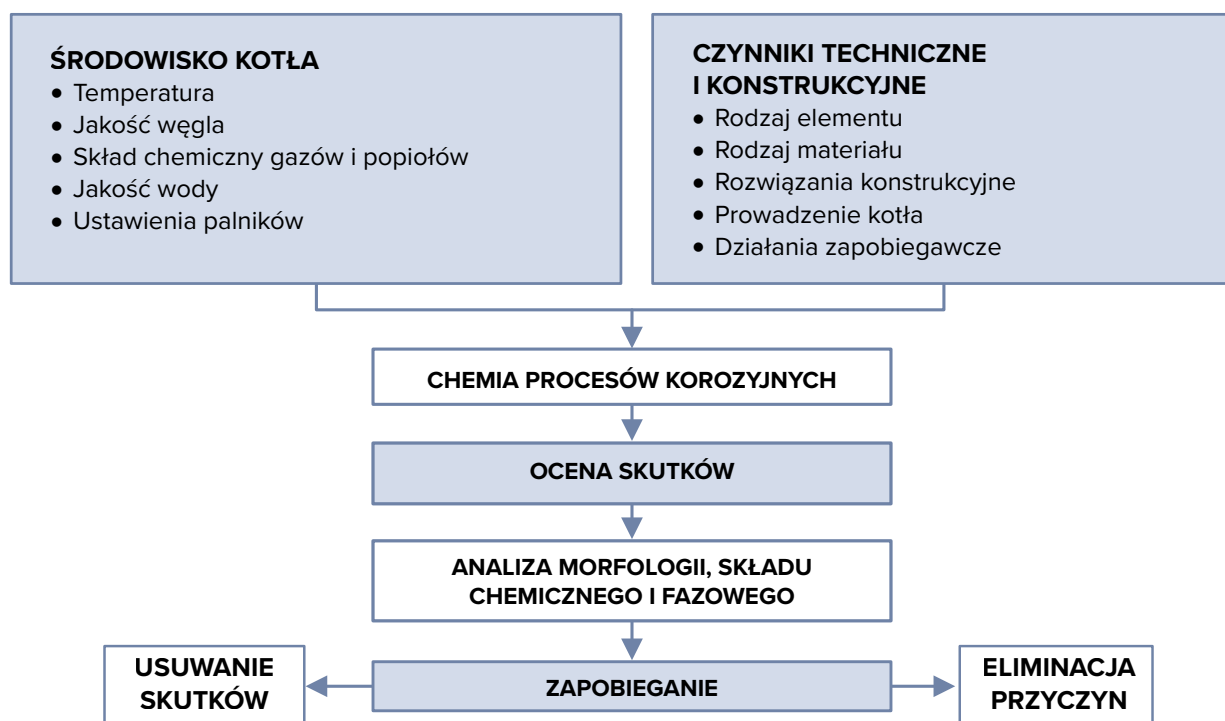


Rys. 34. Sekwencja tlenków zależnie od stężenia chromu w stali

W ramach diagnostyki elementów części ciśnieniowej kotła i rurociągów pracujących w warunkach pełzania niezbędne jest przeprowadzenie badań osadów znajdujących się po stronie wewnętrznej i zewnętrznej na pobranych do badań niszczących wycinkach. Badania po stronie zewnętrznej są wykonywane dla węzownic przegrzewaczy pary, a po stronie wewnętrznej dla węzownic przegrzewaczy pary, komór lub schładzaczy oraz elementów rurociągów.

Dla węzownic przegrzewaczy pary wymagany zakresem badań niszczących na pobranych wycinkach obejmuje:

- 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 szacuje się równoważną temperaturę pracy odniesioną do dotychczasowego czasu eksploatacji. Natomiast na podstawie ilości występujących osadów, określa się ich wpływ na obniżenie zdolności węzownic przegrzewacza pary do przewodzenia ciepła, celem podjęcia decyzji o konieczności trawienia tych elementów kotła.

Dla komór lub 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 ich długotrwałej eksploatacji. Korozja parowo-wodna materiału elementów przegrzewaczy pary ma charakter równomierny, a jej skutkiem jest powstanie odpowiedniej grubości warstwy tlenków żelaza, w zależności od czasu i temperatury w elementach konstrukcyjnych wykonanych ze stali nisko- i wysokostopowych. Jej prędkość jest zależna od stałej utleniania K , temperatury eksploatacji T_e oraz czasu eksploatacji t_e co opisuje równanie (22):

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

gdzie:

Δg_w – przyrost grubości warstwy tlenków

K – stała utleniania

t_e – czas eksploatacji

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

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

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

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

gdzie:

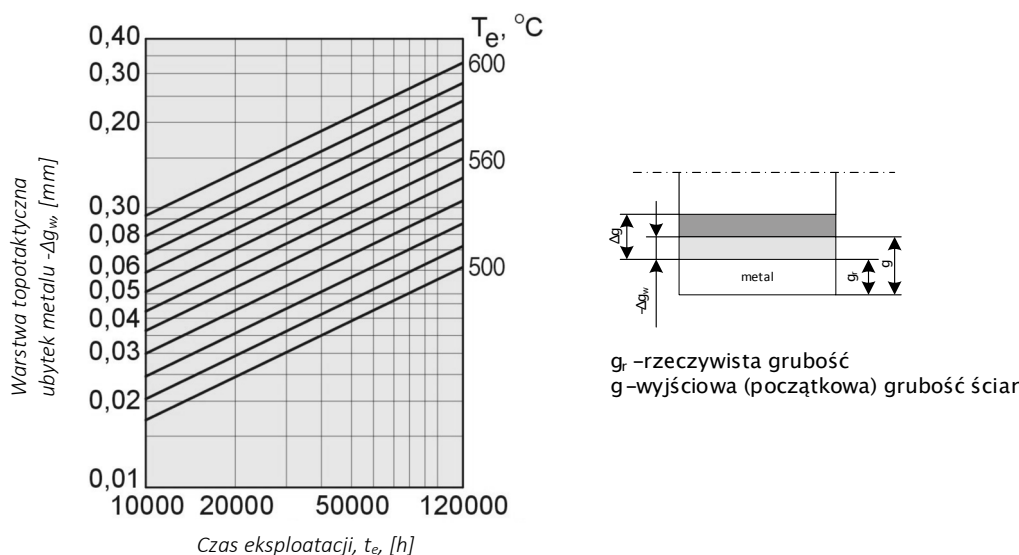
T_e – równoważna temperatura eksploatacji

g – grubość warstwy tlenków

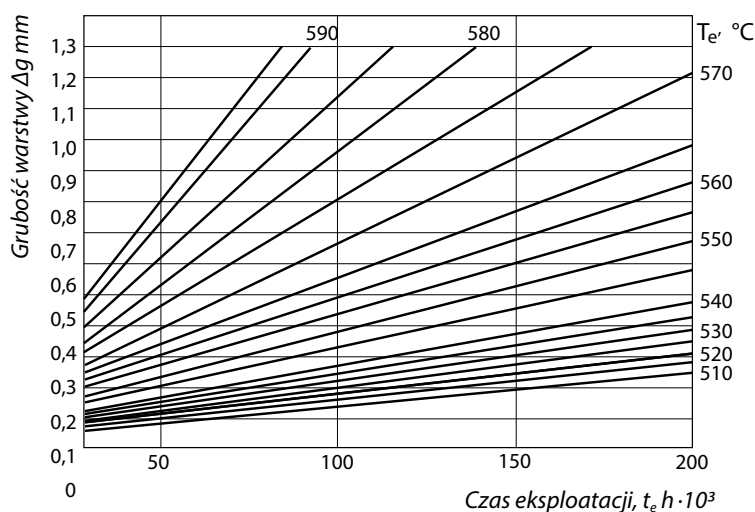
t_e – czas eksploatacji

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.

Na rysunku 36 przedstawiono wpływ temperatury i czasu pracy na ubytek grubości ścianki po stronie wewnętrznej Δg_w , w wyniku tworzenia się warstwy tlenków, zwanej warstwą topotaktyczną. 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 [g/m^2]. Ilość osadów jest różnicą masy badanych wycinków rur w stanie po eksploatacji i tych samych rur po wytrawieniu warstwy osadów odpowiednio dobranym odczynnikiem trawiącym. Na podstawie stwierdzonej ilości osadów podejmuje się decyzję o konieczności trawienia, mającą na celu poprawę wymiany ciepła w badanych węzownikach przegrzewacza pary.

Skład fazowy osadów

Rodzaj związków chemicznych i ich udział w osadzie po stronie wewnętrznej i zewnętrznej badanych wycinków rur wyznacza się na podstawie 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 węzownik przegrzewacza pary.

Grubości osadów

Pomiaru grubości warstwy tlenków dokonuje się na zglądach 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 oceny stanu osadów i 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 Badania z wykorzystaniem mikropróbek

Ze względu na warunki eksploatacji czy też trudności w odtworzeniu (naprawie) elementów urządzenia, po pobraniu wycinka do prób materiałowych opisanych w punkcie 4.6.3.2, zasadne jest przeprowadzenie badań na mikropróbkach. Pobór materiału do tych badań jest realizowany metodą powierzchniowego pobierania wycinków materiału. Zaletą realizacji takich badań jest możliwość pobrania mniejszej ilości materiału, w sposób taki że ubytek materiału powstały w elemencie nie zawiera ostrych korbów. W przypadku urządzeń grubościennych, jakie stosuje się w energetyce, nie są wymagane działania naprawcze. Jednocześnie badania na pobranym materiale są zazwyczaj dokładniejsze od badań realizowanych metodami przenośnymi na obiektach.

Na pobranym wycinku do badań można zrealizować badania:

1. oceny struktury materiału za pomocą mikroskopu świetlnego lub skaningowego mikroskopu elektronowego,
2. składu chemicznego,
3. twardości materiału,
4. własności wytrzymałościowych,
5. określające temperaturę przejścia plastyczno-kruchoego,
6. próby pełzania.

Pobraną wycinek materiału pozwala zrealizować badania wymienione w pkt 1 do 3 w laboratorium w sposób standardowy w oparciu o aktualne normy. Badania z pkt 4 do 5 są możliwe do wykonania np. z wykorzystaniem metody *Small Punch Test* – SPT, w oparciu o wytyczne normy PN-EN 10371 Metale - Metoda badania małym stemplem oraz przywołane w niej inne normy dotyczące m.in. wymagań odnośnie aparatury.

Ze względu na specyfikę metody, istotnym jest, aby jednostka realizująca badania posiadała potwierdzenia walidacji metody w odniesieniu do standardowych badań materiałowych, np. statycznej próby rozciągania czy prób udarności.

Wybór metod badawczych realizowanych na mikropróbkach powinien być każdorazowo uzgadniany z Urzędem Dozoru Technicznego.

Wyznaczenie własności wytrzymałościowych

Wyznaczenie własności wytrzymałościowych materiału, w tym wartości R_e , $R_{p0,2}$ również w temperaturach podwyższonych może być zrealizowane w badaniu SPT zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 10371. Wyznaczenie wartości wydłużenia A nie jest objęte postanowieniami normy, jednak dane literaturowe, jak również opracowania własne ośrodków badawczych realizujących badania tą metodą określają sposób wyznaczenia tej własności materiału w próbie SPT.

Wyznaczenie temperatury przejścia materiału w stan kruchy (DBTT – *Ductile to brittle transition temperature*)

Struktura materiału części urządzeń infrastruktury energetycznej na skutek długoletniej eksploatacji zmienia swoje własności powodując m.in. znaczne podniesienie temperatury przejścia materiału w stan kruchy. Własność ta jest jedną z własności użytkowych charakteryzującą materiał i ma szczególne znaczenie w określeniu warunków uruchamiania i odstawiania urządzeń, a także prowadzeniu prac remontowych czy prób odbiorczych realizowanych w warunkach temperaturowych znacznie niższych od warunków pracy urządzenia. Wyznaczenie temperatury przejścia materiału w stan kruchy jest możliwe na podstawie badania małym stemplem (SPT). Wytyczne dotyczące sposobu wyznaczenia temperatury DBTT w próbie SPT podaje norma PN-EN 10371. W wyniku badań w temperaturach obniżonych wyznacza się temperaturę przejścia plastyczno-kruche go [°C] w próbie SPT (TSP), a następnie wykorzystuje się współczynnik α dla obliczenia temperatury przejścia plastyczno-kruche go (TCVN) odpowiadającej wartości wyznaczonej w próbach udarności.

Próby pełzania

Jak opisano w punkcie 4.6.3.2 próby pełzania konieczne do wyznaczania trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzalnej wymagają długotrwałych badań, dlatego w praktyce inżynierskiej stosowane są tzw. skrócone próby pełzania. Również w przypadku badań na mikropróbkach standardowe próby pełzania, dla których wytyczne zdefiniowane są w normie PN-EN 10371, zastępuje się skróconymi próbami pełzania przy stałym naprężeniu i różnych poziomach temperatury badania wyższej od temperatury eksploatacyjnej. Dla wyznaczenia wartości siły obciążającej F [N] w próbie SPCT (*Small Punch Creep Test*) ekwiwalentnej do standardowych badań próby pełzania i odpowiadającej wymaganemu naprężeniu σ , stosuje się zależność $F = \sigma \cdot \Psi$, gdzie Ψ jest współczynnikiem Chakrabarty i dla standardowych próbek o grubości $h_0=0,5\text{mm}$ współczynnik Ψ jest równy $1,890 \cdot \sqrt{\sigma_{MPa}}$. Otrzymane w próbach SPCT wartości czasu do zerwania oraz współczynnika prędkości pełzania [mm/h] mogą stanowić podstawę do dalszego prognozowania dalszej eksploatacji urządzenia, jednak ze względu na większy rozrzut danych należy zachować ostrożność. Badania SPCT powinny być prowadzone w atmosferze ochronnej np. z wykorzystaniem argonu.

4.6.5 Uwagi dotyczące zakresu i sposobu realizacji badań.

Stan materiału elementów części ciśnieniowej kotła i rurociągów pracujących w warunkach pełzania jest oceniany zarówno metodami nieniszczącymi jak i niszczącymi. Dobór metod dla oceny stanu materiału jest każdorazowo dokonywany w zależności od rodzaju elementu, czasu jego eksploatacji odniesionego do przyjętego obliczeniowego oraz charakteru jego pracy. Niezależnie jednak od czasu eksploatacji wymagana jest ocena mikrostruktury materiału w celu wyznaczenia klasy mikrostruktury oraz oszacowania stopnia wyczerpania materiału. Decyduje to o zdolności materiału do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych umożliwiając przy tym wyznaczenie czasu pracy do następnego przeglądu, będącego bezpiecznym czasem dalszej eksploatacji.

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

W przypadku stwierdzenia nieciągłości w złączu spawanym podczas badań materiałowych, które wymagają naprawy niezbędna jest uprzednia 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 innym materiałem po eksploatacji lub z materiałem nowym, również wymagana jest ocena stanu materiału, która potwierdziłaby że jego stan umożliwia przeprowadzenie naprawy metodą spawania.

Liczba wymaganych miejsc do nieniszczącej badań mikrostruktury metodą replik matrycowych z elementów pracujących w warunkach pełzania, jest uzależniona od wielkości i części składowych elementu i 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.

Doświadczenie w ocenie stanu technicznego elementów rurociągów wskazuje na konieczność prowadzenia badań mikrostruktury nie tylko w miejscach największego rozciągania kolan lecz również w obszarze przejścia kolana w prostkę. W przypadku wystąpienia ograniczeń w swobodnym przemieszczaniu się rurociągu na poszczególnych węzłach rurociągu, pojawia się złożony stan naprężeń, ze znacznym udziałem skręcania i/lub zginania. Może to znacząco obniżyć rzeczywistą trwałość eksploatacyjną rurociągu. Wyniki badań stanu mikrostruktury poszczególnych elementów rurociągu pozwalają identyfikować węzły rurociągu pracujące w sposób niewłaściwy. Są również podstawą do zbadania stanu elementów zawieszonych i podparć w tych węzłach oraz analizy ich funkcjonowania związanej z prawidłowością ich zaprojektowania, wykonania i ustawienia. Badanie zawieszonych podparć powinno być przeprowadzane wg. Wytycznych Urzędu Dozoru Technicznego nr 2/UC/2019/1.

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

Miejsce badania	Technika badań mikrostruktury	Cel badania ^{3), 4)}
Komory przegrzewacza pary		
materiał płaszczka na powierzchniach zewnętrznych w miejscach największego wyężenia	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 płaszczka ¹⁾	repliki matrycowe (SEM/LM) ²⁾	- określenie stopnia degradacji struktury materiału rodzimego (klasa struktury) - stan rozwoju uszkodzeń wewnętrznych SWC i spoiny (klasa uszkodzeń)
materiał płaszczka w postaci 'korków' pobranych techniką trepanacji	zgłady metalograficzne (SEM/LM) ²⁾ , osady wyizolowanych wydzieli	- jak wyżej oraz wyznaczenie składu fazowego wydzieli
Schładzacz		
materiał płaszczka w dolnych 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 płaszczka 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)
na pobranych do badań niszczących wycinkach rurociągu	zgłady metalograficzne (SEM/LM) ²⁾ , osady wyizolowanych wydzieli	- jak wyżej oraz wyznaczenie składu fazowego wydzieli
Rurociągi komunikacyjne		
materiał najbardziej wyężonych 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 wydzieli	- 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 wydzieli, - grubości warstwy tlenków i ich składu fazowego na powierzchni wewnętrznej, - wyznaczenie równoważnego czasu dotychczasowej eksploatacji
Korpusy zaworów szybkozamykających, regulacyjnych, główne zasuw parowe zawory bezpieczeństwa oraz stacje zabezpieczające i obejściowe		
w części wlotowej i wylotowej, w miejscach możliwego dostępu ze względów konstrukcyjnych	repliki lub zgłady 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,

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

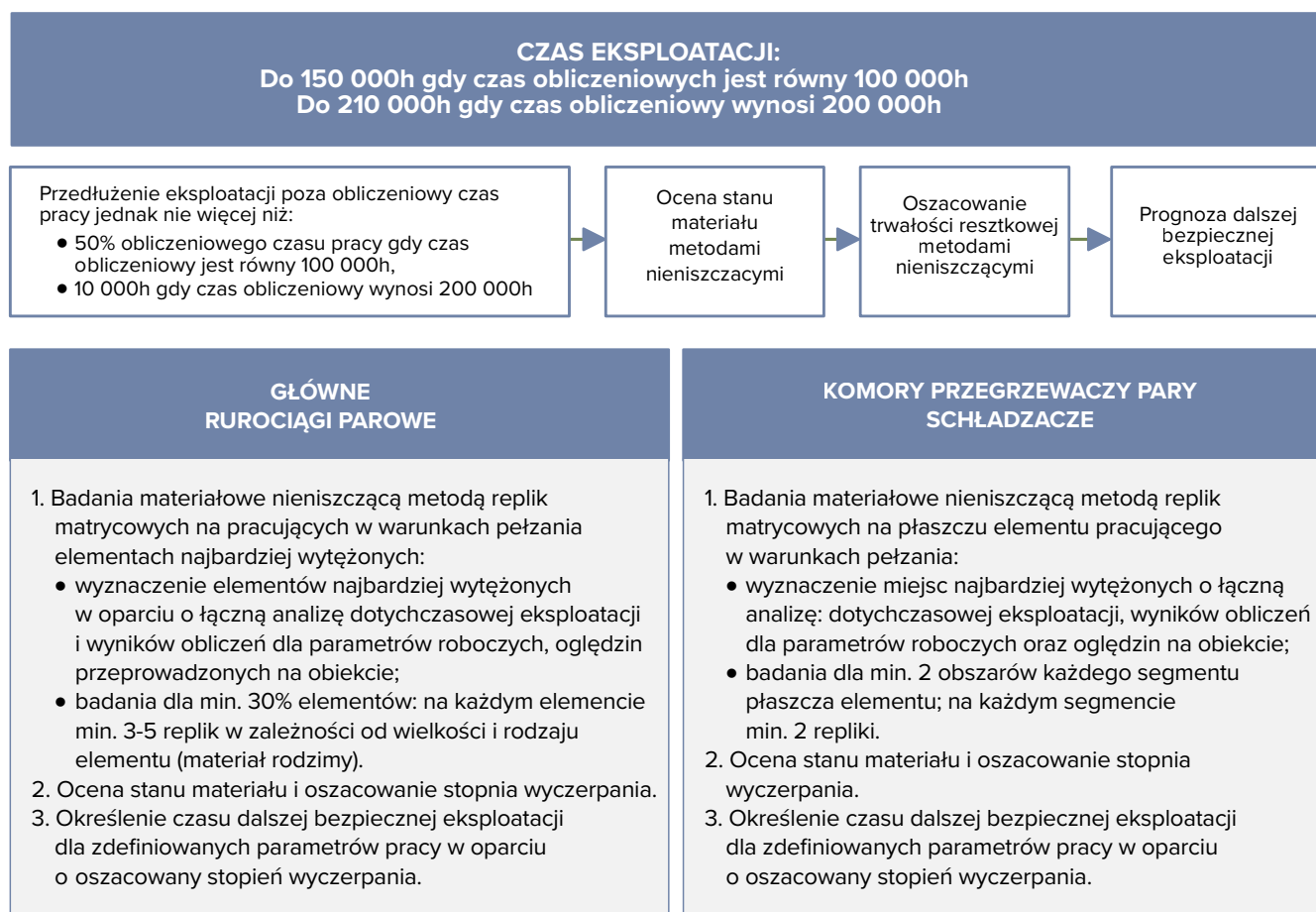
²⁾ SEM - skaningowy mikroskop elektronowy, LM-mikroskop świetlny; w przypadku nie zaobserwowania w LM mikropęknięć wymagany SEM do oceny stanu mikrostruktury i wyznaczenia jej klasy. Ponadto niezależnie od zastosowanej techniki badawczej należy wykonać pomiary twardości,

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,

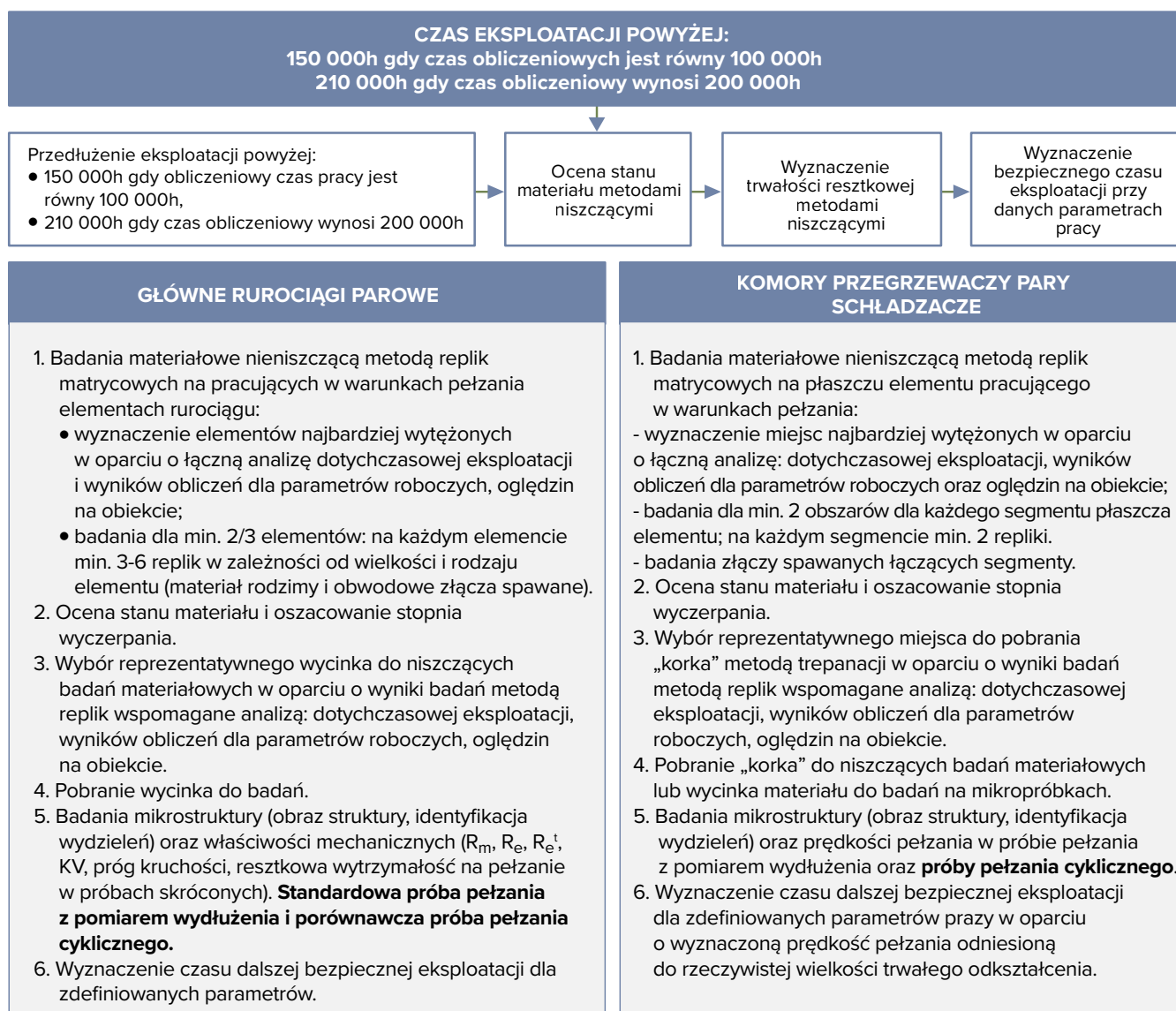
⁴⁾ W przypadku konieczności wykonania naprawy istniejącego złącza spawanego konieczne jest wykonanie oceny stanu materiału elementów złącza (materiał rodzimy -strefa wpływu ciepła-spoina- strefa wpływu ciepła- materiał rodzimy) pod względem możliwości wykonania naprawy przez spawanie.

Doświadczenia w ocenie stanu technicznego komór przegrzewaczy pary, jako elementów grubościennych wykazują, że niektóre spośród tych elementów, są naprawiane lub wymieniane w związku z ich uszkodzeniami będącymi skutkiem równoczesnego działania pełzania i zmęczenia cieplnego wynikającego z występujących termoszkoków. Inicjacja i rozwój pęknięć można zaobserwować na wewnętrznej powierzchni płaszczka, zwłaszcza w obszarze krawędzi otworów i mostków między otworami. Ponieważ największe zmiany w strukturze materiału płaszczka na jego grubości występują po stronie wewnętrznej, niezbędna jest znajomość różnicy w klasie struktury materiału na powierzchni wewnętrznej i przy powierzchni zewnętrznej. Dlatego przeprowadzane są badania niszczące w celu określenia zmian mikrostruktury na grubości ścianki elementu. Ocena stanu mikrostruktury w obszarach najbardziej wyczerpanych 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 ważny element oceny stanu elementów głównych rurociągów parowych, komór przegrzewaczy oraz schładzaczy pary pracujących w warunkach pełzania na podstawie badań nieniszczących przedstawiono na rys. 38. Natomiast 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.



Rys. 38. Uogólniony sposób oceny stanu materiału i określenie bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji na podstawie nieniszczących badań materiałowych dla głównych rurociągów parowych oraz komór przegrzewacza pary i schładzaczy



Rys. 39. Uogólniony sposób oceny stanu materiału i wyznaczenie bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji na podstawie niszczących i niszczących badań materiałowych dla głównych rurociągów parowych oraz komór przegrzewacza pary i schładzaczy

Badania niszczące na materiale korka pobranego metodą trepanacji należy przeprowadzić tylko dla komór wylotowych wyższych stopni przegrzewacza pracujących w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-napięciowych.

W załączniku C (Karta zakresu badań diagnostycznych) zamieszczono propozycję doboru metod badawczych i obszaru badania dla różnych elementów.

4.7 Metalograficzna interpretacja stanu materiału i jego trwałości eksploatacyjnej

W celu oszacowania stopnia wyczerpania materiału na podstawie badań strukturalnych - najczęściej przeprowadzonych metodami nieniszczącymi - niezbędna jest znajomość zachowania się badanego materiału podczas eksploatacji w warunkach pełzania. Zmiany w strukturze zachodzą zarówno w jej podstawowych składnikach fazowych jak i w wydzieleniach, prowadząc do powstawania i rozwoju wewnętrznych uszkodzeń. Udział poszczególnych procesów degradacji struktury oraz ich intensywność zależą od jej stanu wyjściowego i stopnia wyczerpania. W pierwszym okresie eksploatacji 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.

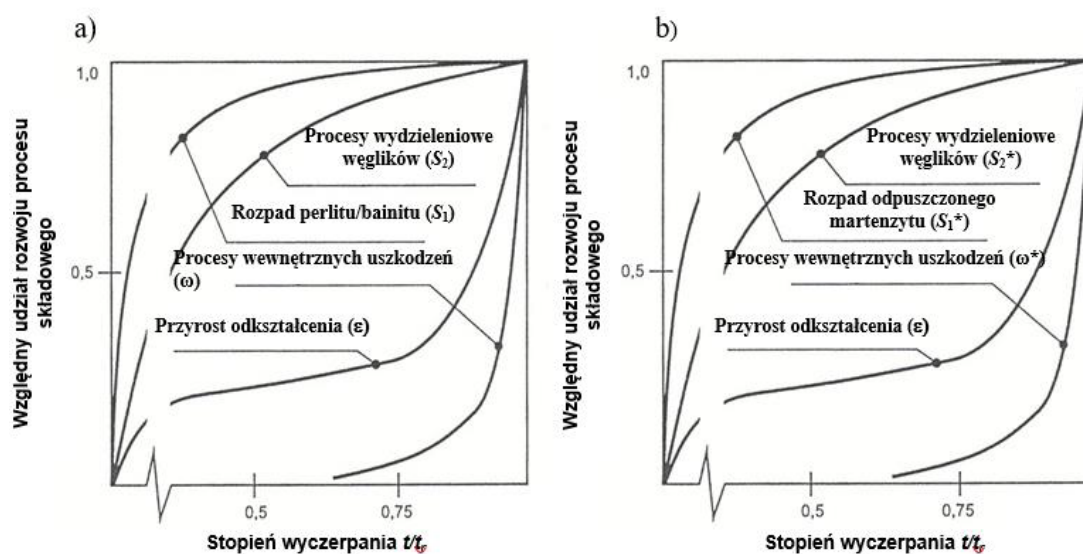
Na podstawie wieloletnich badań i doświadczeń diagnostycznych przeprowadzonych w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach ujawniono, że zmiany zachodzące w mikrostrukturze zwykle związane są z:

- rozpadem podstawowych składników mikrostruktury (perlitu, bainitu, martenzytu), w miejsce których w wyniku długotrwałej eksploatacji powstaje struktura składająca się z ziarn ferrytu z węglkami wewnątrz i po granicach ziarn, przy wzroście podziarn i równoczesnym ich zaniku,
- rozwojem procesów wydzieleniowych węglików do zaniku typów węglików występujących w stanie wyjściowym, tworzeniem nowych, ich wzrostem, koagulacją i koalescencją,
- 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 zdefiniowanych powyżej 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.40 a, 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

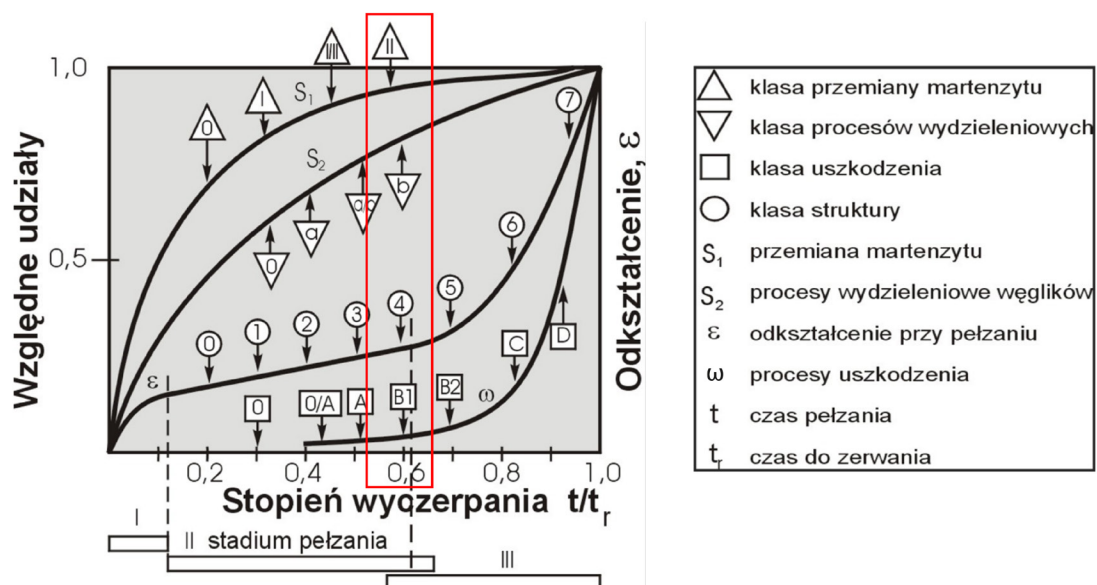
W oparciu o zdefiniowane powyżej procesy, składowe mające wpływ na zmiany w mikrostrukturze skutkujące obniżaniem się odporności na pełzanie w wyniku długotrwałej eksploatacji, odniesione do stopnia wyczerpania materiału opracowano system oceny jego stanu i przydatności do dalszej eksploatacji. Ocena 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. Jednocześnie uznano, że są to dwa kluczowe czynniki mające istotny wpływ na stan struktury materiału po eksploatacji, a ich wpływ jest trwale zapisany w materiale będącym przedmiotem oceny. Ich bezpośrednia znajomość nie jest niezbędna do oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji. Kluczowe znacznie ma natomiast dobór odpowiednich narzędzi i metod badawczych, które umożliwiają ujawnienie cech badanego materiału istotnych dla jego oceny. Znajomość warunków eksploatacji może jednak pomóc w definiowaniu warunków i prognozowaniu czasu dalszej bezpiecznej 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 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.

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.



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

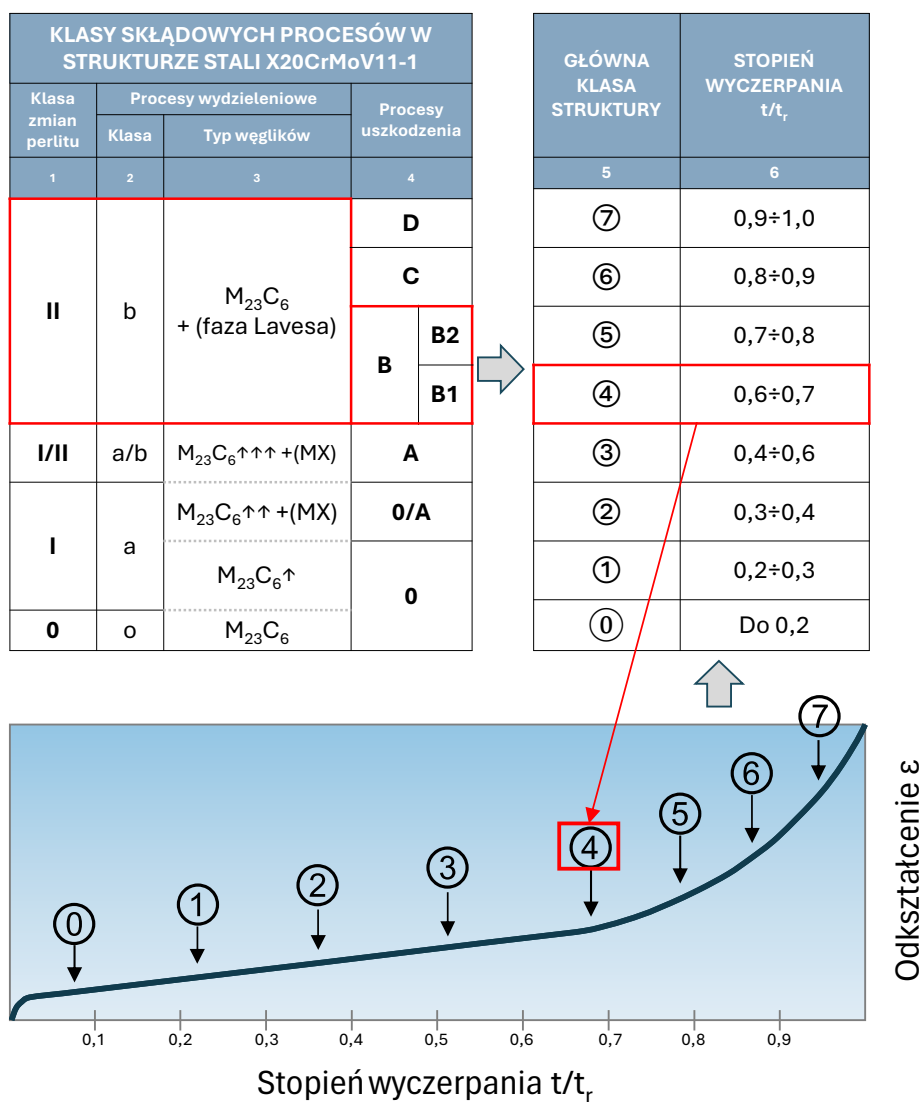
Na rys. 42. przedstawiono przyjętą metodologię oceny stanu badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych tzn.: zmian w strukturze perlitu, bainitu lub martenzytu, zmian w zakresie rozwoju procesów wydzieleniowych oraz uszkodzeń wewnętrznych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

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

Opracowana klasyfikacja dla każdej z badanych stali składa się z 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 istniejącymi 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 obserwowanego w skaningowym mikroskopie elektronowym, zidentyfikowanych typów występujących wydzieleni 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

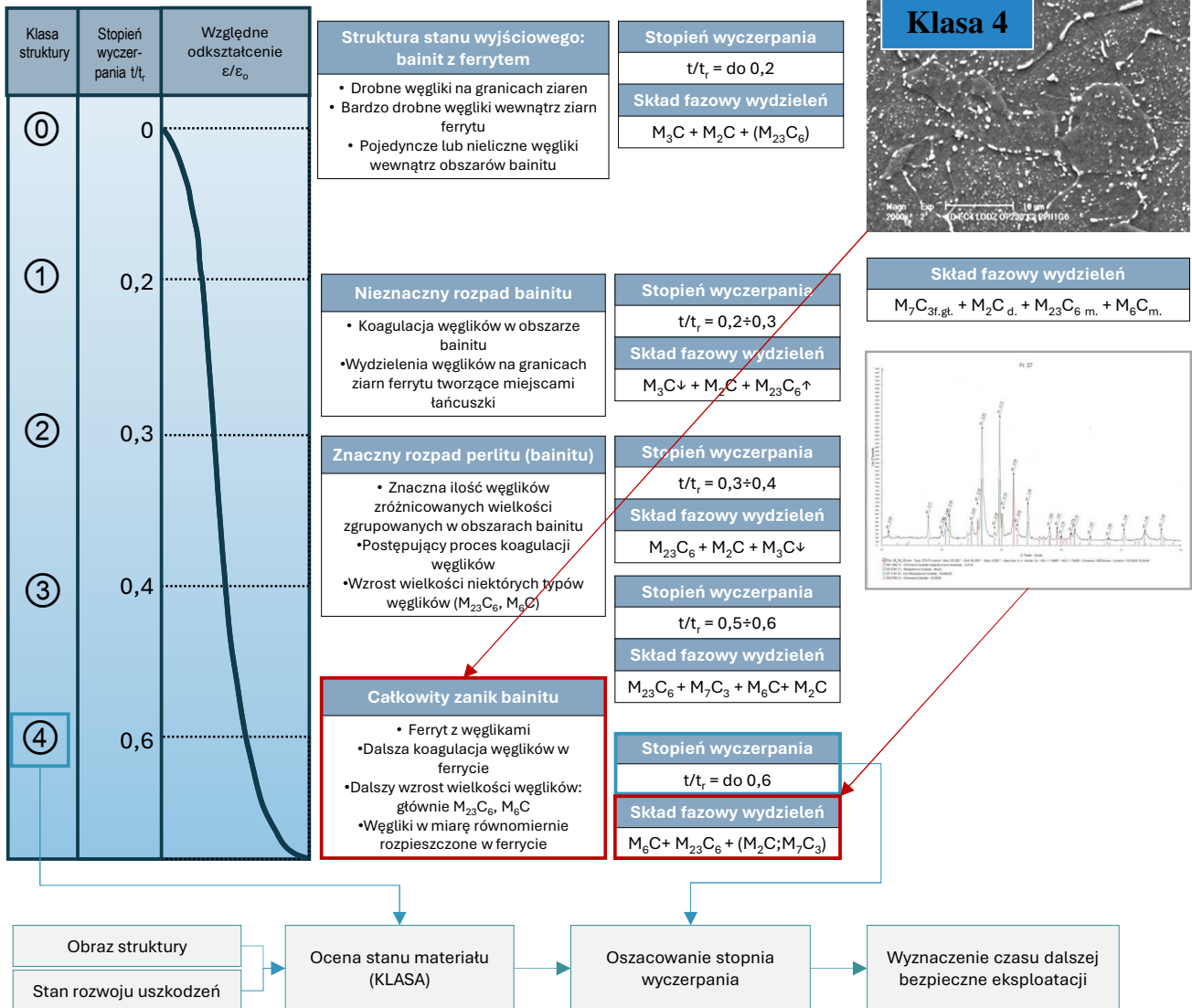
Znając stopień wyczerpania materiału, można wyznaczyć bezpieczny czas dalszej eksploatacji. Przykładową klasyfikację dla wybranej stali niskostopowej przedstawiono na rys. 43. Na podstawie ujawnionego obrazu mikrostruktury oraz składu wydzieleni, materiał został zaklasyfikowany do klasy 4. Klasie 4 odpowiada stopień wyczerpania $t_e/t_r \approx 0,6$. Czas dalszej bezpiecznej eksploatacji dla materiału o takim stopniu 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.

Kolejną przykładową klasyfikację dla stali niskostopowych pokazano na rys. 44. W tym przypadku dla ujawnionego obrazu mikrostruktury materiał sklasyfikowano do klasy 3. Klasie 3 odpowiada stopień wyczerpania $t_e/t_r \approx 0,6$. Czas dalszej bezpiecznej eksploatacji dla materiału o takim stopniu wyczerpania i ujawnionych pojedynczych pustkach nie może być dłuższy niż 20 tys. godzin.

KLASYFIKACJA STRUKTURY STALI PO EKSPLOATACJI

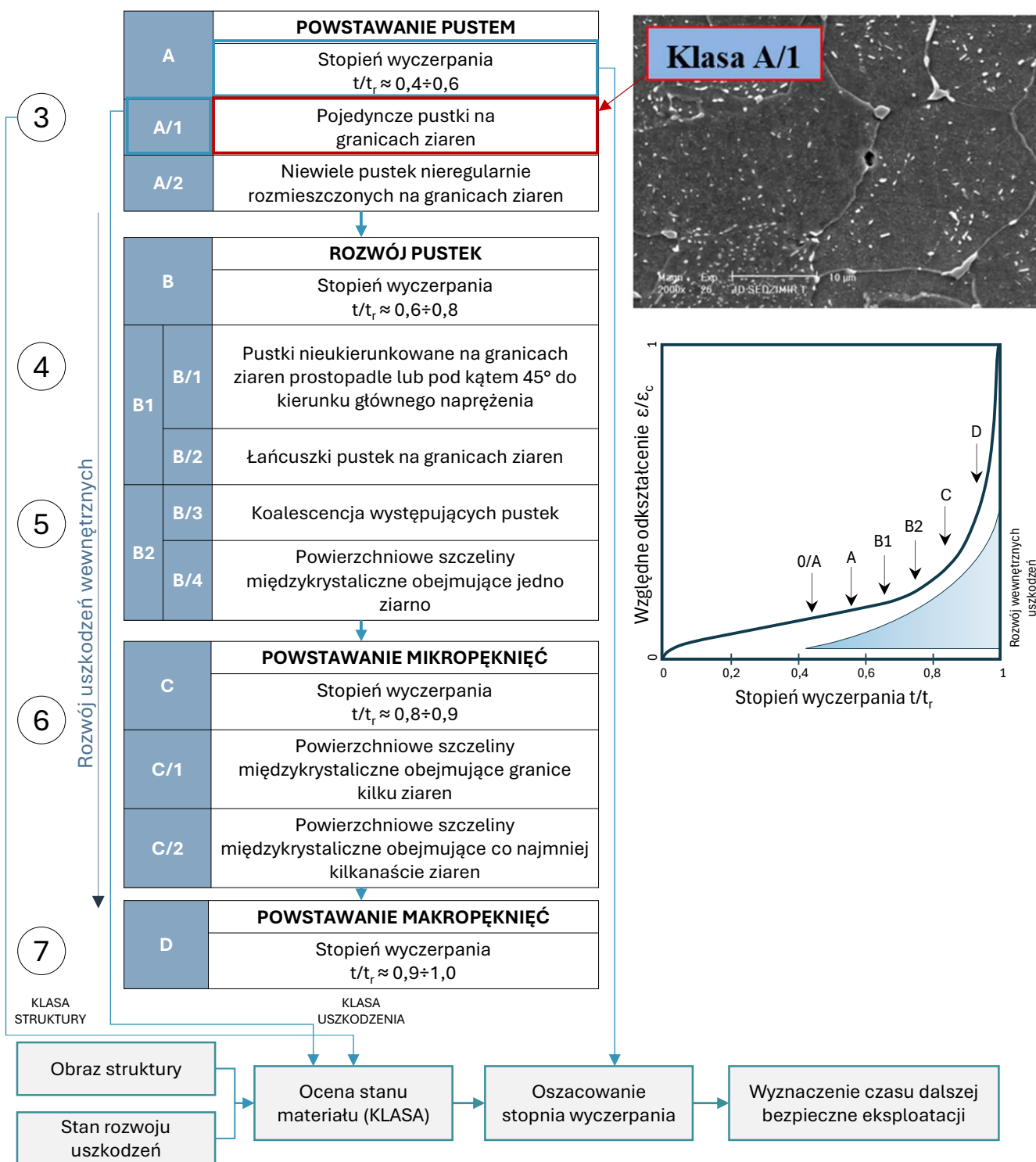
WYNIKI BADAŃ



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

**KLASYFIKACJA USZKODZEŃ
NISKOTEMPERATUROWYCH PO EKSPLOATACJI**

WYNIKI BADAŃ



Rys. 44. Oszacowanie stopnia wyczerpania materiału z uszkodzeniami wewnętrznymi

Więcej informacji w zakresie szacowania stopnia wyczerpania materiałów i okresu dopuszczenia do dalszej eksploatacji elementów pracujących w warunkach pełzania przedstawiono w załączniku B, w którym 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

Ocena na podstawie wyników badań uzyskanych metodami nieniszczącymi

Nie jest możliwe pobranie wycinków do badań niszczących z elementów takich jak komory i kolektory zbiorcze, schładzacz, kolana oraz trójniki. W takim przypadku dobór metod badań nieniszczących oraz liczby pomiarów ustalany jest indywidualnie dla każdego badanego elementu w zależności od jego konstrukcji i charakteru pracy, zgodnie z opracowaną procedurą.

Na podstawie 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,
- pomiarów 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 rozporządzałnej resztkowej z charakterystyk wytrzymałości na pełzanie materiału po eksploatacji dla zadeklarowanych parametrów dalszej pracy,

określa się maksymalny dopuszczalny czas dalszej bezpiecznej eksploatacji materiału i elementu, dla zdefiniowanych przez użytkownika parametrów dalszej pracy. Przykład takiej oceny elementu części ciśnieniowej kotła, w oparciu o: dane z dokumentacji projektowej, rzeczywiste parametry pracy, wyniki badań nieniszczących, i badań metaloznawczych oraz charakterystyki materiału po eksploatacji zestawiono w tabeli 8.

Tablica 8. Przykład oceny elementu pracującego w warunkach pełzania w oparciu o: dane z dokumentacji projektowej, rzeczywiste parametry pracy, wyniki badań nieniszczących oraz wyniki badań metaloznawczych.

	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
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 s_o , MPa	90,49
9	$R_z \min/10^5/t_o$, MPa	106,4
10	$R_z \min/2 \times 10^5/t_o$, 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_{B0} , h x 10 ⁻³	274
13	Czas specjalnego nadzoru τ_0 , 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 S_r , MPa	67,91
18	$R_z \min/10^5/t_r$, MPa	131,2
19	$R_z \min/2 \times 10^5/t_r$, 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
	Badania nieniszczące: penetracyjne	badania nie wykonywano
24	Badania nieniszczące: magnetyczne – proszkowe	Badania magnetyczne: wynik pozytywny (prot. nr MT 441/06/S)
	Badania nieniszczące: ultradźwiękowe	Badania ultradźwiękowe spoin obwodowych: wynik pozytywny (prot. 153B-UT-S-B-06)
	Badania nieniszczące: endoskopowe	Badania endoskopowe: wynik pozytywny (prot. nr VT 440/06/S)
25	Trwałe odkształcenie, %	0,52
26	Strzałka ugięcia, mm	badania nie wykonywano
27	Prędkość pełzania $s^{-1} \times 10^{-8}$	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 wyników badań uzyskanych metodami niszczącymi

W przypadku niektórych elementów możliwe jest pobranie materiału do badań niszczących lub badań z wykorzystaniem mikropróbek. Dotyczy to przede wszystkim węzownic przegrzewaczy pary. Na podstawie historii eksploatacji, doświadczenia eksploatacyjnego, przeprowadzonych oględziny, badań nieniszczących oraz pomiarów grubości ścianki metodą ultradźwiękową wyznacza się reprezentatywne miejsca, z których pobierane są wycinki do badań niszczących lub mikropróbek. Najczęściej przeprowadza się na nich następujące badania:

- badania właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej i podwyższonej zbliżonej do temperatury pracy,
- badania pracy łamania często z wyznaczeniem progu kruchości,
- badania metalograficzne z pomiarem twardości wykonywane na zglądach 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 wyznaczany jest maksymalny dopuszczalny czas dalszej bezpiecznej eksploatacji poszczególnych badanych wycinków węzownic przegrzewaczy pary dla zdefiniowanych parametrów dalszej eksploatacji. Najkrótszy spośród wyznaczonych czasów dalszej bezpiecznej eksploatacji jest przyjęty za czas eksploatacji dla danej węzownicy. Prawidłowe przeprowadzenie takiej analizy - najczęściej realizowanej bez przeprowadzenia badań pełzania - wymaga posiadania charakterystyk materiałów po różnym czasie eksploatacji. W tabelicy 9 pokazano przykładowy efekt analizy wyników przeprowadzonych badań, oceny stanu materiału oraz wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji na podstawie uzyskanych wyników badań wycinków rur węzownic wybranych przegrzewaczy pary eksploatowanych w warunkach pełzania.

Tablica 9. Przykład sposobu oceny stanu materiału i wyznaczenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji na podstawie wyników badań metodami niszczącymi wycinków rur węzownic 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 MPa	R _e MPa	A ₅ %	R _e ¹ 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 z pary II ^o	15HM 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 ¹⁾	0; o	O	0	0 ~120÷150	Wymagania dla materiału w stanie wyjściowym wg klasyfikacji własnej IMŻ	

Uwagi: - temperatura badania R_e¹) 430°C

- nie spełnia wymagań norm

5. DIAGNOSTYKA ELEMENTÓW CIŚNIENIOWYCH W OPARCIU O MONITOROWANIE STANU ELEMENTÓW KRYTYCZNYCH W PROGRAMIE ET INSPEKTOR LUB INNYM ZWALIDOWANYM PRZEZ UDT

Monitorowanie online parametrów pracy elementów kotłów energetycznych i rurociągów parowych (dot. pełzania i zmęczenia) jest kluczowe dla zapewnienia bezpiecznej pracy całego bloku energetycznego oraz dla oceny niezawodności i efektywności ich pracy. Zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 12952-4 i PN-EN 13480-3, zastosowany system monitoringu powinien rejestrować rzeczywiste warunki eksploatacji, szczególnie w przypadkach, gdy urządzenia pracują w trybie regulacyjnym, który nie był pierwotnie przewidziany na etapie projektowania.

Praca urządzeń w trybie regulacyjnym, nieuwzględniona na etapie projektowania, zwiększa ryzyko przyspieszonego zużycia materiału, wynikającego z częstych zmian parametrów pracy. Monitorowanie takiego bloku powinno być skoncentrowane głównie na elementach grubościennych. Wprowadzenie systemu monitoringu, który pozwoliłby ocenić procesy pełzania i zmęczenia poszczególnych elementów wydaje się kluczowe dla zachowania bezpieczeństwa eksploatacji oraz oceny niezawodności poszczególnych elementów ciśnieniowych. Stąd niezbędne jest prowadzenie analizy pozyskiwanych danych w sposób ciągły w celu precyzyjnego szacowania stopnia wyczerpania trwałości eksploatacyjnej. Jednocześnie szybkie wykrywanie nawet niewielkich odchyłeń od norm umożliwia podjęcie natychmiastowych działań zapobiegawczych, minimalizując ryzyko awarii oraz przedłużając żywotność urządzeń. Monitorowanie parametrów online pozwala również na efektywne planowanie badań diagnostycznych oraz dostarcza istotne informacje do podejmowania strategicznych decyzji dotyczących utrzymania ruchu.

Jednym z kluczowych aspektów takiego monitoringu urządzeń pracujących w warunkach pełzania jest bieżąca analiza stopnia ich zużycia w zakresie tych dwóch procesów degradacyjnych. Obliczenia takie powinny być prowadzone na podstawie aktualnych norm, w tym przypadku w szczególności normy PN-EN 12952-4, która opisuje procedurę oceny trwałości elementów pracujących w warunkach pełzania na podstawie zarejestrowanych danych oraz sztywnych przedziałów tj. nawiązujących do średnich temperatur z analizowanych przedziałów czasowych.

Do najważniejszych parametrów monitorowanych online należą:

- temperatura metalu na podstawie pomiaru płytkiego oraz głębokiego, umożliwiające wyznaczenie gradientu temperatur w ścianie analizowanego elementu;
- ciśnienie wewnętrzne;
- rzeczywista grubość ścianek, uwzględniające korozję i erozję.

W celu oceny stopnia zużycia materiału w wyniku pełzania należy stosować metodę obliczeniową opisaną w normie PN-EN 12952-4.

Uszkodzenie powodowane pełzaniem (D_c), wyznacza się na podstawie wartości naprężeń, temperatury oraz czasu eksploatacji. Dzięki stałemu obliczaniu tego wskaźnika możliwe jest bieżące monitorowanie stopnia wykorzystania trwałości elementów oraz precyzyjne prognozowanie ich pozostałego czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji.

Wyznaczenie uszkodzenia powodowanego zmęczeniem (D_f) wymaga odpowiedniego rozmieszczenia czujników temperatury, które umożliwiają pomiar różnicy temperatur w ścianie badanego elementu. Uzyskana wartość ΔT pozwala na określenie naprężeń zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12952-3.

Obliczenia naprężeń powinny być przeprowadzone zgodnie z hipotezą von Missesa opisaną w normie PN-EN

12952-4. Należy przy tym uwzględnić:

- naprężenia mechaniczne wynikające z działania ciśnienia wewnętrznego;
- naprężenia termiczne powstające na skutek różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią zewnętrzną a wewnętrzną ścianki elementu.

Implementacja metody wyznaczania zużycia zmęczeniowego w oparciu o pomiary online wymaga wykonania co najmniej następujących kroków:

- wyznaczenie historii naprężeń;
- identyfikacja wartości ekstremalnych naprężeń;
- eliminacja ekstremów związanych z małymi cyklami obciążenia;
- identyfikacja cykli obciążeń.

Przy wyznaczaniu naprężeń należy uwzględnić wiarygodność zmierzonych wartości, które stanowią dane pośrednie w procesie obliczeniowym. Najprostszym sposobem weryfikacji jest określenie dopuszczalnych zakresów wartości oraz ich zmian. W przypadku zmęczenia niskocyklicznego, obliczanego zgodnie z normą PN-EN 12952-4, czas trwania naprężenia ani odstęp czasowy między ekstremami nie wpływają bezpośrednio na wynik. Mimo to dla poszczególnych elementów ustala się odpowiednie okresy próbkowania oraz stosuje znacznik czasowy dla każdego pomiaru. W analizie należy również uwzględnić geometrię badanego elementu, w tym m.in. średnicę, grubość ścianki rury oraz króćca przyłączonego do niej. Istotne są także: rodzaj czynnika roboczego oraz właściwości wytrzymałościowe materiału, określone na podstawie normy hutniczej dla stali, z której wykonano element, na którym rozmieszczone są czujniki. W obliczeniach należy wykorzystać rzeczywistą, zmierzoną grubość ścianki. Oznacza to, że wszelkie ubytki materiału spowodowane korozją lub erozją, które mogły wystąpić w trakcie eksploatacji aż do momentu analizy, powinny być uwzględnione w modelu obliczeniowym.

Wyznaczenie stopnia zużycia zmęczeniowego oraz pełzaniowego bez wykorzystania danych pomiarowych wymaga posiadania szczegółowej historii eksploatacji analizowanego elementu. Niezbędne są informacje takie jak liczba uruchomień, liczba odstawień oraz inne dane dotyczące pracy urządzenia, które mogły mieć wpływ na jego zużycie. Wszystkie dane powinny zostać zweryfikowane, m.in. na podstawie książki ruchu kotła oraz innych dokumentów potwierdzających ich wiarygodność. Procedura wyznaczania naprężeń pozostaje taka sama jak w przypadku metody opartej na pomiarach online. Właściwości fizyczne stali, niezbędne do przeprowadzenia analizy naprężeń, należy przyjmować zgodnie z załącznikiem D normy PN-EN 12952-3, w zależności od grupy materiałowej, z której wykonany jest analizowany element.

Algorytmy służące do wyliczenia zużycia pełzaniem oraz zmęczeniem powinny być uzgodnione i zwalidowane przez UDT.

W przypadku, gdy element pracuje jednocześnie w warunkach pełzania i zmęczenia, należy uwzględnić oba mechanizmy degradacji materiału. Konserwatywnym podejściem jest sumowanie zużycia pełzaniowego i zmęczeniowego według wzoru:

$$D_{total} = D_c + D_f$$

Po osiągnięciu sumarycznego zużycia $D_{total} = 60\%$ lub zużycia zmęczeniowego $D_f = 50\%$, należy przeprowadzić odpowiednie badania nieniszczące (NDT) lub skrócić odstępy między kolejnymi badaniami diagnostycznymi.

Dane uzyskiwane w procesie obliczeń online powinny być bezpośrednio integrowane z systemami informatycznymi służącymi do analizy predykcyjnej, opartymi na algorytmach sztucznej inteligencji (AI) oraz uczenia maszynowego (ML). Takie podejście umożliwia:

- bieżącą analizę tendencji zmian zużycia i degradacji materiału,
- automatyczne wykrywanie nietypowych wzorców eksploatacyjnych, mogących sugerować przyspieszenie procesów pełzania i zmęczenia,
- tworzenie precyzyjnych modeli prognostycznych na podstawie wyliczonych wartości D_f , D_c do przewidywania przyszłego zużycia elementów oraz planowania działań diagnostycznych, remontowych i konserwacyjnych.

6. PRZYKŁADY SPOSOBU POSTĘPOWANIA W DIAGNOSTYCE TECHNICZNEJ ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA

Poniżej przedstawiono przykładowe sposoby postępowania w diagnostyce technicznej, w tym rodzaje badań materiałowych, dla wybranych elementów krytycznych części ciśnieniowej kotła oraz rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania. Zakres wymaganych badań dla poszczególnych elementów krytycznych zależy od dotychczasowego czasu ich eksploatacji odniesionego do przyjętego czasu obliczeniowego.

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

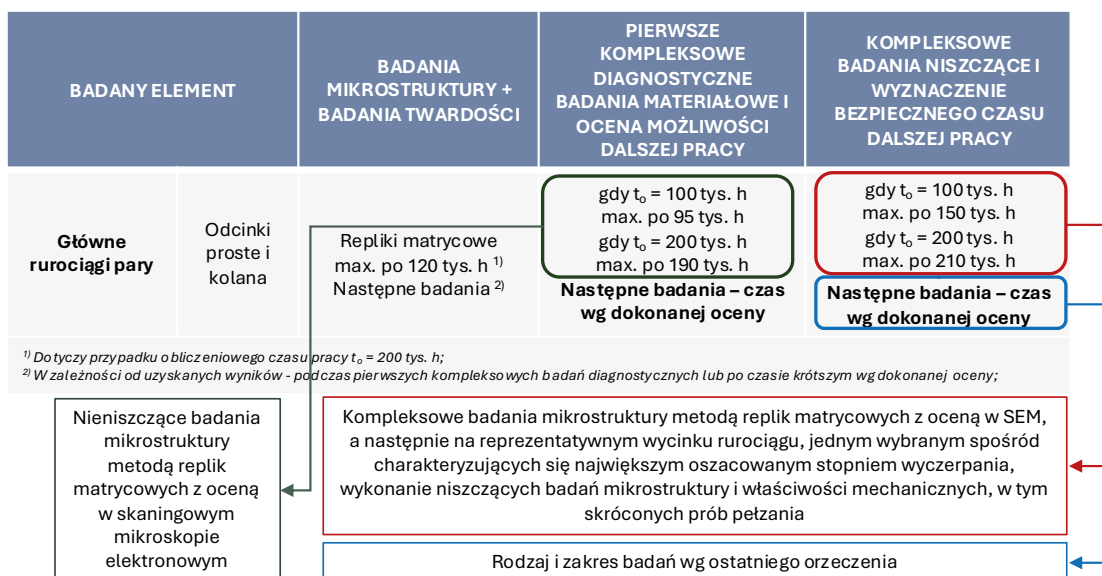
- rur węzownic przegrzewacza pary,
- odcinków prostych i kolan głównych rurociągów parowych,
- płaszcz komory przegrzewacza pary,
- obwodowych złączy spawanych płaszcz komory przegrzewacza pary.

Przykłady dotyczą trybu nadzoru standardowego wg Załącznika A niniejszego opracowania.

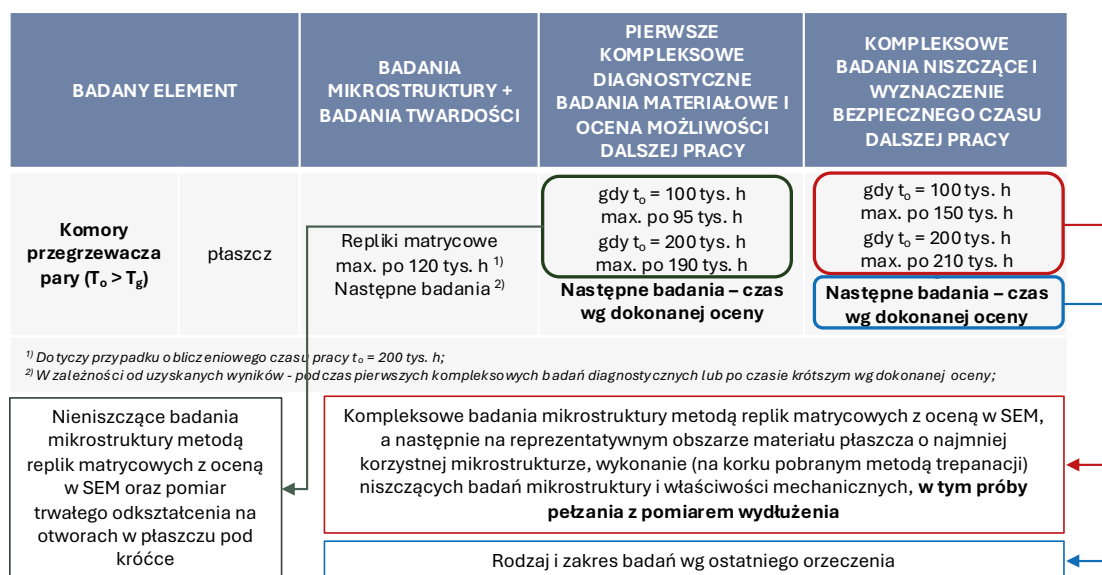
BADANY ELEMENT		BADANIA MIKROSTRUKTURY + BADANIA TWARDOŚCI	PIERWSZE KOMPLEKSOWE DIAGNOSTYCZNE BADANIA MATERIAŁOWE I OCENA MOŻLIWOŚCI DALSZEJ PRACY	KOMPLEKSOWE BADANIA NISZCZĄCE I WYZNACZENIE BEZPIECZNEGO CZASU DALSZEJ PRACY
Węzownice przegrzewacza pary ($T_o > T_d$)	Odcinki proste i kolana	Zgłady metalograficzne max. po 95 tys. h ¹⁾ Następne badania ²⁾	gdy $t_o = 100$ tys. h max. po 95 tys. h gdy $t_o = 200$ tys. h max. po 190 tys. h Następne badania – czas wg dokonanej oceny	gdy $t_o = 100$ tys. h max. po 150 tys. h gdy $t_o = 200$ tys. h max. po 210 tys. h Następne badania – czas wg dokonanej oceny
	Króćce	-	gdy $t_o = 100$ tys. h max. po 95 tys. h gdy $t_o = 200$ tys. h max. po 190 tys. h Następne badania – czas wg dokonanej oceny	
	Spoiny	-	gdy $t_o = 100$ tys. h max. po 95 tys. h gdy $t_o = 200$ tys. h max. po 190 tys. h Następne badania – czas wg dokonanej oceny	
		Badania mikrostruktury, osadów i właściwości mechanicznych (niszczące)	na reprezentatywnych wycinkach węzownic 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 o obliczeniowego czasu pracy $t_o = 200$ tys. h;
²⁾ W zależności od uzyskanych wyników - podczas pierwszych kompleksowych badań diagnostycznych lub po czasie krótszym wg dokonanej oceny;

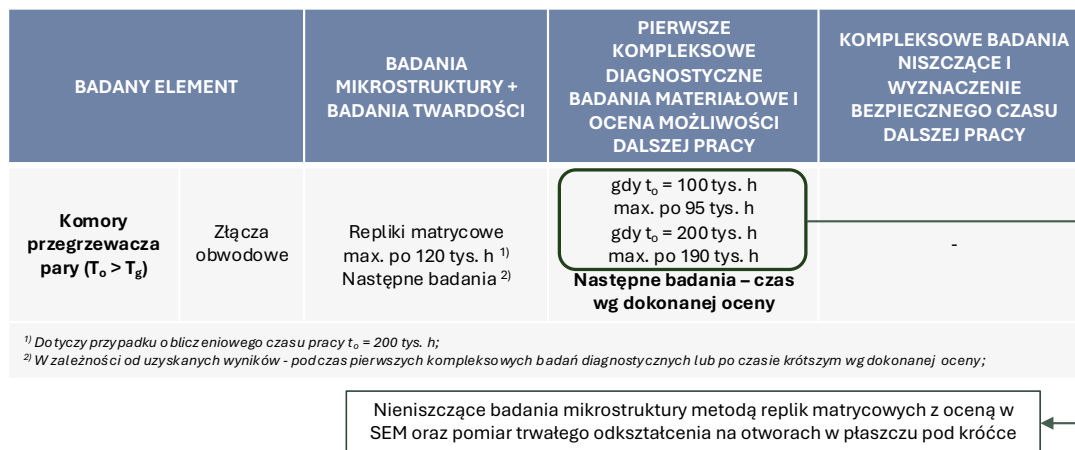
Rys. 45. Przykład sposobu postępowania w diagnostyce technicznej, w tym wymagany rodzaj badań materiałowych dla rur węzownic przegrzewacza pary pracujących w warunkach pełzania



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



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



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

7. WYTYCZNE DOTYCZĄCE PRÓBY CIŚNIENIOWEJ ORAZ URUCHAMIANIA I ODSTAWIENIA URZĄDZENIA Z MATERIAŁEM WYKAZUJĄCYM OBECNOŚĆ OBSZARÓW DEKOHEZYJNYCH

W przypadku kotłów posiadających elementy konstrukcyjne o grubościach ścianki $\geq 50\text{mm}$ obowiązują wymagania określone w Decyzji Prezesa UDT nr 25/95 z dnia 10 listopada 1995 r.

Dla pozostałych urządzeń instrukcja przeprowadzania próby ciśnieniowej powinna być uzgodniona indywidualnie i zawierać co najmniej następujące informacje:

- szybkość narastania ciśnienia próbnego,
- temperaturę medium próbnego (szczególną uwagę należy zwrócić w przypadku materiałów mogących przechodzić w stan kruchy, dla których $R_e/R_m > 0,65$),
- wartość ciśnienia próbnego.

Nie zaleca się wykonywania prób ciśnieniowych przy użyciu ciśnienia próbnego, stosowanego podczas wytwarzania urządzenia. Ponadto, w przypadku kotłów parowych oraz rurociągów pracujących w temperaturze pełzania, szczególnie tych, które znajdują się w II stadium pełzania, należy przewidzieć weryfikację obowiązującej instrukcji dotyczącej procedur uruchamiania i odstawiania. Celem tej weryfikacji jest dostosowanie procedur do aktualnego stanu technicznego urządzeń oraz ograniczenie ryzyka przyspieszonej degradacji materiału.

W szczególności, dla kotłów parowych instrukcja ta powinna zawierać szczegółowe procedury uruchamiania zarówno ze stanu zimnego, jak i ze stanu gorącego. Za stan zimny należy przyjąć urządzenie w stanie bezciśnieniowym, w którym woda ma temperaturę poniżej 100°C , a temperatura najbardziej nagrzanych części nie przekracza 150°C .

Instrukcja taka powinna w szczególności zawierać informacje takie jak:

- prędkość narastania lub spadku ciśnienia,
- czas wygrzewania,
- przepływ czynnika.

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

Podczas uruchamiania rurociągów nie należy dopuszczać do występowania uderzeń hydraulicznych, które mogą prowadzić do poważnych uszkodzeń instalacji. Zjawisko to może być spowodowane zbyt szybkim nagrzewaniem rurociągów przy jednoczesnym powolnym ich odwadnianiu. Dlatego kluczowe jest zapewnienie odpowiedniego tempa nagrzewania oraz skutecznego odwadniania.

Natomiast dla kotłów walczkowych szybkość podnoszenia temperatury nasycenia w walczaku nie powinna przekraczać $1,5^\circ\text{C}/\text{min}$ w zakresie całego procesu uruchamiania kotła.

Podczas nagrzewania oraz studzenia elementów ciśnieniowych w ich ściankach mogą występować naprężenia przekraczające wartości dopuszczalne. W związku z tym należy przewidzieć wykonywanie pomiarów rzeczywistych temperatur ścianki tych elementów.

Dodatkowo, wszystkie parametry związane z procesami uruchamiania i odstawiania urządzeń powinny być rejestrowane, co umożliwi ich późniejszą analizę oraz ocenę wpływu na trwałość eksploatacyjną.

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
- [5] A. Zieliński, Trwałość eksploatacyjna żarowytrzymałych stali o osnowie ferrytycznej w warunkach długotrwałego oddziaływania temperatury, Monografia nr 7, 2016
- [6] A. Hernas, J. Dobrzański, J. Pasternak, S. Fudali, Charakterystyki nowej generacji materiałów dla energetyki, Gliwice, 2015
- [7] PN-EN 10371:2021-09 Metale -- Metoda badania małym stemplem