

Janusz DOBRZAŃSKI, Adam ZIELIŃSKI, Hanna PURZYŃSKA, Maria DZIUBA-KAŁUŻA

Instytut Metalurgii Żelaza

Mirosław MATUSIK

Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A.

TRWAŁOŚĆ EKSPLOATACYJNA MATERIAŁU ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA W ENERGETYCZNYCH URZĄDZENIACH WYSOKOCIŚNIENIOWYCH

Przedstawiono dobór rodzaju badań w zależności od czasu eksploatacji i rodzaju elementu dla oceny stanu materiału i prognozy trwałości eksploatacyjnej w energetycznych urządzeniach wysokociśnieniowych. Określono względne udziały procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania w zależności od stopnia wyczerpania. Dokonano klasyfikacji zmian w strukturze w zależności od dostępności materiału z uszkodzeniami i bez uszkodzeń wewnętrznych. Badano zmiany w strukturze stali pracujących w warunkach pełzania, w tym klasę rozpadu perlitu / bainitu i / lub martenzytu, rozwoju procesów wydzieleniowych i rozwoju wewnętrznych uszkodzeń w zależności od stopnia wyczerpania. 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 zmian w zakresie rozwoju uszkodzeń wewnętrznych odniesionych do stopnia wyczerpania przedstawiono na przykładzie stali niskostopowych i stali X20CrMoV12-1. Poziom wybranych właściwości mechanicznych, twardość, temperaturę przejścia w stan kruchy w zależności od klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania przedstawiono na przykładzie stali 14MoV6-3 i X20CrMoV12-1 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Sporządzono wykresy resztkowej wytrzymałości na pełzanie w postaci zależności $\sigma_b = f(LM)$ w zależności od klasy struktury i stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików na przykładzie stali 13CrMo4-5. Wyznaczoną trwałość resztkową w zależności od czasu do zerwania w próbie pełzania od temperatury badania przy stałym poziomie naprężenia odpowiadającym eksploatacyjnemu przedstawiono w postaci zależności $t_r = f(T)$ dla $\sigma = \text{const}$ na przykładzie stali X20CrMoV12-1. Zależność prędkości pełzania od naprężenia σ dla temperatury dalszej eksploatacji w zależności od klasy struktury i stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików przedstawiono na przykładzie stali 13CrMo4-5. Rodzaj i udział występujących węglików w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania przedstawiono na przykładzie stali 13CrMo4-5. Ocena stanu materiału na podstawie badań mikrostruktury z zastosowaniem metody replik matrycowych przedstawiono na przykładzie materiału odcinka rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 216 000 godzinach eksploatacji w warunkach pełzania.

Słowa kluczowe: pełzanie, trwałość resztkowa, uszkodzenie, wyczerpanie, długotrwała eksploatacja, stale dla energetyki 13CrMo4-5, 14MoV6-3 i X20CrMoV12-1

LIFE TIME OF THE MATERIAL OF ELEMENTS WORKING UNDER CREEP CONDITIONS IN HIGH-PRESSURE POWER UNITS

Selection of the type of investigations depending on service duration and type of element for the evaluation of material condition and forecasting the life time in high-pressure power units was presented. Relative shares of processes causing changes in structure of material during creep depending on the exhaustion degree were determined. Changes in structure depending on availability of the material with and without internal damages were classified. Changes in structure of the examined steels working under creep conditions, including the pearlite / bainite and martensite decomposition class, development of precipitation processes and development of internal damages depending on the exhaustion degree, were examined. Methodology for the evaluation of condition of the tested steels after service under creep conditions based on the assessment of structure changes in constituent processes, the so-called: changes in pearlite, bainite or martensite structure, changes in development of precipitation processes and changes in development of internal damages related to the exhaustion extent, was presented on the example of low-alloy steels and X20CrMoV12-1 steel. The level of selected mechanical properties, hardness, brittle fracture appearance transition temperature depending on the structure class and corresponding exhaustion degree was presented on the example of 14MoV6-3 and X20CrMoV12-1 steels after long-term service under creep conditions. The disposable creep strength diagrams were made in the form of relationship $\sigma_b = f(LM)$ depending on the structure class and state of development of the carbide precipitation processes on the example of 13CrMo4-5 steel. The residual life determined as a relationship between time to rupture in the creep test and test temperature at constant stress level corresponding to the operating one is presented in the form of relationship $t_r = f(T)$ for $\sigma = \text{const}$ on the example of X20CrMoV12-1 steel. The relationship between creep rate and stress σ for temperature of further service depending on the structure class and state of development of

carbide precipitation processes was presented on the example of 13CrMo4-5 steel. The type and share of the occurring carbides depending on the structure class and exhaustion degree was presented on the example of 13CrMo4-5 steel. The evaluation of material condition based on investigations of microstructure using the matrix replica method was presented on the example of the material of 14MoV6-3 steel primary steam pipeline section after 216 000 h service under creep conditions.

Key words: creep, residual life, damage, exhaustion, long-term service, steels for the power industry 13CrMo4-5, 14MoV6-3 and X20CrMoV12-1

1. WPROWADZENIE

Eksploatowane w Polsce bloki energetyczne w zdecydowanej większości znacznie przekroczyły obliczeniowy czas pracy. Czas ten wynika z zastosowanej do obliczeń czasowej wytrzymałości na pełzanie, która została wyznaczona dla najczęściej przyjmowanego obliczeniowego czasu 100 000 godzin. Z kolei większość tych bloków przekroczyła najczęściej nie tylko czas eksploatacji 100 000, ale również 200 000 godzin.

Stan obecny krajowej sieci elektroenergetycznej oraz prognozy wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną wskazują na konieczność znacznej ich rozbudowy i modernizacji przy równoczesnym zapewnieniu ich bezpiecznej pracy. Spowodowało to, że zagadnienie przedłużania pracy jednostek energetycznych poza czas obliczeniowy, związane z oceną stanu materiału i trwałości eksploatacyjnej elementów będących w eksploatacji, nabrało szczególnego znaczenia.

Możliwość przedłużenia eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy wynika z wielu czynników. Wśród nich największy wpływ mają: liczba i wielkość współczynników bezpieczeństwa stosowanych w projektowaniu, a wynikających z poziomu niewiedzy projektantów, średnia czasowa wytrzymałość na pełzanie charakterystyczna dla każdego z gatunków stali będących przedmiotem badań, której wartość rzeczywista może być większa od średniej przyjętej do obliczeń, rzeczywista grubość ścianki rur znacznie większa od grubości obliczeniowej, co wynika z przyjmowania grubości nominalnej najbliższej większej w stosunku do obliczeniowej, powiększonej o wymagane naddatki, rzeczywiste warunki temperaturowo-naprężeniowe pracy, najczęściej niższe od przyjętych obliczeniowych [1–5].

W poniższym opracowaniu przedstawiono najważniejsze elementy składowe metodyki obiektywnej oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji przez ustalenie trwałości rozporządzalnej i resztkowej badanych stali pracujących w warunkach pełzania i wykazanie, że u jej podstaw stoi obiektywna ocena trwałości materiału pracującego w tych warunkach w oparciu o zespół materiałoznawczych metod i technik badawczych, dotyczących zarówno badań metalograficznych i badań własności mechanicznych. Każdorazowy dobór właściwych metod badań i pomiarów wymaga przy tym analizy rodzaju i warunków pracy oraz możliwości dostępu do danego elementu konstrukcyjnego. Badania materiałoznawcze, służące ustaleniu stopnia zaawansowania zmian w strukturze i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania i uszkodzenia analizowanych stali podczas eksploatacji w warunkach pełzania oraz wyniki badań własności mechanicznych, stanowią podstawę dokonywanej oceny czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji. Ocena stanu elementu i jego przydatności do dalszej eksploatacji jest zwykle stowarzyszona z badaniami pomocniczymi, między innymi: metodami penetracyjnymi, magnetycznymi

proszkowymi i ultradźwiękowymi oraz z pomiarami np.: trwałego odkształcenia, strzałki ugięcia, grubości ścianki i naprężeń własnych.

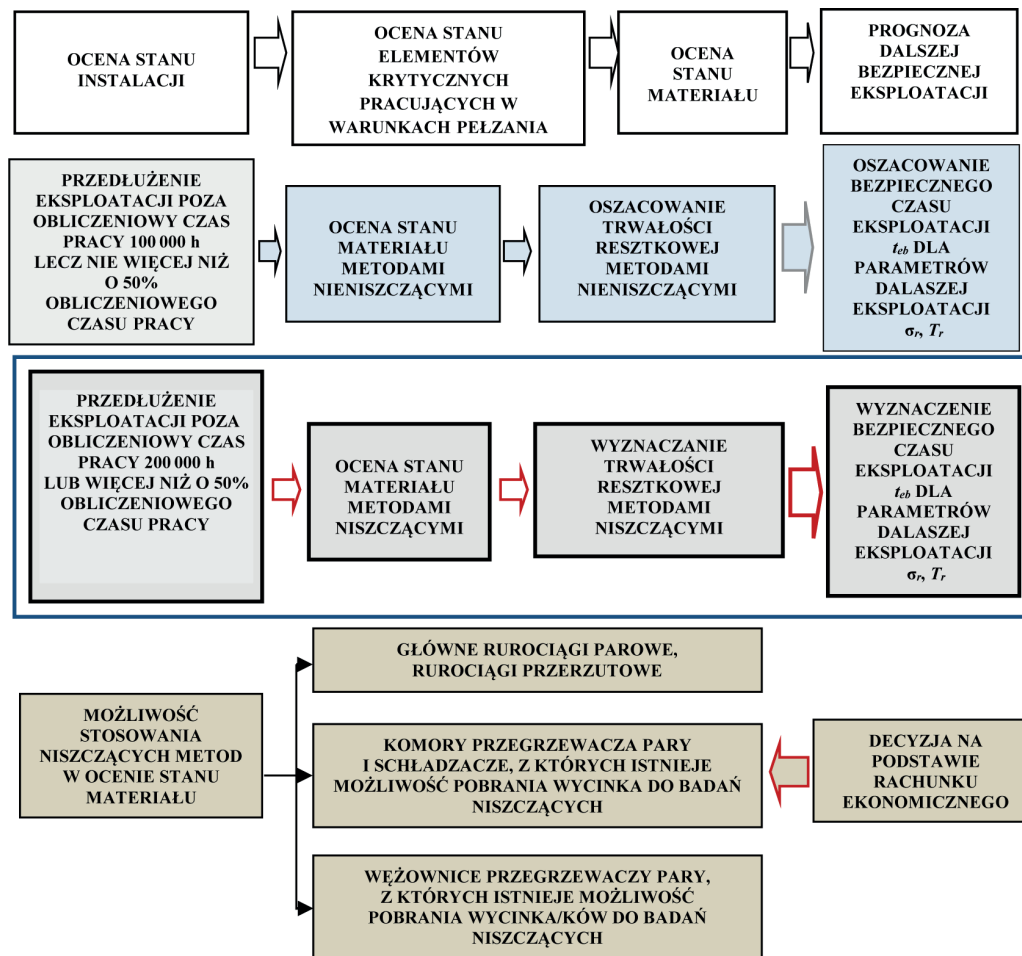
2. DOBÓR RODZAJU BADAŃ W ZALEŻNOŚCI OD CZASU EKSPLOATACJI I RODZAJU ELEMENTU

W praktyce przedłużenie czasu eksploatacji poza obliczeniowy czas 100 000 godzin jest dokonywane z zastosowaniem metody obliczeniowej opartej o dane średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie dla 200 000 godzin oraz pozytywne wyniki kompleksowych badań i pomiarów diagnostycznych. Badaniom tym i ocenie najczęściej poddawane są elementy krytyczne części ciśnieniowej kotłów i turbin definiowane, jako pracujące w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych [6, 7]. Wśród tych elementów najistotniejsze znaczenie mają elementy pracujące powyżej temperatury granicznej, to znaczy w warunkach pełzania. W ocenie tych elementów istotna i niezbędna jest ocena stanu ich materiału. Wykonuje się ją na podstawie uzyskiwanych wyników nieniszczących lub niszczących badań materiałowych.

Wyboru zespołu metod badawczych dokonuje się w zależności od dostępności do elementu i możliwości pobrania materiału do badań niszczących. Uzyskane wyniki odnosi się do posiadanych charakterystyk materiałów po eksploatacji. Zastosowanie takiego sposobu postępowania umożliwi najczęściej dobre oszacowanie stanu materiału, stopnia jego wyczerpania oraz wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji do następnego przeglądu [8].

Przekroczenie czasu eksploatacji o 50% czasu obliczeniowego wynoszącego 100 000 godzin, a tym bardziej osiągnięcie 200 000 godzin eksploatacji elementów, wymaga w licznych przypadkach nie tylko dobrego oszacowania stanu materiału i jego stopnia wyczerpania ale również wyznaczenia jego właściwości mechanicznych oraz trwałości resztkowej na podstawie badań niszczących na pobranym reprezentatywnym wycinku elementu instalacji. Nie zawsze w praktyce jest możliwe pobranie materiału do badań niszczących. Możliwe jest to do przeprowadzenia przy wykonywaniu oceny stanu materiału nitki głównego rurociągu parowego lub rurociągu przerzutowego, komór i schładzaczy oraz węzownicz przegrzewaczy pary. Musi być to jednak poprzedzone rachunkiem ekonomicznym opłacalności przeprowadzenia takiej procedury. Sposób doboru rodzaju badań w zależności od czasu eksploatacji i rodzaju elementu będącego przedmiotem badań przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

Ocena stanu materiału jest jedną z najbardziej istotnych składowych w ocenie stanu elementów pracujących w warunkach pełzania i w określaniu ich przydat-



Rys. 1. Dobór rodzaju badań w zależności od czasu eksploatacji i rodzaju elementu dla oceny stanu materiału i prognozy trwałości eksploatacyjnej elementów części ciśnieniowej kotłów parowych pracujących w warunkach pełzania

Fig. 1. Selection of the type of investigations depending on service duration and type of element for the evaluation of material condition and forecasting the life time of elements in pressure part of steam boilers working under creep conditions

ności do dalszej eksploatacji. Po doborze rodzaju badań dostosowanych do czasu eksploatacji i typu elementu części ciśnieniowej kotła podlegającego badaniom, niezbędnym jest wybór sposobu oceny stanu i przydatności do dalszej pracy materiału elementu. Ocena stanu i przydatności do dalszej pracy materiałów elementów po eksploatacji w warunkach pełzania znacznie poza obliczeniowym czasem pracy, są wykonywane w oparciu o opracowane algorytmy postępowania uwzględniające możliwe i niezbędne do przeprowadzenia rodzaje badań oraz wymaganą dla ich wykonania metodykę.

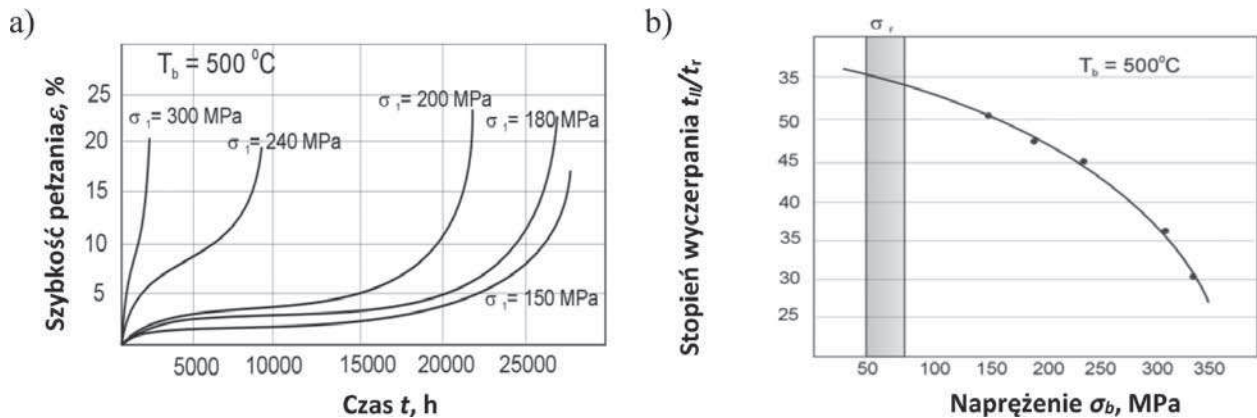
3. TRWAŁOŚĆ RESZTKOWA I RESZTKOWA ROZPORZĄDZALNA

Oszacowanie stanu materiału wymaga wyznaczenia stopnia wyczerpania (t_e/t_r) będącego stosunkiem czasu dotychczasowej eksploatacji t_e do czasu do zerwania t_r , odniesionego do warunków temperaturowo-naprężeniowych. Znajomość czasu dotychczasowej eksploatacji odniesiona do oszacowanego lub wyznaczonego stopnia wyczerpania pozwala wyznaczyć trwałość resztkową t_{re} , będącą czasem pozostającym do zniszczenia materiału dla zdefiniowanych warunków dotychczasowej pracy. Czas ten nie jest jednak czasem dalszej bezpiecznej

eksploatacji. Czasem dalszej bezpiecznej eksploatacji jest część tego czasu, który nazywamy resztkową trwałością rozporządzalną t_{be} . Jest on definiowany jako czas do osiągnięcia końca drugiego okresu pełzania. Jego udział w czasie do zerwania jest nieco różny i zależy od poziomu temperatury oraz naprężenia. Aby określić udział rozporządzalnej trwałości resztkowej t_{be} w trwałości resztkowej t_{re} , definiowanej jako czas do osiągnięcia końca II okresu pełzania t_{IIe} w stosunku do czasu do zerwania t_{re} , wykonano próby pełzania do zerwania z pomiarem wydłużenia w czasie próby w stałej temperaturze T_b zbliżonej do eksploatacyjnej.

Dla każdego z najczęściej stosowanych w praktyce gatunków stali rozporządzalna trwałość resztkowa została wyznaczona dla zakresu parametrów odpowiadających występującym eksploatacyjnym. Sposób jej wyznaczania pokazano na rys. 2 na przykładzie stali 14MoV6-3.

Na rysunku 2a zestawiono wyniki prób w postaci krzywych pełzania $\epsilon = f(t)$ przy $T_b = T_e = 500^\circ\text{C} = \text{const}$, natomiast na rys. 2b stosunek rozporządzalnej trwałości resztkowej t_{be} do trwałości resztkowej t_{re} w zależności od naprężenia badania σ_b . Znając zatem trwałość resztkową, można wyznaczyć rozporządzalną trwałość resztkową, będącą maksymalnym czasem bezpiecznej pracy dla przyjętych parametrów eksploatacji.



Rys. 2. Sposób wyznaczenia udziału trwałości rozporządzalnej t_b w trwałości t_r na przykładzie stali 14MoV6-3

Fig. 2. Method for determination of the share of disposable life t_b in life t_r on the example of 14MoV6-3 steel

4. SYSTEM OCENY STANU MATERIAŁU PO DŁUGOTRWAŁEJ EKSPLOATACJI W WARUNKACH PEŁZANIA

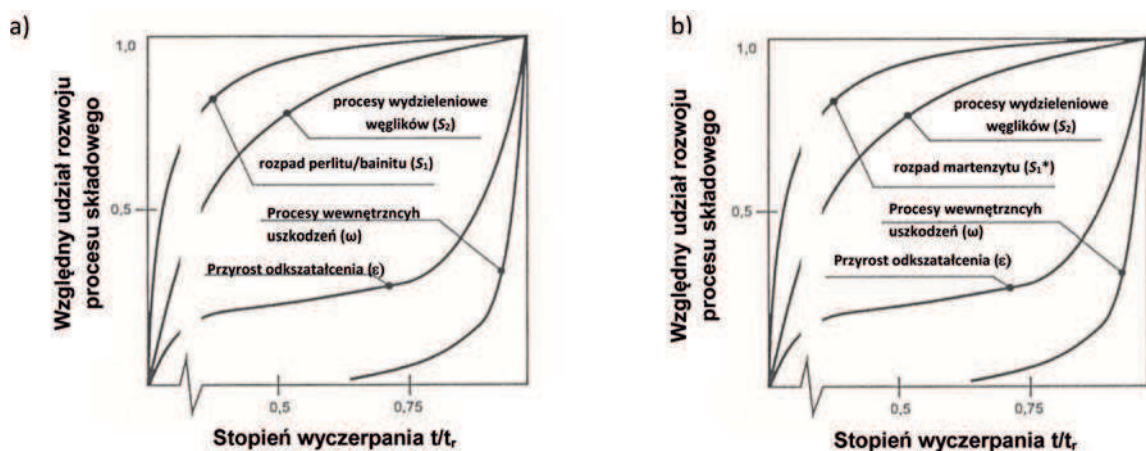
Aby oszacować stopień wyczerpania na podstawie badań strukturalnych, najczęściej metodami nieniszczącymi, niezbędna jest znajomość zachowania się badanych materiałów w czasie pracy w warunkach pełzania. Zmiany w strukturze zachodzą w jej podstawowych składnikach fazowych oraz występujących wydzieleniach,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

cji. Względne udziały procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania w zależności od stopnia wyczerpania schematycznie przedstawiono na rys. 3.

Tworząc system oceny stanu materiału przyjęto, że znajomość stanu wyjściowego jak również znajomość historii eksploatacji nie jest wymagana. Założono jednak, że są to dwa główne czynniki mające istotny wpływ na stan struktury materiału po eksploatacji, a ich skutki są zakodowane w materiale będącym przedmiotem oceny.

W opracowywaniu systemu oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania równie istotną jest znajomość poziomu własności użytkowych odpowiadających określonemu stanowi struktury i odpowiadającemu mu stopniowi wyczerpania. Szczególnie dotyczy to wytrzymałości na pełzanie i prędkości pełzania. Wybrane wyniki tych badań, wykonanych dla różnych stanów struktury materiałów po eksploatacji, najczęściej dotyczących stosowanych gatunków stali przedstawiono w [2].

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.



Rys. 3. Względne udziały procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania: a) w stali 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym, b) w stali X20CrMoV11-1 o strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym

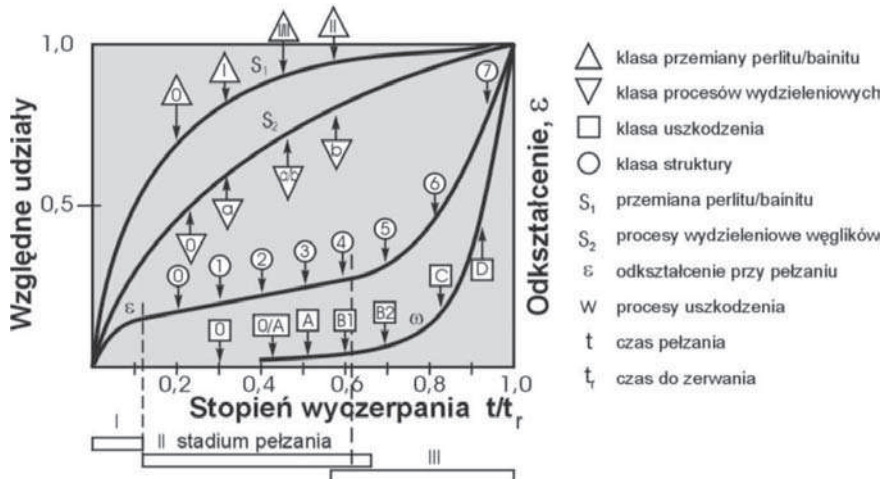
Fig. 3. Relative shares of processes causing changes in structure of material during creep: a) in 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 steels with ferritic-pearlitic, ferritic-pearlitic-bainitic or ferritic-bainitic structure in initial state, b) in X20CrMoV11-1 steel with tempered martensite structure in initial state

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 lub związane z rozpadem bainitu S_1 dla stali o strukturze ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym lub związane z rozpadem odpuszczonego martenzytu S_1 dla stali o strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym,
- związane z rozwojem procesów wydzieleniowych węglików S_2 ,

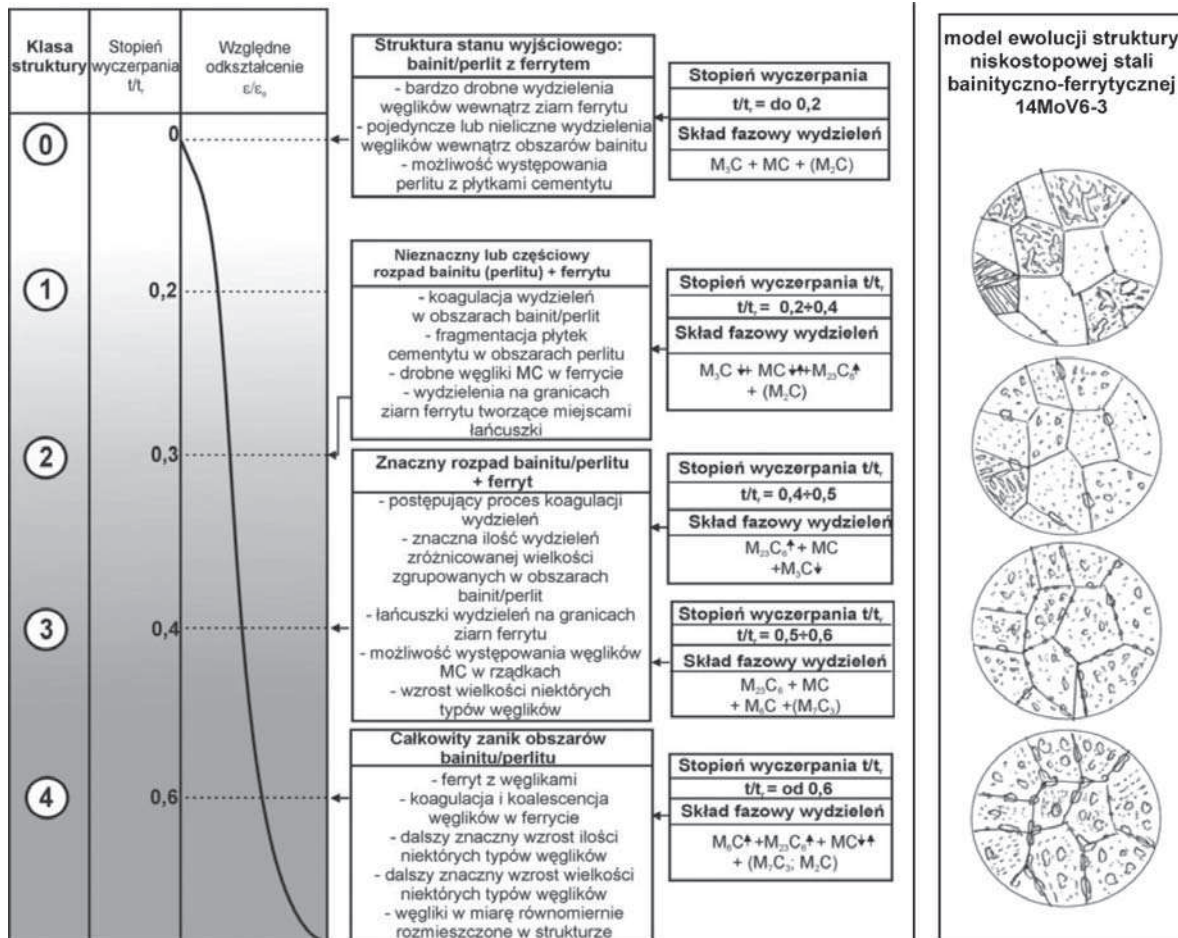
- związane z rozwojem wewnętrznych uszkodzeń ω dla stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym lub związane z rozwojem wewnętrznych uszkodzeń ω^* dla stali o strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym.

Klasyfikację opracowano dla niskostopowych stali w gatunkach: 16Mo3, stali 13CrMo4-5 10CrMo9-10, 14MoV6-3 oraz wysokochromowej X20CrMoV11-1. Opracowana klasyfikacja dla każdej z tych stali składa się dwóch części. Pierwsza część klasyfikacji obej-



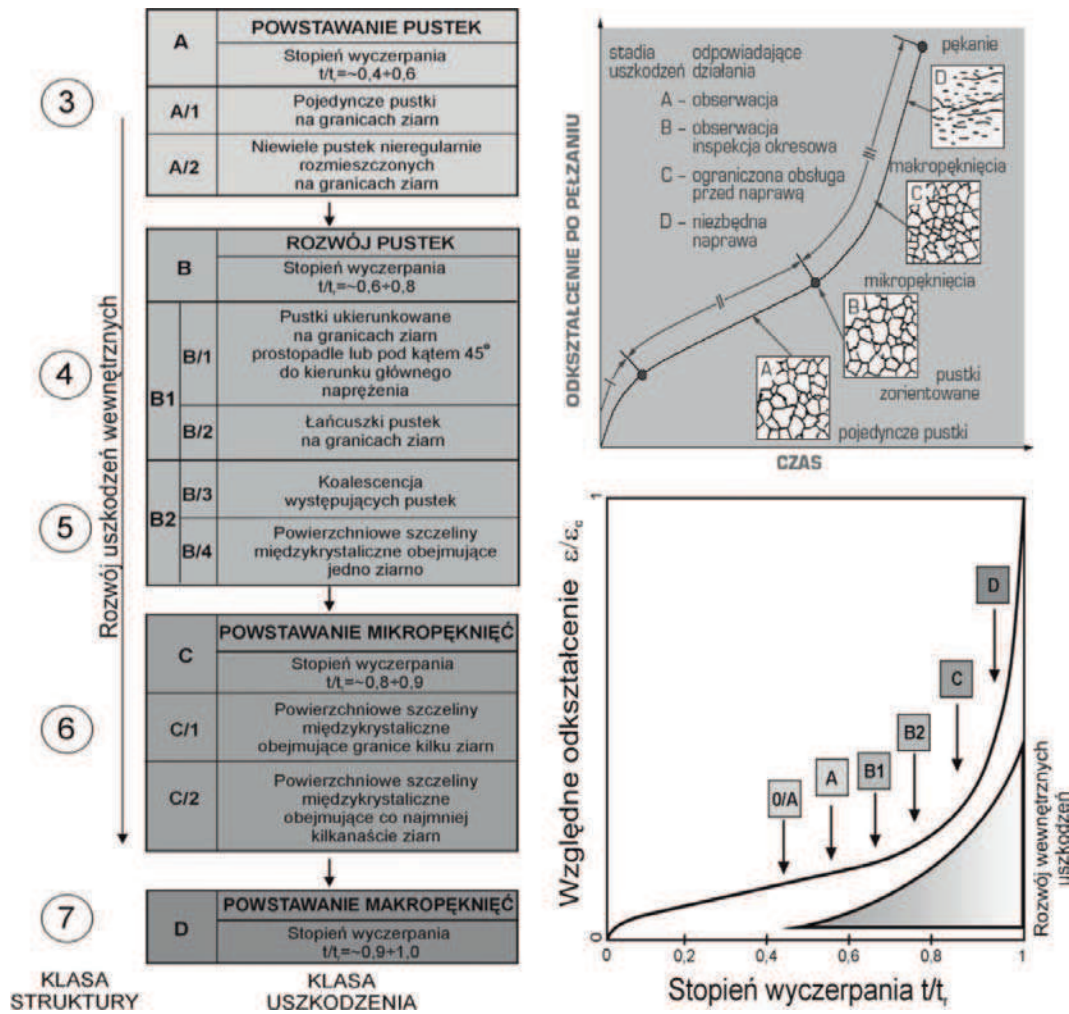
Rys. 4. Sposób klasyfikacji stanu materiału na podstawie zmian w strukturze w oparciu o składowe procesy w odniesieniu do stopnia wyczerpania

Fig. 4. Method for classification of material condition on the basis of changes in structure based on constituent processes with reference to exhaustion extent



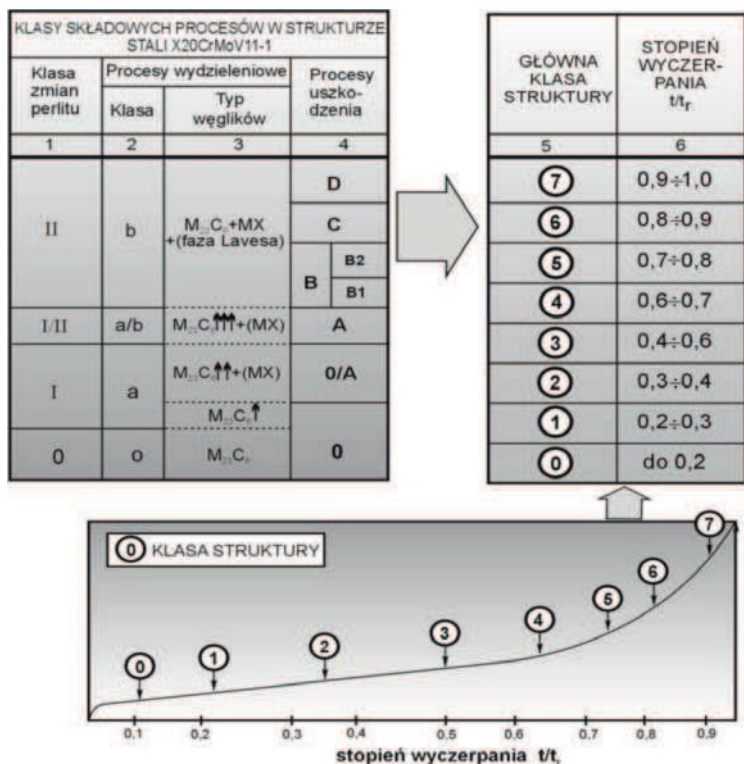
Rys. 5. Schemat zmian struktury stali 14MoV6-3 po długotrwałej eksploatacji bez wewnętrznych uszkodzeń

Fig. 5. Diagram of changes in structure of 14MoV6-3 steel after long-time service without internal damages



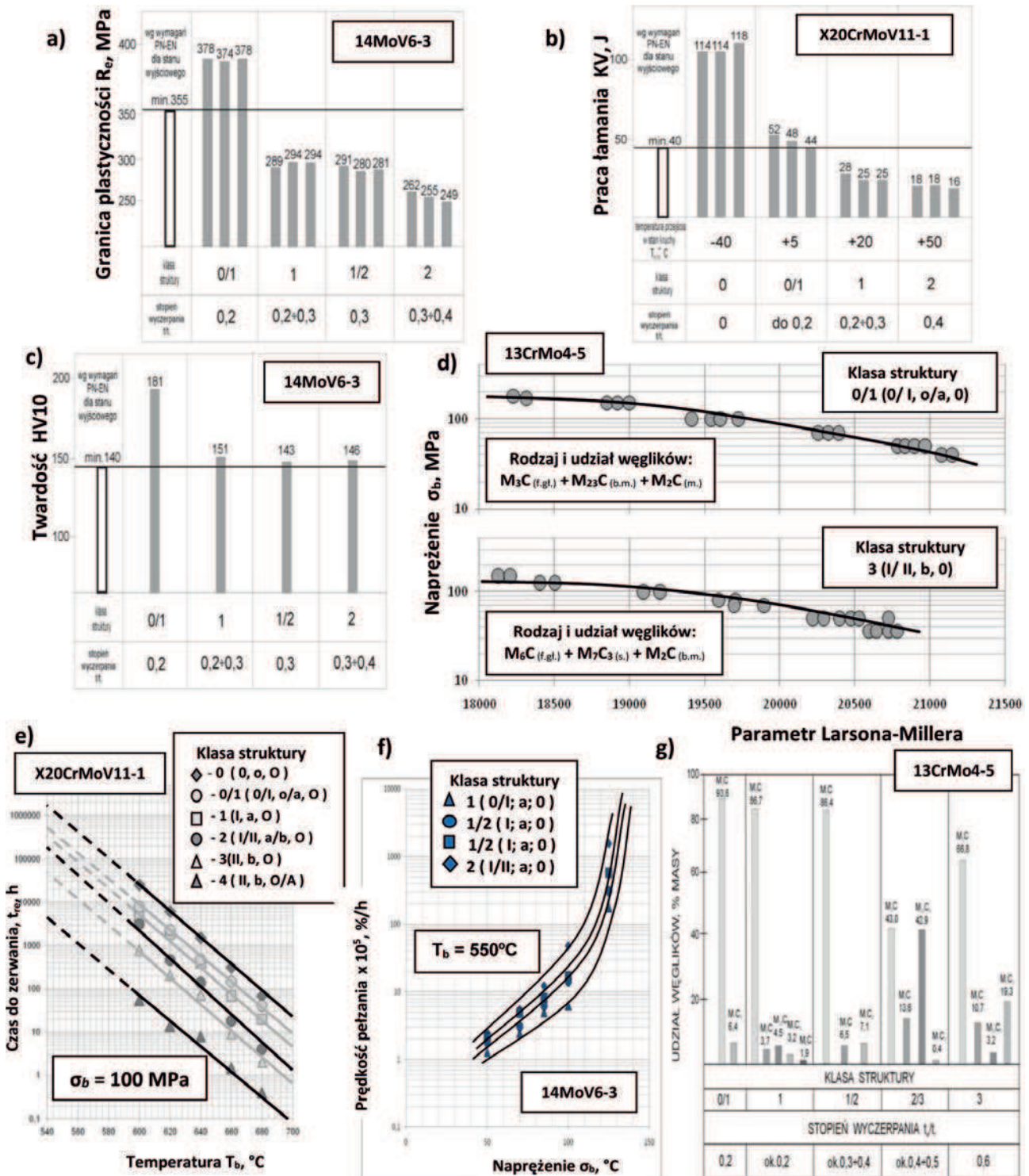
Rys. 6. Klasyfikacja struktury w wyniku rozwoju uszkodzeń wewnętrznych w zależności od stopnia wyczerpania na przykładzie stali niskostopowych

Fig. 6. Classification of structure as a result of development of internal damages depending on exhaustion degree on the example of low-alloy steels



Rys. 7. Metodologia oceny stanu stali wysokochromowej X20CrMoV12-1 pracującej w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania

Fig. 7. Methodology for the evaluation of condition of X20CrMoV12-1 high-chromium steel working under creep conditions based on the assessment of changes in structure of constituent processes related to exhaustion extent



Rys. 8. Przykłady wybranych charakterystyk właściwości mechanicznych, twardości i stanu rozwoju wydzielen w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania po eksploatacji w warunkach pełzania najczęściej stosowanych stali w kotłach energetycznych: a) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, b) udamność w temperaturze pokojowej i temperatura przejścia w stan kruchy, c) twardość HV10, d) resztkowa wytrzymałość na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(L-M)$, e) trwałość resztkowa w skróconych próbach pełzania, f) prędkość pełzania w stanie stacjonarym $\dot{\epsilon}_s$ w zależności od naprężenia σ w temperaturze eksploatacji T_b , g) rodzaj i udział występujących wydzielen

Fig. 8. Examples of selected characteristics of mechanical properties, hardness and state of precipitation development depending on the structure class and exhaustion extent after service under creep conditions for the most frequently used steels in power boilers: a) yield point at room temperature, b) impact fracture and brittle fracture appearance transition temperature, c) hardness HV10, d) residual creep strength as the relationship $\log \sigma_b = f(L-M)$, e) residual life in abridged creep tests, f) creep rate in steady state $\dot{\epsilon}_s$ depending on stress σ at operating temperature T_b , g) type and share of existing precipitations

muje badane stale po eksploatacji bez wewnętrznych uszkodzeń. Przykładowe schematy będący ilustracją opracowanej tej części klasyfikacji dla stali 13CrMo4-5 przedstawiono na rys. 4. Drugą część klasyfikacji stanowią zmiany w strukturze w zależności od stopnia wyczerpania opracowane dla wymienionych materiałów z uszkodzeniami wewnętrznymi. Przykładowy schemat będący ilustracją tej części klasyfikacji dla stali 14MoV6-3 przedstawiono na rys. 5.

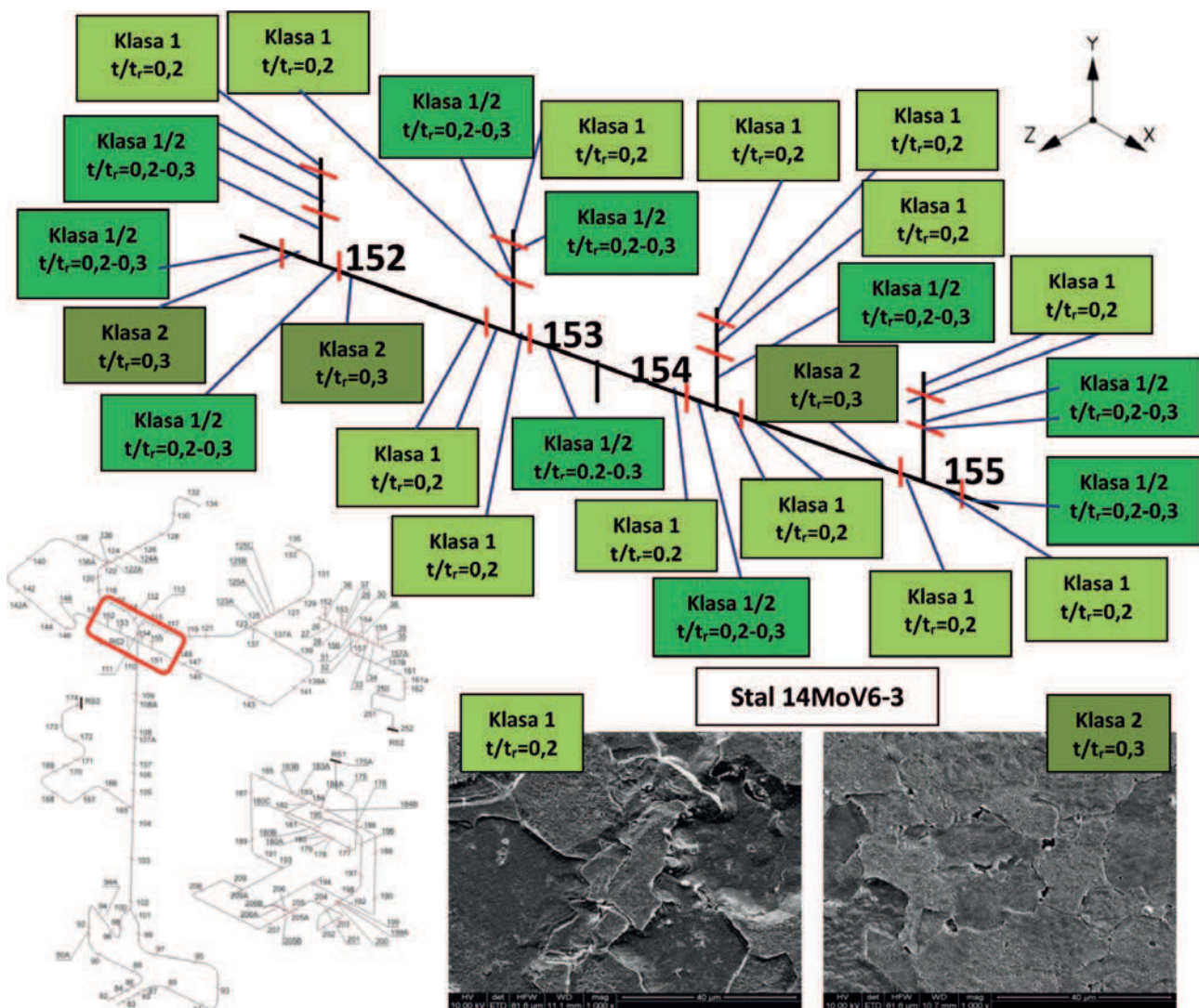
Na podstawie wyników wieloletnich badań własnych opracowano wzorce struktury ilustrujące kolejne etapy zmian i stany struktury zdefiniowane w sporządzonych klasyfikacjach badanych stali [9÷12].

Opracowany schemat zmian struktury niskostopowych stali po eksploatacji w warunkach pełzania obejmujący klasy rozpadu perlitu/bainitu, rozwoju procesów wydzieleniowych oraz rozwoju uszkodzeń wewnętrznych w zależności od stopnia wyczerpania, odniesione do głównej klasy struktury przedstawione na tle krzywej pełzania zaprezentowano na rys. 6.

Metodologię oceny stanu badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych tzn.: zmian w struk-

turze perlitu, bainitu lub martenzytu, zmian w zakresie rozwoju procesów wydzieleniowych oraz zmian w zakresie rozwoju uszkodzeń wewnętrznych odniesionych do stopnia wyczerpania przedstawiono przykładowo dla stali X20CrMoV12-1 na rys. 7. Dokonując oceny wyżej wymienionych elementów składowych struktury i przypisując odpowiadające im klasy ujawnione na podstawie badań strukturalnych, wyznacza się główną klasę struktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania. Znając stopień wyczerpania i dotychczasowy czas eksploatacji można oszacować trwałość resztkową, czyli czas pozostający do zniszczenia materiału. Częścią tego czasu jest rozporządzalna trwałość resztkowa będąca bezpiecznym czasem dalszej eksploatacji dla dotychczasowych warunków pracy [1, 2].

Klasyfikacja zmian struktury w wyniku pełzania umożliwiła zbudowanie elementów charakterystyk materiałowych będących zależnością właściwości mechanicznych od klasy struktury i stopnia wyczerpania. Charakterystyki te pozwalają na ocenę stanu badanych materiałów po eksploatacji w warunkach pełzania, oprócz oszacowanej trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzalnej, wzbogacić o oszacowany po-



Rys. 9. Ocena stanu materiału; klasa mikrostruktury i stopień wyczerpania materiału odcinka rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 216 000 godzinach eksploatacji w warunkach pełzania (repliki matrycowe SEM)

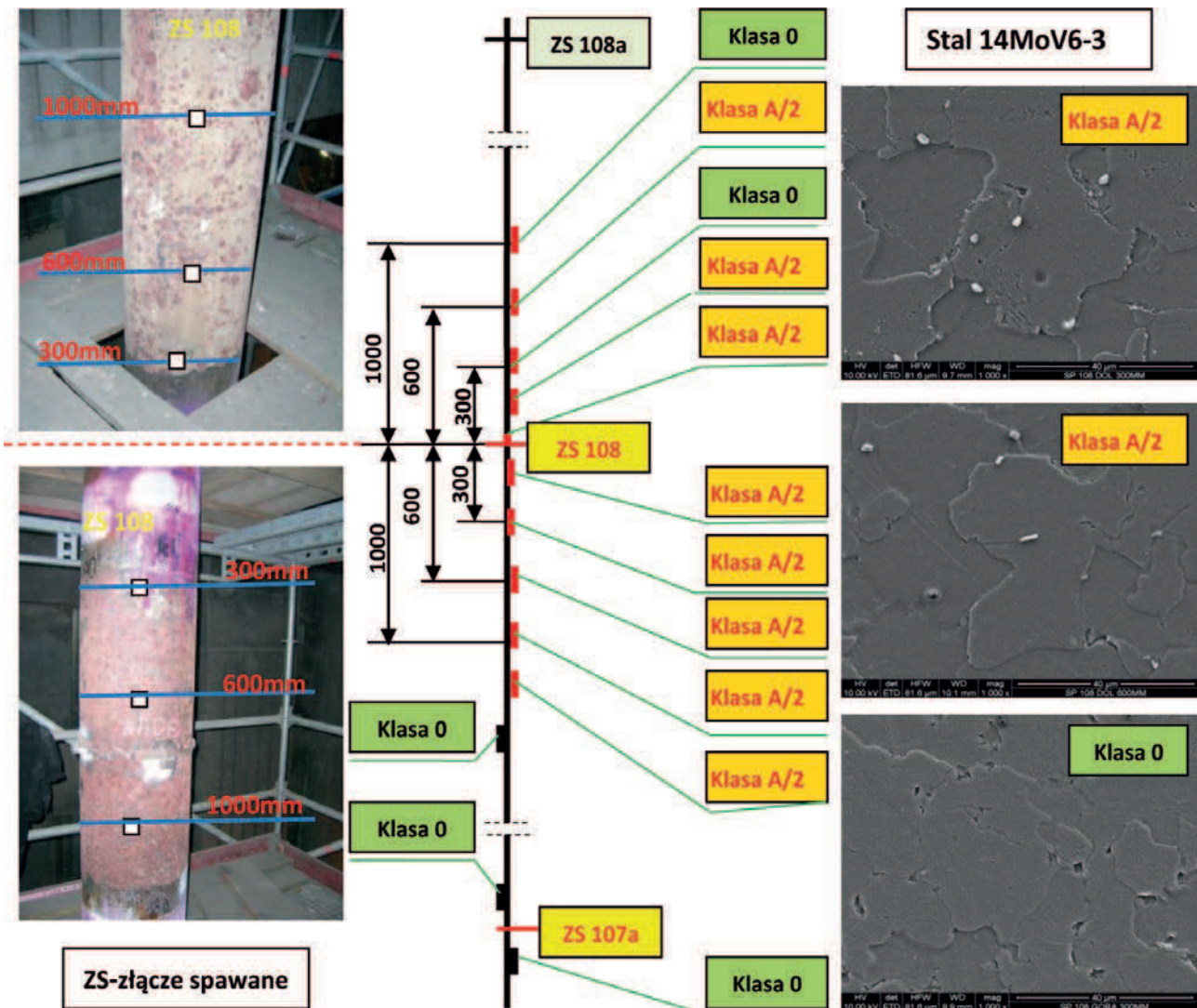
Fig. 9. Evaluation of material condition: microstructure class and exhaustion extent of the material of 14MoV6-3 steel primary steam pipeline section after 216 000 h service under creep conditions (matrix replicas SEM)

ziom innych właściwości użytkowych mających wpływ na zachowanie się badanych materiałów w czasie dalszej eksploatacji, szczególnie w czasie ciśnieniowych prób wodnych oraz uruchamiania i odstawiania urządzeń. Przykłady takich charakterystyk dla omawianych stali przedstawiono na rys. 8a,b,c. Zasadnicze znaczenie mają jednak charakterystyki własności na pełzanie, których przykłady pokazano na rys. 8d,e,f.

Charakterystyki resztkowej wytrzymałości na pełzanie, w postaci zależności naprężenia od parametru Larsona-Millera $\{\log \sigma_b = f(L-M)\}$, dla różnych stanów struktury i o różnym stanie rozwoju procesów wydzieleniowych węglików materiałów po eksploatacji, odpowiadających różnym klasom struktury o różnym stopniu wyczerpania pokazano na rys. 8d, natomiast charakterystyki trwałości resztkowej w postaci zależności czasu do zerwania w próbie pełzania od temperatury badania przy stałym poziomie naprężenia odpowiadającym eksploatacyjnemu $\{\log t_{re} = f(T_e)\}$ przy $\sigma_e = \text{const}$ uzyskanych w oparciu o skrócone próby pełzania na rys. 8e. Przykład zależności prędkości pełzania w stanie stacjonarnym od naprężenia w stałej temperaturze odpowiadającej eksploatacyjnej 550°C

dla stali 14MoV6-3 przedstawiono na rysunku 8f. W oparciu o tak sporządzone charakterystyki można z prędkości pełzania w stanie ustalonym wyznaczyć rozporządzalną trwałość resztkową znając rzeczywistą wartość trwałego odkształcenia pełzania ϵ_e w wyniku dotychczasowej eksploatacji.

Rodzaj i udział występujących wydzieleni, ma istotny wpływ na poziom własności użytkowych materiałów pracujących w warunkach pełzania, które zmieniają się z czasem eksploatacji. Znaczenie ma nie tylko występowanie, ale i udział poszczególnych typów wydzieleni. Rentgenowska analiza osadu wyizolowanego elektrolitycznie z osnowy materiału umożliwia uzyskanie dyfraktogramów rentgenowskich, a ich analiza, w oparciu o wzorcowe dane rentgenograficzne, identyfikację poszczególnych typów węglików. Analiza porównawcza zarejestrowanych natężeń refleksów poszczególnych węglików posłużyła do półilościowej oceny udziałów poszczególnych typów wydzieleni. Przykład zależności udziałów poszczególnych występujących typów węglików od klasy struktury i stopnia wyczerpania w oparciu o metodę półilościową przedstawiono na rys. 8g.



Rys. 10. Ocena stanu materiałów w zakresie uszkodzeń wewnętrznych spowodowanych pełzaniem odcinka pionowego rurociągu głównego pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 216 000 godzin eksploatacji (repliki matrycowe SEM)

Fig. 10. Evaluation of material condition with regard to internal damages caused by creep in vertical section of 14MoV6-3 steel primary steam main pipeline after 216 000 h service under creep conditions (matrix replicas SEM)

5. OCENA STANU MATERIAŁU ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH PEŁZANIA W PRAKTYCE

Praktyczne zastosowanie opracowanego systemu oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania pokazano na przykładzie wyników badań mikrostruktury uzyskanych w skaningowym mikroskopie elektronowym na replikach matrycowych.

Dla oceny stanu i oszacowania przydatności materiału głównych rurociągów parowych kotła OP-650 bloku 200 MW po eksploatacji, znacznie poza obliczeniowym czasem pracy 100 000 godzin, wykonano ponad 1850 replik obejmujących materiał rodzimy i złącza spawane. Badania wykonano na rurociągach głównych pary świeżej ze stali 14MoV6-3 oraz pary wtórnie przegrzanej ze stali 10CrMo9-10. Uzyskane wyniki badań na przykładzie wycinków rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 pokazano na rys. 9 bez wewnętrznych uszkodzeń w wyniku pełzania oraz na rys. 10 z ujawnionymi uszkodzeniami w postaci pustek. Wyniki tych badań pozwoliły na podjęcie decyzji dotyczących pozostawienia znacznej części badanych rurociągów oraz wymiany niektórych jego elementów z zastosowaniem technologii łączenia spawaniem materiałów o znacznych zmianach w mikrostrukturze w wyniku pełzania z materiałami nowymi.

6. PODSUMOWANIE

Opracowana i opisana metodyka oceny stanu materiału, oceny stanu elementu, jego trwałości resztkowej i trwałości rozporządzalnej oraz oceny jego przydatności do dalszej eksploatacji i prognozy czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji została poddana weryfikacji doświadczalnej w ok. 1000 przypadków w praktyce przemysłowej. W żadnym przypadku nie stwierdzono popełnienia błędu w zakresie ustalenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji elementów instalacji energetycznych.

Zakres problematyki trwałości resztkowej i rozporządzalnej elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych jest znacznie szerszy niż przedstawiono w niniejszej pracy. Dotyczy on między innymi metodyki diagnozowania uszkodzeń krytycznych elementów instalacji ciśnieniowych kotłów energetycznych, z wykorzystaniem badań materiałoznawczych, w ocenie przyczyn ich awarii oraz trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych, jak i wykonywania naprawczych złączy spawanych materiałów po eksploatacji z materiałami w stanie wyjściowym lub z materiałami po eksploatacji, elementów wymagających naprawy lub dokonania zmian konstrukcyjnych w wykonywanej modernizacji instalacji po długotrwałej pracy, a także zachowania się materiałów badanych złączy w warunkach odpowiadających warunkom eksploatacji oraz technologii wykonywania naprawczych złączy spawanych.

LITERATURA

- Hernas A., Dobrzański J.: Life-time and damage of boilers and steam turbines elements, Publishing House of the Silesian University of Technology, Gliwice, 2003
- Dobrzański, J.: Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki. Open Access Library, 3, 1-228, 2011
- Zieliński A., Hernas A.: Prognozowanie trwałości resztkowej stalowych elementów rurociągów pracujących w warunkach pełzania i zmęczenia. Prace IMŻ nr 4, 2008, P. 1-17
- Golański G., Zieliński A., Słania J., Jasak J.: Mechanical properties of VM12 steel after 30 000 hrs of ageing at 600°C temperature, Archives of Metallurgy and Materials, Volume 59, Issue 4, 2014, p. 1357-1360
- Kępa J., Golański G., Zieliński A., Brodziak-Hyska A.: Precipitation proces in VM12 steel after ageing at 650°C temperature, JVE Journal of Vibroengineering 14 (2012) 147-150
- Zieliński A., Dobrzański J., Dziuba-Kałuża M.: Structure of welded joints of 14MoV6-3 and 13CrMo4-5 steel elements after design work time under creep conditions, Archiv. Mater. Sc. Eng., 61/2, 2013, 69-76
- Dobrzański J., Zieliński A., Paszkowska H.: Sposób oceny trwałości resztkowej na przykładzie materiału rodzimego i złącza spawanego po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania znacznie poza czas obliczeniowy eksploatacji. Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 2009, 61: 34-37
- Dobrzański J., Zieliński A.: Trwałość resztkowa i rozporządzalna trwałość resztkowa po długotrwałej eksploatacji powyżej obliczeniowego czasu pracy ferrytycznej stali 12Cr-1Mo-V o strukturze odpuszczonego martenzytu, Prace IMŻ 57/3 (2005) 48-52
- Golański G., Zieliński A., Zielińska-Lipiec A.: Degradation of microstructure and mechanical properties in martensitic cast steel after ageing. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2015
- Zieliński A., Dobrzański J., Krztoń H.: Structural changes in low alloy cast steel Cr-Mo-V after long time creep service, J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., 25/1, 2007, 33-36
- Zieliński A., Golański G., Sroka M.: Assessment of microstructure stability and mechanical properties of X10CrWMo-VNb9-2 (P92) steel after long-term thermal ageing for high temperature applications, Kovove Materialy-Metallic Materials (in press)
- Zieliński A., Dobrzański J.: Characteristics of changes in properties and structure of X10CrMoVNb9-1 steel due to long-term impact of temperature and stress. Archives of Materials Science and Engineering, 2013, 60.2.