

6. Metodyka oceny trwałości rozporządzalnej i resztkowej badanych stali pracujących w warunkach pełzania

W poprzednich rozdziałach niniejszej monografii kolejno opisano zmiany własności mechanicznych i zmiany struktury badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania, a także przedstawiono przykłady aplikacji metod sztucznej inteligencji do wspomaganie oceny stanu uszkodzenia stali pracujących w warunkach pełzania, na przykładzie wybranych gatunków stali niskostopowych: 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 oraz wysoko-chromowej X20CrMoV11-1, jako najczęściej lub niemal wyłącznie dotychczas stosowanych w Polsce na elementy instalacji energetycznych, pracujące w warunkach pełzania, szczególną uwagę zwracając na przedstawienie opisu procesu degradacji analizowanych stali podczas długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, zmian ich struktury i rozwoju w nich wewnętrznych uszkodzeń oraz na materiałoznawczą interpretację przyczyn tych zmian, jak również na zmiany własności mechanicznych analizowanych stali podczas eksploatacji w warunkach pełzania.

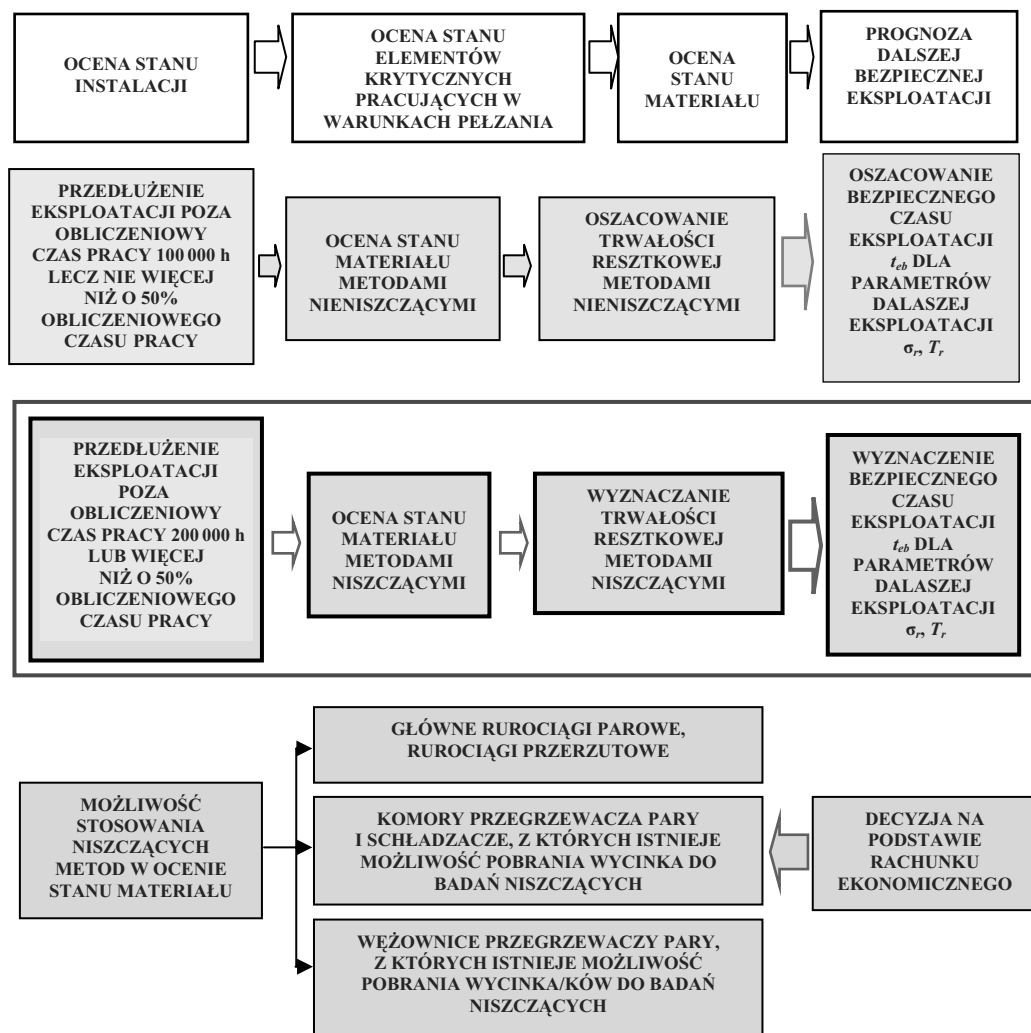
W niniejszym rozdziale za cel postawiono sobie zaprezentowanie autorskiej metodyki obiektywnej oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji w warunkach pełzania przez ustalenie trwałości rozporządzalnej i resztkowej badanych stali pracujących w warunkach pełzania i wykazanie, że u jej podstaw stoi obiektywna ocena trwałości materiału pracującego w warunkach pełzania w oparciu o zespół materiałoznawczych metod i technik badawczych, dotyczących zarówno badań metalograficznych i badań własności mechanicznych, jak i odpowiednio dobranych metod obliczeniowych, przy możliwych zastosowaniach metod komputerowego wspomaganie podejmowania decyzji, w tym zwłaszcza metod sztucznej inteligencji. 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 zaawansowania procesów strukturalnych wyczerpania i uszkodzenia analizowanych stali podczas eksploatacji w warunkach pełzania, oraz wyniki badań mechanicznych stanowią podstawę dokonywanej oceny czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji, chociaż zwykle są stowarzyszone z pomocniczymi badaniami, między innymi: metodami penetracyjnymi, magnetycznymi proszkowymi i ultradźwiękowymi oraz z pomiarami np.: trwałego odkształcenia, strzałki ugięcia, grubości ścianki i naprężeń własnych.

Eksplloatowane w kraju 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. 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 nadatki, rzeczywiste warunki temperaturowo-naprężeniowe pracy najczęściej niższe od przyjętych obliczeniowych.

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 [35, 37, 50, 105]. Badaniom tym i ocenie najczęściej poddawane są elementy krytyczne części ciśnieniowej kotłów i turbin definiowane jako pracujące w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych. Wśród tych elementów najistotniejsze znaczenie mają elementy pracujące powyżej temperatury granicznej, to znaczy w warunkach pełzania, które najczęściej są wykonane z gatunków stali będących przedmiotem badań. 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 umożliwia najczęściej dobre oszacowanie stanu materiału, stopnia jego wyczerpania oraz wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji do następnego przeglądu [25, 35-37, 42, 50, 105].

Przekroczenie czasu eksploatacji o 50% czasu obliczeniowego wynoszącego 100 000 godzin, a tym bardziej osiągnięcie 200 000 godzin eksploatacji elementów, wymaga w licznych



Rysunek 132. 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

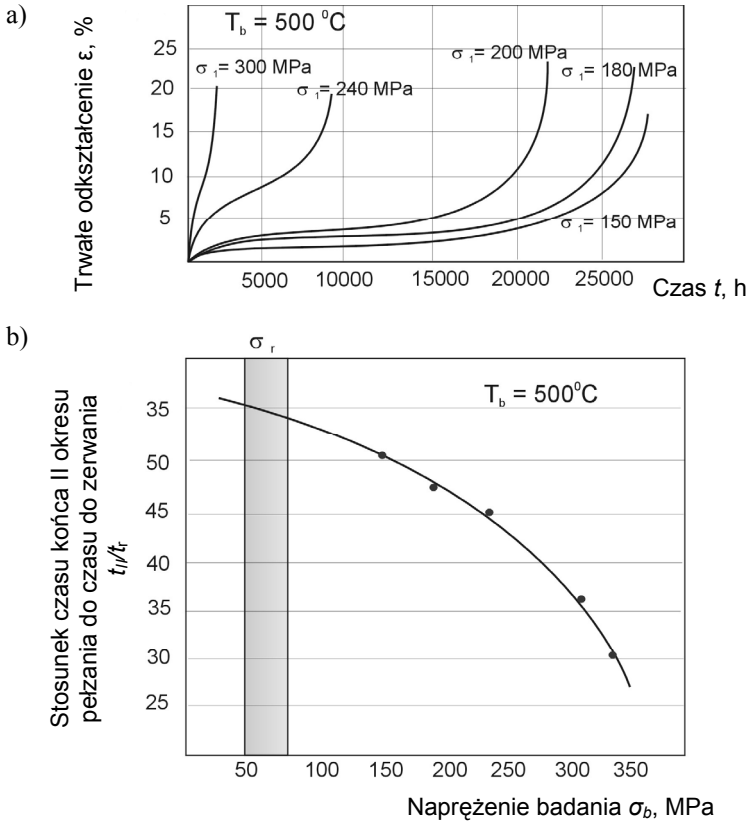
przypadkach nie tylko dobrego oszacowania stanu materiału i jego stopnia wyczerpania ale i wyznaczenia jego własności mechanicznych oraz trwałości resztkowej na podstawie badań niszczących na pobranym reprezentatywnym wycinku. Zasady i sposób wyboru miejsca do badań zostały opisane w kilku publikacjach autora [15, 21, 31, 34-36, 50, 102, 105]. 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 przrzutowego, komór i schładzaczy oraz węzownic 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 132.

Ocena stanu materiału jest jedną z najbardziej istotnych składowych w ocenie stanu elementów pracujących w warunkach pełzania i w określaniu ich przydatności 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. Opracowane i zaproponowane sposoby oceny stanu i przydatności do dalszej pracy materiałów elementów rurociągów, komór, schładzaczy oraz węzownic przegrzewaczy pary po eksploatacji w warunkach pełzania znacznie poza obliczeniowym czasem pracy są przedmiotem licznych opracowań i publikacji autora. Przedstawiono w nich algorytmy postępowania uwzględniające możliwe i niezbędne do przeprowadzenia rodzaje badań oraz wymaganą dla ich wykonania metodykę [15, 21, 25, 31, 32, 34-37, 39-42, 50, 59, 63, 93, 97, 102, 104, 105, 464-467,476].

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 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 badanych gatunków stali rozporządzalna trwałość resztkowa została wyznaczona dla zakresu parametrów odpowiadających występującym eksploatacyjnym. Sposób jej wyznaczania pokazano na rysunku 133 na przykładzie stali 14MoV6-3. Na rysunku 133a zestawiono wyniki prób w postaci krzywych pełzania $\varepsilon = f(t)$ przy $T_b = T_e = 500^\circ\text{C} = \text{const}$, natomiast na



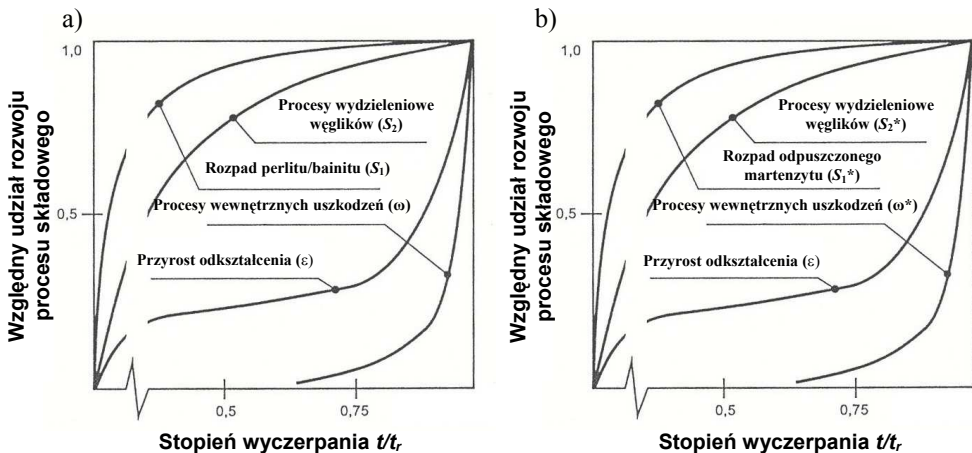
Rysunek 133. Sposób wyznaczenia udziału trwałości rozporządzalnej t_b w trwałości t_r na przykładzie badanej stali 14MoV6-3

rysunku 133b stosunek rozporządzalnej trwałości resztkowej t_{be} do trwałości resztkowej t_{re} w zależności od naprężenia badania σ_b . Pozwoliło to na wyznaczenie stosunku t_{be}/t_{re} dla poziomu naprężenia odpowiadającego eksploatacyjnemu $\sigma_b = \sigma_{ep} = 50\text{-}60$ MPa, który zapisano w postaci zależności $t_{be} = 0,55 t_{re}$. Znając zatem trwałość resztkową można wyznaczyć rozporządzalną trwałość resztkową, będącą czasem bezpiecznej pracy dla przyjętych parametrów eksploatacji.

Aby oszacować stopień wyczerpania na podstawie badań strukturalnych, najczęściej metodami nieniszczącymi, niezbędna jest znajomość zachowania się badanych materiałów w czasie pracy w warunkach pełzania. Wykonane przez autora wieloletnie badania pozwoliły stwierdzić, że 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 stali wysokochromowej. 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 eksploatacji. Zagadnienia te omówiono szczegółowo w rozdziale 4 monografii. Względne udziały procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania w zależności od stopnia wyczerpania schematycznie przedstawiono na rysunku 134.

W opracowywaniu systemu oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania równie istotną jest znajomość poziomu własności użytkowych odpowiadających określono 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, każdego z badanych gatunków stali, pokazano i omówiono w rozdziale 3.



Rysunek 134. 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

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, wobec czego ich znajomość nie jest niezbędna do oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji. Istotnym jest dobór odpowiednich narzędzi i metod badawczych, które umożliwią ujawnienie cech badanego materiału niezbędnych dla oceny. Znajomość warunków eksploatacji może być jednak pomocna w definiowaniu warunków i prognozowaniu czasu dalszej eksploatacji.

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 zatem odpowiadający im stopień wyczerpania, a jemu z kolei przyporządkowano główne klasy struktury, ujmujące klasy procesów składowych zmian w strukturze badanych stali. Na tej podstawie opracowano klasyfikację stanu badanych stali pracujących w warunkach pełzania, uwzględniając zmiany struktury. Znając stopień wyczerpania stali można oszacować bezpieczny czas dalszej eksploatacji elementów z badanych stali dla podanych przez eksploatatora warunków roboczych dalszej pracy. W szczególności w opracowanej klasyfikacji ujęto następujące elementy zmian w strukturze:

- związane z rozpadem perlitu S_1 dla stali o strukturze: ferrytyczno-perlitycznej w stanie wyjściowym,
- związane z rozpadem bainitu S_1^* dla stali o strukturze: ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym,
- 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,
- związane z rozwojem wewnętrznych uszkodzeń ω^* dla stali o strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym.

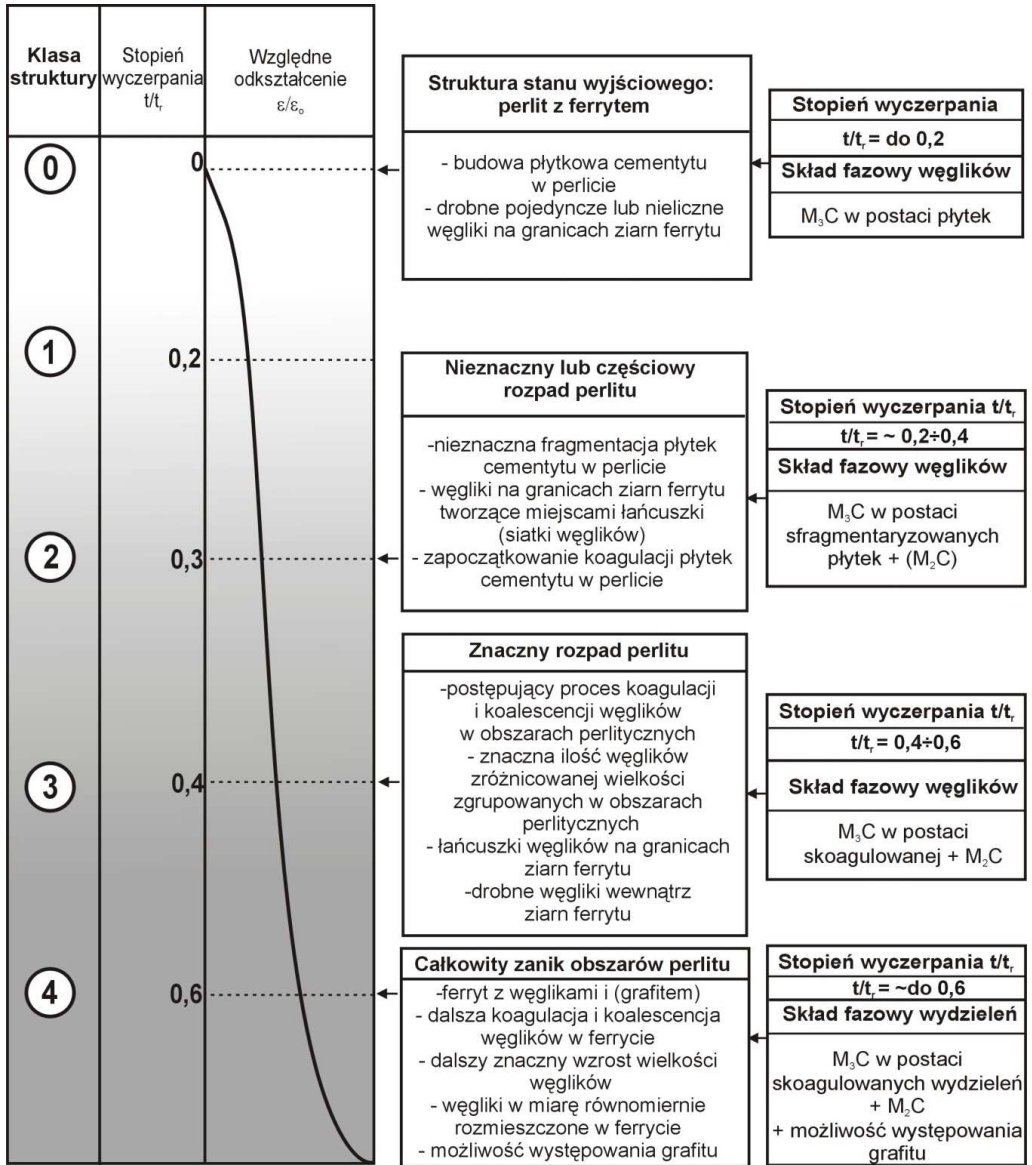
Opracowana klasyfikacja dla każdej z badanych stali składa się dwóch części. Pierwsza część klasyfikacji obejmuje badane stale po eksploatacji bez wewnętrznych uszkodzeń. Schematy będące ilustracją opracowanej tej części klasyfikacji przedstawiono odpowiednio

dla: stali 16Mo3 na rysunku 135, stali 13CrMo4-5 na rysunku 136, stali 10CrMo9-10 na rysunku 137, stali 14MoV6-3 na rysunku 138 oraz stali X20CrMoV11-1 na rysunku 139. Drugą część klasyfikacji stanowią zmiany w strukturze w zależności od stopnia wyczerpania opracowane dla wymienionych materiałów z uszkodzeniami wewnętrznymi. Schematy będące ilustracją tej części klasyfikacji przedstawiono odpowiednio dla: stali 16Mo3, stali 13CrMo4-5, stali 10CrMo9-10 oraz stali 14MoV6-3 na rysunku 140, a dla stali X20CrMoV11-1 na rysunku 141.

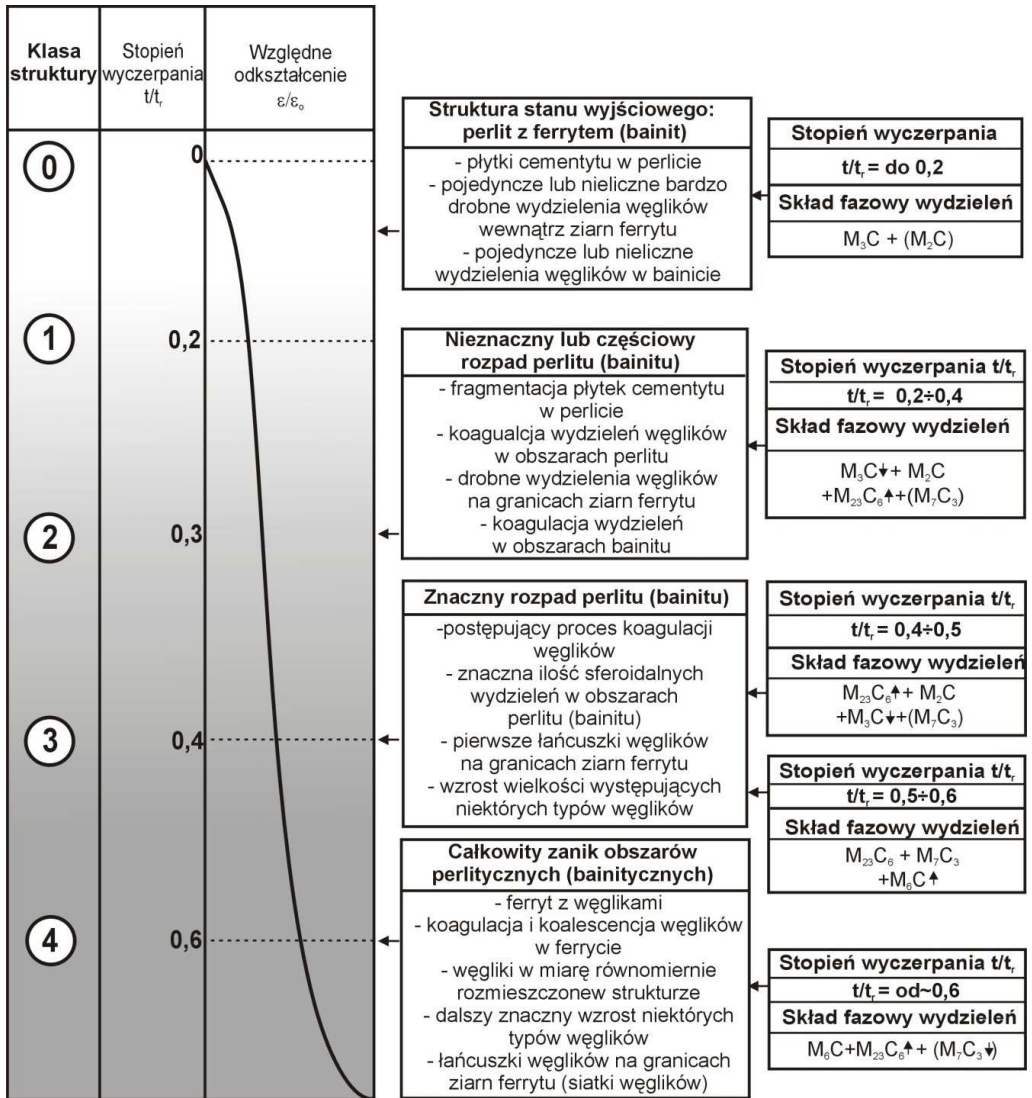
Dla zmian struktury i jej stanów zdefiniowanych dla kolejnych etapów sporządzonych klasyfikacji, opracowano, na podstawie wyników badań zaprezentowanych w rozdziale 3 niniejszej monografii, wzorce struktury ilustrujące etapy tych zmian w badanych stalach. Wzorce zaprezentowano w licznych opracowaniach własnych i publikacjach autora [12, 16, 20, 26-28, 33, 34, 38, 40, 50, 51, 56-58, 101, 104, 105].

Schematy zmian struktury badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania obejmujące klasy rozpadu perlitu/bainitu lub martenzytu, rozwoju procesów wydzieleniowych oraz rozwoju uszkodzeń wewnętrznych w zależności od stopnia wyczerpania odniesione do głównej klasy struktury przedstawione na tle krzywej pełzania zaprezentowano na rysunku 142 dla stali niskostopowych o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej z ewentualnym udziałem perlitu oraz na rysunku 143 dla stali wysokochromowej o strukturze odpuszczonego martenzytu. Zmianom struktury przypisano zatem odpowiadający im stopień wyczerpania, natomiast stopniowi wyczerpania przyporządkowano główną klasę struktury, ujmującą klasy procesów składowych zmian w strukturze.

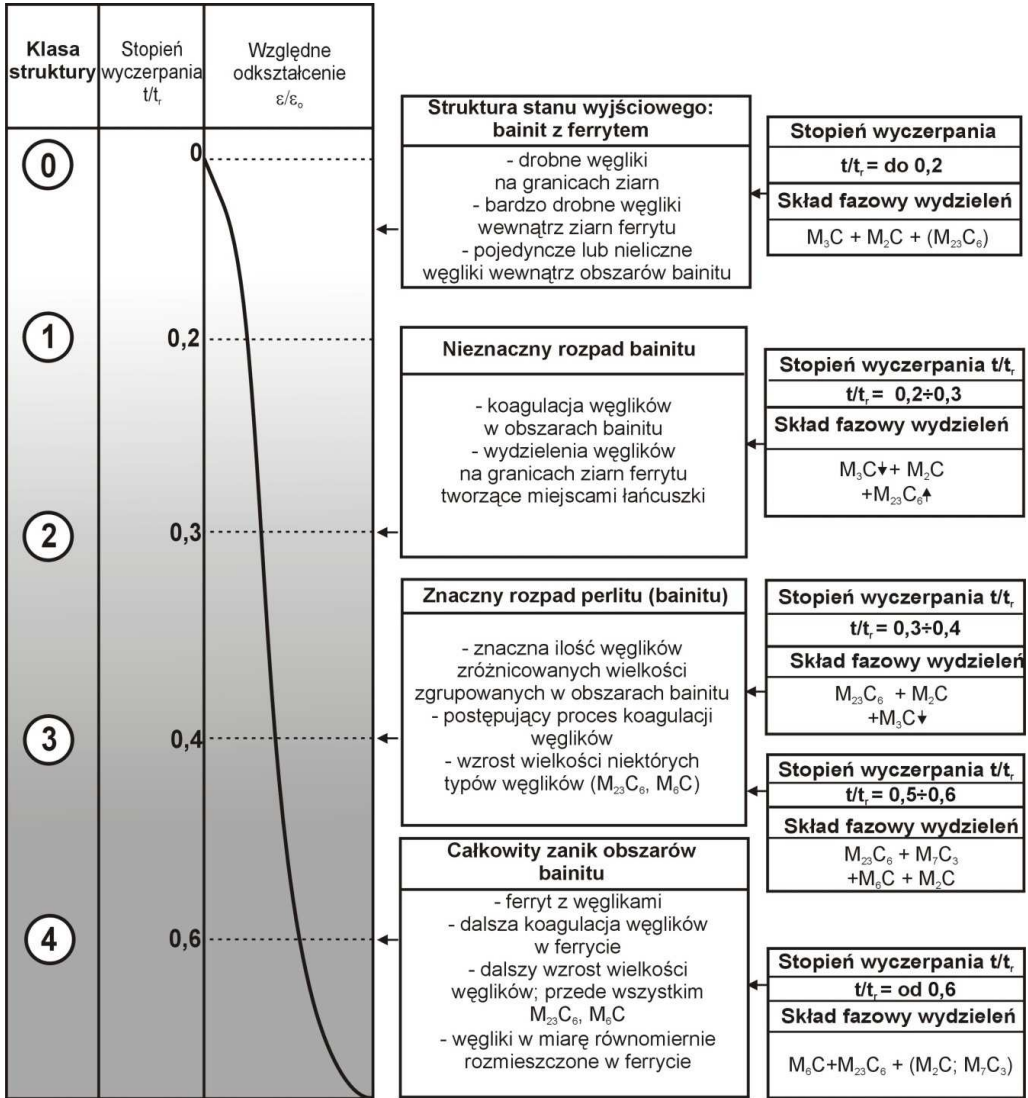
Metodologię oceny stanu badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych tzn.: zmian w strukturze perlitu, bainitu lub martenzytu, zmian w zakresie rozwoju procesów wydzieleniowych oraz zmian w zakresie rozwoju uszkodzeń wewnętrznych odniesionych do stopnia wyczerpania przedstawiono na rysunkach 144-148. 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.



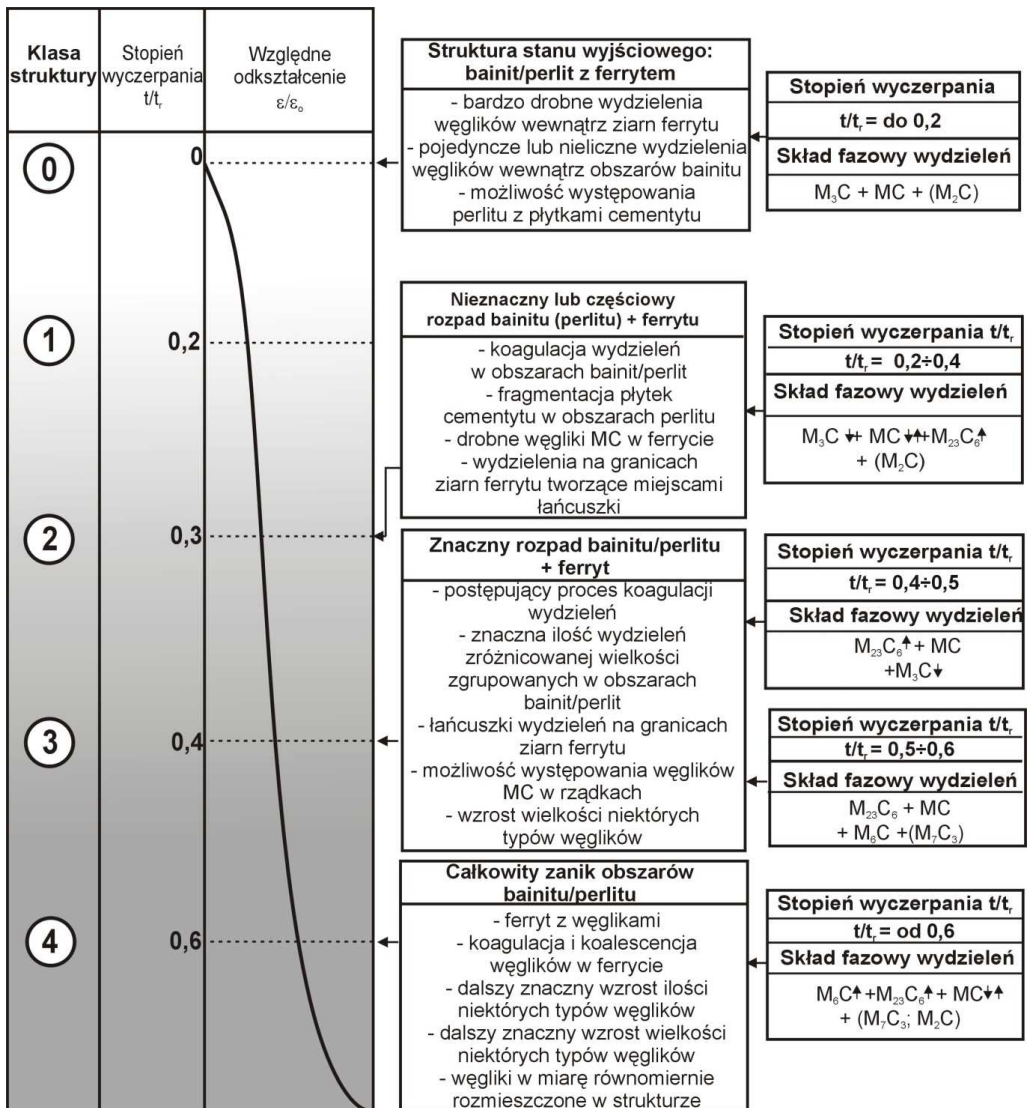
Rysunek 135. Klasy struktury w zależności od stanu jej podstawowych składników i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania i względnym odkształceniem po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania stali 16Mo3 bez wewnętrznych uszkodzeń



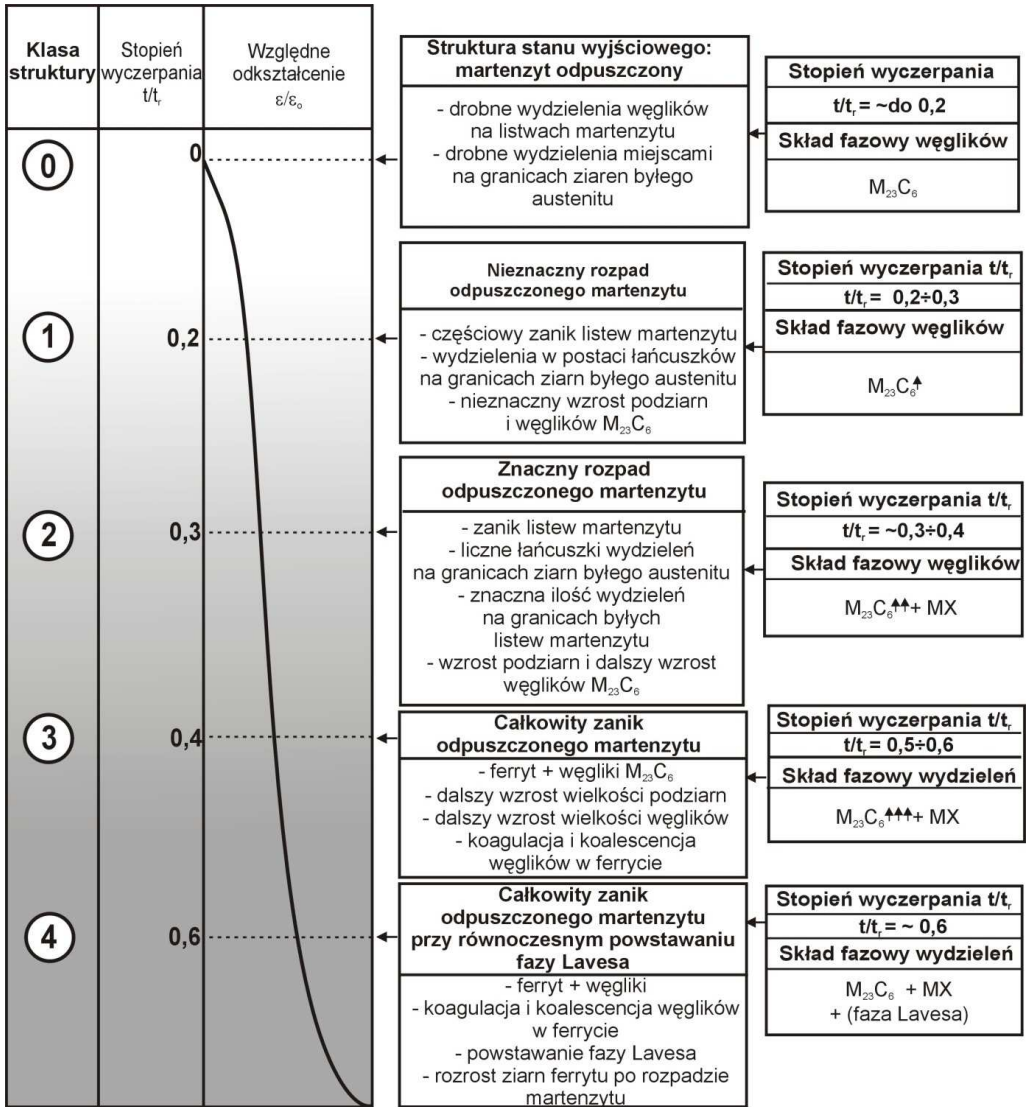
Rysunek 136. Klasy struktury w zależności od stanu jej podstawowych składników i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania i względnym odkształceniem po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania stali 13CrMo4-5 bez wewnętrznych uszkodzeń



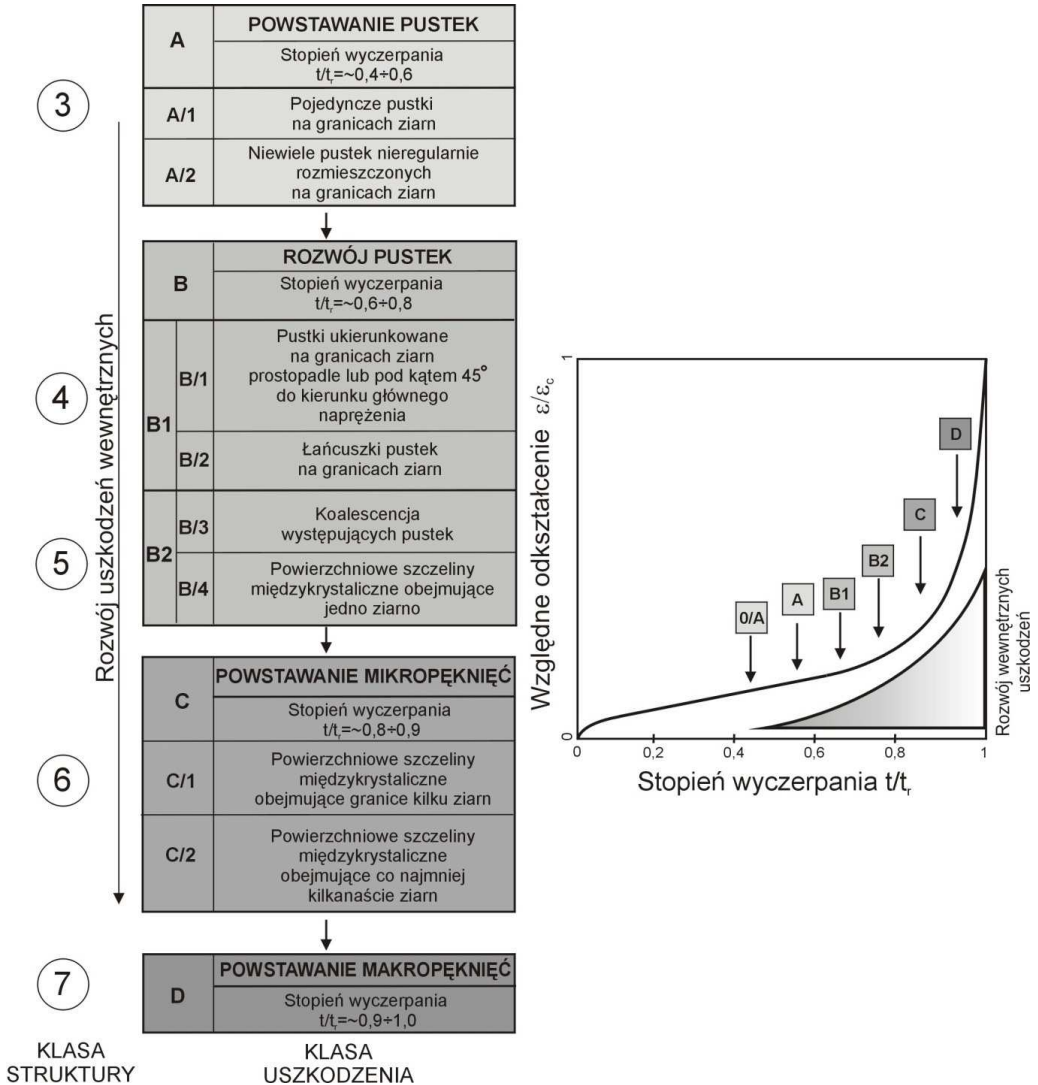
Rysunek 137. Klasy struktury w zależności od stanu jej podstawowych składników i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania i względnym odkształceniem po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania stali 10CrMo9-10 bez wewnętrznych uszkodzeń



Rysunek 138. Klasy struktury w zależności od stanu jej podstawowych składników i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania i względnym odkształceniem po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania stali 14MoV6-3 bez wewnętrznych uszkodzeń

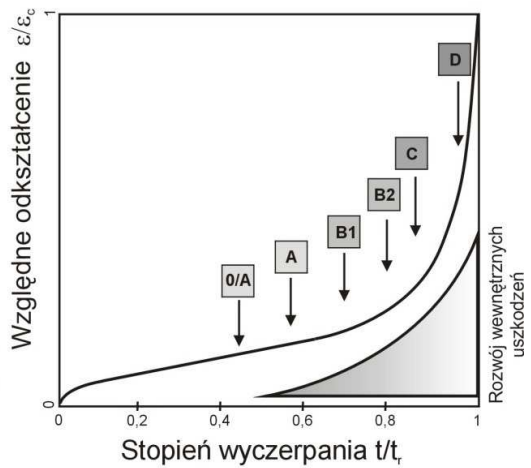


Rysunek 139. Klasy struktury w zależności od stanu jej podstawowych składników i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania i względnym odkształceniem po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania stali X20CrMoV11-1 bez wewnętrznych uszkodzeń

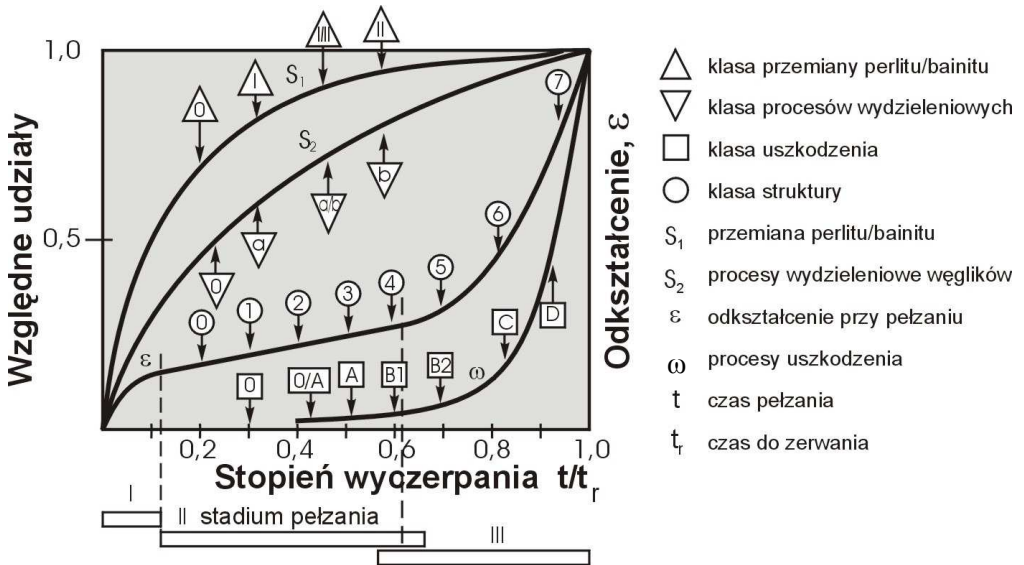


Rysunek 140. Klasy struktury w wyniku rozwoju uszkodzeń wewnętrznych w zależności od stopnia wyczerpania w stalach 16Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 oraz 14MoV6-3 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania

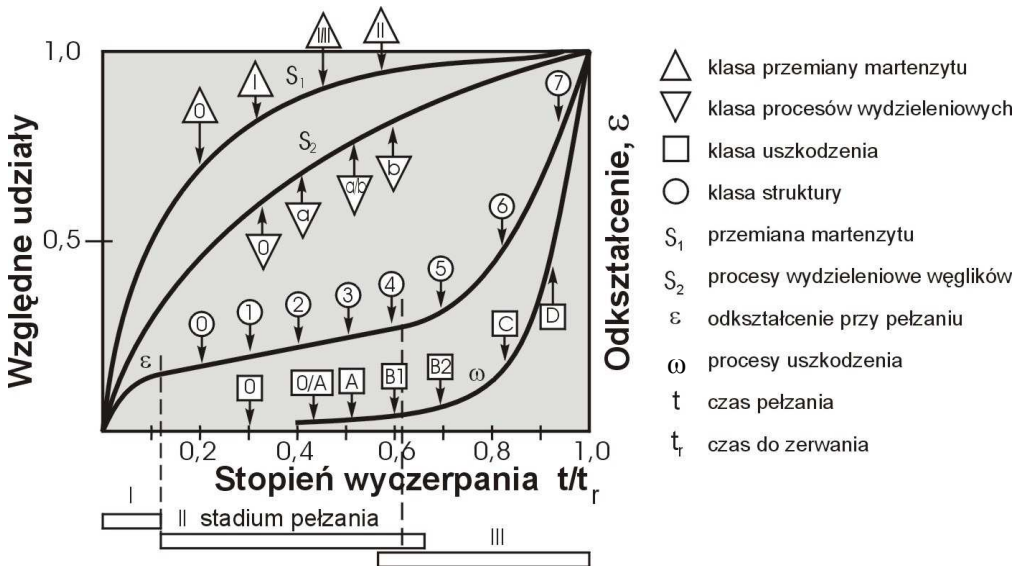
4	POWSTAWIANIE PUSTEK		
	A	Stopień wyczerpania $t/t_c \approx -0,4+0,6$	
	A/1	Pojedyncze pustyki na granicach listew martenzytu i ziarn byłego austenitu	
	A/2	Niewiele pustyków nieregularnie rozmieszczonych na granicach listew i/lub ziarn byłego austenitu	
5	ROZWÓJ PUSTEK		
	B	Stopień wyczerpania $t/t_c \approx -0,6+0,8$	
	B1	B/1	Pustyki ukierunkowane na granicach ziarn byłego austenitu i tworzących się subziarn prostopadle lub pod kątem 45° do kierunku głównego naprężenia
		B/2	Łańcuszki na granicach ziarn byłego austenitu i tworzących się subziarn
	B2	B/3	Koalescencja występujących pustyków
B/4		Szczeliny międzykrystaliczne obejmujące jedno ziarno	
6	POWSTAWIANIE MIKROPEKNIĘĆ		
	C	Stopień wyczerpania $t/t_c \approx -0,8+0,9$	
	C/1	Szczeliny międzykrystaliczne obejmujące granice kilku ziarn	
	C/2	Szczeliny międzykrystaliczne obejmujące granice co najmniej kilkanaście ziarn	
7	POWSTAWIANIE MAKROPEKNIĘĆ		
	D	Stopień wyczerpania $t/t_c \approx -0,9+1,0$	
KLASA STRUKTURY		KLASA USZKODZENIA	



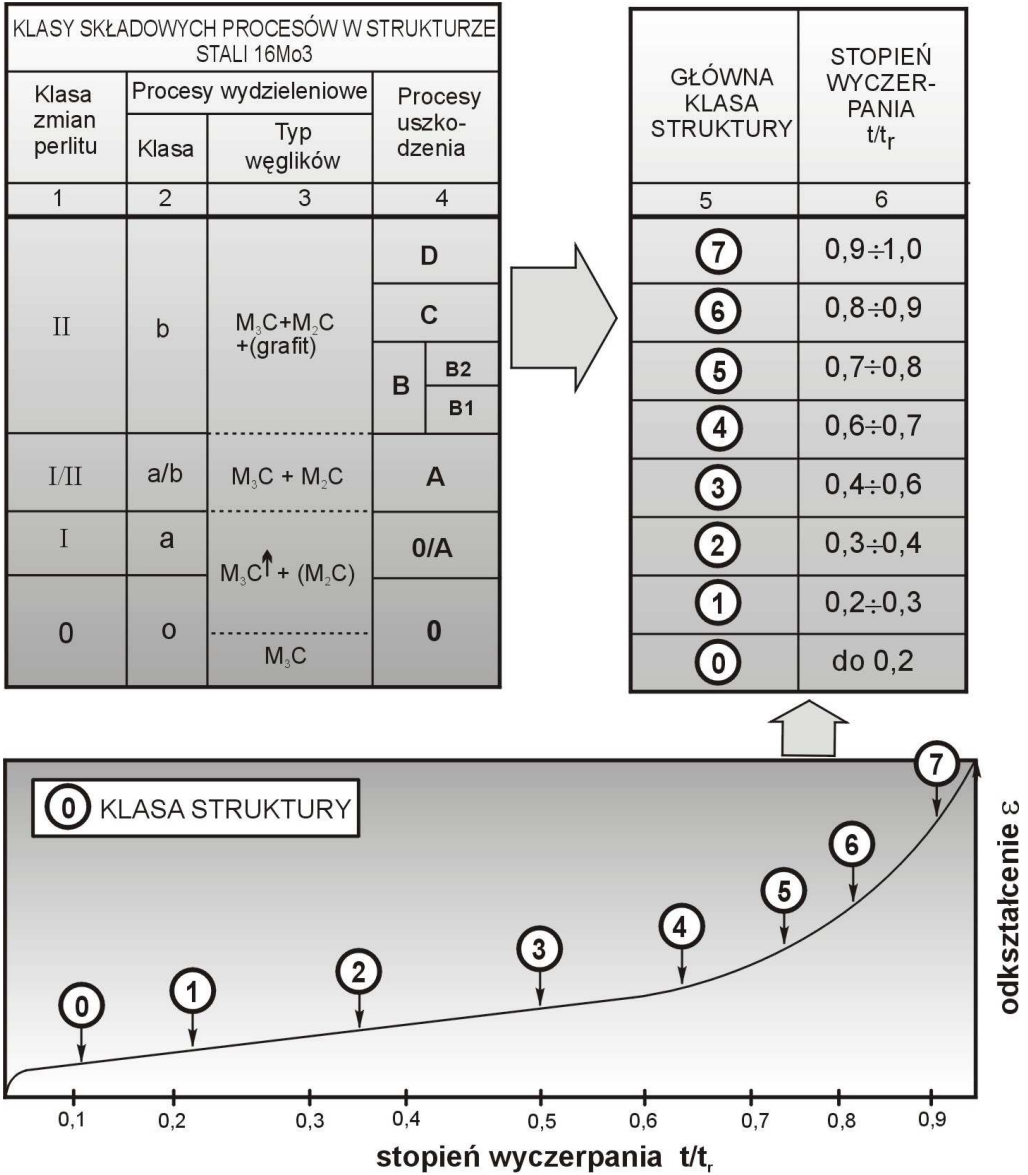
Rysunek 141. Klasyfikacja struktury w wyniku rozwoju uszkodzeń wewnętrznych w zależności od stopnia wyczerpania w stali X20CrMoV11-1 pracującej w warunkach pełzania



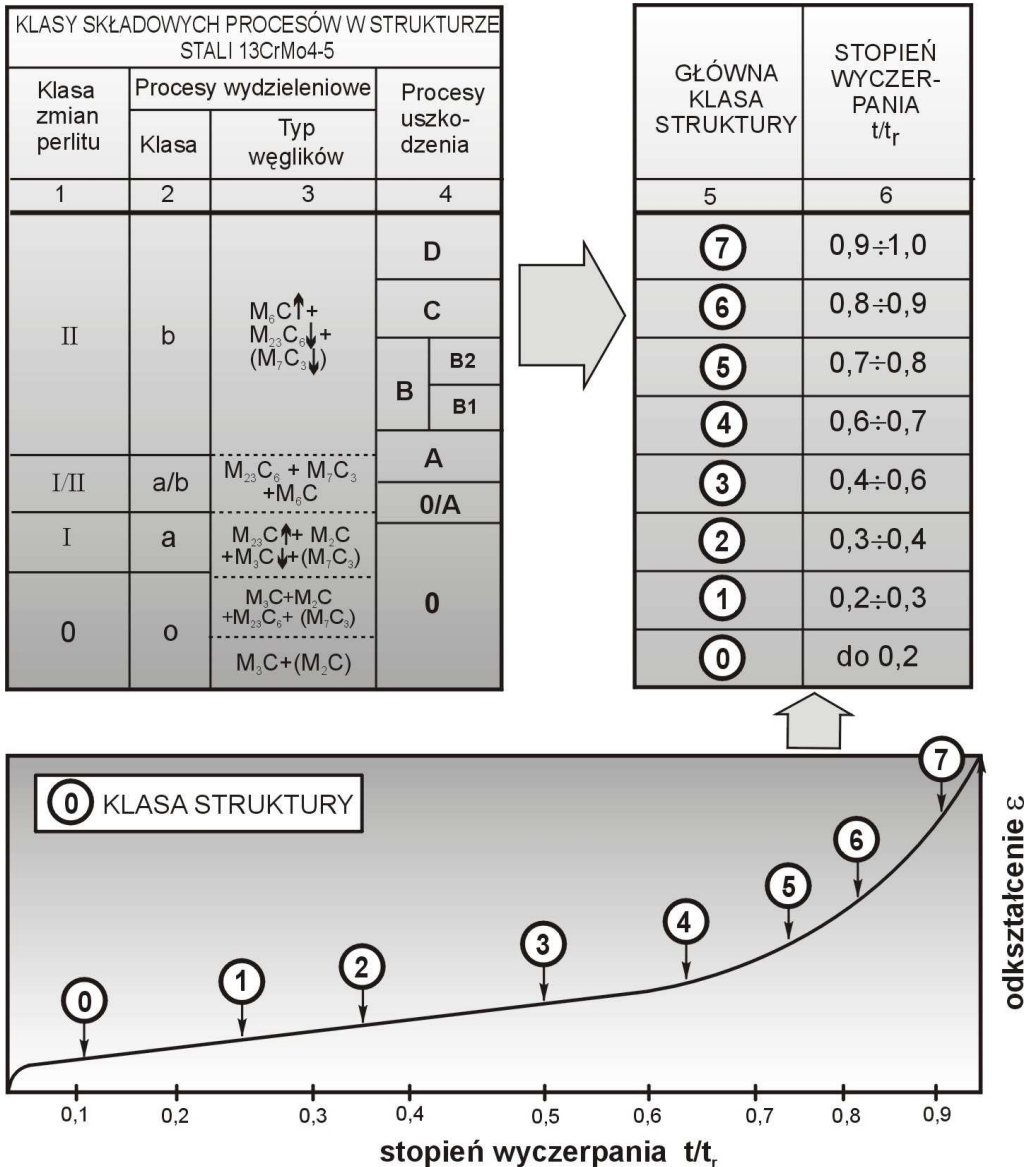
Rysunek 142. Sposób klasyfikacji stanu materiału na podstawie zmian w strukturze w oparciu o składowe procesy w odniesieniu do stopnia wyczerpania dla stali 16Mo3, 14MoV6-3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej w stanie wyjściowym, pracujących w warunkach pełzania



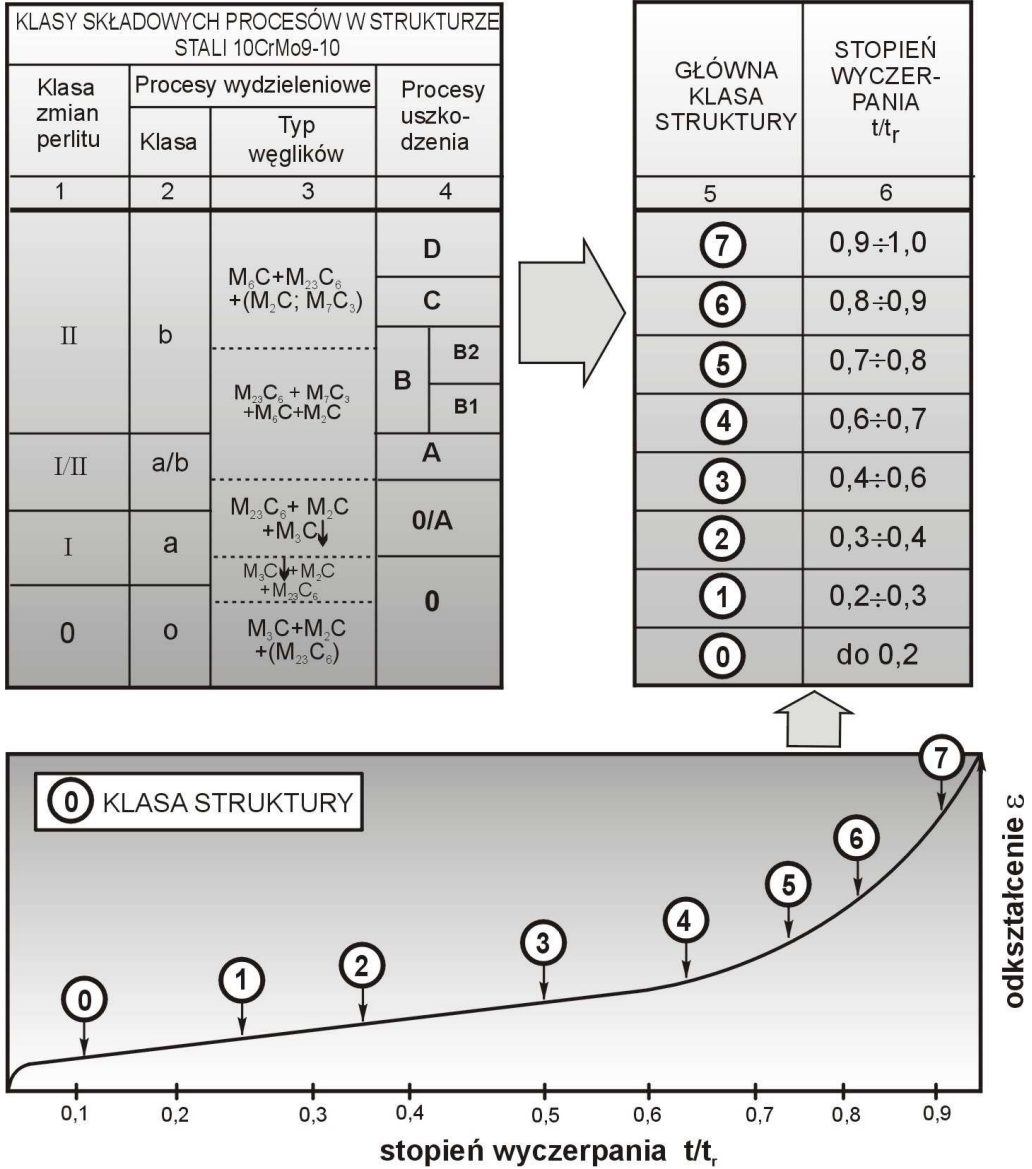
Rysunek 143. Sposób klasyfikacji stanu materiału na podstawie zmian w strukturze w oparciu o składowe procesy w odniesieniu do stopnia wyczerpania dla stali X20CrMoV11-1 o strukturze martenzytu odpuszczonego w stanie wyjściowym, pracującej w warunkach pełzania



Rysunek 144. Metodologia oceny stanu stali 16Mo3 pracującej w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania; () możliwość występowania

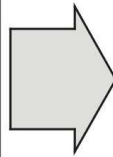


Rysunek 145. Metodologia oceny stanu stali 13CrMo4-5 pracującej w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania; () możliwość występowania

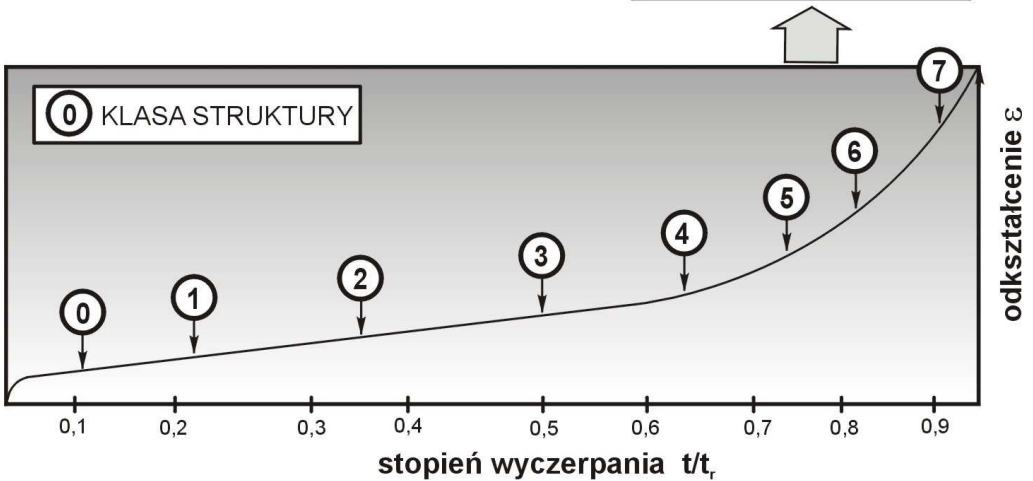


Rysunek 146. Metodologia oceny stanu stali 10CrMo9-10 pracującej w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania; () możliwość występowania

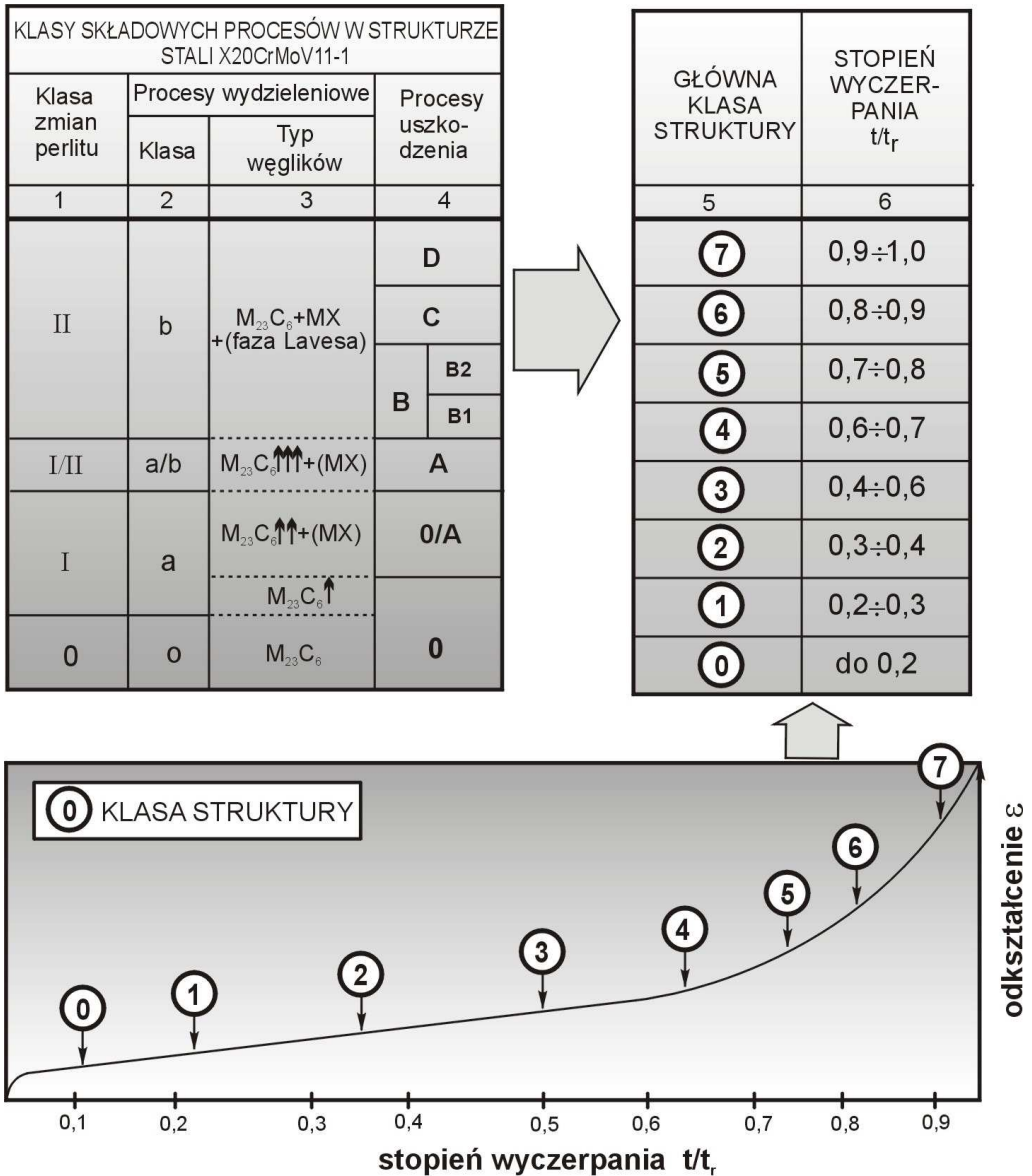
KLASY SKŁADOWYCH PROCESÓW W STRUKTURZE STALI 14MoV6-3			
Klasa zmian perlitu	Procesy wydzieleniowe		Procesy uszkodzenia
	Klasa	Typ węglików	
1	2	3	4
II	b	$M_6C \uparrow + M_{23}C_6 \uparrow$ $+ MC \downarrow$ $+(M_7C_3; M_2C)$	D
			C
			B
I/II	a/b	$M_{23}C_6 + MC +$ $M_6C + (M_7C_3)$	A
I	a	$M_{23}C_6 \uparrow + MC +$ $M_6C \downarrow$	0/A
0	o	$M_6C \downarrow + MC \downarrow$ $+ M_{23}C_6 \uparrow + (M_2C)$	0



GŁÓWNA KLASA STRUKTURY	STOPIEŃ WYCZERPANIA t/t _r
5	6
7	0,9 ÷ 1,0
6	0,8 ÷ 0,9
5	0,7 ÷ 0,8
4	0,6 ÷ 0,7
3	0,4 ÷ 0,6
2	0,3 ÷ 0,4
1	0,2 ÷ 0,3
0	do 0,2



Rysunek 147. Metodologia oceny stanu stali 14MoV6-3 pracującej w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania; () możliwość występowania



Rysunek 148. Metodologia oceny stanu stali X20CrMoV11-1 pracującej w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania; () możliwość występowania

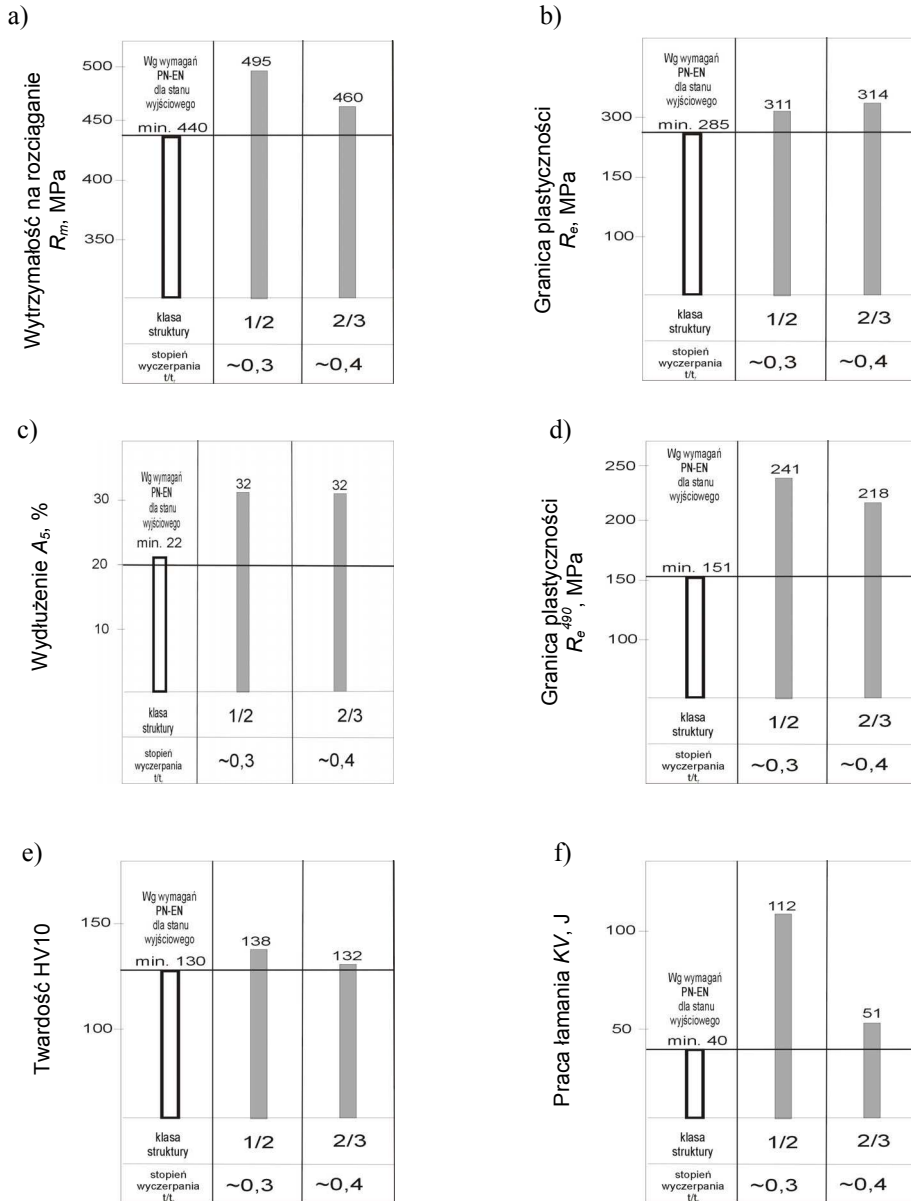
Klasyfikacja zmian struktury w wyniku pełzania umożliwiła zbudowanie elementów charakterystyk materiałowych będących zależnością własności mechanicznych od klasy struktury i stopnia wyczerpania. Charakterystyki te pozwalają ocenę stanu badanych materiałów po eksploatacji w warunkach pełzania, oprócz oszacowanej trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzalnej, wzbogacić o oszacowany poziom innych własności użytkowych mających wpływ na zachowanie się badanych materiałów w czasie dalszej eksploatacji, szczególnie w czasie ciśnieniowych prób wodnych oraz uruchamiania i odstawiania urządzeń. Poniżej przedstawiono przykłady takich charakterystyk dla gatunków stali będących przedmiotem badań. Zależność własności mechanicznych, a w tym: wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności i wydłużenia w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, granicy plastyczności w podwyższonej temperaturze, twardości oraz udarności w temperaturze pokojowej od klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania zbudowano dla materiałów komór wylotowych przegrzewaczy pary części ciśnieniowej kotła ze stali: 16Mo3 (rys. 149), 13CrMo4-5 (rys. 150), 10CrMo9-10 (rys. 151) i X20CrMoV11-1 (rys. 152) oraz głównych rurociągów parowych ze stali 14MoV6-3 (rys. 153) będących grubościennymi elementami kotła ogrzewanymi przepływającym od wewnątrz czynnikiem. Podobne zależności sporządzono dla materiałów węzownic przegrzewaczy pary części ciśnieniowej kotła ze stali: 16Mo3 (rys. 154), 13CrMo4-5 (rys. 155), 10CrMo9-10 (rys. 156) i X20CrMoV11-1 (rys. 157) będących cienkościennymi elementami ogrzewanymi od zewnątrz spalinami. Dla elementów cienkościennych nie sporządzono zależności dla udarności ze względu na zbyt małą grubość ścianki rur węzownic przegrzewaczy pary, aby wykonać próbki do takich badań. Uzyskane wartości dla materiałów po eksploatacji odniesiono do wymaganych wartości dla rur w stanie wyjściowym. Istotną cechą niezbędną w ocenie stanu materiału jest również ocena zdolności materiału do odkształceń w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej, miarą której jest między innymi poziom temperatury przejścia w stan kruchy. Zależność wartości temperatury przejścia w stan kruchy od klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania dla wybranych spośród badanych stali przedstawiono na rysunku 158a oraz w tabelicy 18 dla stali 14MoV6-3 i na rysunku 158b oraz w tabelicy 19 dla stali X20CrMoV11-1. Wybrane spośród badanych stali 14MoV6-3 i X20CrMoV11-1 to te, które mają największe skłonności do utraty własności ciągliwych w wyniku eksploatacji.

Zasadnicze znaczenie mają jednak charakterystyki własności na pełzanie. W dalszej części niniejszej pracy przedstawiono wybrane charakterystyki resztkowej wytrzymałości na

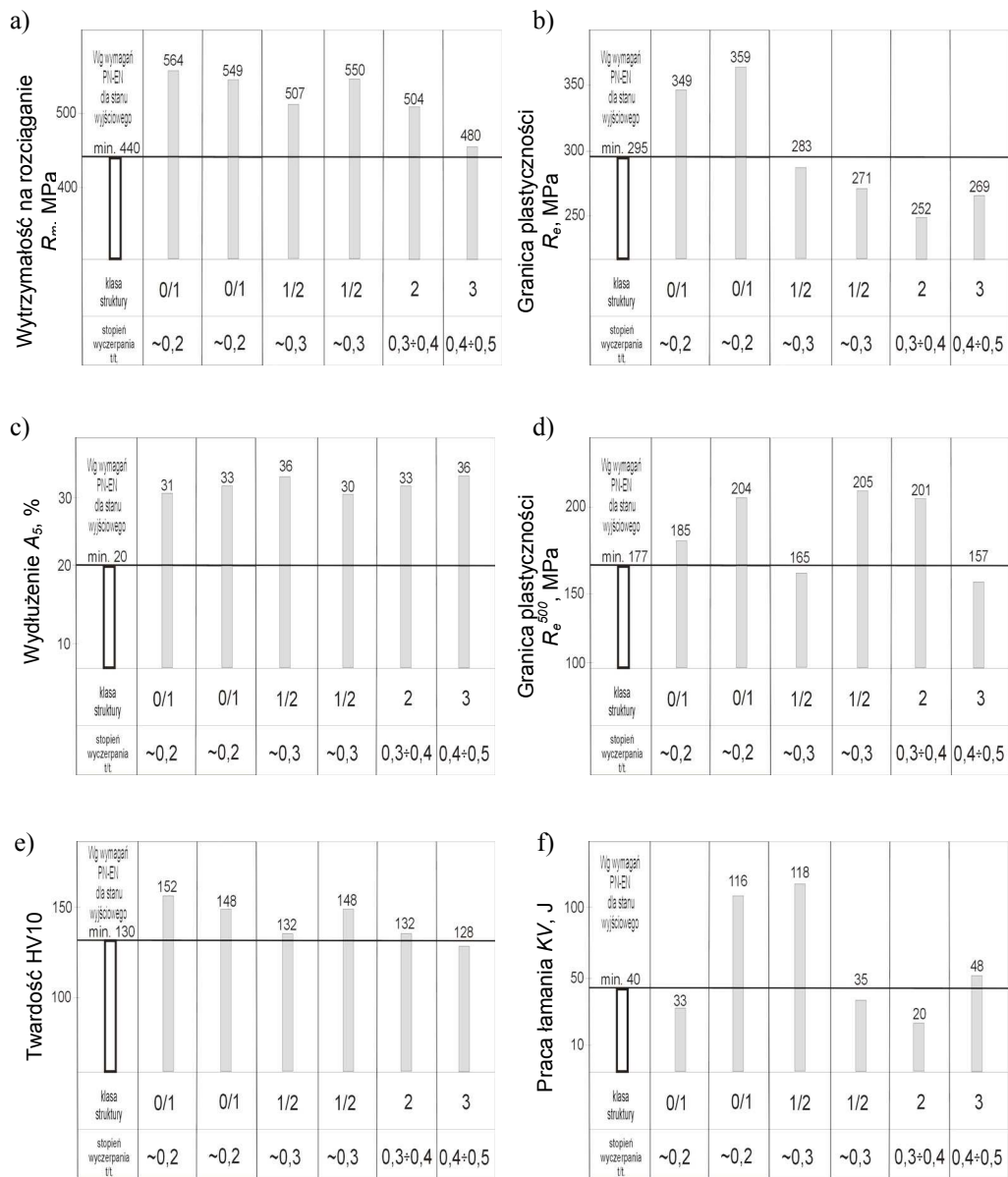
pełzanie, w postaci zależności naprężenia od parametru Larsona-Millera $\{\log \sigma_b = f(L-M)\}$, dla różnych stanów struktury i o różnym stanie rozwoju procesów wydzieleniowych węglików materiałów po eksploatacji, odpowiadających różnym klasom struktury o różnym stopniu wyczerpania. Na rysunku 159 przedstawiono charakterystyki resztkowej wytrzymałości na pełzanie wycinków komór wylotowych przegrzewaczy pary po różnym czasie eksploatacji wykonanych ze stali 13CrMo4-5, na rysunku 160 wycinków komór wylotowych przegrzewaczy pary ze stali 10CrMo9-10 oraz na rysunku 161 wycinków elementów głównych rurociągów parowych części ciśnieniowej kotłów ze stali 14MoV6-3. Trwałość resztkową wyznaczono z opracowanych charakterystyk dla przewidywanej temperatury i czasu dalszej eksploatacji oraz oszacowano na podstawie stopnia wyczerpania określonego dla oznaczonej klasy struktury celem dokonania ich porównania. Uzyskane wyniki zestawiono dla wybranych elementów z wybranych stali odpowiednio dla wycinków ze stali: 13CrMo4-5 w tablicy 20, 10CrMo9-10 w tablicy 21 oraz 14MoV6-3 w tablicy 22.

Na przykładzie wycinków elementów głównych rurociągów pary świeżej wykonanych ze stali 14MoV63 oraz wycinków komór wylotowych przegrzewaczy pary wykonanych ze stali X20CrMoV11-1 po eksploatacji w warunkach pełzania przedstawiono odpowiednio na rysunku 162 i 163 porównanie charakterystyki trwałości resztkowej w postaci zależności czasu do zerwania w próbie pełzania od temperatury badania przy stałym poziomie naprężenia odpowiadającym eksploatacyjnemu $\{\log t_{re} = f(T_e) \text{ przy } \sigma_e = \text{const}\}$ uzyskanych w oparciu o skrócone próby pełzania. Metodologię wyznaczania trwałości resztkowej w oparciu o wyniki skróconych prób pełzania omówiono w rozdziale 3 niniejszej monografii. Wyznaczoną na podstawie sporządzonych charakterystyk trwałość resztkową dla materiałów o różnych klasach struktury i odpowiadających im stopni wyczerpania zestawiono odpowiednio w tablicy 23 dla wycinków po eksploatacji ze stali 14MoV63 oraz w tablicy 24 dla wycinków po eksploatacji ze stali X20CrMoV11-1.

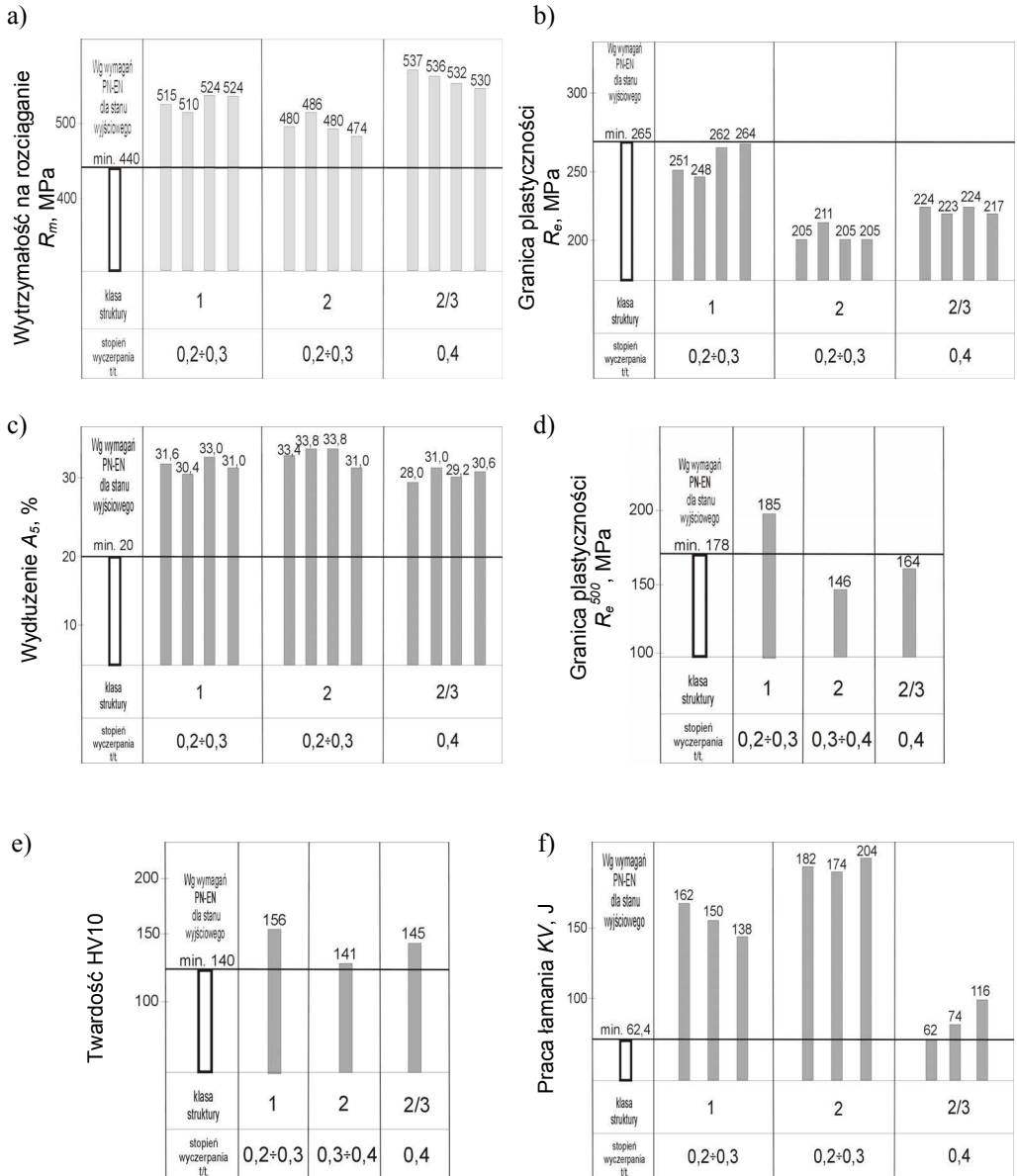
Dla wybranych wycinków komór wylotowych przegrzewaczy pary kotłów wysokopiętnych po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowych stali 13CrMo4-5 oraz 10CrMo9-10 sporządzono zależności prędkości pełzania w stanie stacjonarnym od naprężenia w stałej temperaturze odpowiadającej eksploatacyjnej $\{\log \dot{\epsilon}_s = f(\sigma) \text{ przy } T_b = T_e \text{ const}\}$ dla różnych klas struktury i odpowiadającego im stopnia wyczerpania.



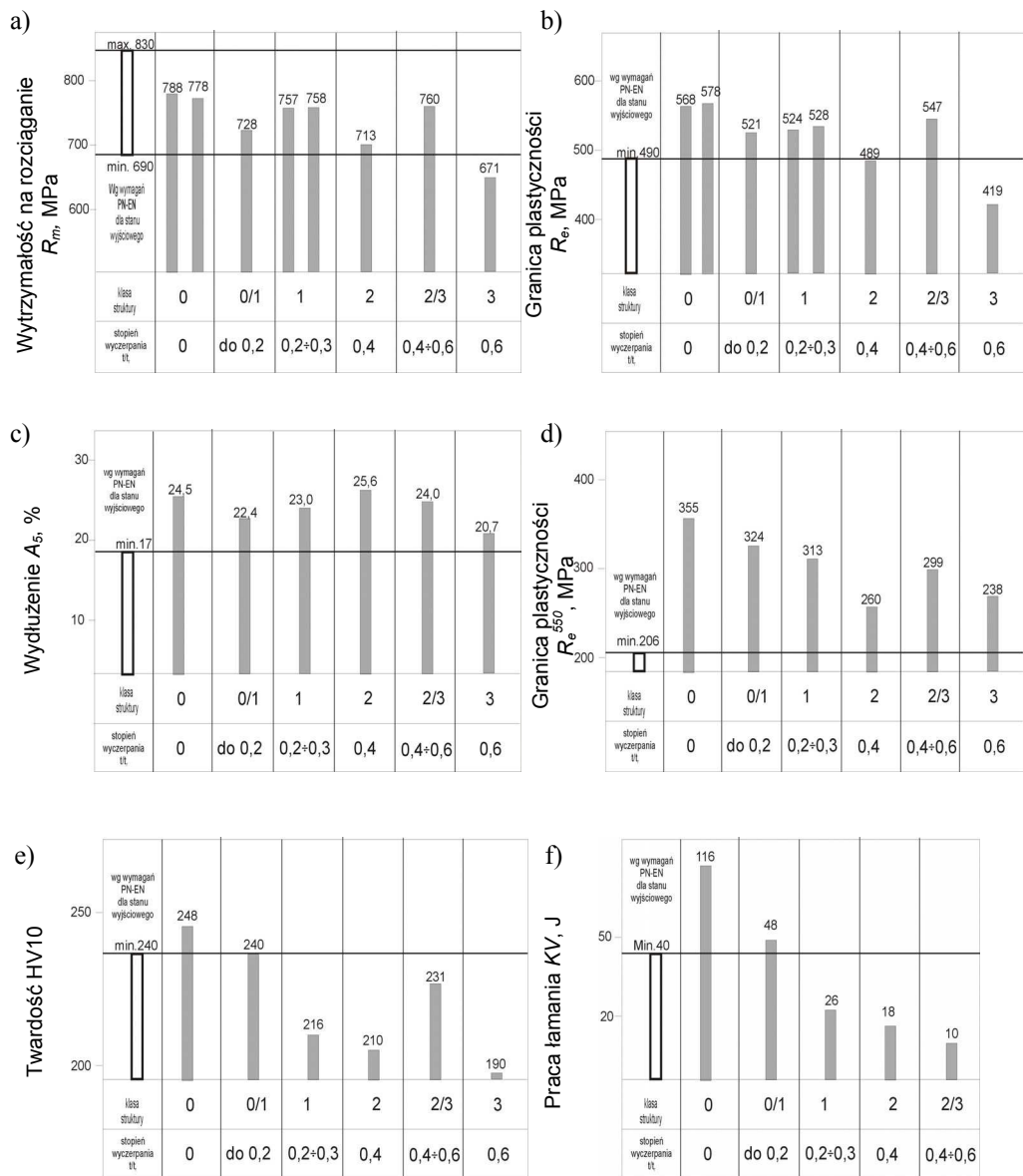
Rysunek 149. Własności mechaniczne wycinków komór wylotowych przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 16Mo3 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania: a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10, f) udarność w temperaturze pokojowej



Rysunek 150. Własności mechaniczne wycinków komór wylotowych przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 13CrMo4-5 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania: a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10, f) udarność w temperaturze pokojowej

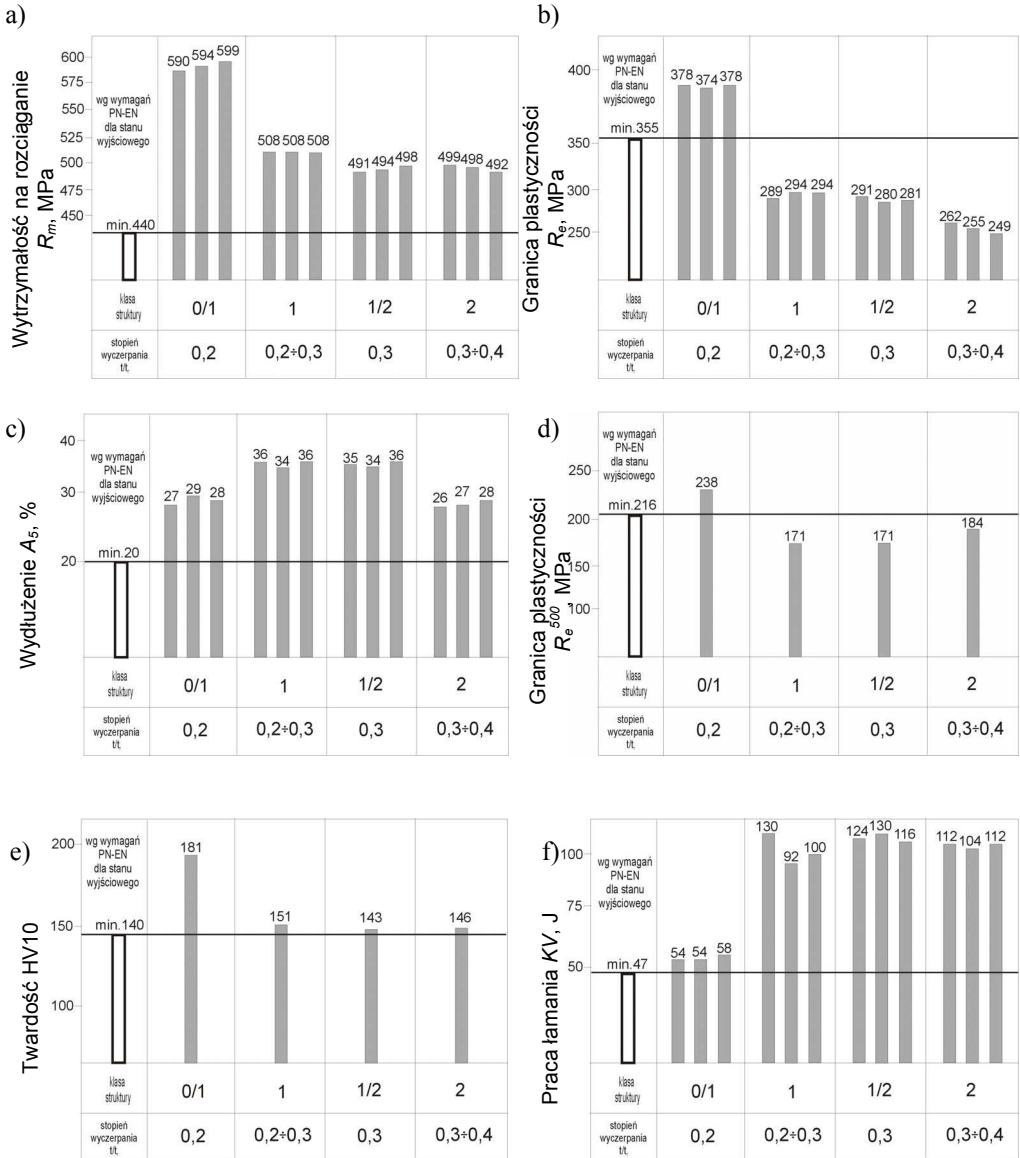


Rysunek 151. Własności mechaniczne wycinków komór wylotowych przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 10CrMo9-10 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania: a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10, f) udarność w temperaturze pokojowej

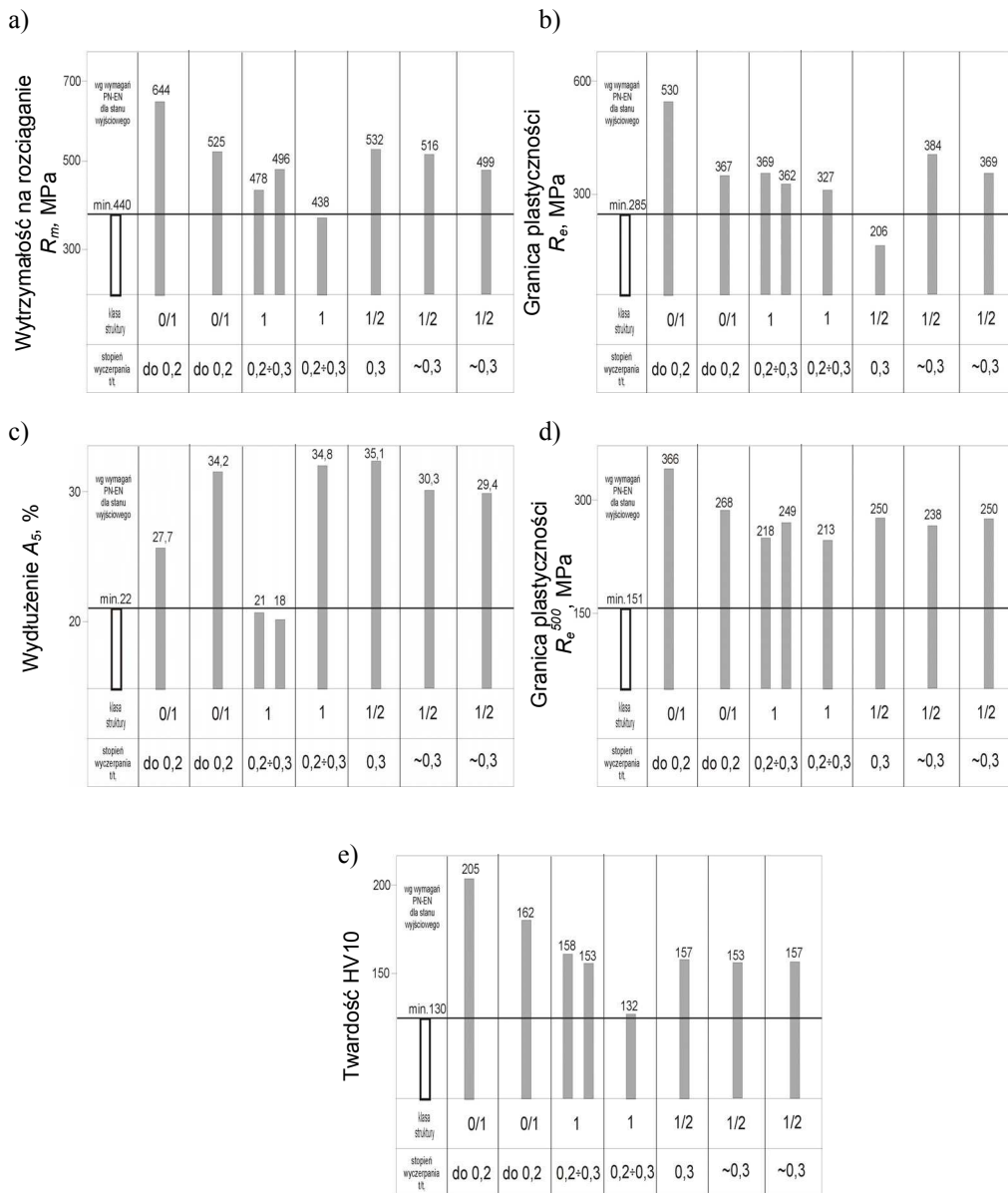


Rysunek 152. Własności mechaniczne wycinków komór wylotowych przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali X20CrMoV11-1 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania:

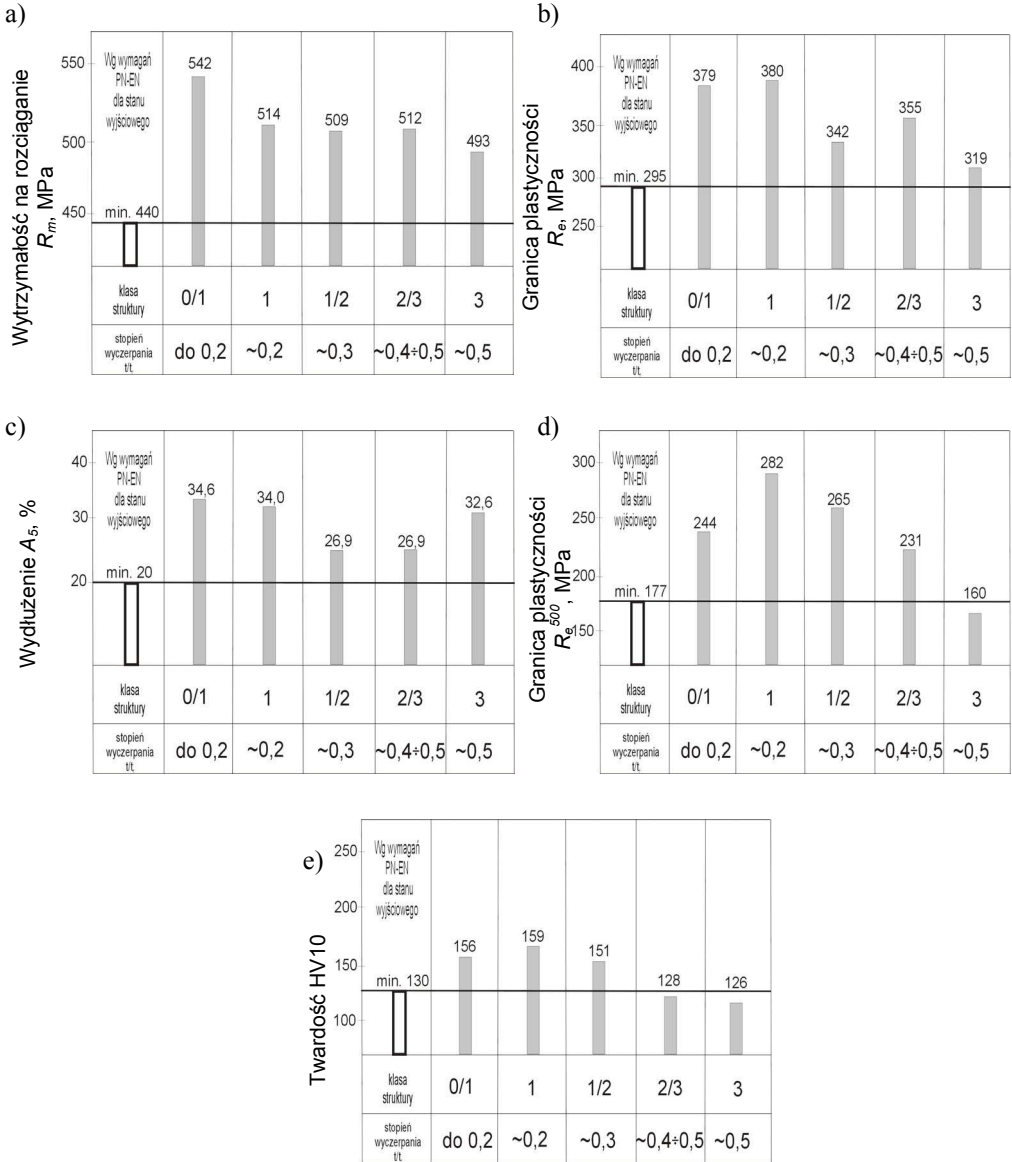
- a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej,
- b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej,
- c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej,
- d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze,
- e) twardość HV10,
- f) udarność w temperaturze pokojowej



Rysunek 153. Własności mechaniczne wycinków głównych rurociągów parowych kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 14MoV6-3 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania: a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10, f) udarność w temperaturze pokojowej

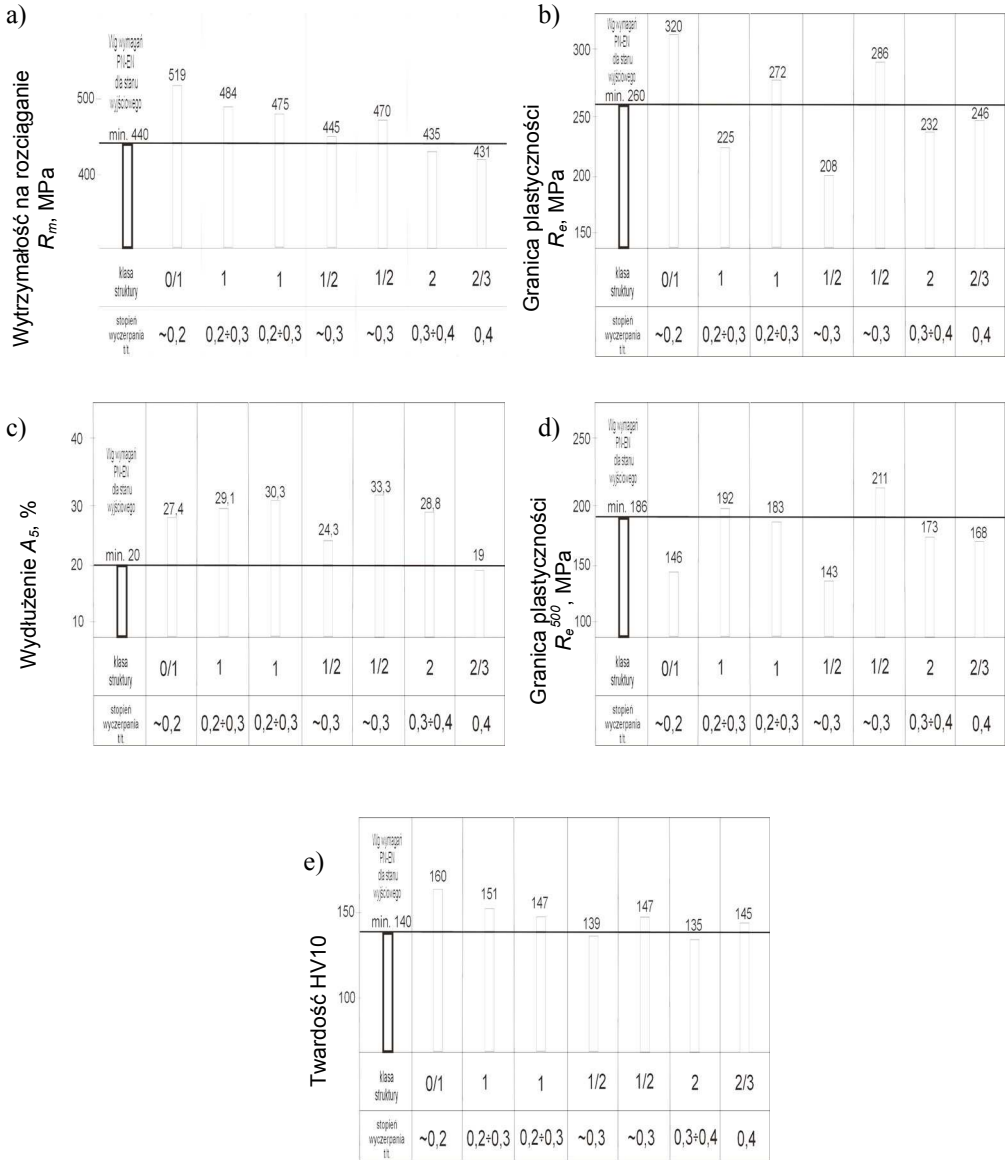


Rysunek 154. Własności mechaniczne wycinków węzownic przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 16Mo3 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania:
 a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10



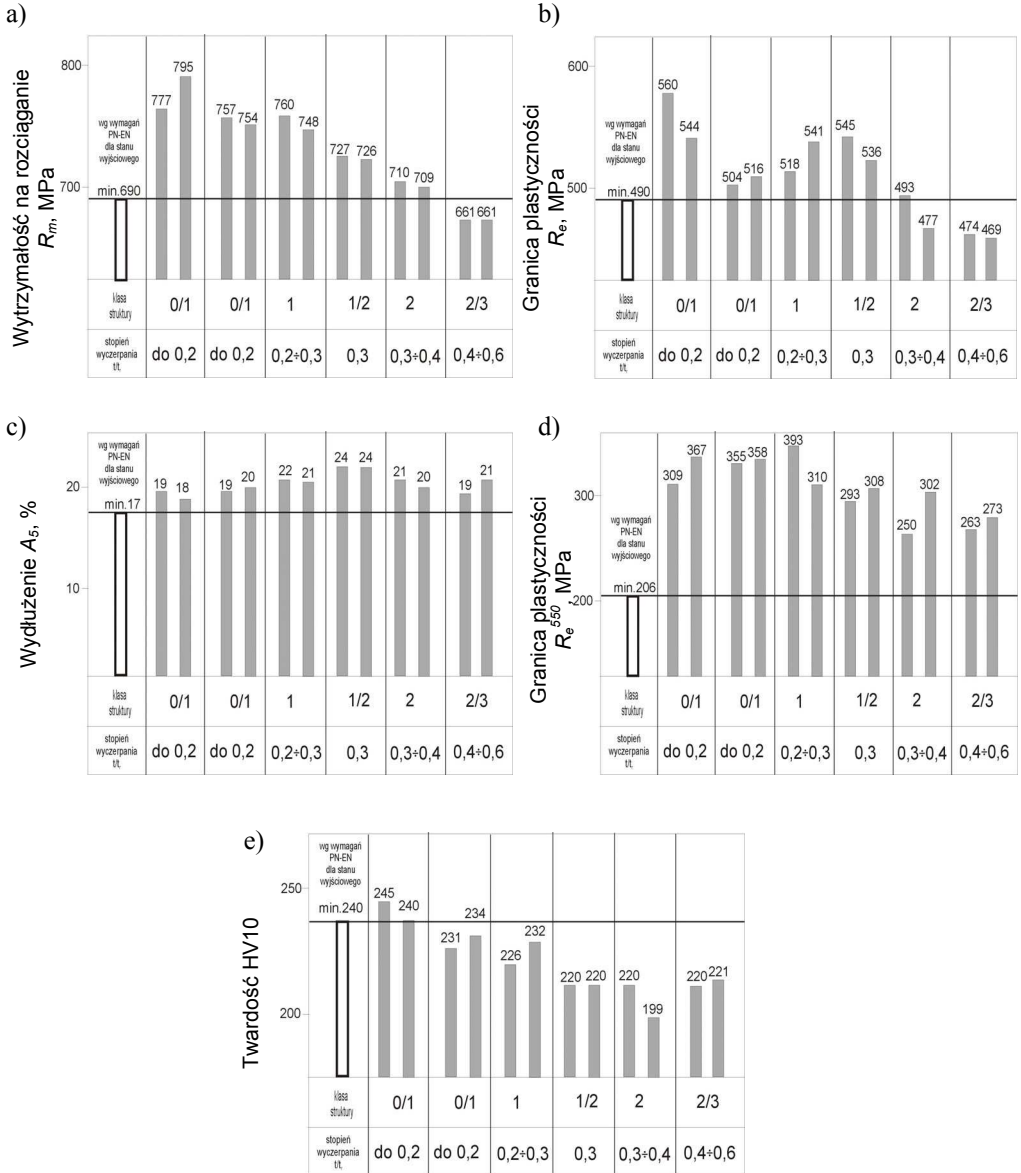
Rysunek 155. Własności mechaniczne wycinków węzownic przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 13CrMo4-5 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania:

- a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10



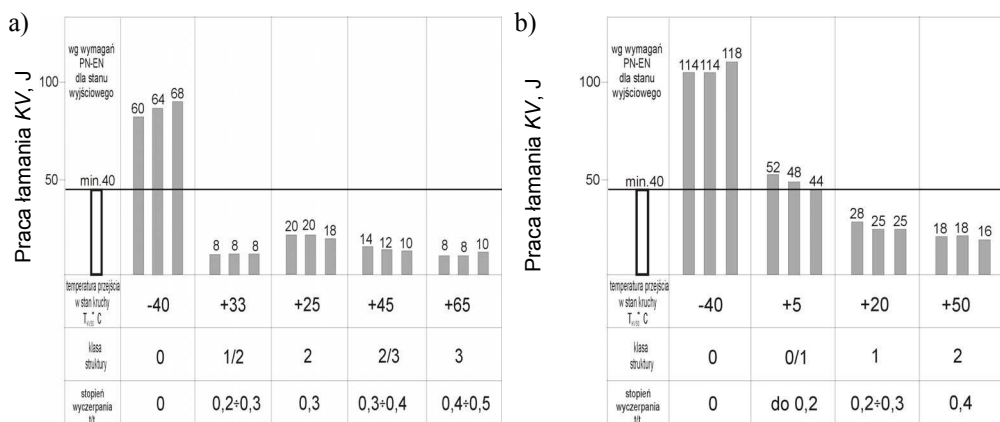
Rysunek 156. Własności mechaniczne wycinków węzownic przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 10CrMo9-10 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania:

- a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10



Rysunek 157. Własności mechaniczne wycinków węzownic przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali X20CrMoV11-1 w zależności od ich klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania:

- a) wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej, b) granica plastyczności w temperaturze pokojowej, c) wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej, d) granica plastyczności w podwyższonej temperaturze, e) twardość HV10



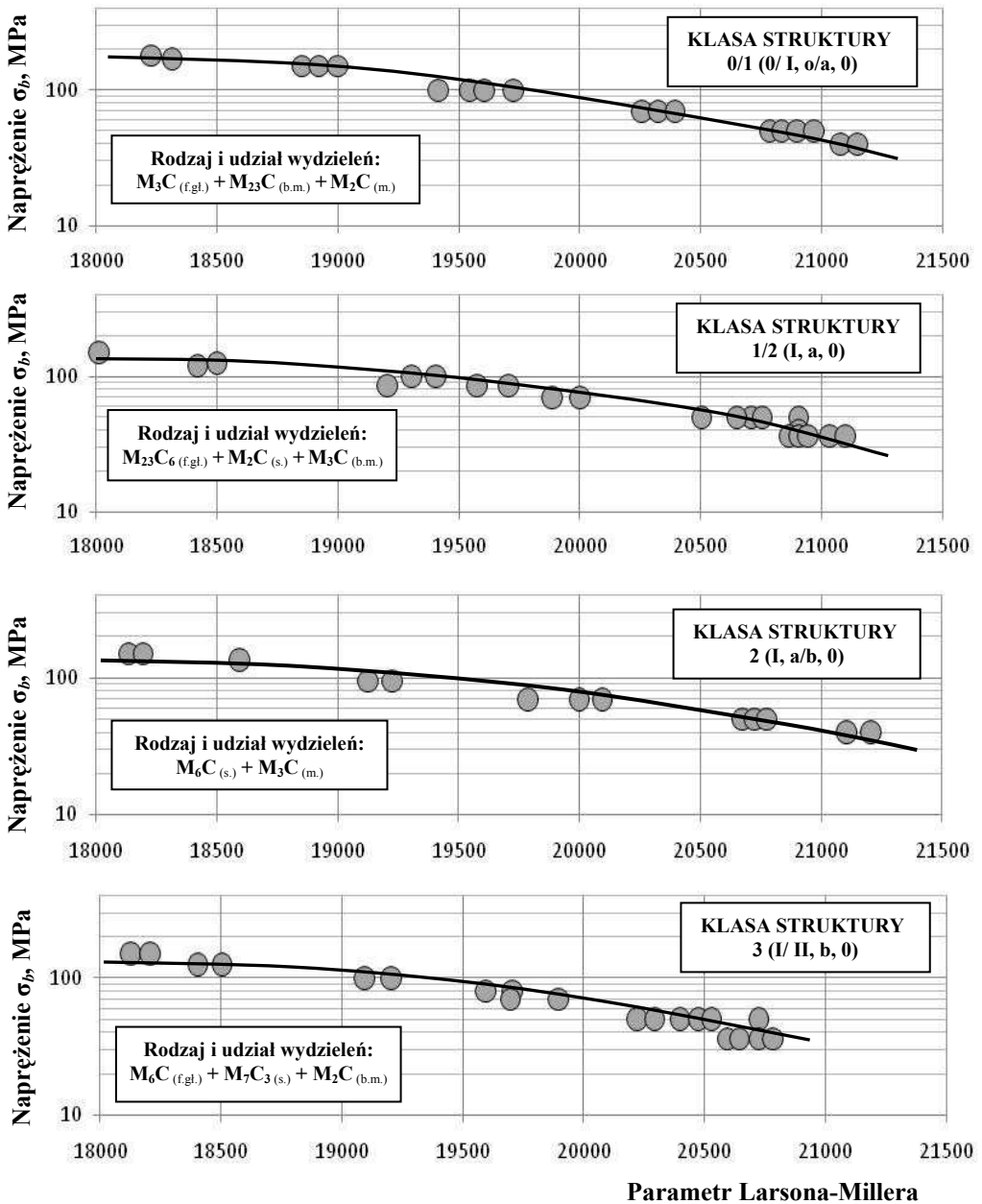
Rysunek 158. Udarność w temperaturze pokojowej i temperatura przejścia w stan kruchy w zależności od klasy struktury wycinków elementów kotłów energetycznych po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z: a) niskostopowej stali 14MoV6-3, b) wysokochromowej stali X20CrMoV11-1

Tablica 18. Praca łamania w temperaturze pokojowej i temperatura przejścia w stan kruchy w zależności od klasy struktury wycinków elementów kotłów energetycznych po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z wysokochromowej stali 14MoV6-3

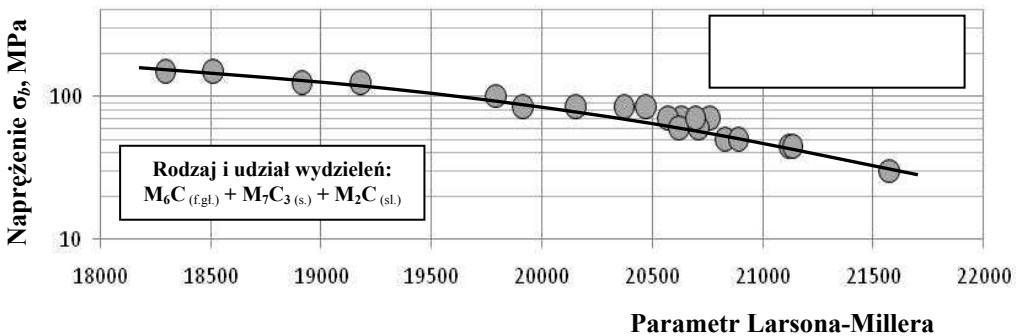
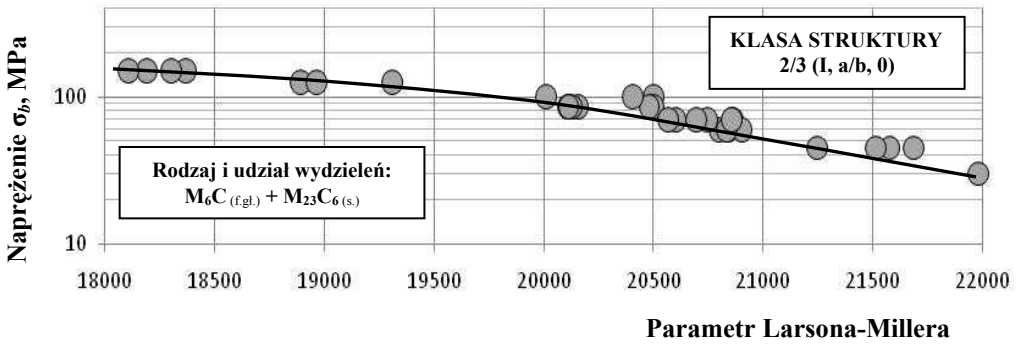
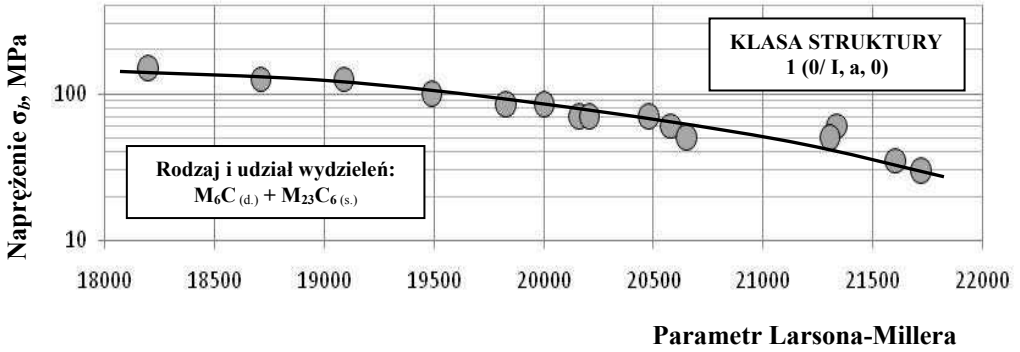
Stan materiału			Praca łamania w temperaturze pokojowej KV, J	Temperatura przejścia w stan kruchy T_{KV50} , °C	Twardość HV10	Czas eksploatacji t_e , h
Klasyfikacja struktury	Stopień wyczerpania t_d/t_r					
Klasa struktury	Podklasy struktury					
1	2	3	4	5	6	7
0	0; o; O	0	64	- 40	208	stan wyjściowy
1/2	0/I; a; O	0,2-0,3	8	+ 33	165	118 000
2	I; a; O	0,3	20	+ 25	141	193 000
2/3	I; a/b; O	0,3-0,4	12	+ 45	142	200 000
3	I/II; a/b; O	0,4÷0,5	8	+ 65	135	185 600

Tablica 19. Praca łamania w temperaturze pokojowej i temperatura przejścia w stan kruchy w zależności od klasy struktury wycinków elementów kotłów energetycznych po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1

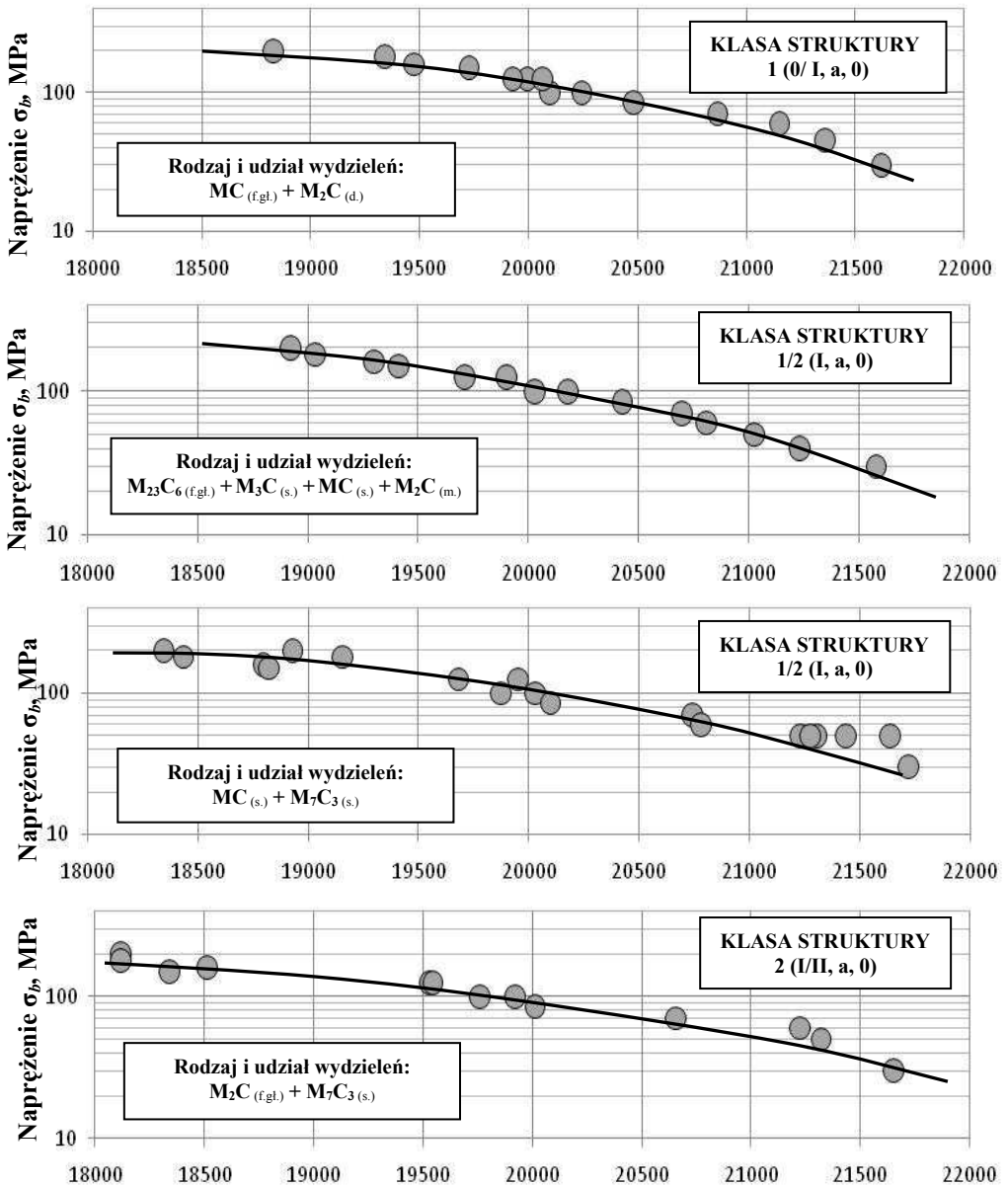
Stan materiału			Praca łamania w temperaturze pokojowej KV, J	Temperatura przejścia w stan kruchy T_{KV50} , °C	Twardość HV10	Czas eksploatacji t_e , h
Klasyfikacja struktury	Stopień wyczerpania t_d/t_r					
Klasa struktury	Podklasy struktury					
1	2	3	4	5	6	7
0	0, 0, O	0	96	- 40	248	stan wyjściowy
0/1	0/I, o/a, O	do 0,2	48	+ 5	240	20 000
1	I, a, O	0,2-0,3	27	+ 20	216	108 000
2	I/II, a/b, O	0,3-0,4	18	+ 50	210	160 000
3	II, b, O	0,4-0,5	8	+ 60	231	186 000



Rysunek 159. Resztkowa wytrzymałość na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(L-M)$ w zależności od klasy struktury i stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików wybranych wycinków komór wylotowych przegrzewaczy pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 13CrMo4-5 (*(f.gl.)* – faza główna; *(s.)* – średnio; *(m.)* – mało; *(b.m.)* – bardzo mało)



Rysunek 160. Resztkowa wytrzymałość na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(L-M)$ w zależności od klasy struktury i stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików wybranych wycinków komór wylotowych przegrzewaczy pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10 (*f,gl.* – faza główna; *(d.)* – dużo; *(s.)* – średnio; *(sl.)* – ślady)



Parametr Larsona-Millera

Rysunek 161. Resztkowa wytrzymałość na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(L-M)$ w zależności od klasy struktury i stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików wybranych wycinków głównych rurociągów pary świeżej pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 14MoV6-3 (*(f,gl.)* – faza główna; *(d)* – dużo; *(s.)* – średnio; *(m.)* – mało)

Tablica 20. Trwałość resztkowa (resztkowa wytrzymałość na pełzanie) w zależności od klasy struktury, składu fazowego wydzieleni węglików i stopnia wyczerpania na przykładzie wybranych wycinków elementów przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 13CrMo4-5

Stan materiału			Rodzaj i udział wydzieleni ¹⁾	Trwałość resztkowa t_{re} , h (wg charakterystyki) dla $T_e = 540^\circ\text{C}$ $\sigma_e = 50 \text{ MPa}$
Klasa struktury	Podklasy struktury	Oszacowany stopień wyczerpania t_d/t_r		
1	2	3	4	5
0/1	0/I; o/a; O	do 0,2	$\text{M}_3\text{C}_{(f.gl.)} + \text{M}_{23}\text{C}_6_{(m.)} + \text{M}_2\text{C}_{(m.)} + \text{M}_6\text{C}_{(b.m.)}$	289 000
1/2	I; a; O	0,3	$\text{M}_{23}\text{C}_6_{(f.gl.)} + \text{M}_2\text{C}_{(s.)} + \text{M}_3\text{C}_{(b.m.)}$	164 000
2	I; a/b; O	0,3÷0,4	$\text{M}_6\text{C}_{(s.)} + \text{M}_3\text{C}_{(m.)}$	142 000
3	I/II; b; O	0,4÷0,5	$\text{M}_6\text{C}_{(f.gl.)} + \text{M}_7\text{C}_3_{(s.)} + \text{M}_2\text{C}_{(b.m.)}$	70 000

Tablica 21. Trwałość resztkowa (resztkowa wytrzymałość na pełzanie) w zależności od klasy struktury, składu fazowego wydzieleni węglików i stopnia wyczerpania na przykładzie wybranych wycinków elementów przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10

Stan materiału			Rodzaj i udział wydzieleni ¹⁾	Trwałość resztkowa t_{re} , h (wg charakterystyki) dla $T_e = 540^\circ\text{C}$ $\sigma_e = 60 \text{ MPa}$
Klasa struktury	Podklasy struktury	Oszacowany stopień wyczerpania t_d/t_r		
1	2	3	4	5
1	0/I; a; O	0,2-0,3	$\text{M}_6\text{C}_{(d.)} + \text{M}_{23}\text{C}_6_{(s.)}$	218 000
2/3	I; a/b; 0	0,3-0,4	$\text{M}_6\text{C}_{(f.gl.)} + \text{M}_{23}\text{C}_6_{(s.)}$	251 000
3	I/II; a/b; O	0,4	$\text{M}_6\text{C}_{(f.gl.)} + \text{M}_7\text{C}_3_{(s.)} + \text{M}_2\text{C}_{(sl.)}$	289 000

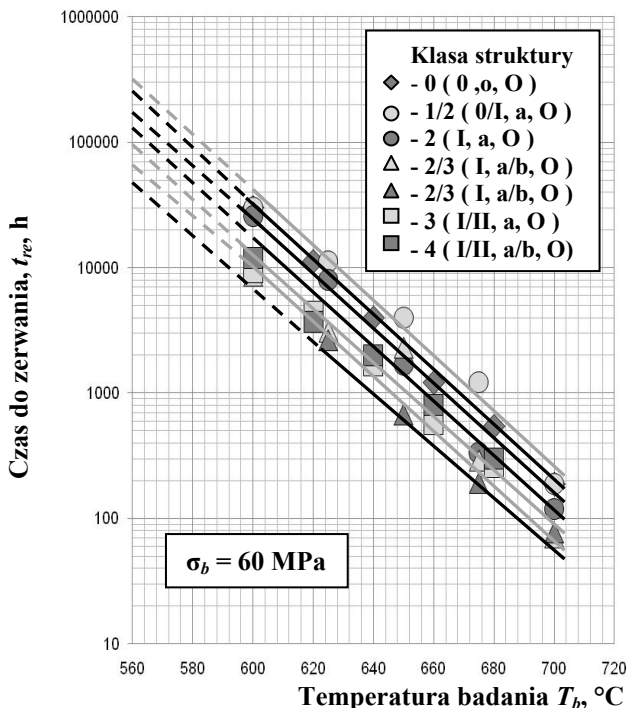
Tablica 22. Trwałość resztkowa (resztkowa wytrzymałość na pełzanie) w zależności od klasy struktury, składu fazowego wydzieleni węglików i stopnia wyczerpania na przykładzie wybranych wycinków elementów przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 14MoV6-3

Stan materiału			Rodzaj i udział wydzieleni ¹⁾	Trwałość resztkowa t_{re} , h (wg charakterystyki) dla $T_e = 540^\circ\text{C}$ $\sigma_e = 60 \text{ MPa}$
Klasa struktury	Podklasy struktury	Oszacowany stopień wyczerpania t_d/t_r		
1	2	3	4	5
1	0/I; a; O	0,2-0,3	$\text{MC}_{(f.gl.)} + \text{M}_2\text{C}_{(d.)}$	510 000
1/2	I; a; 0	0,3	$\text{M}_{23}\text{C}_6_{(f.gl.)} + \text{M}_3\text{C}_{(s.)} + \text{MC}_{(s.)} + \text{M}_2\text{C}_{(m.)}$	384 000
1/2	I; a; 0	0,3	$\text{MC}_{(s.)} + \text{M}_7\text{C}_3_{(s.)}$	333 000
2	I/II; a; 0	0,3-0,4	$\text{M}_2\text{C}_{(f.gl.)} + \text{M}_7\text{C}_3_{(s.)}$	289 000

¹⁾ (f.gl.) – faza główna; (d.) – dużo; (s.) – średnio; (m.) – mało; (b.m.) – bardzo mało; (sl.) – ślady

Zależności prędkości pełzania w stanie stacjonarnym od naprężenia w stałej temperaturze odpowiadającej eksploatacyjnej 520°C dla stali 13CrMo4-5 przedstawiono na rysunku 164, a dla stali 10CrMo9-10 na rysunku 165. Natomiast na rysunku 166 przedstawiono takie zależności dla wycinków głównych rurociągów parowych wykonanych ze stali 14MoV6-3 w stałej temperaturze badania 520°C i 550°C. 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. Wartość tę można wyznaczyć dokonując pomiarów średnic otworów technologicznych komór. Wartość trwałego odkształcenia wynika z różnicy średnic otworu mierzonych w dwóch prostopadłych kierunkach: osiowym i obwodowym. Sposób ich wyznaczania zaproponowany przez autora został przedstawiony w publikacjach własnych [15, 50, 445, 467].

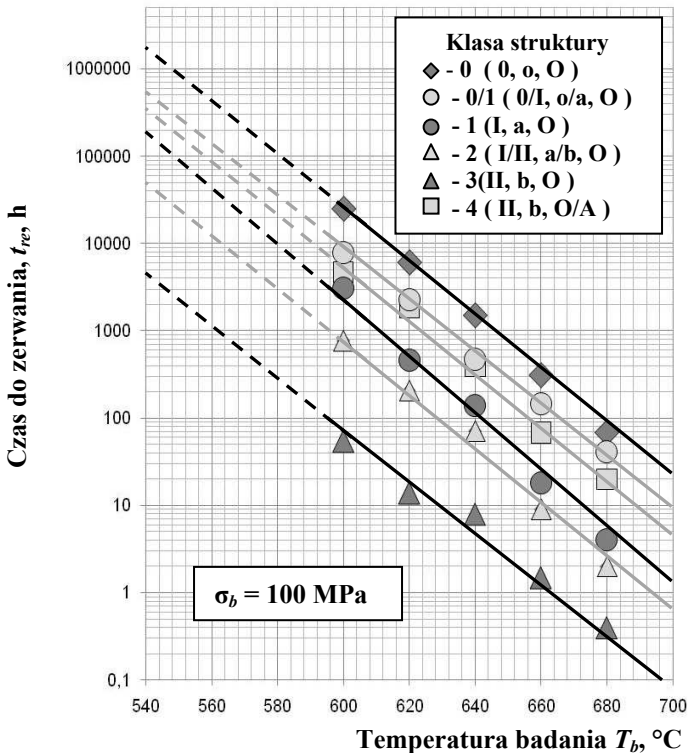
Dla badanych materiałów na podstawie badań pełzania wyznaczono graniczną wartość trwałego odkształcenia, przyjętą jako dopuszczalną ϵ_{dop} , gwarantującą bezpieczną eksploatację materiału pracującego w warunkach pełzania. Wynosi ona 2% dla niskostopowych stali



Rysunek 162. Trwałość resztkowa w zależności od klasy struktury materiałów elementów głównych rurociągów parowych kotłów energetycznych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania wykonanych ze stali 14MoV6-3

Tablica 23. Trwałość resztkowa w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania materiałów elementów głównych rurociągów parowych kotłów energetycznych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania wykonanych ze stali 14MoV6-3

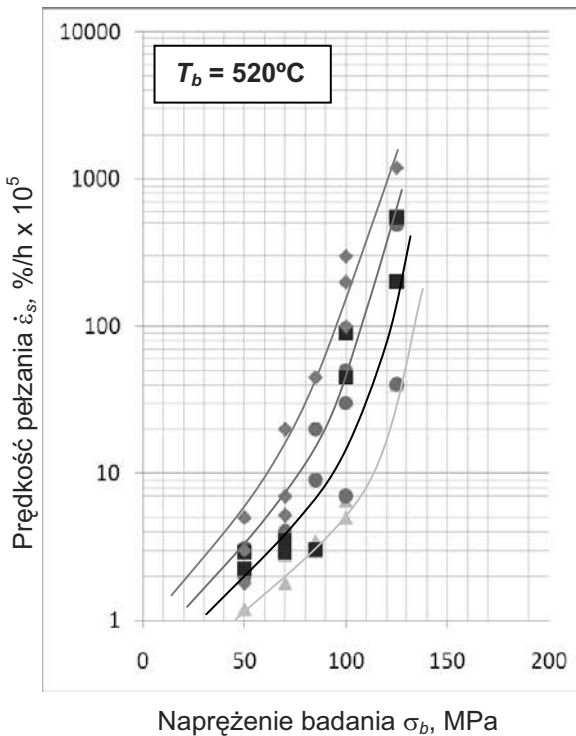
Stan materiału			Parametry dotychczasowej eksploatacji		Poziom naprężenia dalszej eksploatacji $\sigma_e = 60$ MPa	
Klasyfikacja struktury		Stopień wyczerpania t_e/t_r	Temperatura $T_e, ^\circ\text{C}$	Czas t_e, h	Trwałość resztkowa t_{re}, h w temperaturze, $^\circ\text{C}$	
Klasa struktury	Podklasy struktury				550	560
1	2	3	4	5	6	7
0	0; o; O	0	0	0	600 000	340 000
1/2	0/I; a; O	0,2-0,3	540	118 000	450 000	280 000
2	I; a; O	0,3	540	148 000	300 000	210 000
2/3	I; a/b; O	0,3-0,4	540	105 000	250 000	140 000
2/3	I; a/b; O	0,3-0,4	540	200 000	140 000	90 000
3	I/II; a; 0	0,4	540	193 000	110 000	65 000
4	I/II; a/b; O	0,4÷0,5	540	186 000	85 000	50 000



Rysunek 163. Trwałość resztkowa w zależności od klasy struktury materiałów elementów przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania wykonanych ze stali X20CrMoV11-1

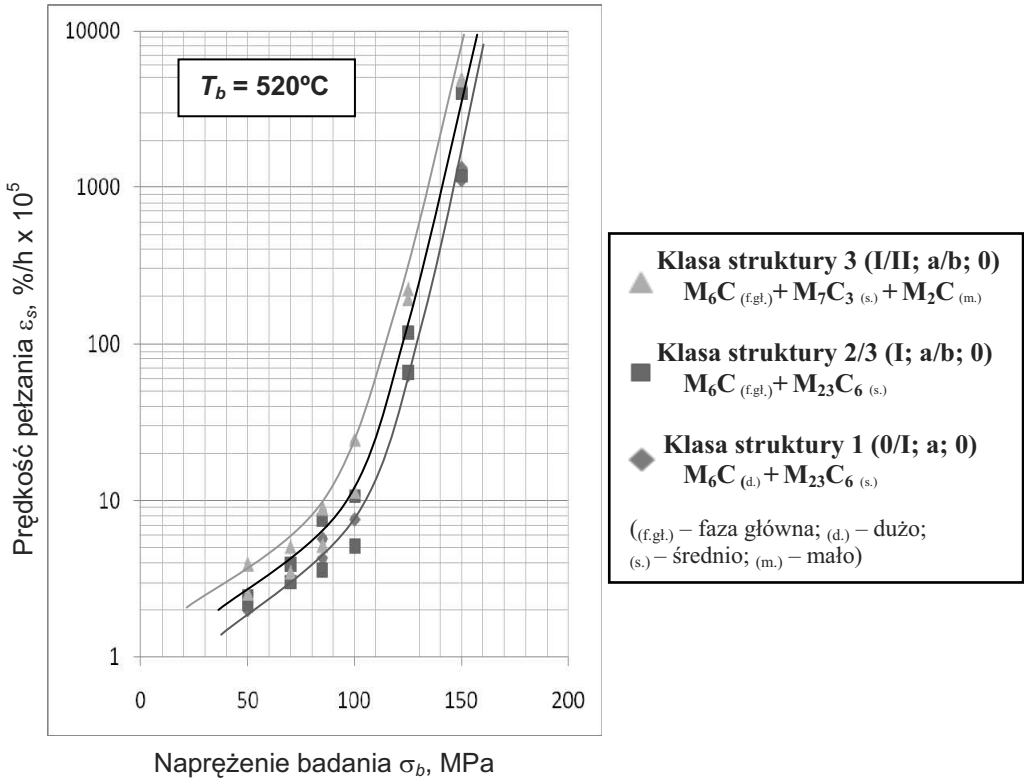
Tablica 24. Trwałość resztkowa w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania materiałów komór wylotowych przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania wykonanych ze stali X20CrMoV11-1

Stan materiału			Parametry dotychczasowej eksploatacji		Poziom naprężenia dalszej eksploatacji $\sigma_e = 100$ MPa			
Klasyfikacja struktury		Stopień wyczerpania t_e/t_r	Temperatura $T_e, ^\circ\text{C}$	Czas t_e, h	Trwałość resztkowa t_{res}, h w temperaturze, $^\circ\text{C}$			
Klasa struktury	Podklasy struktury				550	560	570	580
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0, 0, O	0	0	0	320 000	150 000	80 000	50 000
0/1	0/I, o/a, O	do 0,2	550	20 000	150 000	65 000	41 000	20 000
1	I, a, O	0,2-0,3	550	108 000	75 000	40 000	24 000	11 000
2	I/II, a/b, O	0,3-0,4	550	160 000	55 000	32 000	14 000	8 000
3	II, b, O	0,4-0,5	575	186 000	38 000	14 000	8000	3 500
4	II, b, O/A	0,5-0,6	580	186 000	1 000	600	350	180



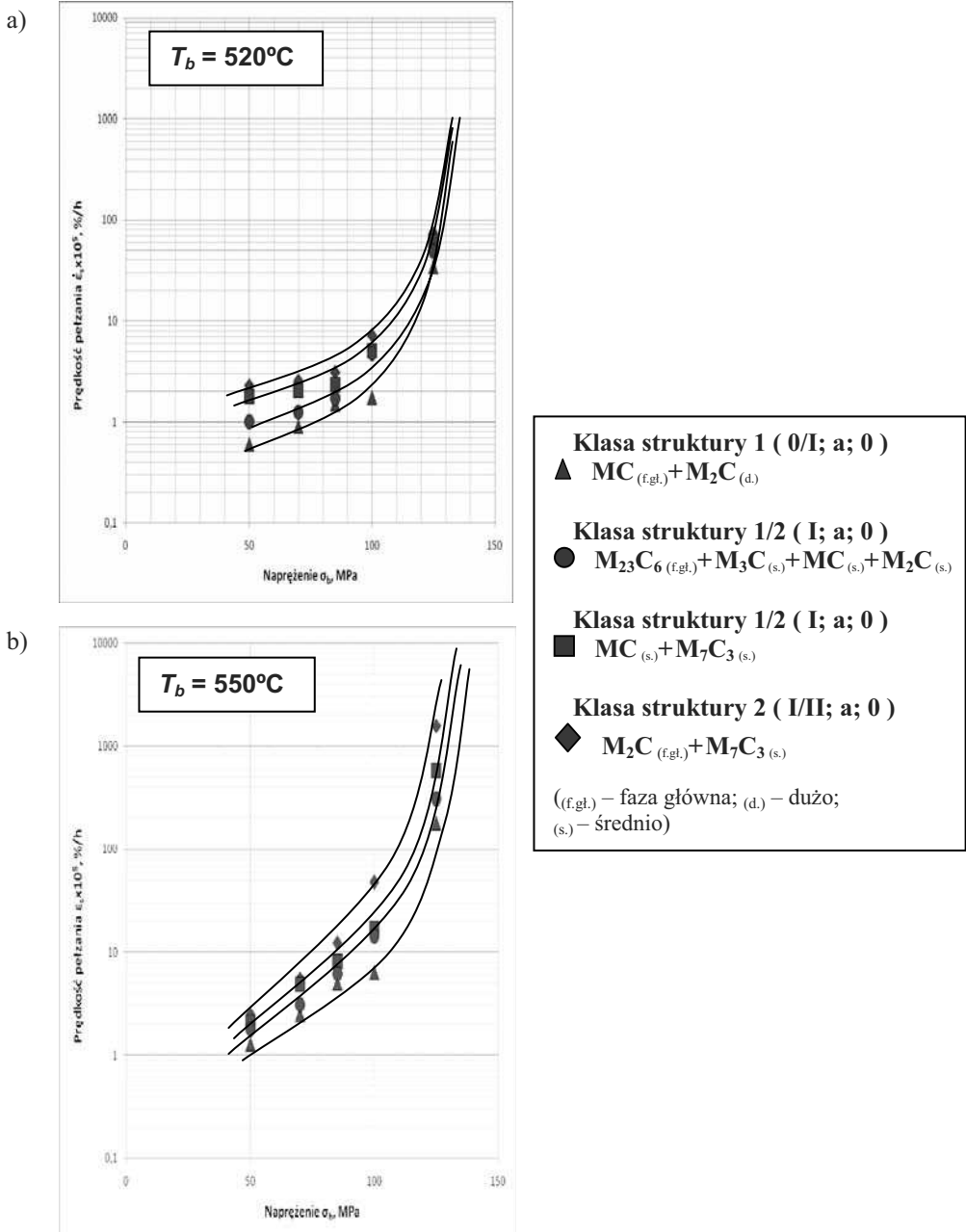
- Klasa struktury 0/1 (0/I; o/a; 0)**
▲ $M_3C_{(f,gl.)} + M_{23}C_6_{(m.)} + M_6C_{(m.)}$
- Klasa struktury 1/2 (I; a; 0)**
● $M_{23}C_6_{(f,gl.)} + M_2C_{(s.)} + M_3C_{(b,m.)}$
- Klasa struktury 2 (I; a/b; 0)**
■ $M_6C_{(s.)} + M_3C_{(m.)}$
- Klasa struktury 3 (I/II; b; 0)**
◆ $M_6C_{(f,gl.)} + M_7C_3_{(s.)} + M_2C_{(m.)}$
- (f,gl.) – faza główna; (s.) – średnio;
(m.) – mało; (b,m.) – bardzo mało

Rysunek 164. Prędkość pełzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w zależności od naprężenia σ dla temperatury dalszej eksploatacji 520°C w zależności od klasy struktury i stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików wybranych materiałów komór wylotowych przegrzewaczy kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 13CrMo4-5



Rysunek 165. Prędkość pełzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w zależności od naprężenia σ dla temperatury dalszej eksploatacji 520°C w zależności od klasy struktury i stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików wybranych materiałów komór wylotowych przegrzewaczy kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10

16Mo3, 13CrMo4-5 i 10CrMo9-10, natomiast 1% dla stali 14MoV6-3 i X20CrMoV11-1. Różnica pomiędzy dopuszczalną wartością trwałego odkształcenia ϵ_{dop} a zmierzoną wartością rzeczywistą ϵ_e wynikającą z dotychczasowej eksploatacji, będąca pozostającą w dyspozycji wartością trwałego odkształcenia ϵ_{ep} zapewniającą dalszą bezpieczną eksploatację, odniesiona do wyznaczonej prędkości pełzania $\dot{\epsilon}_{es}$ dla przewidywanego poziomu temperatury i naprężenia dalszej eksploatacji umożliwia wyznaczenie resztkowej trwałości rozporządzalnej t_{re} . Uzyskane w ten sposób wyniki resztkowej trwałości rozporządzalnej w zależności od klasy struktury i odpowiadającej jej stopnia wyczerpania zestawiono w tablicy 25 dla stali 13CrMo4-5, w tablicy 26 dla stali 10CrMo9-10 oraz w tablicy 27 dla stali 14MoV6-3.



Rysunek 166. Prędkość pełzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w zależności od napężenia σ dla temperatury dalszej eksploatacji 520 i 550°C w zależności od klasy struktury i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych węglików materiałów elementów rurociągów pary świeżej kotłów po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 14MoV6-3

Tablica 25. Rozporządzalna trwałość resztkowa w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania na podstawie prędkości pełzania w stanie ustalonym materiałów komór wylotowych przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania wykonanych ze stali 13CrMo4-5

Parametry dotychczasowej eksploatacji		Trwale odkształcenie ε			Stan materiału			Prędkość pełzania $\dot{\varepsilon}_{es}$, %/h $\times 10^{-5}$	Rozporządzalna trwałość resztkowa t_{re} , h w 520°C i przy $\sigma_e = 50 \text{ MPa}$ ²⁾
Temperatura T_e , °C	Czas t_e , h	Całkowite dopuszczalne ε_{dops} , %	Zmierzone rzeczywiste ε_{eps} , %	Pozostałe eksploatacji ε_{ep} , % ¹⁾	Klasyfikacja struktury		Stopień wyczerpania t_e/t_r		
					Klasa struktury	Podklasy struktury			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
540	121 000	2	0,285	1,715	0/1	0/I, o/a, O	do 0,2	1,2	143 000
540	123 243		0,350	1,650	1/2	I, a, O	0,3	2,25	73 000
540	100 000		0,430	1,570	2	I, a/b, O	0,3-0,4	4,2	37 000
540	127 000		0,780	1,220	3	I/II, a/b, O	0,4-0,5	8,1	15 000

¹⁾ Pozostałe dopuszczalne trwale odkształcenie eksploatacji $\varepsilon_{ep} = \varepsilon_{dops} - \varepsilon_e$
²⁾ Rozporządzalna trwałość resztkowa $t_{re} = \varepsilon_{ep} / \dot{\varepsilon}_{es}$; naprężenie dalszej eksploatacji σ_e

Tablica 26. Rozporządzalna trwałość resztkowa w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania na podstawie prędkości pełzania w stanie ustalonym materiałów komór wylotowych przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania wykonanych ze stali 10CrMo9-10

Parametry dotychczasowej eksploatacji		Trwale odkształcenie ε			Stan materiału			Prędkość pełzania $\dot{\varepsilon}_{es}$, %/h $\times 10^{-5}$	Rozporządzalna trwałość resztkowa t_{re} , h w 520°C i przy $\sigma_e = 50 \text{ MPa}$ ²⁾
Temperatura T_e , °C	Czas t_e , h	Całkowite dopuszczalne ε_{dops} , %	Zmierzone rzeczywiste ε_{eps} , %	Pozostałe eksploatacji ε_{ep} , % ¹⁾	Klasyfikacja struktury		Stopień wyczerpania t_e/t_r		
					Klasa struktury	Podklasy struktury			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
535	116 974	2	0,435	1,565	1	0/I, a, O	0,2-0,3	1,9	82 000
535	122509		0,690	1,310	2/3	I, a/b, O	0,3-0,4	2,7	48 000
520	92 966		0,810	1,190	3	I/II, a/b, O	0,4	3,8	31 000

¹⁾ Pozostałe dopuszczalne trwale odkształcenie eksploatacji $\varepsilon_{ep} = \varepsilon_{dops} - \varepsilon_e$
²⁾ Rozporządzalna trwałość resztkowa $t_{re} = \varepsilon_{ep} / \dot{\varepsilon}_{es}$; naprężenie dalszej eksploatacji σ_e

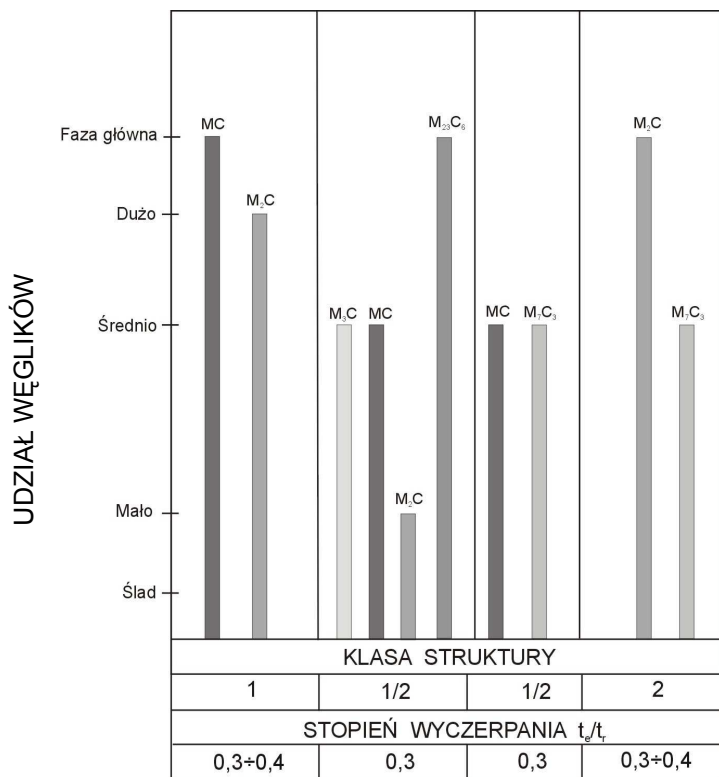
Tablica 27. Rozporządzalna trwałość resztkowa w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania na podstawie prędkości pełzania w stanie ustalonym materiałów elementów głównych rurociągów parowych kotłów energetycznych po długotrwałej pracy w warunkach pełzania wykonanych ze stali 14MoV6-3

Parametry dotychczasowej eksploatacji		Trwałe odkształcenie ϵ			Stan materiału			Prędkość pełzania $\dot{\epsilon}_{es}$, %/h $\times 10^{-5}$	Rozporządzalna trwałość resztkowa t_{res} w 520°C i przy $\sigma_e = 60 \text{ MPa}$ ²⁾
Temperatura T_{es} , °C	Czas t_{es} , h	Całkowite dopuszczalne ϵ_{dop} , %	Zmierzone rzeczywiste ϵ_{ep} , %	Pozostałe eksploatacji ϵ_{ep} , % ¹⁾	Klasyfikacja struktury		Stopień wyczerpania t_e/t_r		
					Klasa struktury	Podklasy struktury			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
540	150 000	1	0,195	0,805	1	0/I, a, O	0,2-0,3	0,68	118 000
545	136 980		0,235	0,765	1/2	I, a, O	0,3	1,2	64 000
540	180 000		0,265	0,735	1/2	I, a, O	0,3	2,0	37 000
546	127 000		0,305	0,695	2	I/II, a, O	0,3-0,4	2,7	26 000

¹⁾ Pozostałe dopuszczalne trwałe odkształcenie eksploatacji $\epsilon_{ep} = \epsilon_{dop} - \epsilon_e$
²⁾ Rozporządzalna trwałość resztkowa $t_{re} = \epsilon_{ep} / \dot{\epsilon}_{es}$; naprężenie dalszej eksploatacji σ_e

Rodzaj i udział występujących wydzielań, ma istotny wpływ na poziom własności użytkowych materiałów pracujących w warunkach pełzania zmienia się z czasem eksploatacji. Znaczenie ma nie tylko występowanie, ale i udział poszczególnych typów wydzielań. Rentgenowska analiza osadu wyizolowanego elektrolitycznie wydzielań umożliwia uzyskanie dyfraktogramów rentgenowskich, a ich analiza, w oparciu o wzorcowe dane rentgenograficzne, identyfikację poszczególnych typów węglików. Analiza porównawcza zarejestrowanych nateżeń refleksów poszczególnych węglików posłużyła do półilościowej oceny udziałów poszczególnych typów wydzielań. Przykład zależności udziałów poszczególnych występujących typów węglików od klasy struktury i stopnia wyczerpania w oparciu o metodę półilościową przedstawiono na rysunku 166 oraz zestawiono w tablicy 28 dla wybranych wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, wykonanych z niskostopowej stali 14MoV6-3.

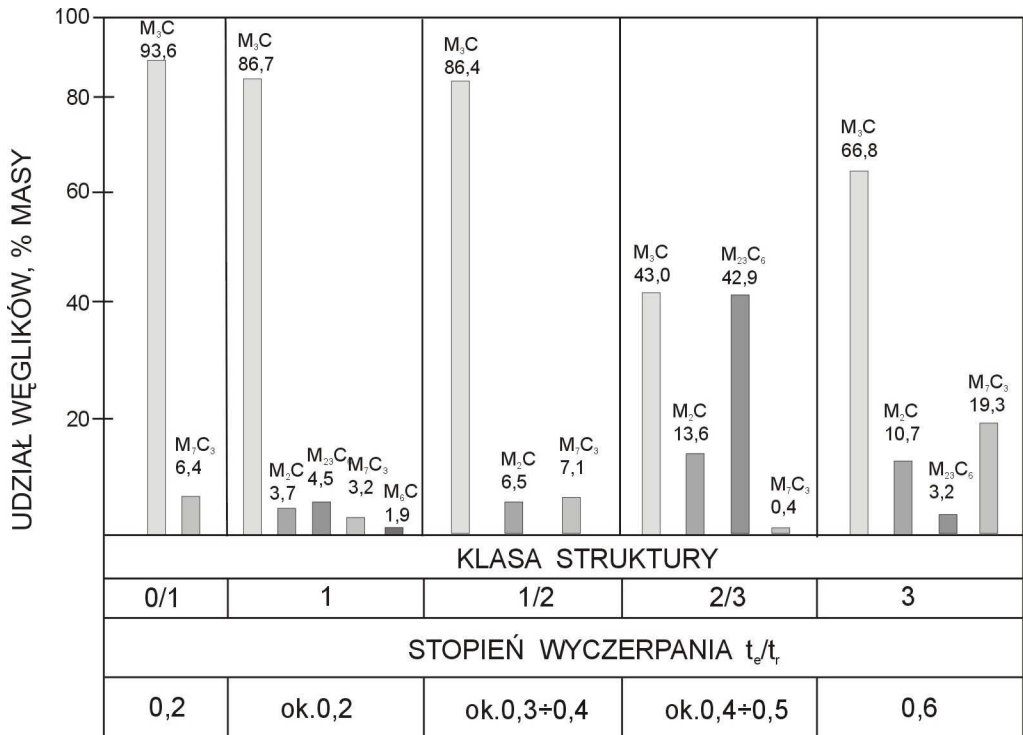
Do rentgenowskiej ilościowej analizy fazowej wydzielań węglikowych zastosowano metodę Rietvelda [550], a do obliczeń program SIROQUANTTM wykorzystujący dane modelowe dla poszczególnych typów węglików. Wynik wykonanych obliczeń przedstawiono w postaci zależności udziałów poszczególnych typów węglików od klasy struktury i stopnia wyczerpania dla wycinków wężownic przegrzewaczy pary po eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali 13CrMo4-5 na rysunku 168 i ze stali 10CrMo9-10 na rysunku 169 oraz zestawiono odpowiednio w tablicach 29 i 30.



Rysunek 167. Rodzaj i udział występujących węglików w zależności od klasy struktury na przykładzie wybranych wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 14MoV6-3

Tablica 28. Rodzaje i udział występujących węglików w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania na przykładzie wybranych wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 14MoV6-3

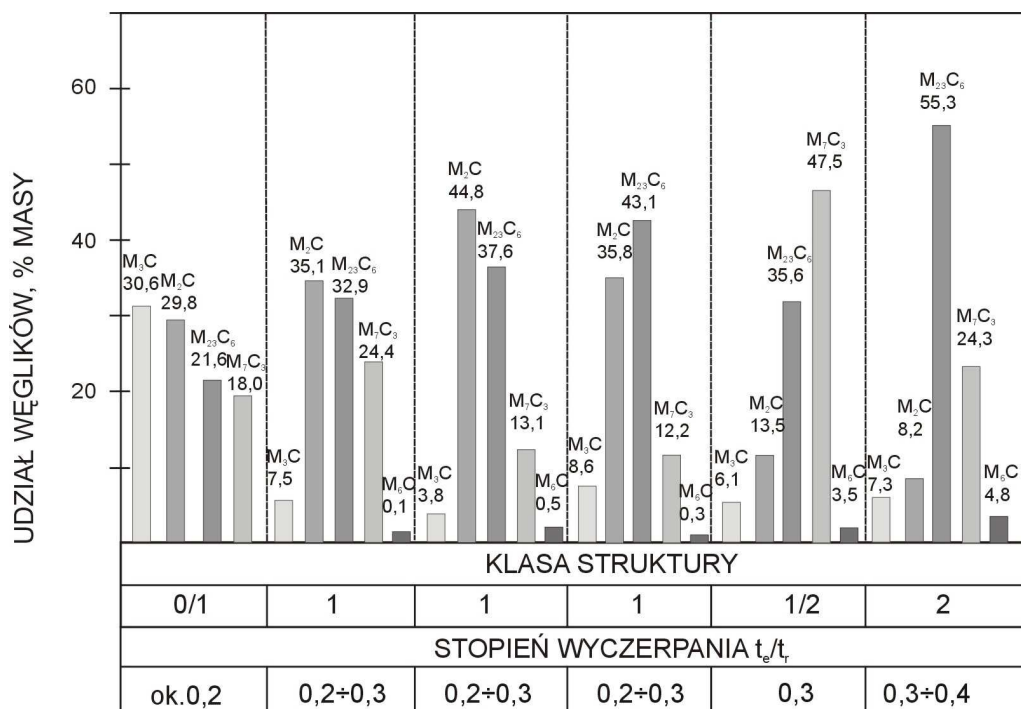
Stan materiału			Rodzaj i udział wydzieleni (_(f.gl.) – faza główna; _(d.) – dużo; _(s.) – średnio; _(m.) – mało; _(b.m.) – bardzo mało)	Czas eksploatacji t _e , h
Klasa struktury	Podklasy struktury	Stopień wyczerpania t _d /t _r		
1	2	3	4	5
0	0; o; O	0	Fe ₃ C (_(f.gl.)); MC(V) (_(d.)); MC(Mo) (_(m.)); M ₂ C (_(m.))	stan wyjściowy
1/2	0/I; a; O	0,2-0,3	MC(V) (_(f.gl.)); Mo ₂ C (_(f.gl.)); M ₂₃ C ₆ (_(m.)); M ₆ C (_(m.))	118 000
2	I; a; O	0,3	MC(V) (_(f.gl.)); M ₂ C; M ₂₃ C ₆ ; Fe ₃ C	193 000
2/3	I/II; a; 0	0,3-0,4	MC; M ₂₃ C ₆ ; Fe ₃ C; M ₂ C	200 000
3	I/II; a/b; O	0,4-0,5	M ₂₃ C ₆ (_(f.gl.)); MC(V); M ₇ C ₃ ; Fe ₃ C	164 000



Rysunek 168. Rodzaje występujących węglików w zależności od klasy struktury na przykładzie wybranych wycinków głównych rurowciągów pary świeżej kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, wykonanych z niskostopowej stali 13CrMo4-5

Tablica 29. Rodzaje występujących węglików w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania na przykładzie wybranych wycinków elementów przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, wykonanych z niskostopowej stali 13CrMo4-5

Stan materiału			Rodzaj i udział wydzielen (f.gl.) – faza główna; (d.) – dużo; (s.) – średnio; (m.) – mało; (b.m.) – bardzo mało)	Czas eksploatacji t_e , h
Klasa struktury	Podklasy struktury	Stopień wyczerpania t_e/t_r		
1	2	3	4	5
0/1	0/I; o/a; O	do 0,2	M_3C (f.gl.); M_7C_3 (m.);	69 618
1	0/I; a; O	0,2	M_3C (f.gl.); M_2C (m.); $M_{23}C_6$ (m.); M_7C_3 (m.); M_6C (b.m.)	91 979
1/2	I; a; O	0,3-0,4	M_3C (f.gl.); M_2C (m.); M_7C_3 (m.)	148 054
2/3	I/II; a; 0	0,4-0,5	M_3C (d.); $M_{23}C_6$ (d.); M_2C (s.); M_7C_3 (b.m.)	148 054
3	I/II; a/b; O	0,6	M_3C (f.gl.); M_7C_3 (s.); M_2C (s.); $M_{23}C_6$ (m.);	122 621



Rysunek 169. Rodzaje występujących węglików w zależności od klasy struktury na przykładzie materiałów wybranych wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10

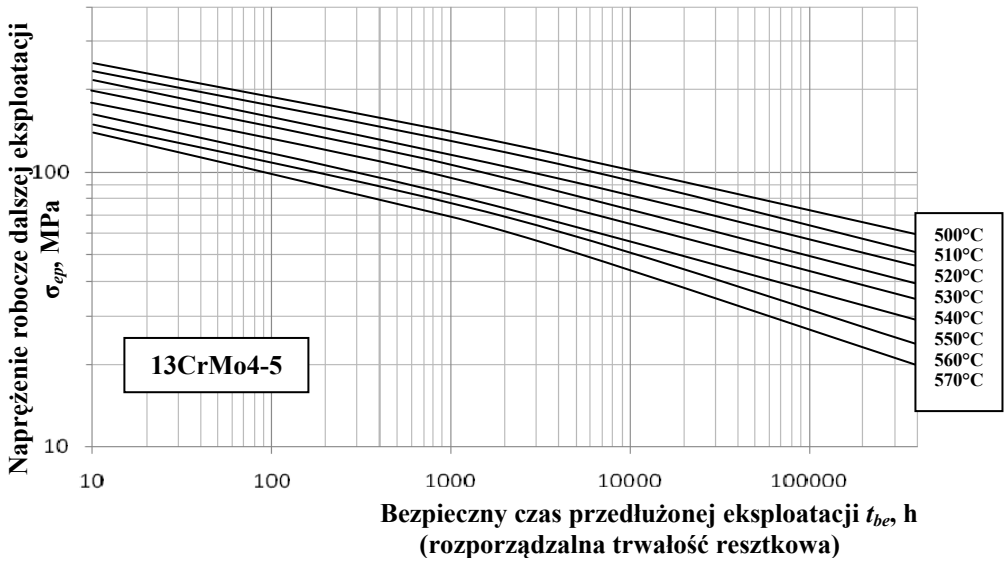
Tablica 30. Rodzaje występujących węglików w zależności od klasy struktury i stopnia wyczerpania na przykładzie wybranych wycinków elementów przegrzewacza pary kotłów energetycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10

Stan materiału			Rodzaj i udział wydzielań (f.gł.) – faza główna; (d.) – dużo; (s.) – średnio; (m.) – mało; (b.m.) – bardzo mało	Czas eksploatacji t_e , h
Klasa struktury	Podklasy struktury	Stopień wyczerpania t_e/t_r		
1	2	3	4	5
0/1	0; o; O	0,2	M ₃ C (s.); M ₂ C (s.); M ₂₃ C ₆ (s.); M ₇ C ₃ (s.)	6 948
1	0/I; a; O	0,2-0,3	M ₂ C (d.); M ₂₃ C ₆ (d.); M ₇ C ₃ (s.); M ₃ C (m.); M ₆ C (b.m.)	69 618
1	0/I; a; O	0,2-0,3	M ₂ C (d.); M ₂₃ C ₆ (d.); M ₇ C ₃ (s.); M ₃ C (m.); M ₆ C (b.m.)	69 618
1	0/I; a; O	0,2-0,3	M ₂₃ C ₆ (d.); M ₂ C (d.); M ₇ C ₃ (s.); M ₃ C (m.); M ₆ C (b.m.)	69 618
1/2	I; a; O	0,3	M ₇ C ₃ (d.); M ₂₃ C ₆ (d.); M ₂ C (s.); M ₃ C (m.); M ₆ C (m.)	156 526
2	I/II; a; O	0,3-0,4	M ₂₃ C ₆ (f.gł.); M ₇ C ₃ (d.); M ₂ C (m.); M ₃ C (m.); M ₆ C (m.)	141 642

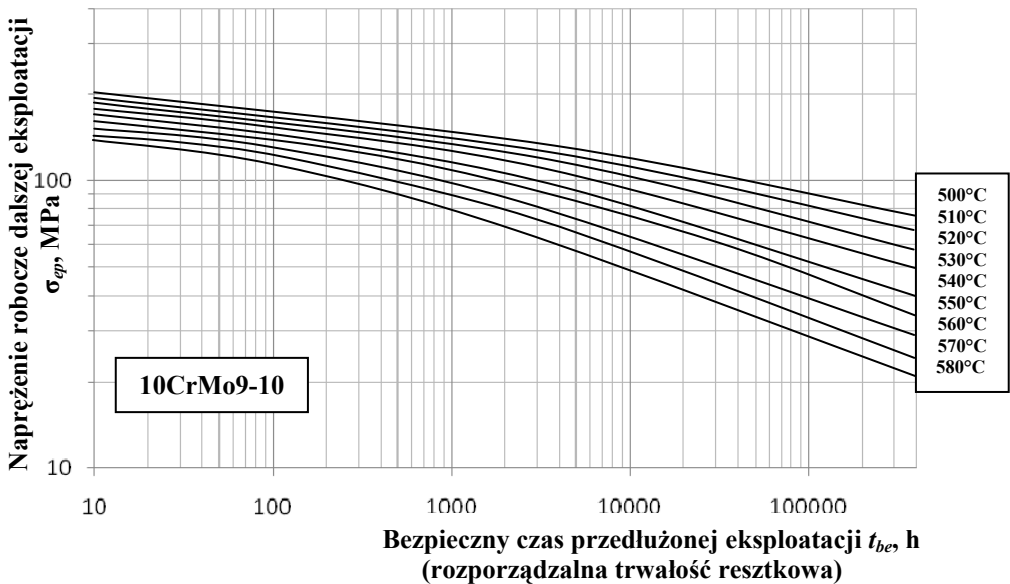
Ocena trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzalnej, a więc oszacowanie lub wyznaczenie możliwego czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji, odgrywa, oprócz czynnika ekonomicznego, szczególnie ważną rolę w przypadku planowanej modernizacji części ciśnieniowej kotła, wymagającej oceny stanu jej elementów i podjęcia decyzji o wymianie lub pozostawieniu w eksploatacji poszczególnych elementów, zwłaszcza gdy został przekroczony obliczeniowy czas pracy.

W diagnostyce mającej na celu dopuszczenie do dalszej eksploatacji elementów krytycznych części ciśnieniowej kotłów pracujących w warunkach pełzania, po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy stosowane są procedury opracowane przez zespół kierowany przez autora, które zostały zaprezentowane i omówione w licznych pracach badawczych i publikacjach własnych [14-19, 21, 25, 29, 31, 32, 35-37, 39-42, 44, 47, 50, 59, 60, 63, 88, 93, 94, 97, 101, 104, 105]. W ocenie elementów ocena materiałów realizowana jest w oparciu o sposób oceny i kwalifikacji do dalszej pracy najczęściej stosowanych stali niskostopowych o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej oraz wysokochromowej stali o strukturze odpuszczonego martenzytu, który jest wynikiem ok. czterdziestoletnich badań i doświadczeń diagnostycznych autora.

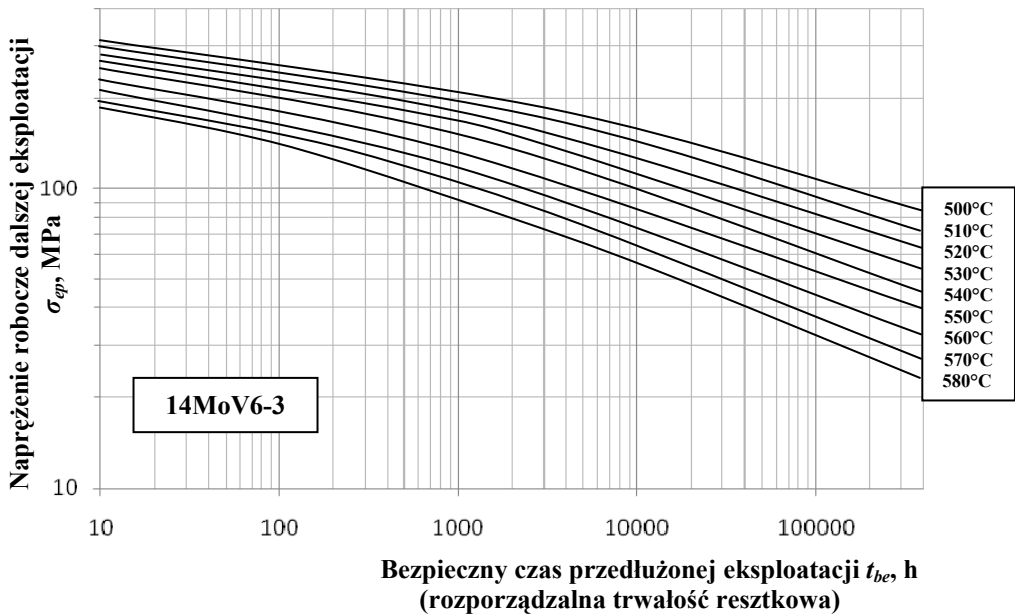
Oprócz charakterystyk minimalnej trwałości resztkowej w zależności od poziomu naprężenia i przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji dla różnych poziomów temperatury z zakresu eksploatacyjnego, które pokazano na rysunkach 66-68 w rozdziale 3 opracowania, zaproponowano podobne charakterystyki dla minimalnej resztkowej trwałości rozporządzalnej badanych niskostopowych stali nie wykazujących zapoczątkowania procesów uszkodzeń wewnętrznych. Charakterystyki te pokazano na rysunkach 170-172 odpowiednio dla stali 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 oraz 14MoV6-3. Umożliwiają one wstępne wyznaczenie przewidywanego minimalnego czasu dalszej bezpiecznej pracy dla przewidywanych parametrów dalszej eksploatacji (σ_{ep} , T_{ep}). Wyznaczenie tego czasu pozwala na podejmowanie właściwych decyzji o sposobie dalszego postępowania z badanym elementem pracującym w warunkach pełzania; doboru metod badawczych i pomiarów umożliwiających oszacowanie lub wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji bądź podanie czasu do następnego przeglądu, przeprowadzenia naprawy lub dokonanie wymiany elementu na nowy.



Rysunek 170. Charakterystyki minimalnej resztkowej trwałości rozporządzalnej w postaci zależności $\log \sigma_{ep} = f(\log t_{be})$ dla różnych poziomów przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji niskostopowej stali 13CrMo4-5 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń



Rysunek 171. Charakterystyki minimalnej resztkowej trwałości rozporządzalnej w postaci zależności $\log \sigma_{ep} = f(\log t_{be})$ dla różnych poziomów przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji niskostopowej stali 10CrMo9-10 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń



Rysunek 172. Charakterystyki minimalnej resztkowej trwałości rozporządzalnej w postaci zależności $\log \sigma_{ep} = f(\log t_{be})$ dla różnych poziomów przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji niskostopowej stali 14MoV6-3 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń

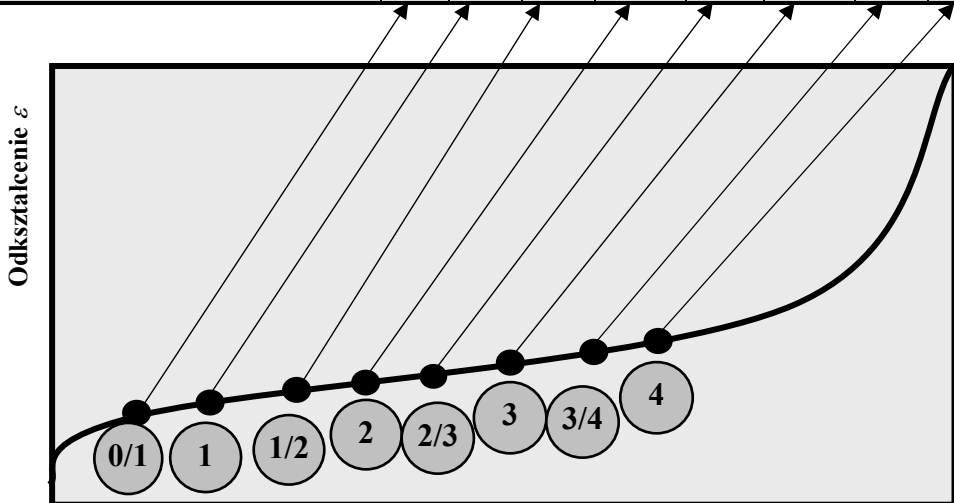
Sposób oceny i kwalifikacji do dalszej pracy badanych stali pracujących w warunkach pełzania bez uszkodzeń wewnętrznych przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 173. Rysunek składa się z dwóch elementów. Pierwszym elementem jest schematyczna krzywa pełzania będąca zależnością trwałego odkształcenia ϵ od stopnia wyczerpania materiału t_e/t_r , na której zaznaczono występowanie poszczególnych klas struktury. Drugim elementem jest tabela, na podstawie której, w oparciu o wcześniej dokonaną ocenę stanu materiału i określenie klasy jego struktury, można tej klasie przypisać stopień wyczerpania. Każdej klasie przyporządkowany jest maksymalny dopuszczalny okres eksploatacji do następnego przeglądu. Okres ten podany został w godzinach i latach. Ważnym staje się ten rodzaj dopuszczalnego okresu eksploatacji do następnego przeglądu, który pierwszy zostanie osiągnięty. Istotny wpływ na upływanie wyznaczonego okresu ma nie tylko rzeczywisty czas eksploatacji, ale również liczba odstawień i uruchomień oraz łączny czas postojów kotła. Wyznaczone okresy eksploatacji do następnego przeglądu są zróżnicowane w zależności od czasu dotychczasowej eksploatacji, tzn. z przedziału pomiędzy 100 000 a 200 000 godzin lub powyżej 200 000 godzin oraz

gatunku stali, tzn. należącej do grupy niskostopowych stali ferrytyczno-perlitycznych oraz niskostopowych dwuskładnikowych stali ferrytyczno-bainitycznych lub niskostopowych trójskładnikowych stali ferrytyczno-bainitycznych oraz wysokochromowej stali o strukturze odpuszczonego martenzytu. Ponadto w oparciu o odpowiadający klasie struktury wskaźnik n , podany w tablicy będącej częścią rysunku, można z podanego wzoru wyznaczyć prognozowany czas dalszej eksploatacji t_{ep} . Wartości wskaźnika n dla danej klasy struktury jest zróżnicowana podobnie, jak dla wyznaczonych okresów eksploatacji, tzn. dla dwóch grup gatunków stali.

Sposób oceny i kwalifikacji do dalszej pracy badanych stali pracujących w warunkach pełzania z uszkodzeniami wewnętrznymi przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 174. Rysunek również składa się z dwóch elementów. Pierwszym elementem jest schematyczna krzywa pełzania będąca zależnością trwałego odkształcenia ϵ od stopnia wyczerpania materiału t_e/t_r , na której zaznaczono występowanie poszczególnych klas uszkodzenia. Drugim elementem jest tabela, na podstawie której, w oparciu o wcześniej dokonaną ocenę stanu materiału i określenie klasy uszkodzenia, można tej klasie przypisać stopień wyczerpania. Każdej klasie uszkodzenia przyporządkowany jest maksymalny dopuszczalny okres eksploatacji do następnego przeglądu. Okres ten podany został w godzinach i latach. Ważnym staje się ten rodzaj dopuszczalnego okresu eksploatacji do następnego przeglądu, który pierwszy zostanie osiągnięty. Istotny wpływ na upływanie wyznaczonego okresu, tak jak poprzednio, ma nie tylko rzeczywisty czas eksploatacji, ale również liczba odstawień i uruchomień oraz łączny czas postojów kotła. Wyznaczone okresy eksploatacji do następnego przeglądu, zależne od klasy uszkodzeń, zostały zróżnicowane dla badanych grup gatunków stali, tzn. należących do grupy niskostopowych stali ferrytyczno-perlitycznych oraz niskostopowych dwuskładnikowych stali ferrytyczno-bainitycznych lub niskostopowych trójskładnikowych stali ferrytyczno-bainitycznych oraz wysokochromowej o strukturze odpuszczonego martenzytu.

W ocenie stanu materiału, a tym bardziej w ocenie stanu elementu, jego przydatności oraz prognozie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji, istotnym elementem jest wybór reprezentatywnych miejsc do badań materiałowych. Wynika to ze zróżnicowania stopnia degradacji struktury w zależności od miejsca na badanym elemencie, będącego skutkiem zróżnicowanego wyężenia. Jest to pierwsza wykonywana czynność decydująca o wiarygodności przeprowadzanej oceny stanu materiału, służącej do oszacowania lub wyznaczenia trwałości resztkowej

Okres eksploatacji do następnego przeglądu (powtórnych badań materiałowych); godziny lub lata ⁵⁾	Czas dotychczasowej eksploatacji powyżej 200 000 h ⁴⁾	Stale t. f-b i m ²⁾	maks.40 000 lub 6 lat			30 000 lub 4 lata	maks.15 000 lub 2,5 roku		maks.4 000 lub 10 miesięcy	
		Stale f-p i d. f-b ¹⁾	maks.40 000 lub 6 lat			maks.30 000 lub 4 lata		15 000 lub 2,5 roku	maks.6 000 lub 1 rok	
	Czas dotychczasowej eksploatacji od 100 000 do 200 000 h	Stale t. f-b i m ²⁾	maks.60 000 lub 10 lat			40 000 lub 6 lat	maks.30 000 lub 4 lata		maks.10 000 lub 2 lata	
		Stale f-p i d. f-b ¹⁾	maks.60 000 lub 10 lat			maks.40 000 lub 6 lat		30 000 lub 4 lata	maks.10 000 lub 2 lata	
Prognozowany czas dalszej bezpiecznej eksploatacji t_{ep} ³⁾ , h $t_{ep} = \frac{n \times t_e}{1,00 - n}$	Wskaźnik n	Stale t. f-b i m ²⁾	0,70	0,65	0,55	0,45	0,35	0,30	0,20	0,10
		Stale f-p i d. f-b ¹⁾	0,75	0,70	0,60	0,50	0,40	0,35	0,25	0,15
Stopień wyczerpania t_e/t_r ¹⁾			do 0,2	0,2	0,2-0,3	0,3	0,3-0,4	0,4	0,4-0,5	0,5
Klasa struktury			0/1	1	1/2	2	2/3	3	3/4	4



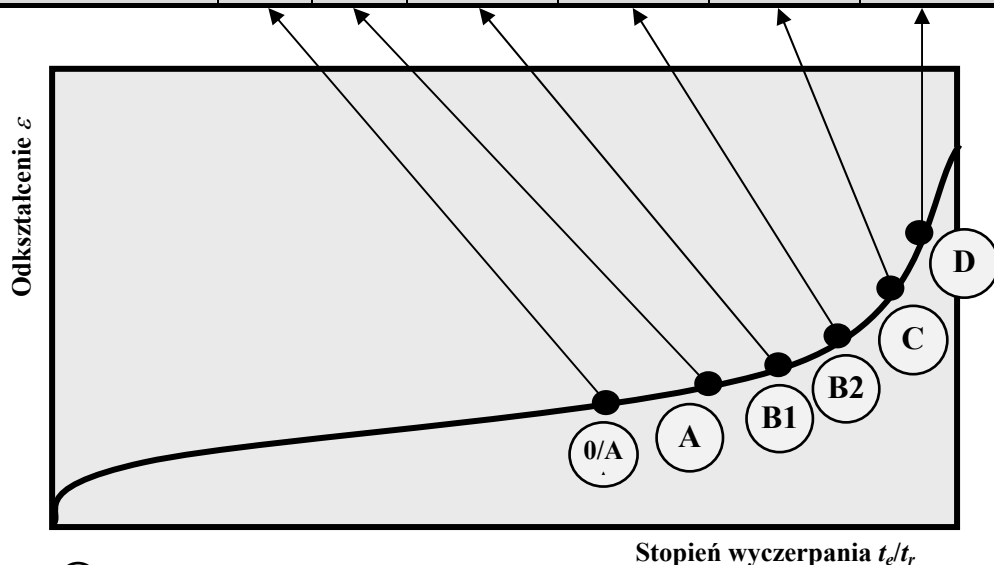
Uwagi: ④ klasa struktury

Stopień wyczerpania t_e/t_r

¹⁾ f-p i d. f-b: stale ferrytyczno-perlityczne i dwuskładnikowe ferrytyczno-bainityczne, ²⁾ t. f-b i m: stale trójskładnikowe ferrytyczno-bainityczne i stale martenzytyczne, ³⁾ dla dotychczasowych parametrów roboczych eksploatacji, ⁴⁾ oprócz prognozy na podstawie wyników badań nieniszczącymi metodami materiałowymi wymagane wyniki badań niszczącymi metodami materiałowymi, w tym wyznaczenie trwałości resztkowej i rozporządzalnej resztkowej na podstawie wyników skróconych prób pełzania, ⁵⁾ jako graniczny warunek, który zostanie pierwszy spełniony

Rysunek 173. Sposób oceny i kwalifikacji do dalszej pracy najczęściej stosowanych stali niskostopowych o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej oraz wysokochromowej stali o strukturze odpuszczonego martenzytu bez uszkodzeń wewnętrznych, po eksploatacji w warunkach pełzania

Okres eksploatacji do następnego przeglądu (powtórnych badań materiałowych); godziny lub lata ⁴⁾	Stale t. f-b i m ³⁾	maks. 30 000 lub 4,5 roku	maks. 20 000 lub 3 lata	maks. 10 000 lub 2 lata	maks. 6 000 lub 1 rok		maks. 2000 lub <0,5 roku do następnego planowanego postoiu - przygotować się do naprawy lub wymiany	natychmiastowa wymiana	
	Stale f-p i d. f-b ²⁾	maks. 40 000 lub 6 lat	maks. 25 000 lub 4 lata	maks. 15 000 lub 2,5 roku	maks. 10 000 lub 1,5 roku		maks. 3000 lub 0,5 roku przygotować się do naprawy lub wymiany	natychmiastowa wymiana	
Stopień wyczerpania t_e/t_r ¹⁾		ok. 0,4 ÷ 0,6	ok. 0,5 ÷ 0,7	ok. 0,6 ÷ 0,8		ok. 0,7 ÷ 0,8		ok. 0,8 ÷ 0,9	>0,9 ÷ 1,0
Klasa uszkodzenia		O/A	A	B/1	B/2	B/3	B/4	C	D
				B1		B2			



Uwagi: (A) Klasa uszkodzenia
¹⁾ w zależności od gatunku stali i parametrów pracy, ²⁾ f-p i d. f-b: stale ferrytyczno-perlityczne i dwuskładnikowe ferrytyczno-bainityczne, ³⁾ t. f-b i m: stale trójskładnikowe ferrytyczno-bainityczne i stale martenzytyczne, ⁴⁾ jako graniczny warunek, który zostanie pierwszy spełniony

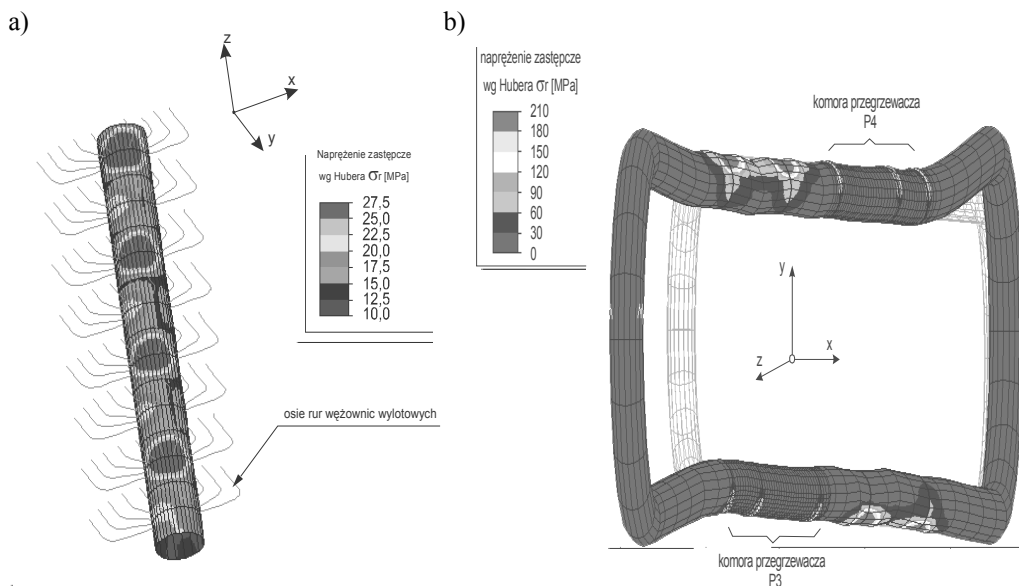
Rysunek 174. Sposób oceny i kwalifikacji do dalszej pracy najczęściej stosowanych stali niskostopowych o strukturze ferrytyczno-perlitycznej lub ferrytyczno-bainitycznej oraz wysokochromowej stali o strukturze odpuszczonego martenzytu w zakresie uszkodzeń wewnętrznych, po eksploatacji w warunkach pełzania

i resztkowej trwałości rozporządzalnej. Wybór reprezentatywnych miejsc do badań materiałowych musi być poprzedzony:

- zebraniem doświadczeń eksploatacyjnych i ich analizą,
- analizą wyników pomiarów rzeczywistych parametrów pracy w czasie eksploatacji dostarczonych przez użytkownika obiektu,
- sporządzeniem mapy występowania defektów na podstawie badań endoskopowych, defektoskopowych i pomiarów,
- analizą stanu naprężeń, odkształceń i temperatury metodą elementów skończonych.

Często stosowane są również metody fizyczne: własności magnetycznych, szumów Berkhausena [542-545], pamięci magnetycznej metalu (metoda MPM) [546, 547] oraz współczynnika intensywności tłumienia (metoda WIT) [548-550]. Badania porównawcze uzyskanych wyników tymi metodami pozwalają wskazać miejsca, które winny być przedmiotem badań materiałowych. Metody te jednak nie mają zbyt wielkiego zastosowania w ocenie ilościowej ze względu na brak ich weryfikacji metodami niszczącymi i małą powtarzalność uzyskiwanych wyników badań. Zarówno doświadczenia eksploatacyjne jak i analiza pomiarów rzeczywistych warunków pracy są podstawą wyboru miejsc badań na elemencie oraz wyboru rodzaju badań diagnostycznych niezbędnych do wykonania. Sporządzanie map obszarów o największym natężeniu występowania defektów jest etapem poprzedzającym opracowanie modelu stanu naprężeń wybranych elementów krytycznych. Do sporządzania takich map wykorzystywane są wyniki badań diagnostycznych prowadzonych podczas planowanych, okresowych przeglądów kotłów [102, 105].

W analizie wyężenia materiału wykorzystywana jest również metoda elementów skończonych (MES). Ze względu na złożoność obiektów obliczenia rozkładu naprężeń w ściankach elementów krytycznych przeprowadza się najczęściej w dwóch etapach. W etapie pierwszym określa się wielkości sił wewnętrznych (wynikających z rozszerzalności cieplnej) obciążających składowe części elementu i wywołane nimi naprężenia na przekroju jego ścianki. W etapie drugim badany jest wpływ zmienności obciążeń termicznych wynikających z nieustalonych warunków pracy analizowanego obiektu na wyężenie materiału w wybranych węzłach konstrukcyjnych [102, 105, 490, 539, 540]. Wybrany element takiej analizy wyężenia w postaci rozkładu naprężeń zastępczych obliczonych wg hipotezy Hubera na przykładzie komory wylotowej przegrzewacza pary pierwotnej wyższego stopnia kotła o dużej wydajności pokazano w postaci graficznej na rysunku 175 [102].



Rysunek 175. Rozkład naprężeń zastępczych: a) w komorze przegrzewacza pary, b) zespołu komór przegrzewaczy po odkształceniu cieplnym oraz jego postać geometryczna przy założeniu sztywnego mocowania komór do belek nośnych [102]

Trafność dokonywanej oceny trwałości resztkowej jest również zależna od klasy struktury i klasy wewnętrznych uszkodzeń oraz zastosowanych metod badawczych. Im wyższa jest klasa uszkodzeń wewnętrznych, tym mniejsza jest liczba niezbędnych metod badawczych zastosowanych dla przeprowadzenia trafnej i wiarygodnej oceny stanu materiału. Przybliżoną trafność oceny wraz z prognozą dalszej bezpiecznej eksploatacji materiału elementu w zależności od stanu klasy struktury oraz wewnętrznych uszkodzeń i zastosowanych metod badań zestawiono w tabelicy 31.

Opracowana i opisana w niniejszym rozdziale 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 wykorzystana przez autora w ok. tysiącu przypadków w praktyce przemysłowej, z których kilkaset zacytowano w niniejszej pracy, przynosząc miliardowe efekty ekonomiczne. Należy zauważyć, że w żadnym z omawianych przypadków nie stwierdzono popełnienia błędu w zakresie ustalenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji elementów instalacji energetycznych, co można uznać za dowód wykonanej weryfikacji doświadczalnej opracowanej metodyki, stanowiącej przedmiot niniejszej monografii.

Tablica 31. *Przybliżona trafność oceny oraz prognoza dalszej bezpiecznej eksploatacji materiału elementu w zależności od klasy struktury oraz wewnętrznych uszkodzeń i zastosowanych metod badawczych*

Zakres badań diagnostycznych	Przybliżona trafność oceny, %	Prognoza dotycząca dalszej pracy godziny (lata)	Orientacyjny stopień wyczerpania	Klasa uszkodzenia
Szlif na elemencie, badania makroskopowe, badania defektoskopowe, endoskopowe	95	natychmiastowa naprawa lub wymiana	powyżej 0,85	D
Szlif na elemencie, przenośny mikroskop LM – pow. do 400x	95	max. 3500 h (0,5 roku) naprawa lub wymiana	od 0,70 do 0,80	C
Szlif na elemencie, przenośny mikroskop LM – pow. do 400 x	~55	ocena wstępna	od 0,60 do 0,80	B
Szlif na elemencie + replika, mikroskop stacjonarny LM pow. do 1000x	powyżej 60	do 10 000 h (1,5 roku)		
Szlif na elemencie + replika cieniowana, mikroskop SEM – pow. do 5000x, bank danych	powyżej 80	do 20 000 h (3 lata)		
Jak wyżej + badania niszczące (głównie pelzanie), bank danych, mikroskop SEM – pow. do 5000x	powyżej 90	powyżej 25 000 h (4 lata)		
Szlif na elemencie, przenośny mikroskop LM – pow. do 400x	~55	ocena wstępna 10 000 h (1,5 roku)	od 0,40 do 0,60	A
Szlif na elemencie + replika cieniowania, przenośny mikroskop + stacjonarny LM – pow. do 1000x	powyżej 60	maks. 10 000 h (1,5 roku)		
Jak wyżej + bank danych, mikroskop SEM – pow. do 5000x	powyżej 75	do maks. 20 000 h (3 lata)		
Jak wyżej + analiza RTG izolatu, bank danych, mikroskop SEM – pow. do 5000x mikroanalizator RTG	powyżej 80	powyżej 20 000 h (3 lata)		
Jak wyżej + badania niszczące (głównie pelzanie) bank danych, mikroskop SEM – pow. do 5000x, mikroanalizator RTG	powyżej 95	powyżej 25 000 h (4 lata)		
Szlif na elemencie + replika, przenośny mikroskop + stacjonarny LM – pow. do 1000x	~55	ocena wstępna do ~10 000h (1,5 roku)	poniżej 0,40	O/A lub O
Jak wyżej + replika cieniowana, mikroskop SEM – pow. do 5000x, bank danych	powyżej 75	powyżej 25 000 h (4 lata)		
Jak wyżej + analiza RTG izolatu, bank danych, mikroskop SEM – pow. do 5000x mikroanalizator RTG	powyżej 80	powyżej 40 000 h (6 lat)		
Jak wyżej + badania niszczące (głównie pelzanie), mikroskop SEM – pow. do 5000x, bank danych, mikroanalizator RTG	95	powyżej 40 000 h (6 lat)		