

Diagnostyka materiałowa elementów części ciśnieniowej kotłów i rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania znacznie poza obliczeniowym czasem pracy

Material diagnostics of components in the pressure part of steam boilers and pipelines operating under creep conditions much beyond the designed service life

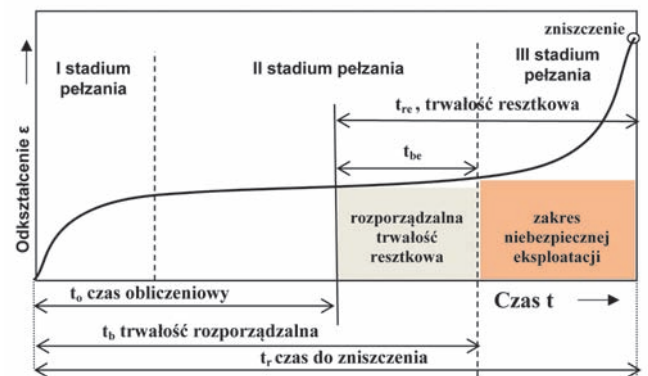
Energetyka zawodowa w Polsce oczekuje stworzenia możliwości eksploatacji pracujących bloków energetycznych do co najmniej 350 000 godzin, szczególnie, że rzeczywisty czas eksploatacji większości z nich przekroczył znacznie założony czas obliczeniowy wynoszący najczęściej 100 000 godzin. Spełnienie tych oczekiwań może być możliwe dzięki zastosowaniu metodologii umożliwiającej dobre oszacowanie lub wyznaczenie pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji dzięki występowaniu tzw. trwałości resztkowej [1-3]. Opracowana metodologia jest oparta na rzetelnych badaniach diagnostycznych i pomiarach wykonywanych głównie na elementach krytycznych kotła i turbiny będących w eksploatacji. Dopuszczanie do eksploatacji poza czas obliczeniowy dotyczy w szczególności: 2 bloków energetycznych o mocy 500 MW, 16 bloków o mocy 360 MW, ok. 60 bloków o mocy 200 MW i ok. 20 bloków o mocy 120 MW, to łącznie ok. 100 jednostek. Jednostki te stanowią ponad 75% krajowej mocy. Elementy krytyczne podlegające takiej ocenie to najczęściej elementy części ciśnieniowej kotła pracujące w warunkach pełzania.

Opracowana metodologia, którą przedstawiono poniżej, umożliwia dopuszczanie materiału tych elementów do dalszej eksploatacji po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy. Istotną składową tej metodologii jest sposób oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji. Metodologia ta i zaproponowane procedury wymagają prowadzenia okresowych badań diagnostycznych i każdorazowo dokonywania oceny stanu i stopnia wyczerpania materiału tych elementów, będąc podstawą oszacowania/wyznaczenia czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji.

Trwałość resztkowa i resztkowa rozporządzalna

Możliwości przedłużania eksploatacji poza czas obliczeniowy ma swoje źródło w co najmniej kilku czynnikach. Wśród nich do najważniejszych można zaliczyć: grubość rzeczywistą

znacznie większą od wyznaczonej obliczeniowej ($g_r \gg g_o$), robocze parametry pracy najczęściej niższe niż przyjęte obliczeniowe ($T_r < T_o$; $p_r < p_o$), wartość przyjętych współczynników bezpieczeństwa „X” o znacznej wielkości oraz rzeczywistą wartość wytrzymałości na pełzanie wyższą niż średnia wg norm ($R_{z,rz} > R_{sr}$ nawet o 20%). Dzięki tym czynnikom powstało pojęcie trwałości resztkowej i resztkowej rozporządzalnej [1, 3].



Rys. 1. Graficzne przedstawienie pojęcia trwałości resztkowej i rozporządzalnej [1, 3, 5]

Równocześnie dla potrzeb szacowania stanu materiału wprowadzono pojęcie 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} . Jest ona 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.

Pojęcia trwałości resztkowej i rozporządzalnej resztkowej przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 1 [1, 3, 5].

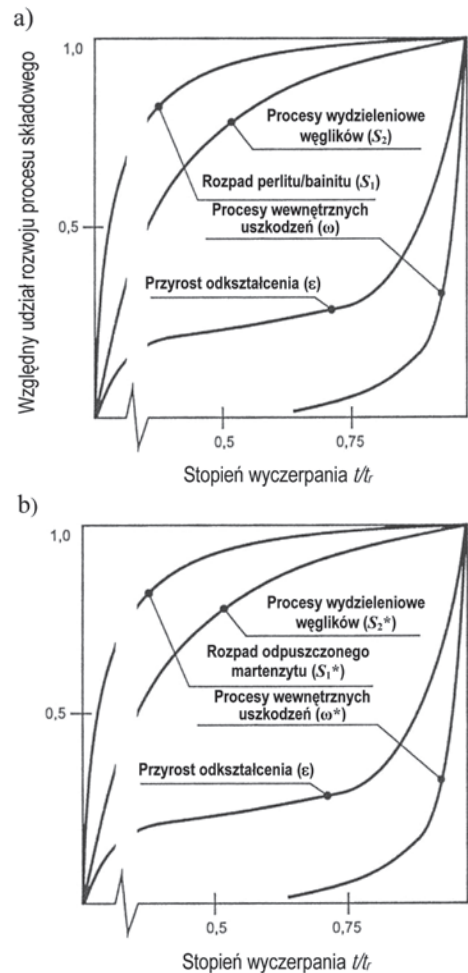
Zasady doboru rodzaju badań w ocenie stanu materiału elementów pracujących w warunkach pełzania

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. Wybór sposobu oceny stanu materiału, jego przydatności do dalszej pracy oraz szacowania/wyznaczania czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji materiału elementu decyduje o doborze rodzaju diagnostycznych badań niezbędnych w tej ocenie. Rodzaj tych badań należy dostosować do czasu eksploatacji i typu elementu części ciśnieniowej bloku energetycznego podlegającego badaniom. 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 [1-8].

Dla oszacowania stopnia wyczerpania na podstawie badań strukturalnych, najczęściej metodami nieniszczącymi, niezbędna jest znajomość zachowania się badanych materiałów w czasie pracy w warunkach pełzania. Zmiany w strukturze zachodzą w jej podstawowych składnikach fazowych oraz występujących wydzieleniach, powodując powstawanie i rozwój wewnętrznych uszkodzeń.

Ujawniono, 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 inkubacji i rozwojowi wewnętrznych uszkodzeń powodując powstawanie nieciągłości. Inicjacja nieciągłości najczęściej następuje pod koniec drugiego lub z początkiem trzeciego okresu pełzania, zależy to od rodzaju struktury, poziomu temperatury i naprężenia. Względne udziały procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania w zależności od stopnia wyczerpania dla niskostopowych stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, ferrytyczno-bainitycznej lub będącej mieszaniną perlitu i bainitu z ferrytem schematycznie przedstawiono na rysunku 2a, a zmiany w wysokochromowych stalach o strukturze stanu wyjściowego będącej odpuszczonym martenzytem na rysunku 2b.

Przyjęto, że dwa główne czynniki mające istotny wpływ na stan struktury materiału po eksploatacji, których skutki są zakodowane w materiale będącym przedmiotem oceny, to stan wyjściowy materiału i historia eksploatacji. Równocześnie ujawniono, że skutki zmian zachodzących w wyniku pełzania są zakodowane w materiale. Dlatego tworząc system oceny stanu materiału przyjęto, że ich znajomość nie jest wymagana.



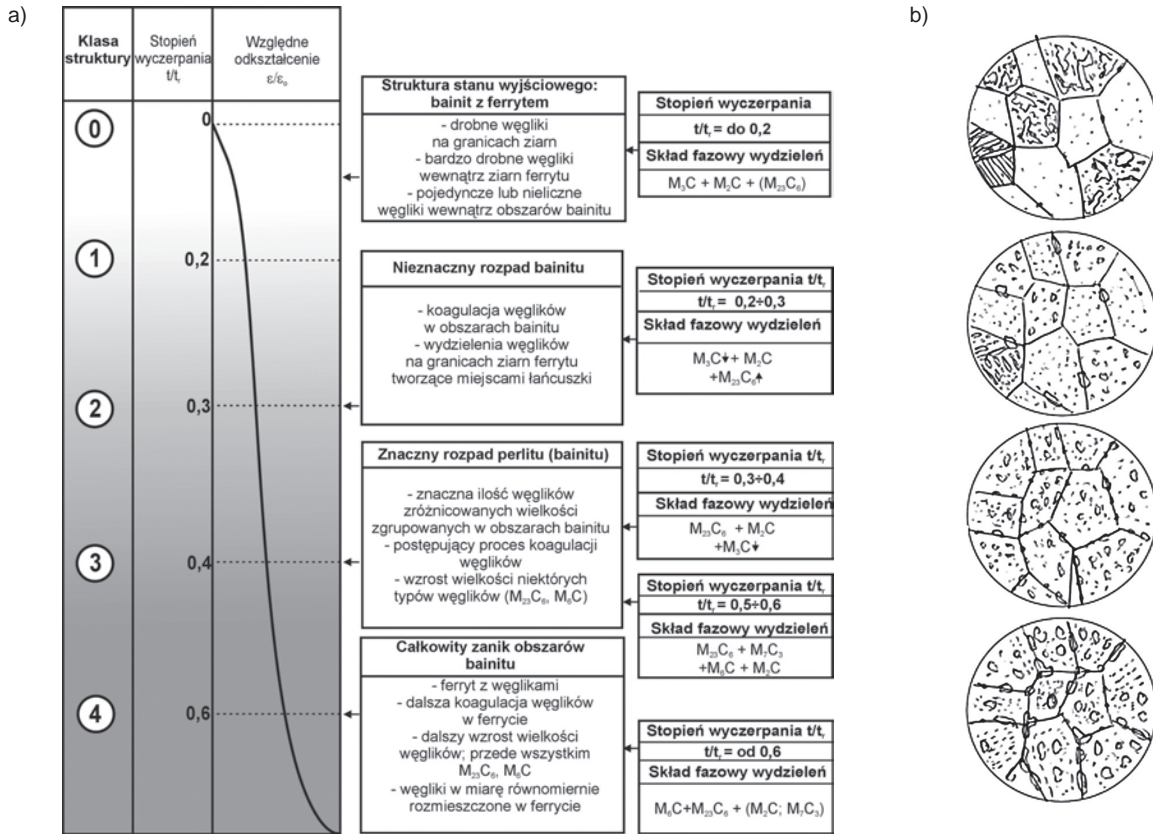
Rys. 2. Względne udziały procesów powodujących zmiany w strukturze materiału podczas pełzania w niskostopowych stalach o strukturze będącej mieszaniną ferrytu z perlitem lub ferrytu z bainitem w stanie wyjściowym [1]

W opracowanym systemie oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania istotną jest znajomość poziomu właściwości użytkowych odpowiadających określonemu stanowi struktury i odpowiadającemu mu stopniowi wyczerpania, a szczególnie wytrzymałości na pełzanie i prędkości pełzania. Wybrane wyniki tych badań, wykonanych dla różnych stanów struktury materiałów po eksploatacji, najczęściej dotychczas stosowanych gatunków stali przedstawiono w pracy [1].

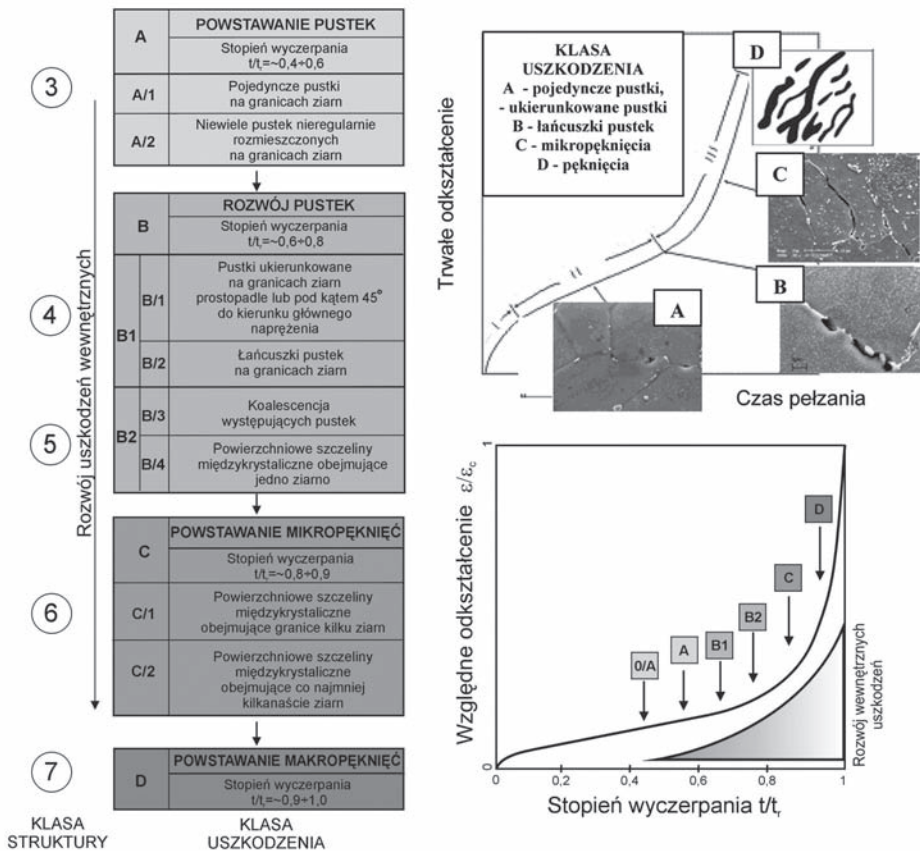
Degradacja mikrostruktury w wyniku pełzania jest skutkiem nakładania się zmian wynikających z, zachodzących w jej składnikach fazowych, procesów wydzieleniowych jak i uszkodzeń wewnętrznych. Przyjęto, że stopień wyczerpania materiałów pracujących w takich warunkach jest ich skutkiem.

W opracowanej klasyfikacji ujęto powyżej zdefiniowane elementy zmian w strukturze. Klasyfikację opracowano dla niskostopowych stali w gatunkach: 16Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, 14MoV6-3 oraz wysokochromowej X20CrMoV11-1.

Opracowana klasyfikacja dla każdej z tych stali składa się z części obejmującej zmiany w strukturze badanych stali po eksploatacji bez wewnętrznych uszkodzeń w zależności od stopnia wyczerpania oraz części obejmującej zmiany w strukturze w zależności od stopnia wyczerpania opracowane dla wymienionych materiałów z uszkodzeniami wewnętrznymi w wyniku pełzania.



Rys. 3. 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 oraz model ewolucji struktury stali 10CrMo9-10 bez wewnętrznych uszkodzeń [1]



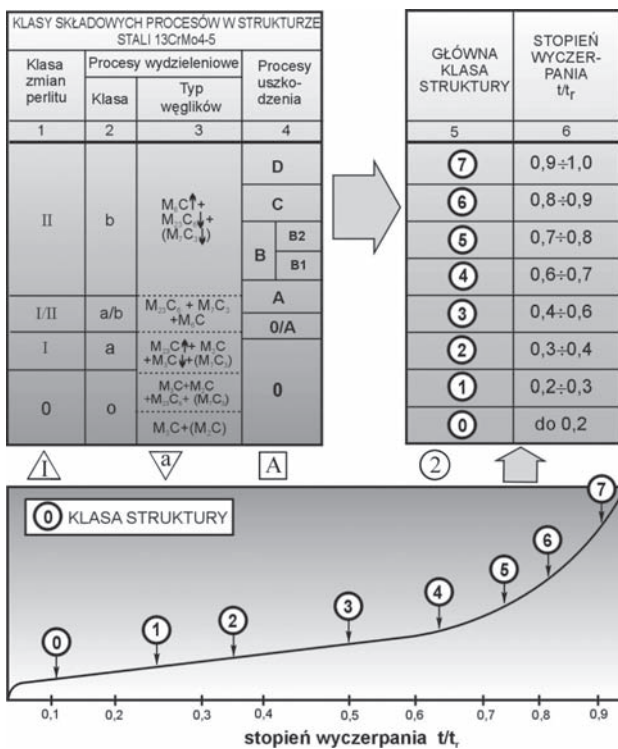
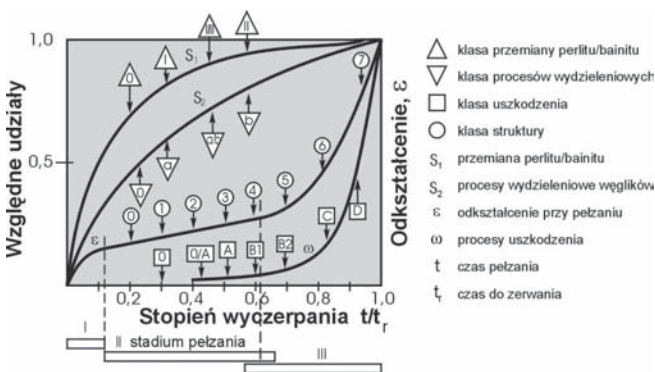
Rys. 4. Klasyfikacja uszkodzeń wewnętrznych w zależności od stopnia wyczerpania w wysokochromowych stalach martenzytycznych pracujących w warunkach pełzania [1]

Przykładowy schemat dla stali 10CrMo9-10, będący ilustracją opracowanej części klasyfikacji dla stanów struktury bez uszkodzeń wewnętrznych, przedstawiono na rysunku 3a, a opracowany dla niej model ewolucji mikrostruktury w wyniku pełzania na rysunku 3b.

Natomiast przykład schematu będącego ilustracją części klasyfikacji dla stanów struktury z uszkodzeniami wewnętrznymi dla niskostopowych stali typu Cr-Mo i Cr-Mo-V pokazano na rysunku 4.

Równocześnie opracowano atlas struktur ilustrujący kolejne etapy zmian i stany struktury dla zdefiniowanych klas najczęściej stosowanych stali [1, 3, 6].

Metodologię oceny stanu materiału pracującego w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze w wyniku procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania na przykładzie stali 10CrMo9-10 pokazano w postaci graficznej na rysunku 5.



Rys. 5. Metodologia oceny stanu materiału pracującego w warunkach pełzania na podstawie oceny zmian w strukturze procesów składowych odniesionych do stopnia wyczerpania na przykładzie stali 13CrMo4-5 [1]

Klasyfikacja zmian struktury w wyniku pełzania umożliwiła zbudowanie elementów charakterystyk materiałowych będących zależnością własności mechanicznych od klasy struktury i stopnia wyczerpania. Charakterystyki te pozwalają na ocenę stanu badanych materiałów po eksploatacji w warunkach pełzania.

Ocena stopnia „wyeksploatowania” stali po długotrwałej pracy w warunkach pełzania, mierzona jest stopniem wyczerpania, na podstawie oceny zmian w strukturze w wyniku procesów składowych tzn.: zmian w strukturze perlitu, bainitu lub martenzytu, zmian w zakresie rozwoju procesów wydzieleniowych oraz zmian w zakresie rozwoju uszkodzeń wewnętrznych. Oceniając wyżej wymienione elementy składowe mikrostruktury wyznacza się główną klasę struktury i odpowiadający jej stopień wyczerpania. Oprócz oszacowanej trwałości resztkowej i resztkowej trwałości rozporządzałnej można oszacować poziom 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 [2].

Ocena stanu materiału elementów pracujących w warunkach pełzania w praktyce

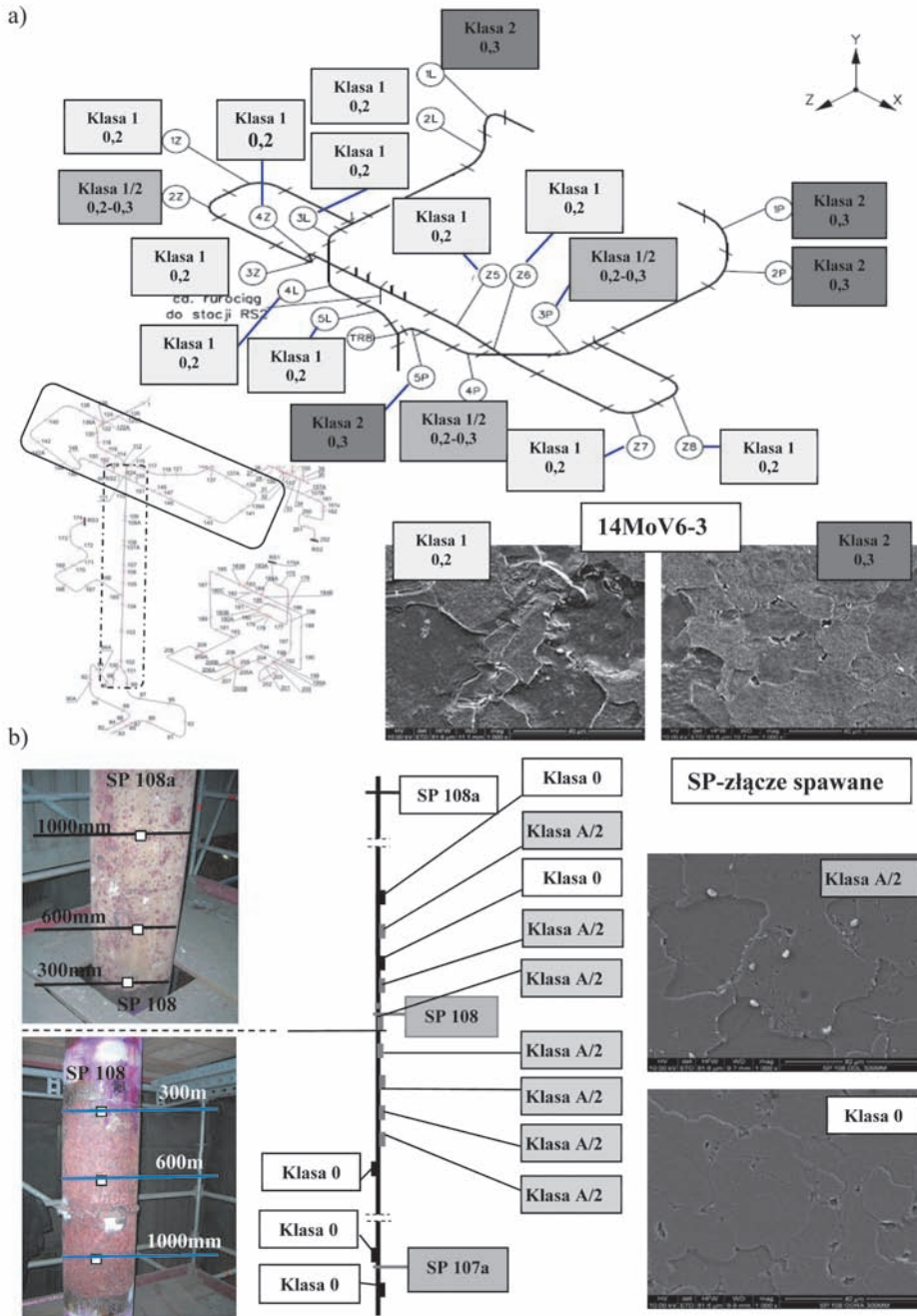
Praktyczne zastosowanie opracowanego systemu oceny stanu materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania pokazano na przykładzie wyników badań mikrostruktury przy użyciu mikroskopu skaningowego na replikach matrycowych.

Przykład wyników badań mikrostruktury bez wewnętrznych uszkodzeń w wyniku pełzania na wycinku rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po długotrwałej eksploatacji przez ponad 215000 godzin pokazano na rysunku 6a oraz na rysunku 6b z ujawnionymi uszkodzeniami w postaci pusteł. 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.

Podsumowanie

Opracowana i opisana metodyka oceny stanu materiału, oceny stanu elementu, jego trwałości resztkowej i trwałości rozporządzałnej 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 rozporządzałnej 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 po eksploatacji z materiałami w stanie wyjściowym lub z materiałami po eksploatacji.



Rys. 6.
Ocena stanu materiału; klasa mikrostruktury i stopień wyczerpania materiału odcinka rurociągu pary świeżo ze stali 14MoV6-3 po ok. 215 000 godzinach eksploatacji w warunkach pełzania (repliki matrycowe SEM)
a) bez uszkodzeń wewnętrznych,
b) z uszkodzeniami wewnętrznymi

PIŚMIENNICTWO

- [1] Dobrzański J., Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki, Open Access Library, Volume 3, 2011, pp. 1-228.
- [2] Dobrzański J., Hernas A., Klimas H., Materiałoznawcze podstawy przedłużenia czasu bezpiecznej eksploatacji elementów krytycznych kotła, *Energetyka* 1997, nr 10, 549-556.
- [3] Hernas A., Dobrzański J., Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych – Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [4] Dobrzański J., Kowalski B., Wodzyński J., Diagnostyka techniczna elementów krytycznych części ciśnieniowej kotłów energetycznych pracujących w warunkach pełzania po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy, *Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów*, Prace IMiUE, Politechnika Śląska, 23/1 (2009) 85-126.
- [5] Neubauer B., Wedel U., NDT: Replication avoids unnecessary replacement of power plant components, *Power Engineering* 88 (1984) 44-48.
- [6] Dobrzański J., Hernas A., Moskal G., Microstructural degradation in power plant steels, Chapter No. 9 in book: J.E. Oakey (ed.), *Power plant life management and performance improvement*, Woodhead Publishing Limited, Sawston, UK, 2011.
- [7] Dobrzański J., Diagnostyka materiałowa w ocenie stanu i prognozie czasu eksploatacji poza czas obliczeniowy rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania, *Energetyka* 2002, nr 12, 937-946.
- [8] Dobrzański J., Zieliński A., Paszkowska H., Wyznaczanie trwałości resztkowej i czasu dalszej bezpiecznej pracy na przykładzie materiału rodzimego i złącza spawanego, *Prace IMŻ* 61/1 (2009) 9-25.

