

Diagnostyka i ocena trwałości elementów kotła ze stali 16Mo3 pracującego w warunkach pełzania

Diagnosis and sustainability assessment of boiler components made of 16Mo3 steel operating in creep conditions

Streszczenie

Artykuł zawiera modelowe obrazy degradacji mikrostruktury stali 16Mo3 pracującej w warunkach pełzania w części ciśnieniowej kotła energetycznego. Dla badanego materiału podano klasy struktury w zależności od stanu jej mikrostruktury w tym również stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania. W postaci graficznej przedstawiono odniesienie klas mikrostruktury do stopnia wyczerpania, dokonane na podstawie oceny zmian w strukturze to jest: stopnia rozpadu poszczególnych faz, stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych oraz stopnia rozwoju wewnętrznych uszkodzeń. W tabelach zestawiono zaproponowane okresy dopuszczenia do dalszej eksploatacji w zależności od klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania

Słowa kluczowe: pełzanie; stal energetyczna; trwałość

Abstract

The article contains the model images of the degradation of 16Mo3 steel microstructure working in creep conditions of pressure zone in the boiler. The material being tested is given class structure according to the state of the microstructure, including: the degree of development of the processes of precipitation in relation to the degree of exhaustion. In graphical form shows the microstructure of a reference class to the degree of exhaustion, made on the basis of changes in the structure of it is: the degree of disintegration of the individual phases and level of precipitation processes and the degree of development of internal damage. The tables summarize the proposed periods of admission to further exploitation depending on the class structure and the corresponding degree of exhaustion

Keywords: creep; energetic steel; sustainability

Wstęp

Przedmiotem opracowania są zasady diagnostyki oraz sposób dokonywania oceny stanu elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania, w celu oszacowania lub wyznaczenia ich trwałości eksploatacyjnej. W procesie oceny stanu i prognozowania bezpiecznego czasu dalszej eksploatacji elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania stosowane są metody, które można przyporządkować do dwóch następujących grup [1÷5]:

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

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

W praktyce inżynierskiej wykorzystuje się metody kwalifikowane do obydwu grup przy czym metody obliczeniowe stosuje się zazwyczaj w prognozowaniu dalszej eksploatacji jako główny element analizy ekonomicznej, w podejmowaniu decyzji o przystąpieniu do badań diagnostycznych i pomiarów [6÷8].

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

Mgr inż. Adam Ogrodnik – Urząd Dozoru Technicznego; **dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. PW** – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: t.chmielewski@wip.pw.edu.pl

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

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

Stal stosowana na elementy kotłów i rurociągów powinna charakteryzować się [6,8÷10]:

- stabilnymi właściwościami wytrzymałościowymi w czasie długotrwałej eksploatacji w podwyższonej temperaturze [11];
- małą skłonnością do wzrostu kruchości (obniżenia udarności, wzrostu temperatury przejścia w stan kruchy) w warunkach pracy [12];
- wysoką granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie;
- stabilną mikrostrukturą w czasie długotrwałej eksploatacji;
- korzystnymi właściwościami fizycznymi, tj. możliwie małym współczynnikiem rozszerzalności liniowej i dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła;
- odpowiednią żarowytrzymałością i żaroodpornością;
- odpornością na zmęczenie cieplne i cieplno-mechaniczne podczas eksploatacji, a szczególnie odpornością na zmęczenie niskocyklowe [13];
- odpowiednimi właściwościami technologicznymi, takimi jak: dobra spawalność, podatność do przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej.

Tablica 1. Okres dopuszczenia do dalszej eksploatacji w zależności od klasy struktury niskostopowej stali ferrytyczno-perlitycznej 16Mo3 (16M) pracującej w warunkach pełzania

Table 1. Time of exploitation depended on microstructure class of low alloy 16Mo3 steel operating in creep condition

Stal molibdenowa 16Mo3 (16M), ferrytyczno-perlityczna					
Stan struktury	Skład fazowy wydzieliń	Klasa struktury	Stopień wyczerpania	Czas dopuszczenia do dalszej eksploatacji [h] w zależności od dotychczasowego okresu pracy	
				od 100 000 do 150 000 h	powyżej 150 000 h
Struktura stanu wyjściowego lub niewiele odbiegająca od stanu wyjściowego - perlit z ferrytem <ul style="list-style-type: none"> • budowa płytkowa cementytu w perlicie, • drobne pojedyncze lub nieliczne węgliki na granicach ziarn ferrytu 	M ₃ C w postaci płytek	0	0	maks. 60 000	maks. 40 000
		0/1	do 0,2		
Nieznaczny lub częściowy rozpad perlitu: <ul style="list-style-type: none"> • nieznaczna fragmentacja płytek cementytu w perlicie, • węgliki na granicach ziarn ferrytu tworzące miejscami łańcuszki (siatki węglików), • zapoczątkowanie koagulacji płytek cementytu w perlicie. 	M ₃ C w postaci sfragmentaryzowanych płytek	1	0,2÷0,3	maks. 60 000	maks. 40 000
		2	0,3÷0,4		
Znaczący rozpad perlitu: <ul style="list-style-type: none"> • postępujący proces koagulacji i koalescencji węglików w obszarach perlitycznych, • znaczna ilość węglików różnicowanej wielkości zgrupowanych w obszarach perlitycznych, • łańcuszki węglików na granicach ziarn ferrytu, • drobne węgliki wewnątrz ziarn ferrytu. 	M ₃ C w postaci skoagulowanej +M ₂ C	3	0,4÷0,5	maks. 40 000	DT
		3/4	0,5÷0,6		
Całkowity zanik obszarów perlitu: <ul style="list-style-type: none"> • ferryt z węglkami (i grafitem), • dalsza koagulacja i koalescencja węglików w ferrycie, • dalszy znaczący wzrost wielkości węglików, • węgliki w miarę równomiernie rozmieszczone w ferrycie, • możliwość występowania grafitu. 	M ₃ C w postaci skoagulowanych wydzieliń + M ₂ C, możliwość występowania grafitu	4	>0,6	DT	DT

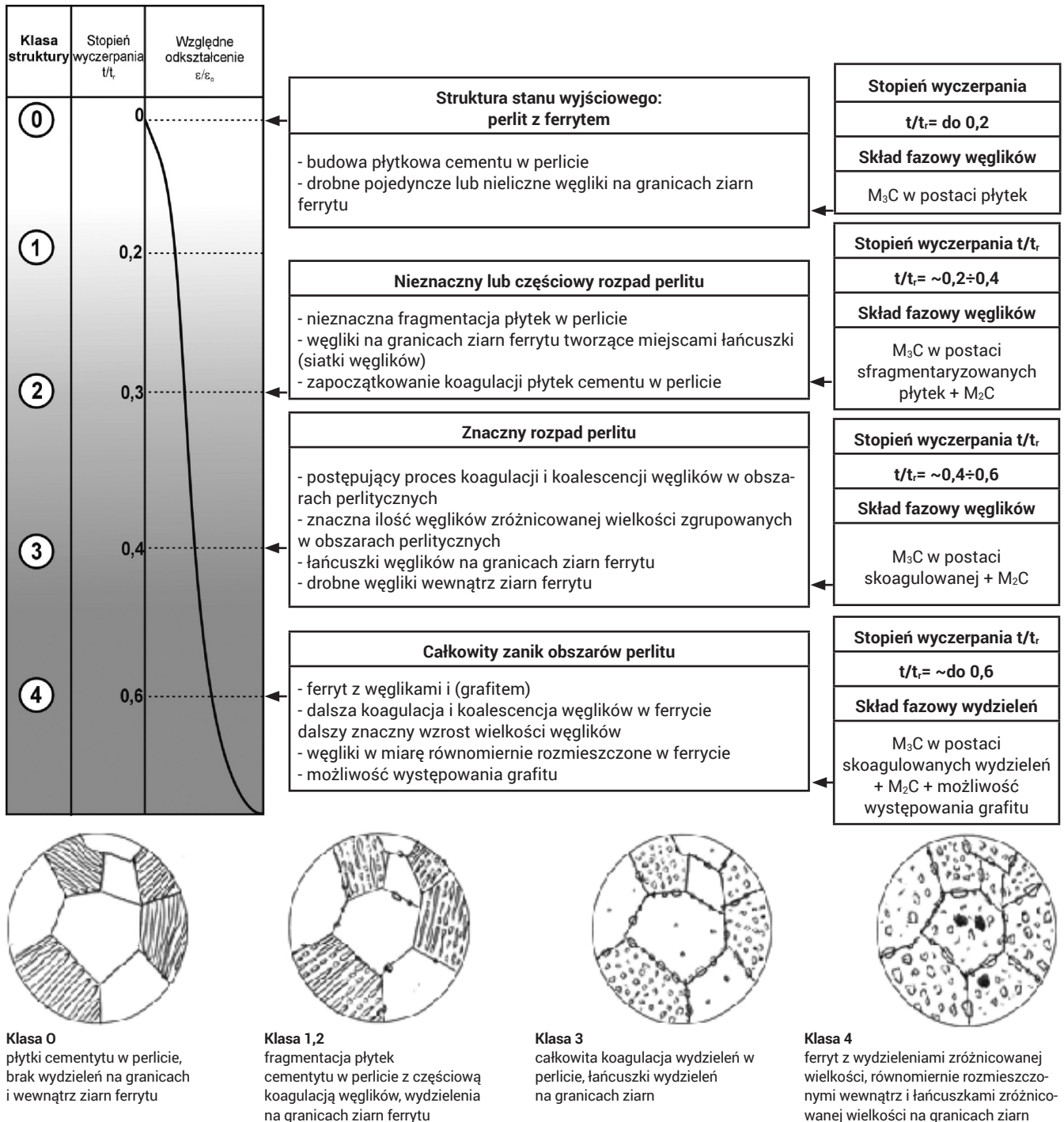
Niniejsze opracowanie dotyczy eksploatowanej przez długi okres czasu w warunkach pełzania stali niskostopowej o strukturze ferrytyczno-perlitycznej w gatunku 16Mo3 wg EN 10028-2 + PN-EN10216-2 (16M wg PN-75/H- 84024),

Wyniki badań strukturalnych

Opracowanie zawiera modelowe obrazy degradacji mikrostruktury stali 16Mo3 pracującej w warunkach pełzania w części ciśnieniowej kotła energetycznego. Modele degradacji mikrostruktury zamieszczono na rysunku 1. Dla przedmiotowego materiału podano klasy struktury w zależności od stanu jej podstawowych składników strukturalnych i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania. W postaci graficznej przedsta-

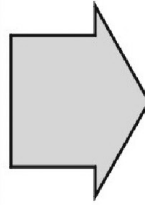
wiono odniesienie klas mikrostruktury do stopnia wyczerpania, dokonane na podstawie oceny następujących zmian w strukturze: stopnia rozpadu poszczególnych faz, stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych oraz stopnia rozwoju wewnętrznych uszkodzeń (rys. 2). Ponadto w postaci tabelarycznej zestawiono zaproponowane okresy dopuszczenia do dalszej eksploatacji w zależności od klasy struktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania (tabl. I).

Dla przedmiotowej stali pokazano przykłady oceny stanu mikrostruktury, obserwacje mikrostruktury przeprowadzane w mikroskopie świetlnym oraz skaningowym mikroskopie elektronowym, z wykorzystaniem zglądów metalograficznych a także replik matrycowych pobieranych bezpośrednio na obiektach przemysłowych. Przykłady te obejmują stany materiału po eksploatacji bez uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania (tabl. II).

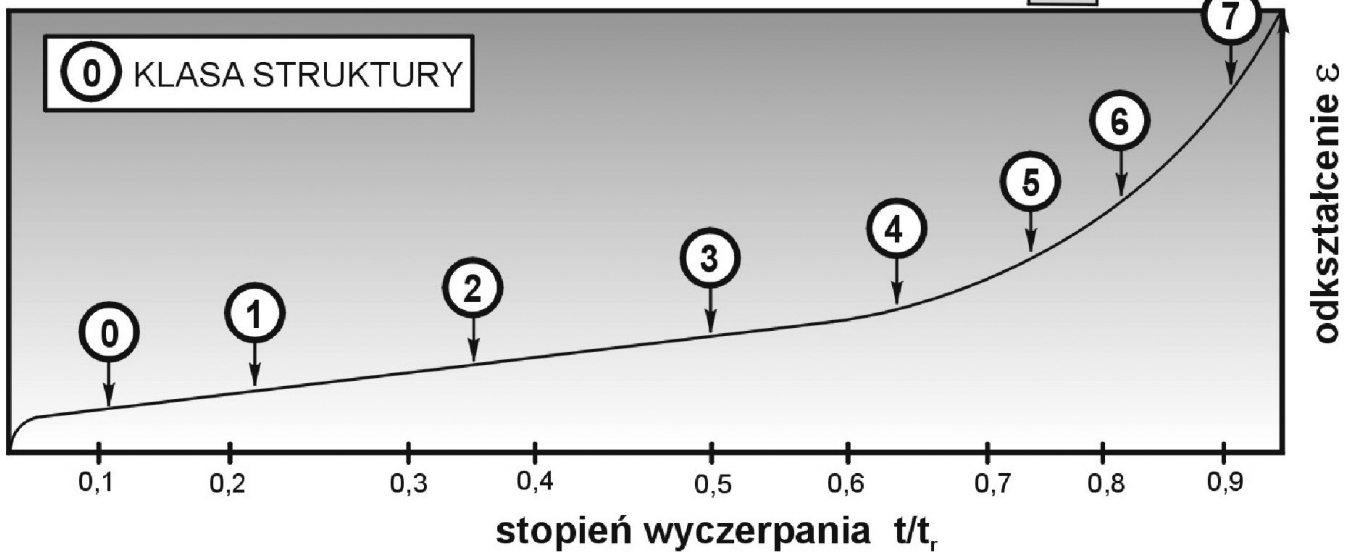


Rys. 1. Modele degradacji struktury ferrytyczno-perlitycznej stali 16Mo3 (16M) w wyniku pełzania. Klasy struktury w zależności od stanu jej podstawowych składników i stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych w powiązaniu ze stopniem wyczerpania bez wewnętrznych uszkodzeń
Fig. 1. The models of ferritic-pearlitic structure degradation in 16Mo3 steel as a result of creeping process. Structure classes depended on state of microstructure and level of damage development

KLASY SKŁADOWYCH PROCESÓW W STRUKTURZE STALI 16Mo3				
Klasa zmian perlitu	Procesy wydzieleniowe		Procesy uszkodzenia	
	Klasa	Typ węglików		
1	2	3	4	
II	b	$M_3C + M_2C + (\text{grafit})$	D	
			C	
			B	B2
				B1
I/II	a/b	$M_3C + M_2C$	A	
I	a	$M_3C \uparrow + (M_2C)$	0/A	
0	o	M_3C	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

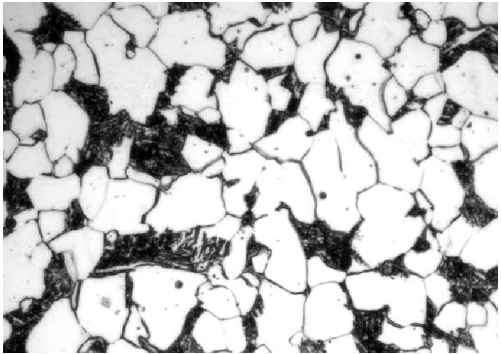
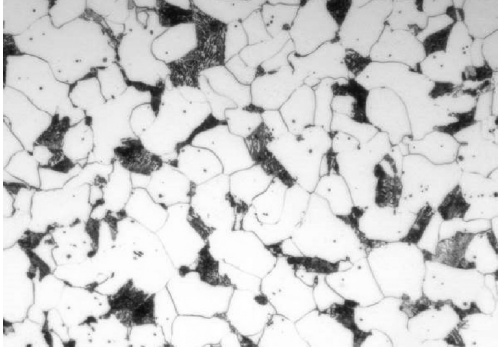
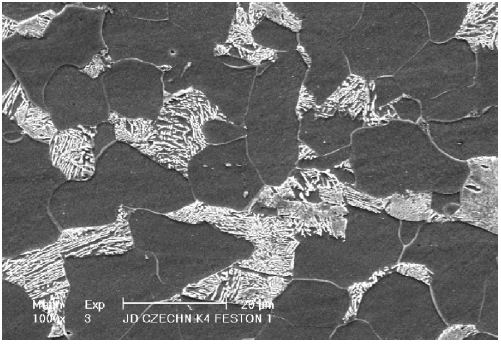
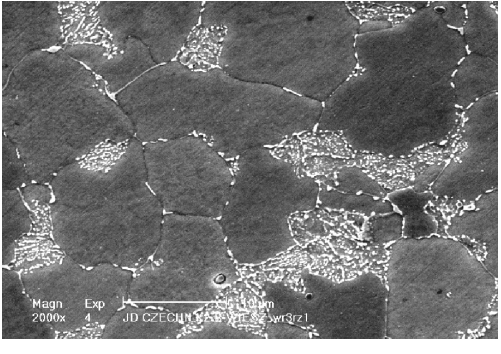


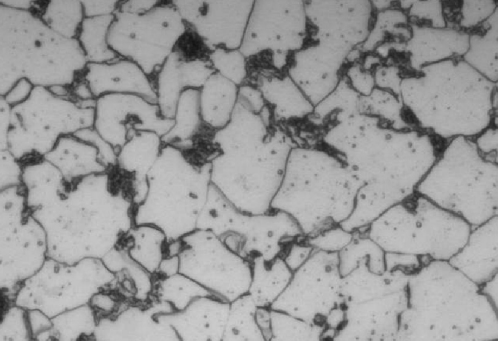
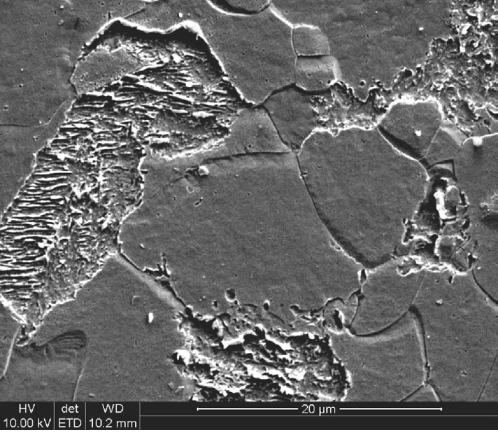
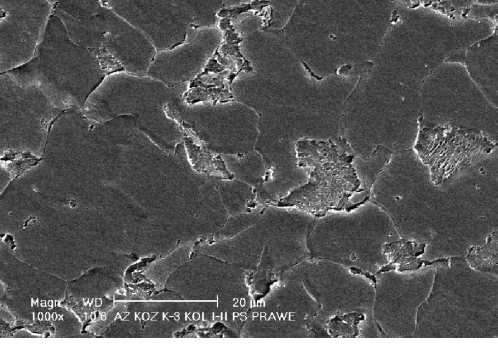
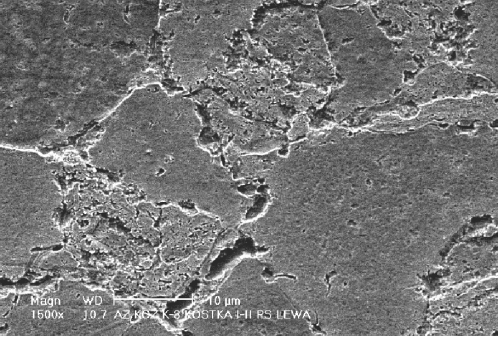
Rys. 2. Klasa mikrostruktury w odniesieniu do stopnia wyczerpania na podstawie oceny zmian w strukturze: stopnia rozpadu obszarów perlitycznych, stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych oraz stopnia rozwoju wewnętrznych uszkodzeń niskostopowej stali ferrytyczno-perlitycznej 16Mo3 (16M) pracującej w warunkach pełzania

Fig. 2. Class of microstructure depended on state of material exhausting based on changes in microstructure assessment: Structure classes depended on state of microstructure and level of damage development

Tablica I. Str. 9-10. Przykłady oceny stanu mikrostruktury niskostopowej stali ferrytyczno-perlitycznej 16Mo3 (16M) po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania

Table I. PP 9-10 Examples of the microstructure evaluation of ferritic-pearlitic low alloy steel - 16Mo3 (16M) after long-term operation in creep condition

Obraz mikrostruktury	preparat urządzenie	Opis mikrostruktury	Klasa struktury	Stopień wyczerpania
	<p>zgląd metalograficzny trawiony mikroskop świetlny</p>	<p>Struktura ferrytyczno perlityczna. Płytki cementytu w perlicie. Na granicach ziarn ferrytu pojedyncze drobne wydzielenia. Wewnątrz ziarn ferrytu nie zaobserwowano wydzielań.</p>	<p>o; 0; 0 Klasa 0</p>	<p>0</p>
	<p>zgląd metalograficzny trawiony mikroskop świetlny</p>	<p>Struktura ferrytu z obszarami perlitu. Fragmentacja płytek cementytu w perlicie. Wewnątrz i na granicach ziarn ferrytu nie zaobserwowano wydzielań. Nie zaobserwowano zapoczątkowania procesów uszkodzenia. Nie stwierdzono nieciągłości i mikropęknięć w strukturze.</p>	<p>0/I; oa; 0 Klasa 1</p>	<p>do 0,2</p>
	<p>zgląd metalograficzny trawiony skaniny mikroskop elektronowy</p>	<p>Struktura ferrytyczno perlityczna. Płytki cementytu w perlicie. Na granicach ziarn ferrytu pojedyncze drobne wydzielenia. Wewnątrz ziarn ferrytu nie zaobserwowano wydzielań</p>	<p>o; 0; 0 Klasa 0</p>	<p>0</p>
	<p>zgląd metalograficzny trawiony skaniny mikroskop elektronowy</p>	<p>Struktura ferrytu z obszarami perlitu. Fragmentacja płytek cementytu w perlicie. Proces koagulacji i koalescencji węglików w obszarach perlitycznych. Na granicach ziarn ferrytu wydzielienia tworzące miejscami łańcuszki. Wewnątrz ziarn ferrytu nie zaobserwowano wydzielań Nie zaobserwowano zapoczątkowania procesów uszkodzenia. Nie stwierdzono nieciągłości i mikropęknięć w strukturze.</p>	<p>I/II; a/b; 0 Klasa 2/3</p>	<p>0,4</p>

Obraz mikrostruktury	preparat urządzenie	Opis mikrostruktury	Klasa struktury	Stopień wyczerpania
	replika matrycowa mikroskop świetlny	Struktura ferrytyczno perlityczna. Płytki cementytu w perlicie. Na granicach ziarn ferrytu pojedyncze drobne wydzielienia. Wewnątrz ziarn ferrytu niewiele drobnych wydzieliń	0/l; oa; 0 Klasa 1	do 0,2
	replika matrycowa skaningowy mikroskop elektronowy	Struktura ferrytyczno perlityczna. Płytki cementytu w perlicie. Na granicach i wewnątrz ziarn ferrytu nie zaobserwowano wydzieliń.	o; 0; 0 Klasa 0	0
	replika matrycowa skaningowy mikroskop elektronowy	Struktura ferrytyczno perlityczna. W obszarach perlitu sfragmentary- zowane płytki cementytu. Na granicach ziarn ferrytu pojedyncze wydzielienia różnicowanej wielkości. Wewnątrz ziarn ferrytu nie zaobserwowano wydzieliń. Nie zaobserwowano zapoczątko- wania procesów uszkodzenia. Nie stwierdzono nieciągłości i mikropęknięć w strukturze.	0/l; o/a; 0 Klasa 1	do 0,2
	replika matrycowa skaningowy mikroskop elektronowy	Struktura ferrytyczno perlityczna. Po części skoagulowane obszary perlitu Na granicach ziarn ferrytu różnicowanej wielkości wydzielienia, niektóre dość znaczne. Wewnątrz ziarn ferrytu zaobserwowano wydzielienia dość równomiernie rozmieszczone. Nie zaobserwowano zapoczątko- wania procesów uszkodzenia. Nie stwierdzono nieciągłości i mikropęknięć w strukturze	l; a; 0 Klasa 1/2	0,3

Podsumowanie

W przypadku stali eksploatowanych w warunkach podwyższonej temperatury, narażonej na pełzanie, będącej częścią kotła energetycznego, którego ewentualna awaria może być przyczyną znacznych strat nie tylko o charakterze materialnym, niezwykle istotna jest trafność oceny jej stanu w kontekście dalszej bezpiecznej eksploatacji. W zależności od zastosowanych metod badawczych, trafność oceny oraz prognoza dalszej bezpiecznej eksploatacji materiału może być niejednoznaczna bez znajomości charakterystycznych modeli degradacji mikrostruktury.

W ramach prowadzonych badań obserwowano kolejne stopnie degradacji mikrostruktury świadczące o stopniowym wyczerpywaniu się możliwości dalszej bezpiecznej eksploatacji. Zaproponowano sklasyfikowanie struktury oraz określenie stopnia wyczerpania na podstawie opisywanego postępu degradacji mikrostruktury.

Wyniki niniejszego opracowania mogą być przydatne w zakresie:

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

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

Literatura

- [1] J. Dobrzański, A. Hernas: Sprawozdanie nr P/XII-2/2014: 'Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania – Etap I'.
- [2] J. Dobrzański, A. Hernas: Sprawozdanie nr P-2/III-1/2015: 'Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania – Etap II'.
- [3] Praca zbiorowa: Materiały Techniczne Urzędu Dozoru Technicznego nr 3/2013: 'Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania'.
- [4] Praca zbiorowa: Materiały stosowane w energetyce ciepłej, wyd. Politechniki Częstochowskiej, 2003.
- [5] T. Chmielewski: Projektowanie procesów technologicznych – spawalnictwo Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013.
- [6] K. Ferenc i inni: Technika spawalnictwa w praktyce: poradnik inżyniera, konstruktora i spawacza, Verlag Dashofer, 2009.
- [7] T. Sałaciński: SPC Statistical Process Control, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2015.
- [8] W. Kramarek, T. Sałaciński: Energetyka jądrowa na świecie (1), Przegląd Techniczny, vol. 20, s. 13-19, 2013.
- [9] P. Urbańczyk, J. Słania, G. Golański: Wpływ pełzania na uszkodzenia złącza spawanego rurociągu pary świeżej, Przegląd Spawalnictwa, vol. 86 (4), s. 23-30, 2014.
- [10] M. Kwiecień, A. Głowacki: Pełzanie jako zjawisko ograniczające długotrwałą eksploatację rurociągów parowych, Energetyka, nr 7, s. 556-560, 2013.
- [11] Soo Woo Nam: Assessment of damage and life prediction of austenitic stainless steel under high temperature creep-fatigue interaction condition, Materials Science and Engineering: A, Vol. 322 (1-2), p. 64-72, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01118-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01118-2)
- [12] Y. Takahashi: Study on creep-fatigue evaluation procedures for high-chromium steels – Part I: Test results and life prediction based on measured stress relaxation, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 85 (6), p. 406-422, 2008.
- [13] R. Frith, M. Stone: A proposed new pressure vessel design class, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 139-140, p. 4-11, 2016.