

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

Instytut Metalurgii Żelaza

BADANIA NOWYCH MATERIAŁÓW NA ELEMENTY KOTŁÓW O NADKRYTYCZNYCH PARAMETRACH PRACY

Celem pracy było przedstawienie wybranych charakterystyk materiałowych dotyczących zmian właściwości wytrzymałościowych odniesionych do zmian strukturalnych zachodzących w stali podczas długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. W opracowaniu mającym charakter przeglądowy zawarte zostały dane dotyczące stali stosowanych do budowy kotłów nadkrytycznych. Przedstawiono wybrane wyniki badań stali T23 (7CrWVMoNb9-6), T24 (7CrMoVTiB10-10), P91 (X10CrMoVNb9-1), P92 (X10CrWMoVNb9-2) VM12 (X12CrCoWVNb12-2-2) w stanie wyjściowym oraz po długotrwałej ekspozycji w warunkach pełzania.

Słowa kluczowe: stale: T23, T24, P92, P91, VM12, mikrostruktura, pełzanie, właściwości mechaniczne

INVESTIGATIONS OF NEW MATERIALS FOR ELEMENTS OF BOILERS WITH SUPERCRITICAL WORKING PARAMETERS

The purpose of the paper was to present selected material characteristics with regard to changes in strength properties related to structural changes occurring in steel during long-term service under creep conditions. This review includes data concerning steels used for construction of supercritical boilers. Selected test results are presented for T23 (7CrWVMoNb9-6), T24 (7CrMoVTiB10-10), P91 (X10CrMoVNb9-1), P92 (X10CrWMoVNb9-2) and VM12 (X12CrCoWVNb12-2-2) steels in initial state and after long-term exposure under creep conditions.

Key words: steels: T23, T24, P92, P91, VM12, microstructure, creep, mechanical properties

1. WPROWADZENIE

Materiały stosowane na najbardziej wytężone elementy konstrukcyjne kotła wymagają odpowiednich walorów użytkowych, a w szczególności:

- czasowej wytrzymałości na pełzanie nie tylko dla 100 000 h, ale i dla 200 000 h,
- granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w temperaturze pokojowej i podwyższonej,
- odporności na kruche pękanie w warunkach eksploatacyjnych kotła,
- żaroodporności w środowisku spalin i pary wodnej,
- wytrzymałości na zmęczenie cieplno-mechaniczne, szczególnie na zmęczenie niskocyklowe.

Zróżnicowane warunki pracy panujące w kotle wysokoprężnym, szczególnie szeroki zakres temperatury pracy, powodują, że nie należy oczekiwać zastosowania jednego uniwersalnego gatunku stali. Oczekiwane właściwości wytrzymałościowe i technologiczne dla elementów ścian membranowych spełniają nowe niskostopowe stale bainityczne, a wymagania stawiane stalom przeznaczonym na przegrzewacze pary spełniają nowe wysokochromowe stale o strukturze odpuszczonego martenzytu w temperaturze pracy do ok. 600°C i ciśnieniu do ok. 30 MPa.

W ostatnich latach na świecie nastąpił znaczny rozwój nowych stali do pracy w podwyższonej temperaturze, a w kraju powstaje szereg prac i projektów

badawczych, mających na celu sprawdzenie wymaganego poziomu właściwości wytrzymałościowych i technologicznych, nie tylko w stanie dostawy, ale również na skutek długotrwałej eksploatacji. Do stali tych zalicza się niskostopowe stale 7Cr5WVNb9-6 (T/P23) i 7CrMoVTiB10-10 (T/P24) oraz wysokochromowe stale X10CrMoVNb9-1 (P91), X10CrWMoVNb9-2 (P92) i X12CrCoWVNb12-2-2 (VM12).

Instytut Metalurgii Żelaza we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi w Polsce i za granicą (COST 522, 536) prowadzi prace w zakresie badań poprzedzających zastosowanie stali nowej generacji dla energetyki.

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań właściwości mechanicznych, mikrostruktury oraz badań pełzania. Przedstawione wyniki badań stanowią element bazy charakterystyk materiałowych stali do pracy w podwyższonej temperaturze [1–20]. Charakterystyki te wykorzystywane są w opracowywaniu technologii wytwarzania oraz w pracach diagnostycznych elementów ciśnieniowych kotłów w ocenie trwałości w obliczeniowym i poza obliczeniowym czasem pracy. Skutkuje to zwiększeniem wydajności, obniżeniem awaryjności oraz zwiększeniem bezpieczeństwa pracy eksploatowanych kotłów energetycznych [1, 2].

Tabela 1. Skład chemiczny badanych stali

Table 1. Chemical composition of tested steels

Gatunek stali	Zawartość pierwiastków, % mas.												
	-	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	W	Nb	B	inne
T23	bad, mat.	0,04÷ 0,10	0,10÷ 0,60	max 0,50	max 0,03	max 0,01	1,90÷ 2,60	0,05÷ 0,30	0,20÷ 0,30	1,45÷ 1,75	0,02÷ 0,08	0,0005÷ 0,006	N max 0,03
	wg normy [3]	0,058	0,46	0,20	0,014	0,001	2,18	0,08	0,25	1,54	0,05	0,0023	N max 0,03
T24	bad, mat.	0,09	0,24	0,53	0,015	0,002	2,51	1,01	0,007	-	-	0,005	Cu 0,24
	wg normy [3]	0,05 0,10	0,15 0,45	0,30 0,70	- 0,02	- 0,01	2,20 2,60	0,90 1,10	- 0,010	-	-	0,0015 0,0070	Cu 0,20 0,30
P91	bad, mat.	0,11	0,41	0,28	0,016	0,004	8,80	0,91	0,22	-	0,07	-	N 0,03
	wg normy [3]	0,08÷ 0,12	0,30÷ 0,60	0,20÷ 0,50	max 0,02	max 0,01	8,0÷ 9,5	0,85÷ 1,05	0,18÷ 0,25	-	0,06÷ 0,10	-	N 0,03÷ 0,07
P92	bad, mat.	0,10	0,45	0,17	0,01	0,01	9,26	0,47	0,20	1,95	0,059	0,009	N 0,04
	wg normy [3]	0,07÷ 0,13	0,30÷ 0,60	max 0,50	max 0,02	max 0,01	8,5÷ 9,5	0,30÷ 0,60	0,15÷ 0,25	1,5÷ 2,0	0,04÷ 0,09	max 0,006	N 0,03÷ 0,07
VM12	bad, mat.	0,13	0,22	0,48	0,01	0,01	11,40	0,27	0,22	1,30	0,05	0,003	N 0,05
	wg normy [9]	0,11÷ 0,14	0,15÷ 0,45	0,40÷ 0,60	max 0,02	max 0,01	11,0÷ 12,0	0,20÷ 0,40	0,20÷ 0,30	1,30÷ 1,70	0,03÷ 0,08	0,003÷ 0,006	N 0,03÷ 0,07

2. MATERIAŁ DO BADAŃ

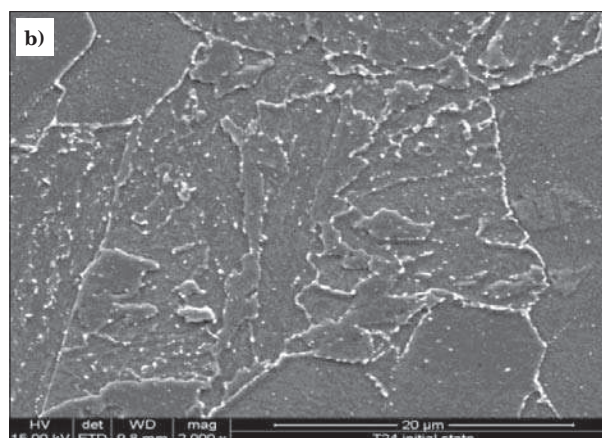
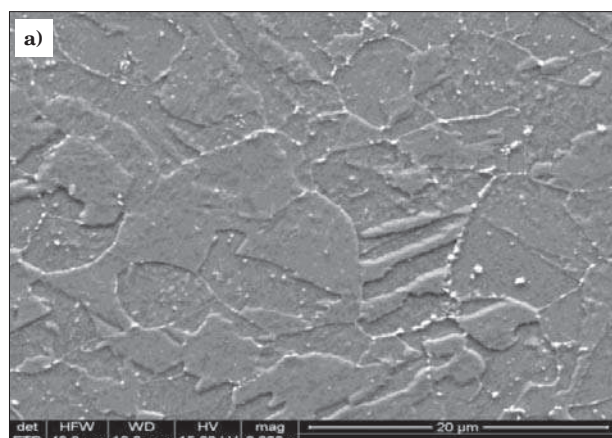
Materiałem do badań były stale T23 (7Cr5WVNb9-6), T24 (7CrMoVTiB10-10), P91 (X10CrMoVNb9-1), P92 (X10CrWMoVNb9-2) i VM12 (X12CrCoWVNb12-2-2) w stanie dostawy i po długotrwałej ekspozycji w podwyższonej temperaturze. Skład chemiczny badanych stali zestawiono w tabeli 1.

3. WYBRANE ELEMENTY CHARAKTERYSTYK MATERIAŁOWYCH BADANYCH STALI

3.1. MIKROSTRUKTURA

Obserwację mikrostruktury badanych stali w stanie wyjściowym oraz po długotrwałym wyżarzaniu i pełzaniu w zakresie temperatury 550 i 650°C przeprowadza się w skaningowym i transmisyjnym mikroskopie elektronowym.

W stanie wyjściowym stale niskostopowe T23 i T24 charakteryzują się mikrostrukturą bainityczno-ferrytyczną (Rys. 1) będącej typową dla tej grupy stali [2].

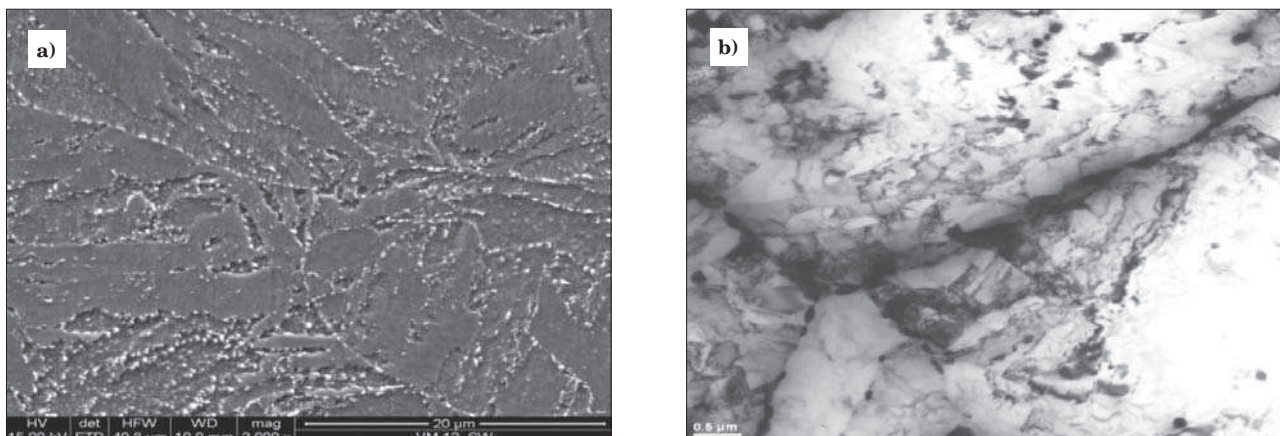


Rys. 1. Mikrostruktura w stanie wyjściowym a) stali T23, b) stali T24 obserwowana w skaningowym mikroskopie elektronowym
Fig. 1. Microstructure in initial state of a) T23 steel, b) T24 steel, observed using scanning electron microscope

Stal P91 w stanie wyjściowym charakteryzuje się mikrostrukturą odpuszczonego martenzytu z drobno-dyspersyjnymi wydzieleniami typu MX, głównie wanadu oraz węglkami $M_{23}C_6$ bogatymi w wanad i niob. Wydzielenia występują zarówno po granicach, jak i wewnątrz ziarn ferrytu.

W stanie wyjściowym stal P92 charakteryzuje się mikrostrukturą z dominującym udziałem odpuszczonego martenzytu listwowego o dużej gęstości dyslokacji oraz spoligonizowaną podstrukturą ziaren ferrytu. Przeprowadzona identyfikacja wydzielen wykazała występowanie w badanej stali w stanie wyjściowym wydzielen typu: MX i $M_{23}C_6$. Wydzielenia MX obserwowano wewnątrz listew martenzytu, na dyslokacjach oraz na granicach podziaren. Węglik $M_{23}C_6$ z kolei ujawniono głównie po granicach ziaren byłego austenitu oraz granicach listew martenzytu.

W stanie wyjściowym stal VM12 charakteryzuje się mikrostrukturą wysokoodpuszczonego, listwowego martenzytu z licznymi wydzieleniami (Rys. 2). Jak wykazały badania [21] w stanie wyjściowym w stali VM12 ujawniono węglki $M_{23}C_6$ i wydzielenia typu MX. Węglik (węglkoborki) $M_{23}C_6$ występowały głównie po granicach ziaren byłego austenitu i granicach podzia-



Rys. 2. Obrazy mikrostruktury stali VM12 w stanie wyjściowym obserwowanej w a) SEM, b) TEM

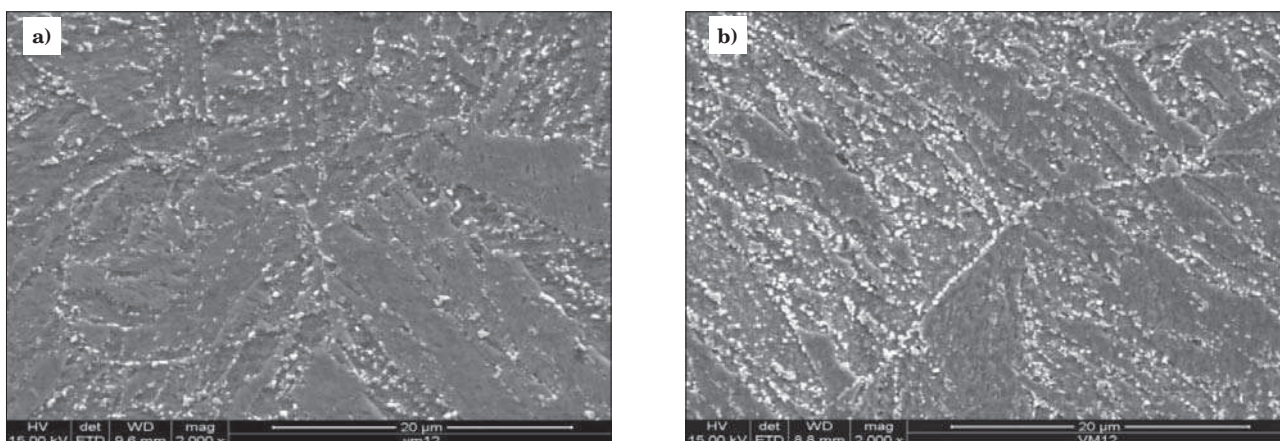
Fig. 2. Images of microstructure of VM12 steel in initial state observed using a) SEM, b) TEM

ren/listew martenzytu. Azotki (węglikoazotki) typu MX wydzielone były głównie wewnątrz podziarn oraz na granicach podziarn. Węgliki $M_{23}C_6$ stabilizują podziarnową mikrostrukturę stali martenzytycznej, z kolei drobnodispersyjne wydzielania MX stanowią skuteczną przeszkodę dla ruchu dyslokacji, zapewniając tym samym wysoką wytrzymałość na pełzanie. W mikrostrukturze badanej stali ujawniono również obecność ferrytu delta.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe mikrostruktury stali VM12 po 30 000 godzin wyżarzania w temperaturze 600 i 650°C. Przeprowadzone obserwacje mikrostruktury stali VM12 wyżarzanej przez 30 000 h/600°C godzin wykazały zauważalny wzrost wielkości wydzielen po granicach ziarn byłego austenitu, na granicach listew martenzytu oraz wewnątrz ziaren. Zaobserwowano również nieznaczny zanik mikrostruktury odpuszczonego martenzytu. Wyżarzanie w temperaturze 650°C po 30 000 h spowodowało znaczny wzrost wielkości wydzielen po granicach ziarn byłego austenitu, na granicach listew martenzytu oraz wewnątrz ziaren, w porównaniu nie tylko do stanu wyjściowego stali VM12, ale również w odniesieniu do tego samego czasu wyżarzania, ale w temperaturze 600°C. Widoczny jest również częściowy zanik budowy listwowej odpuszczonego martenzytu (Rys. 3b).

3.2. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

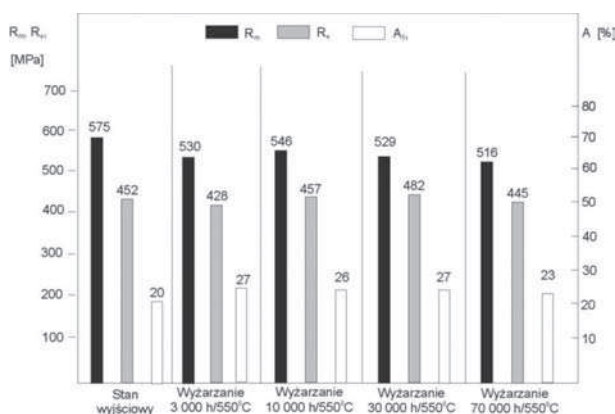
W wyniku procesów aktywowanych ciepłnie wywołanych temperaturą i ciśnieniem w długim czasie następują zmiany w strukturze materiału, których skutkiem jest zmiana zespołu jego własności użytkowych, powodujących obniżanie zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń eksploatacyjnych. Niezależnie od struktury stanu wyjściowego, następuje obniżanie się właściwości wytrzymałościowych (R_m , R_e , R_e^t) przy równoczesnej utracie plastyczności, której odzwierciedleniem są wartości: wydłużenia w próbie rozciągania oraz pracy łamania w próbie uderności (A , KV). Wyznacznikiem zmniejszających się własności wytrzymałościowych jest ponadto wartość twardości. Jeżeli charakter zachodzących zmian można uznać za stosunkowo łatwy do przewidzenia, to jego wymiar liczbowy odniesiony do wymagań dla materiału w stanie wyjściowym dla różnych stanów zdegradowanej struktury po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, jest nie do przewidzenia bez stosownych badań. Dynamika zachodzących zmian jest przede wszystkim zależna od typu struktury stanu wyjściowego materiału oraz od rzeczywistych eksploatacyjnych warunków temperaturowo-naprężeniowych. Przykłady opracowanych charakterystyk w postaci zmian właściwości mechanicznych, w wyniku długotrwałego oddziaływania podwyższonej tempe-



Rys. 3. Obrazy mikrostruktury stali VM12 a) po wyżarzaniu 30 000h/600°C, b) po wyżarzaniu 30 000h/650°C obserwowanej w SEM

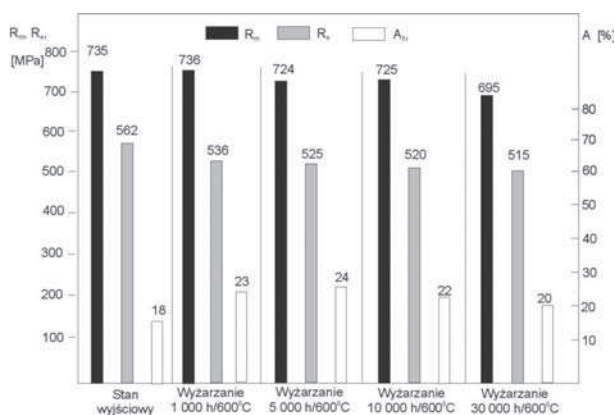
Fig. 3. Images of microstructure of VM12 steel a) after annealing for 30 000 h at 600°C, b) after annealing for 30 000 h at 650°C, observed using SEM

ratury, pokazano na rys. 4 dla niskostopowej stali T23 oraz na rys. 5 dla wysokochromowej stali P92.



Rys. 4. Zmiana właściwości wytrzymałościowych stali T23 po wyżarzaniu w temperaturze 550°C

Fig. 4. Change in strength properties of T23 steel after annealing at 550°C

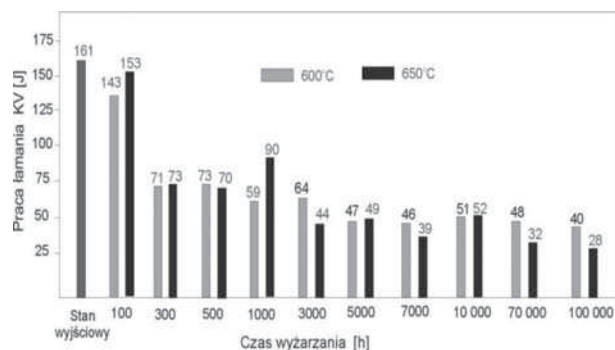


Rys. 5. Zmiana właściwości wytrzymałościowych stali P92 po wyżarzaniu w temperaturze 600°C

Fig. 5. Change in strength properties of P92 steel after annealing at 600°C

Istotną cechą świadczącą o zdolności do odkształceń materiału, oprócz wydłużenia w próbie rozciągania, jest wartość pracy łamania uzyskiwana w próbie udarności. Znajomość wartości tego wskaźnika daje możliwość przyjęcia w praktyce przemysłowej właściwej wartości temperatury prowadzenia wodnych prób ciśnieniowych oraz warunków uruchomienia i odstawiania kotła, dostosowanych do stanu tych materiałów po długotrwałej eksploatacji. Praca łamania badanych stali po długotrwałej ekspozycji w podwyższonej temperaturze, pomimo obniżania się jej wartości, jest wyższa niż minimalna oczekiwana 27 J. Przykłady zmian wartości udarności w zależności od czasu wyżarzania pokazano dla stali P92 na rysunku 6.

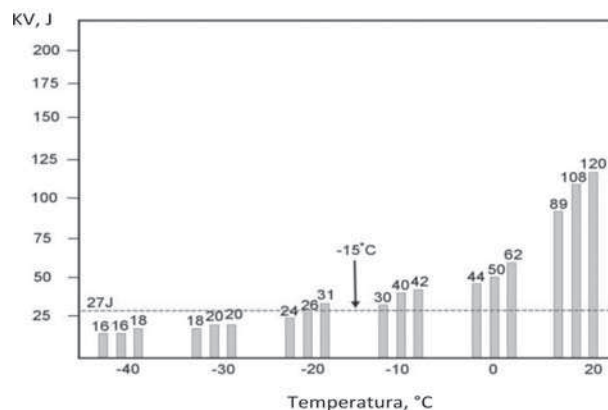
Oprócz znajomości rzeczywistych wartości pracy łamania w próbach udarności w temperaturze pokojowej dla badanych elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych będących w eksploatacji, istotną informacją jest również temperatura przejścia w stan kruchy. Temperatura ta odpowiada przełomom uzyskanym w próbie udarności o zbliżonym udziale przełomu o charakterze ciągliwym i kruchym (50/50%). W praktyce przyjmuje się, że stan taki odpowiada pracy łamania równej 27 J, uzyskiwanej na standardowych próbkach z karbem V.



Rys. 6. Zmiana pracy łamania stali P92 po wyżarzaniu w czasie do 100 000 godzin

Fig. 6. Change in impact energy of P92 steel after annealing for up to 100 000 h

Temperaturę przejścia w stan kruchy dla stali P91 po 100 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Temperatura przejścia w stan kruchy stali P91 po 90 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania

Fig. 7. Brittle fracture appearance transition temperature of P91 steel after 90 000 h service under creep conditions

4. PRÓBY PEŁZANIA

Spośród wszystkich właściwości mechanicznych najbardziej istotną i decydującą o przydatności do eksploatacji w warunkach pełzania są własności wyznaczone w wyniku prób pełzania. Wytrzymałość na pełzanie, będąca podstawą do obliczeń projektowych, decyduje o zdolności do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych elementów wykonanych z badanych materiałów.

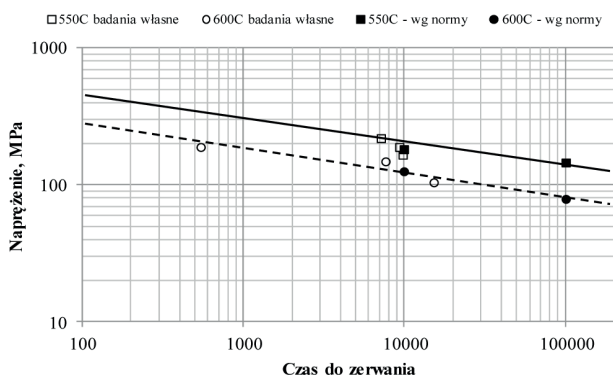
Próby pełzania prowadzone są na jednopróbkowych sześciostanowiskowych maszynach do prób pełzania produkcji IMŻ ze zmodyfikowanym układem regulacji i pomiaru temperatury umożliwiającym prowadzenie prób pełzania w zadanej temperaturze z dokładnością $\pm 1^\circ\text{C}$.

Przykład kontrolnych prób pełzania w temperaturze 550, 600 i 650°C o łącznym czasie trwania prób 93220 godzin pokazano na rys. 8 na tle danych wytrzymałości na pełzanie dla stali T23. Natomiast porównanie oszacowanych wartości wytrzymałości na pełzanie z badań własnych z wartościami wg normy dla 10, 30 i 100 tysięcy godzin zestawiono w tabeli 2. Ekstrapolację wyników badań własnych oraz danych literaturowych przeprowadzono korzystając z autorskiego programu komputerowego wykorzystującego metodę wykreślną oraz metodę parametryczną Larson-Millera. Pozwala

Tabela 2. Wartości wytrzymałości na pełzanie stali T23 w zależności od czasu i temperatury badania wg badań własnych i danych literaturowych [3]

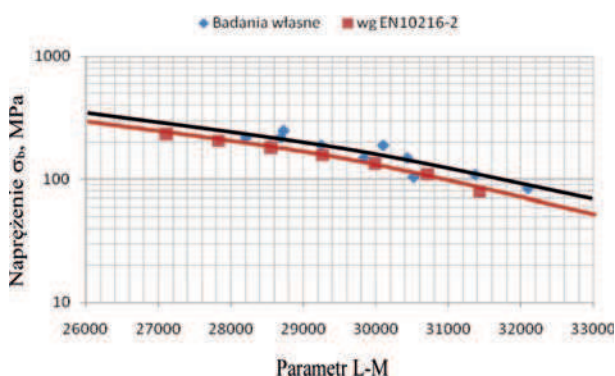
Table 2. Creep strength values of T23 steel depending on time and test temperature based on the own and literature data [3]

Temperatura badania, °C	Wartość wytrzymałości na pełzanie, MPa					
	10 000 h		30 000 h		100 000 h	
	wg [5]	Badania własne	wg [5]	Badania własne	wg [5]	Badania własne
480	275	319	254	293	233	267
490	260	299	240	274	219	249
500	246	280	227	256	206	231
510	232	262	214	239	193	214
520	219	245	201	222	181	198
530	206	228	189	205	169	182
540	194	211	176	190	157	167
550	182	196	164	175	145	153
560	170	181	151	160	134	139
570	159	166	139	147	122	126
580	148	153	127	134	110	114
590	137	140	115	121	97	103
600	125	127	104	110	79	92



Rys. 8. Wyniki badań wytrzymałości na pełzanie badanej stali T23 [13, 14]

Fig. 8. Results of creep strength tests of T23 steel [13, 14]



Rys. 9. Wyniki badań wytrzymałości na pełzanie stali T23 w postaci zależności L-M

Fig. 9. Results of creep strength tests of T23 steel, presented as the L-M relationship

on w pełni wykonywać ekstrapolację wyników prób pełzania, przechowywać uzyskane wyniki, ich szybkie uzupełnianie oraz porównywanie wyników uzyskiwanych dla kilku gatunków materiałów.

Krzywą parametryczną Larson-Millera dla badanej stali przedstawiono na rys. 9

Przedstawione w tabeli 2 wyniki jednoznacznie wskazują, że badana stal charakteryzuje się wartościami wytrzymałości na pełzanie zbliżonymi tzn. nieznacznie wyższymi od wartości średnich zawartych w normie PN-EN [3].

5. PODSUMOWANIE

W powyższej pracy przedstawiono tylko wybrane wyniki badań właściwości mechanicznych i zmian mikrostruktury zachodzących podczas długotrwałej ekspozycji w podwyższonej temperaturze stali nowej generacji do zastosowań w budowie kotłów i turbin o nadkrytycznych parametrach pracy. Wyniki badań stanowią bazę charakterystyk materiałowych wykorzystywanych przez producentów i projektantów kotłów parowych oraz przez służby diagnostyczne dopuszczające do dalszej pracy elementy krytyczne kotła pracujące w warunkach pełzania. Opracowany atlas mikrostruktur zarejestrowanych przy użyciu skaningowego i transmisyjnego mikroskopu elektronowego stanowi bazę wyjściową do opracowania schematu zmian mikrostruktury, wykorzystując ilościową analizę występujących wydzielen w badanych stalach w powiązaniu z oszacowanym stopniem wyczerpania.

LITERATURA

1. Hernas A.: Materiały i Technologie do budowy kotłów nadkrytycznych i spalarni odpadów, Praca zbiorowa pod redakcją A. Hernasa, Katowice 7-11, 2009
2. Dobrzański J., Zieliński A., Hernas A.: Struktura i własności nowych stali żarowytrzymałych o osnowie ferrytycznej, Materiały i Technologie do budowy kotłów nadkrytycznych i spalarni odpadów, Praca zbiorowa pod redakcją A. Hernasa, Katowice, 2009, 47-101
3. PN-EN 10216-2, styczeń 2009, Rury stalowe bez szwu do zastosowań cienkościennych. Warunki techniczne dostawy. Część 2: Rury ze stali niestopowych i stopowych z określonymi własnościami w temperaturze podwyższonej
4. Golański G.: Evolution of Secondary Phases in GX12CrMoVNbN9-1 Cast Steel after Heat Treatment, Archives of Materials Science and Engineering, 48, 1, 12-18, 2011
5. Golański G.; Zieliński A.; Zieliński-Lipiec A.: Degradation of microstructure and mechanical properties in martensitic cast steel after ageing. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2015, 46, No 3, 248-255
6. Golański G., Zieliński A., Słania J., Jasak J.: Mechanical properties of VM12 steel after 30 000 hrs of ageing at 600°C temperature. Archives Of Metallurgy And Materials, 59(4), 2014
7. Zieliński A., Dobrzański J.: Material properties and structure of thick-walled elements made of steel 7CrMoVTiB10-10 after long-term annealing, Archives of Materials Science and Engineering, 58, 1, 5-12, 2012
8. Dobrzański J., Zieliński A., Sroka M.: The influence of simultaneous impact of temperature and time on the properties and structure of X10CrWMoVNb9-2 steel, Journal of Archives in Materials and manufacturing Engineering, 34, 1, 7-14, 2009
9. Zieliński A., Dobrzański J., Krztoń H.: Structural changes in low alloy cast steel Cr-Mo-V after long time creep service, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 25.1, 2007, 33-36
10. Dobrzański J., Zieliński A., Sroka M.: Structure, properties and method of the state evaluation of low-alloyed steel T23 (HCM2S) worked in creep conditions. Proceedings of the 11th International Scientific Conference on the Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science CAM3S. 2005
11. Dobrzański J., Zieliński A., Sroka M.: Microstructure, properties investigations and methodology of the state evaluation of T23 (2.25 Cr-0.3 Mo-1.6 W-Nb) steel in boilers application. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 32.2, 2009, 142-153
12. Zieliński A., et al.: The impact of repair welded joint on the life of Cr-Mo-V steel steam pipeline after service under creep conditions." Materials Science and Engineering 68.1, 2014, 36-44
13. Zieliński A., Dobrzański J., Golański G., Sroka M.: Computer-assisted analysis of changes in the microstructure of P92 steel after exposure at elevated temperature. Science and Engineering, 65(2), 2014, 77-86
14. Zielińska-Lipiec A.: The Analysis of Microstructural Stability of Modified Martensitic Deformation, AGH 2005 Kraków ISSN 0867-8631
15. Sroka M., Zieliński A.: Computer assisted evaluation of degree of exhaustion of T/P23 (2.25 Cr-0.3 Mo-1.6 W-Nb) steel after long-term annealing. Archives of Materials Science and Engineering, 2013, 58, 2, 205-212
16. Dobrzański J., Sroka M., Zieliński A.: Methodology of classification of internal damage the steels during creep service, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, 18, 263-266
17. Zieliński A., Dobrzański J.: Characteristics of changes in properties and structure of X10CrMoVNb9-1 steel due to long-term impact of temperature and stress. Archives of Materials Science and Engineering, 2013, 60.2. 72-81
18. Zieliński A., Dobrzański J., Krztoń H.: Structural changes in low alloy cast steel Cr-Mo-V after long time creep service, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 25, 1, 33-36
19. Golański G., Zieliński A.: VM12 – nowa stal z kobaltem dla energetyki, Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2011, 3, 228-233.
20. Horn R. M., Ritchie R.O.: Mechanism of tempered martensite embrittlement in low alloy steels, Metall. Trans. A, 1978, 9A, 1039-1053
21. Dobrzański J., Zieliński A., Paszkowska H.: Ocena zachowania się i prognoza długotrwałej pracy stali nowej generacji na elementy kotłów eksploatowanych powyżej temperatury granicznej, Projekt rozwojowy NR 15 0060 10 realizowany w IMŻ, 2013