

Adam ZIELIŃSKI, Janusz DOBRZAŃSKI

Instytut Metalurgii Żelaza

## OCENA STANU I PRZYDATNOŚCI DO DALSZEJ PRACY MATERIAŁU RUROCIĄGÓW PAROWYCH EKSPLOATOWANYCH POWYŻEJ OBLICZENIOWEGO CZASU PRACY

*W pracy przedstawiono wyniki badań materiału rurociągów pary po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Wykonano badania właściwości mechanicznych, zmian struktury oraz skrócone próby pełzania celem wyznaczenia trwałości resztkowej wytypowanych do badań rurociągów wykonanych ze stali 13CrMo4-5, 14MoV6-3 i 10CrMo9-10. Wykazano, że dla rurociągów, które osiągnęły lub przekroczyły obliczeniowy czas pracy tylko kompleksowy program nieniszczących badań materiałowych, umożliwiają ocenę stanu materiału rurociągu i wyznaczenie czasu dalszej jego bezpiecznej eksploatacji dla zdefiniowanych parametrów dalszej pracy.*

*Słowa kluczowe:* pełzanie, rurociągi pary, stal 13CrMo4-5, 14MoV6-3, 10CrMo9-10

## THE ASSESSMENT OF CONDITION AND SUITABILITY FOR FURTHER SERVICE OF THE MATERIAL OF STEAM PIPELINES OPERATED BEYOND THE DESIGN WORK TIME

*This paper presents the results of tests of the material of steam pipelines after long-term service under creep conditions. The mechanical testing, structural change tests and abridged creep tests were carried out to determine the residual life of the 13CrMo4-5, 14MoV6-3 and 10CrMo9-10 steel pipelines selected for testing. It has been established that for pipelines that have reached or exceeded the design work time only the comprehensive programme of non-destructive tests of materials, carried out on pipeline components, which allows the representative test piece to be determined for non-destructive tests and the tests to be carried out, makes it possible to assess the condition of the material of pipeline and determine the time of its further safe service for defined further operation parameters, thus allowing further safe operation of such devices.*

*Key words:* creeping, steam pipelines, 13CrMo4-5, 14MoV6-3 and 10CrMo9-10 steel

### 1. WPROWADZENIE

Eksploatowane w kraju bloki energetyczne w 90% 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. Możliwość przedłużania eksploatacji powyżej obliczeniowego czasu pracy, często powyżej 200 000 a ostatnio nawet do ponad 300 000 godzin wynika z szeregu współczynników bezpieczeństwa stosowanych na etapie projektowania [1–14]. Ponadto inne czynniki, które mają na to wpływ to między innymi: średnia czasowa wytrzymałość na pełzanie, której wartość rzeczywista może być większa od średniej przyjętej do obliczeń, rzeczywista grubość ścianki znacznie większa od grubości obliczeniowej oraz rzeczywiste parametry pracy najczęściej niższe od przyjętych obliczeniowych. Wymienione powyżej czynniki w praktyce, przy prawidłowej eksploatacji, rzetelnie prowadzonej diagnostyce, oraz ekonomicznie uzasadnionych pracach modernizacyj-

nych bloków energetycznych, pozwalają na przedłużenie czasu pracy znacznie poza obliczeniowy [7–17]. Należy tutaj nadmienić, że w przypadku przedłużenia czasu eksploatacji powyżej 200 tys. godzin elementów krytycznych, niezbędnym jest wyznaczenie resztkowej wytrzymałości na pełzanie w skróconych próbach pełzania. Szczególnie dotyczy to głównych rurociągów parowych [1]. Znajomość rzeczywistej wytrzymałości na pełzanie materiału po eksploatacji jest niezbędna do wyznaczenia bezpiecznego czasu dalszej pracy rurociągu dla zdefiniowanych parametrów dalszej pracy. W praktyce spotyka się, że do obliczeń, które bywają podstawą dopuszczenia do eksploatacji znacznie powyżej obliczeniowego czasu pracy 100 000 godzin, a często nawet powyżej 200 000 godzin stosuje się wytyczne normy PN-EN 12952-4/2002 [18] wykorzystując do obliczeń ekstrapolowaną powyżej 200 000 godzin wartość średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie wyrobów hutniczych w stanie wyjściowym. Sposób postępowania ujęty w normie może mieć zastosowanie jedynie jako jeden z elementów w podejmowaniu decyzji o przystąpieniu do badań lub odstąpieniu od dalszej eksploata-

cji w oparciu o analizę uwzględniającą czynnik ekonomiczny. Obliczenia należy traktować jedynie jako orientacyjne, gdyż wynik uzyskany w obliczeniach, w zdecydowanej większości przypadków nie pokrywa się z wynikami badań. Zarówno wyniki badań struktury jak i resztkowa wytrzymałość na pełzanie wyznaczona w próbach pełzania nie potwierdzają oceny dokonanej tą metodą. Metoda ta zatem nie może być podstawą decyzji o dopuszczeniu do dalszej eksploatacji. Świadczą o tym również wyniki badań niszczących prowadzonych na materiale elementów o znanej historii eksploatacji, które zostały wykonane dla weryfikacji przydatności tej metody.

W praktyce podczas eksploatacji kotłów energetycznych może również wystąpić nadmierna utrata trwałości powodując zniszczenie elementu czy konstrukcji nawet przed upływem obliczeniowego czasu pracy. Z wieloletnich doświadczeń autorów niniejszego opracowania wynika, że utrata trwałości w większości przypadków spowodowana jest nieprawidłową eksploatacją urządzeń ciśnieniowych często w powiązaniu z wadami konstrukcyjnymi. Natomiast wystąpienie awarii w wyniku nadmiernej utraty trwałości najczęściej jest skutkiem nie tylko nieprawidłowej eksploatacji ale również niewłaściwej i nierzetelnie przeprowadzonej okresowej diagnostyki elementów ciśnieniowych kotła jako niezbędnej profilaktyki. Uniemożliwia to wczesne wykrycie przyczyn, których wyeliminowanie lub złagodzenie wpływa w istotny sposób na wydłużenie trwałości eksploatacyjnej.

W pracy dokonano oceny stanu materiału wybranych rurociągów pary pierwotnej i wtórnej po ponad **200 tys. godz.** eksploatacji i wyznaczono czas dalszej bezpiecznej pracy materiału rurociągów dla zdefiniowanych roboczych parametrów dalszej eksploatacji. Zaprezentowany sposób postępowania w prognozowaniu czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji materiału rurociągów pary jest z sukcesem stosowany w praktyce.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiał do badań stanowiły wycinki rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania. Miejsca pobrania reprezentatywnych wycinków do badań niszczących poprzedzono nieniszczącymi badaniami mikrostruktury metodą replik matrycowych, badań magnetyczno-proszkowych oraz badań ultradźwięko-

wych wykonanych podczas planowanych postojów kotłów, celem przeprowadzenia diagnostycznych badań kontrolnych stanu rurociągów.

Wytypowane i pobrane do badań niszczących odcinki charakteryzowały się największym oszacowanym stopniem wyczerpania spośród badanych metodami nieniszczącymi elementów rurociągu. Zestawienie badanych wycinków rurociągów zestawiono w tabeli 1.

## 3. ZAKRES BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań niszczących materiałów pobranych wycinków rurociągów była ocena ich stanu i przydatności do dalszej pracy oraz oszacowanie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji.

Do realizacji wyżej zdefiniowanego celu wykonano:

- badania mikrostruktury z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej,
- rentgenowską analizę składu fazowego wydzieleni izolatów węglkowych,
- badania właściwości mechanicznych w temperaturze pokojowej i podwyższonej:
  - statyczną próbę rozciągania,
  - wyznaczenie temperatury przejścia w stan kruchy na podstawie badań udarności,
  - skrócone próby pełzania bez pomiaru wydłużenia w czasie trwania próby celem wyznaczenia trwałości resztkowej materiału.

## 4. WYNIKI BADAŃ

### 4.1. BADANIA MIKROSTRUKTURY

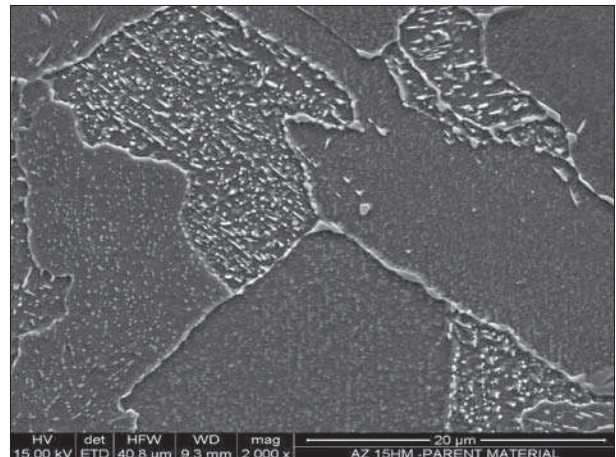
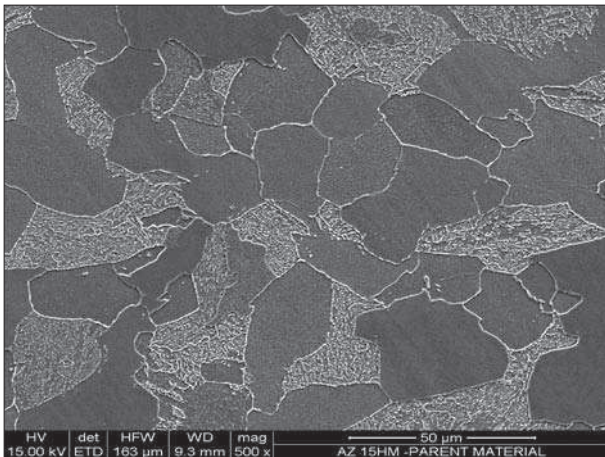
Obserwacje mikrostruktury przeprowadzono na zgładach trawionych z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego Insect F (SEM) przy powiększeniach 500÷5000×. Wyniki badań w postaci obrazów struktury pokazano na rys. 1–6.

Materiał wycinka rurociągu parowego ze stali 13CrMo4-5 po 140 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania wykazuje mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną z niewielką ilością bainitu. W obszarach perlitu ujawniono częściowo sfragmentaryzowane płytki cementytu. Natomiast na granicach ziarn ferrytu stwierdzono nieliczne, na ogół drobne wydzielenia, a wewnątrz ziarn liczne, równomiernie rozmieszczone bardzo drobne wydzielenia węglków (Rys. 1).

**Tabela 1. Materiał do badań z rurociągów parowych ze stali 13CrMo4-5, 14MoV6-3 oraz 10CrMo9-10 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po znacznym przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy**

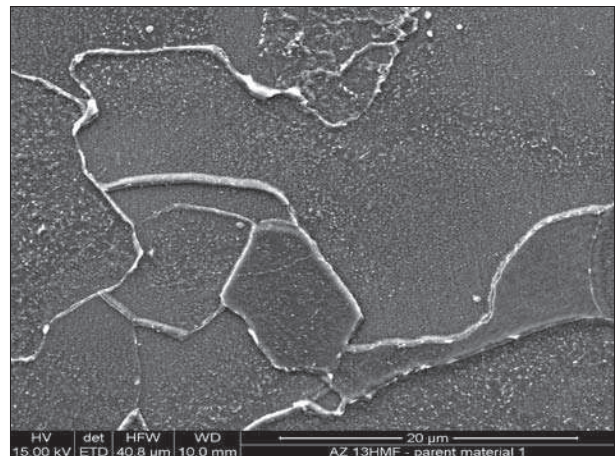
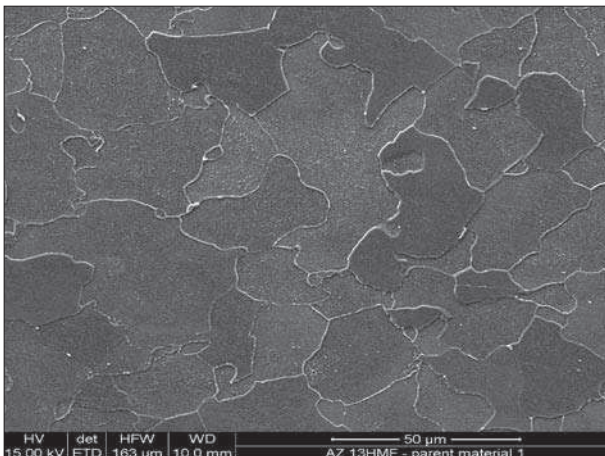
**Table 1. Test pieces from 13CrMo4-5, 14MoV6-3 and 10CrMo9-10 steel steam pipelines after long-term service much beyond the design work time**

Lp.	Oznaczenie	Materiał	Wymiary, mm	Parametry obliczeniowe	Czas eksploatacji, h
				T, °C; p, MPa	
1	A	13CrMo4-5	φ410×20	490; 6,0	140 000
2	B	14MoV6-3	φ323,9×40	540; 14,3	200 000
3	C	14MoV6-3	φ323/9×40	540; 14,0	220 000
4	D	14MoV6-3	φ323/9×40	540; 14,0	216 000
5	E	14MoV6-3	φ323,9×40	540; 14,0	227 000
6	F	10CrMo9-10	φ323,9×40	540; 14,0	227 000
7	G	10CrMo9-10	φ508×20	540; 3,0	220 000
8	H	10CrMo9-10	φ508×20	540; 3,0	216 000



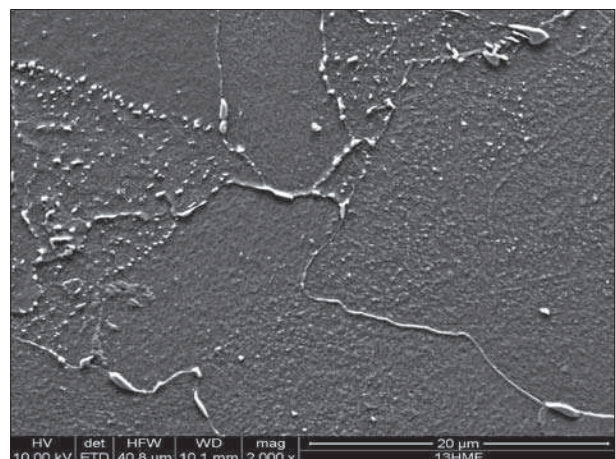
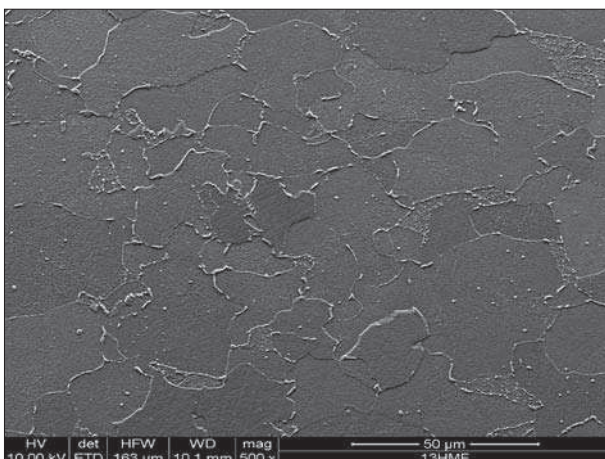
Rys. 1. Struktura materiału wycinka rurociągu parowego ze stali 13CrMo4-5 po 140 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (SEM), twardość 159 HV10 (ozn. A)

Fig. 1. Structure of material of test piece from the 13CrMo4-5 steam pipeline after 140 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 159 HV10 (marked as A)



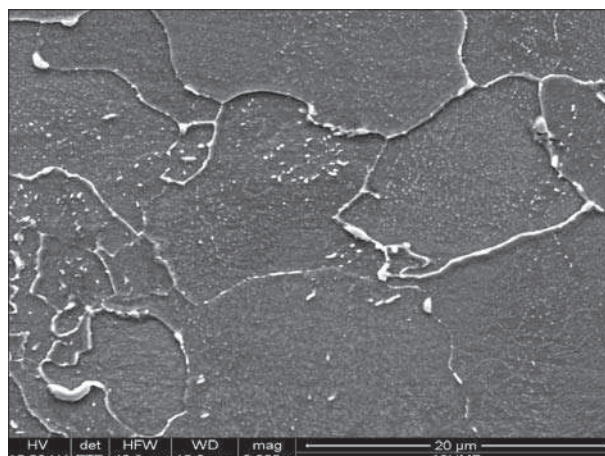
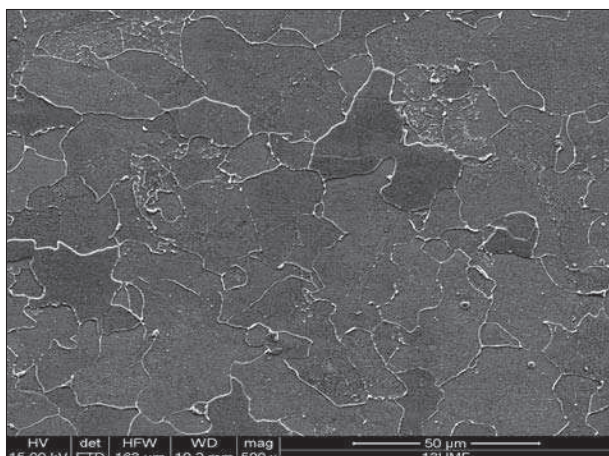
Rys. 2. Struktura materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 200 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania, (SEM), twardość 155 HV10 (ozn. B)

Fig. 2. Structure of material of test piece from the 14MoV6-3 steam pipeline after 200 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 155 HV10 (marked as B)



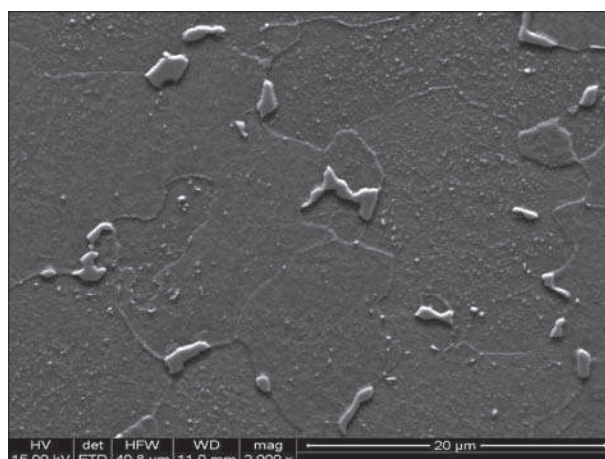
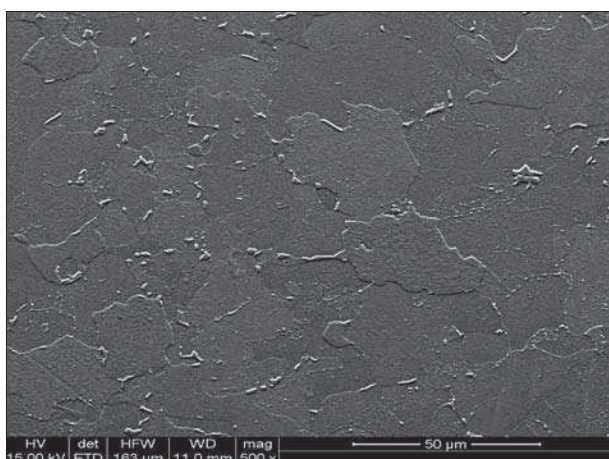
Rys. 3. Struktura materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 220 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (SEM), twardość 160 HV10 (ozn. C)

Fig. 3. Structure of material of test piece from the 14MoV6-3 steam pipeline after 220 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 160 HV10 (marked as C)



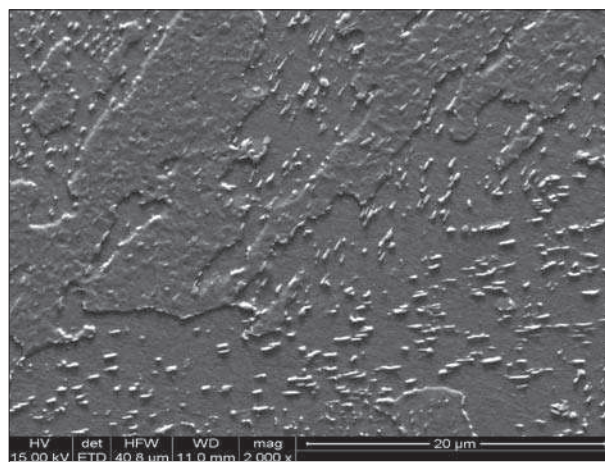
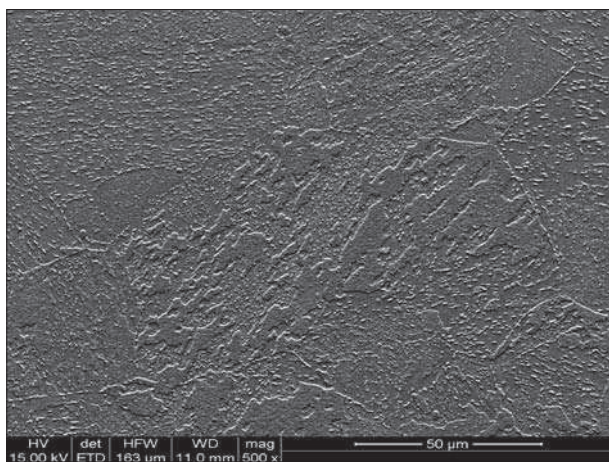
Rys. 4. Struktura materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 216 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (SEM), twardość 150 HV10 (ozn. D)

Fig. 4. Structure of material of test piece from the 14MoV6-3 steam pipeline after 216 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 150 HV10 (marked as D)



Rys. 5. Struktura materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 227 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (SEM), twardość 129 HV10 (ozn. E)

Fig. 5. Structure of material of test piece from the 14MoV6-3 steam pipeline after 227 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 129 HV10 (marked as E)



Rys. 6. Struktura materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 10CrMo9-10 po 227 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (SEM), twardość 137 HV10 (ozn. F)

Fig. 6. Structure of material of test piece from the 10CrMo9-10 steam pipeline after 227 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 137 HV10 (marked as F)

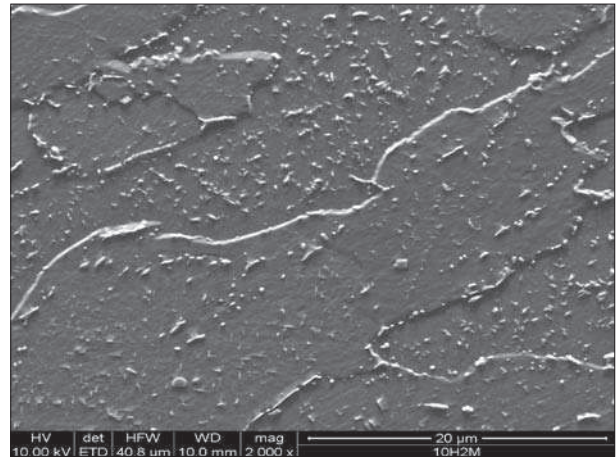
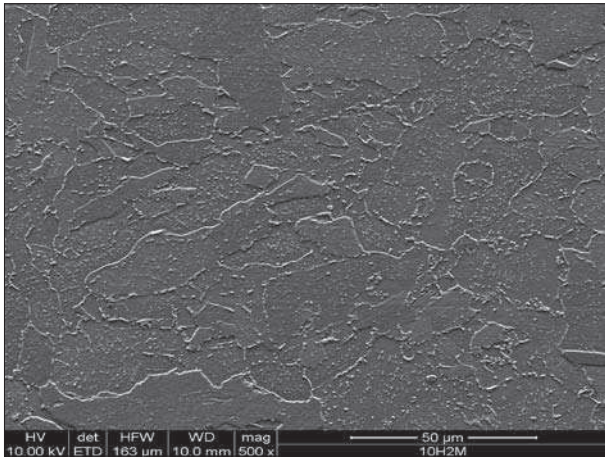
Strukturę materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po 200 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania stanowi ferryt z nieznacznie skoagulowanymi węglnikami bainitu. Na granicach i wewnątrz ziarn ferrytu ujawniono nieliczne wydzielenia węglików o zróżnicowanej wielkości. Wewnątrz ziarn węgliki rozmieszczone są w sposób równomierny (Rys. 2).

Podobną strukturę ferrytyczno-bainityczną z obszarami bainitu częściowo skoagulowanymi oraz z zaawansowanym procesem wydzieleniowym na granicach i wewnątrz ziarn stwierdzono w materiale rurociągu ze stali 14MoV6-3 po 216 000 i 220 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (Rys. 3, 4). Po czasie 227 000 godzin eksploatacji procesy wydzieleniowe i rozpad bainitu są jeszcze bardziej zaawansowane co objawia się głównie występowaniem węglików po granicach ziarn w postaci łańcuszków (Rys. 5).

Dokonano również oceny stanu struktury stali 10CrMo9-10 po długotrwałej eksploatacji w elementach rurociągów pary wtórnej po długotrwałej eksplo-

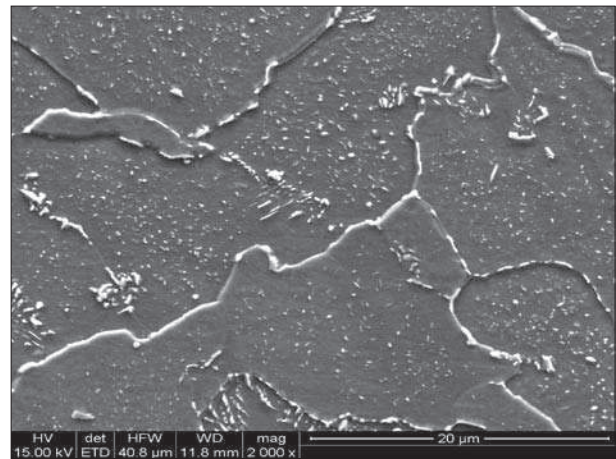
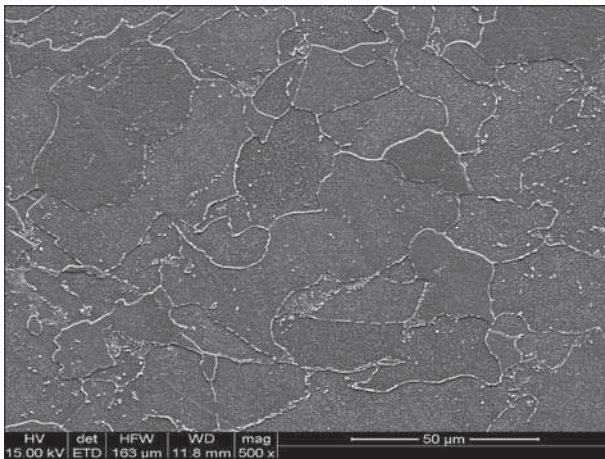
atacji w warunkach pełzania w czasie przekraczającym 200 000 godzin. Strukturą materiału wycinka rurociągu pary świeżej z tej stali po 227 000 godzin eksploatacji jest bainit w postaci płytek o zróżnicowanej wielkości i nieregularnych kształtach z licznymi drobnymi wydzieleniami oraz ferryt z drobnymi wydzieleniami na granicach i wewnątrz ziarn (Rys. 6). Natomiast struktura materiału badanych wycinków po 216 000 i 220 000 godzinach eksploatacji to po części z ferrytem z węglnikami na granicach oraz licznymi drobnymi wewnątrz ziarn (Rys. 7 i 8). Wewnętrznych uszkodzeń pełzaniowych nie zaobserwowano w żadnym z badanych materiałów, niezależnie od gatunku stali.

Opis struktury wraz z oceną, klasą materiału oraz oszacowanym stopniem wyczerpania  $t_e/t_r$ , na podstawie klasyfikacji własnej Instytutu Metalurgii Żelaza zestawiono w tabeli 2 dla materiału ze stali 13CrMo4-5, w tabeli 3 ze stali 14MoV6-3 oraz w tabeli 4 ze stali 10CrMo9-10 [1, 3].



Rys. 7. Struktura materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 10CrMo9-10 po 220 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (SEM), twardość 153 HV10 (ozn. G)

Fig. 7. Structure of material of test piece from the 10CrMo9-10 steam pipeline after 220 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 153 HV10 (marked as G)



Rys. 8. Struktura materiału wycinka rurociągu pary świeżej ze stali 10CrMo9-10 po 216 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania (SEM), twardość 144 HV10 (ozn. H)

Fig. 8. Structure of material of test piece from the 10CrMo9-10 steam pipeline after 216 000 h service under creep conditions (SEM), hardness 144 HV10 (marked as H)

Tabela 2. Opis stanu mikrostruktury, klasa struktury oraz ocena stopnia degradacji i stopnia wyczerpania materiału wycinka rurociągu parowego ze stali 13CrMo4-5 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po znacznym przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy

Table 2. Description of microstructural condition, structure class and assessment of the degradation extent and exhaustion extent of the material of test piece from the 13CrMo4-5 steel steam pipeline after long-term service much beyond the design work time

Material oznaczenie	Opis mikrostruktury Stan materiału – stopień wyczerpania	HV10
13CrMo4-5 A	Struktura ferrytyczno-perlityczno-bainityczna. Obszary perlitu z częściowo sfragmentaryzowanymi płytkami cementytu. Na granicach ziarn ferrytu nieliczne raczej bardzo drobne wydzielienia. Wewnątrz ziarn ferrytu w większości bardzo drobne, liczne równomiernie rozmieszczone wydzielienia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropełknięć w strukturze. Obszary perlit/bainit: klasa I, wydzielienia: klasa a Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 1, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,3</b>	159

Tabela 3. Opis stanu mikrostruktury, klasa struktury oraz ocena stopnia degradacji i stopnia wyczerpania materiału wycinków głównych rurociągów pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po znacznym przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy

Table 3. Description of microstructural condition, structure class and assessment of the degradation extent and exhaustion extent of the material of test pieces from the main 14MoV6-3 steel primary steam pipelines after long-term service much beyond the design work time

Material oznaczenie	Opis mikrostruktury Stan materiału – stopień wyczerpania	HV10
14MoV6-3 B	Struktura ferrytyczno-bainityczna. Obszary bainityczne tylko nieznacznie skoagulowane. Na granicach ziarn ferrytu nieliczne zróżnicowanej wielkości wydzielienia. Wewnątrz ziarn ferrytu w większości bardzo drobne, liczne, równomiernie rozmieszczone wydzielienia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropełknięć w strukturze. Obszary bainityczne: klasa 0/I, wydzielienia: klasa o/a Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 0/1, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,2</b>	155
14MoV6-3 C	Struktura ferrytyczno-bainityczna. Obszary bainityczne po części skoagulowane. Na granicach ziarn ferrytu liczne zróżnicowanej wielkości wydzielienia. Wewnątrz ziarn ferrytu w większości bardzo drobne równomiernie rozmieszczone wydzielienia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropełknięć w strukturze. Obszary bainityczne: klasa I, wydzielienia: klasa a Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 1/2, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,3</b>	160
14MoV6-3 D	Struktura ferrytyczno-bainityczna. Obszary bainityczne po części skoagulowane. Na granicach ziarn ferrytu liczne zróżnicowanej wielkości wydzielienia. Wewnątrz ziarn ferrytu w większości bardzo drobne równomiernie rozmieszczone wydzielienia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropełknięć w strukturze. Obszary bainityczne: klasa I, wydzielienia: klasa a Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 1/2, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,3</b>	150
14MoV6-3 E	Struktura ferrytyczno-bainityczna. Obszary bainityczne w znacznej części skoagulowane. Na granicach ziarn ferrytu liczne znacznej wielkości wydzielienia. Wewnątrz ziarn ferrytu w większości drobne wydzielienia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropełknięć w strukturze. Obszary bainityczne: klasa I/II, wydzielienia: klasa a/b Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 2/3, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,4</b>	129

Istotnym elementem w ocenie zachodzących zmian w mikrostrukturze jest ocena stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych węglików, a w tym rodzaju i ilości występujących wydzielen. Aby tego dokonać wykonano rentgenowską analizę składu fazowego wydzielen badanych materiałów w dyfraktometrze rentgenowskim Empyrean stosując promieniowanie kobaltu w konfiguracji z detektorem Pixcel. Rozwiązanie uzyskanych dyfraktogramów pozwoliło na identyfikację występujących wydzielen i oszacowanie ich ilości. Uzyskane wyniki badań zestawiono w tabeli 5.

Uzyskane składy fazowe oraz udział poszczególnych typów wydzielen są zgodne z sekwencją wydzielen odpowiadającą klasom struktury przyjętym dla poszczególnych materiałów po eksploatacji zestawionym w tabelach 2–4.

#### 4.2. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Badania właściwości wytrzymałościowych materiału rurociągów pary pierwotnej i wtórnej po długotrwałej eksploatacji przeprowadzono w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej oraz w temperaturze podwyższonej  $T_b = 500^\circ\text{C}$ . Wyniki badań przedstawiono w rubrykach 4÷7.

Dla materiału rurociągu wykonanego ze stali 13CrMo4-5 po 140 000 godzin eksploatacji uzyskano właściwości wytrzymałościowe wyższe od minimalnych wymaganych dla tej stali w stanie wyjściowym (Tab. 6). Natomiast dla wszystkich materiałów rurociągów pary świeżej po eksploatacji w warunkach pełzania ze stali 14MoV6-3 otrzymane wartości granicy plastyczności w temperaturze pokojowej oraz dla materiału rurocią-

Tabela 4. Opis stanu mikrostruktury, klasa struktury oraz ocena stopnia degradacji i stopnia wyczerpania materiału wycinków głównych rurociągów pary wtórnej ze stali 10CrMo9-10 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po znacznym przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy

Table 4. Description of microstructural condition, structure class and assessment of the degradation extent and exhaustion extent of the material of test pieces from the main 10CrMo9-10 steel secondary steam pipelines after long-term service much beyond the design work time

<b>Materiał oznaczenie</b>	<b>Opis mikrostruktury Stan materiału – stopień wyczerpania</b>	<b>HV10</b>
10CrMo9-10 F	Struktura bainityczno-ferrytyczna. Obszary bainityczne o postaci nie odbiegającej od charakterystycznej dla stanu wyjściowego jednak z licznymi drobnymi wydzieleniami. Na granicach ziarn ferrytu liczne bardzo drobne wydzielenia. Wewnątrz ziarn ferrytu, liczne, w większości drobne równomiernie rozmieszczone wydzielenia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropęknięć w strukturze. Obszary perlit/bainit: klasa I, wydzielenia: klasa o/a Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 0/1, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,2</b>	137
10CrMo9-10 G	Struktura bainityczno-ferrytyczna. Obszary bainityczne miejscami nieznacznie skoagulowane. Na granicach ziarn ferrytu liczne bardzo drobne wydzielenia. Wewnątrz ziarn ferrytu w większości drobne równomiernie rozmieszczone wydzielenia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropęknięć w strukturze. Obszary perlit/bainit: klasa I, wydzielenia: klasa o/a Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 1, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,2÷0,3</b>	153
10CrMo9-10 H	Struktura ferrytyczno-bainityczna. Obszary bainityczne miejscami nieznacznie skoagulowane. Na granicach i wewnątrz ziarn ferrytu zróżnicowanej wielkości wydzielenia. Nie zaobserwowano nieciągłości i mikropęknięć w strukturze. Obszary perlit/bainit: klasa I, wydzielenia: klasa o/a Procesy uszkodzenia: klasa O <b>KLASA 1, STOPIEŃ WYCZERPANIA: ok. 0,2÷0,3</b>	144

Tabela 5. Skład fazowy węglików materiału wycinków rurociągów parowych ze stali 13CrMo4-5, 14MoV6-3 oraz 10CrMo9-10 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania po znacznym przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy

Table 5. Phase composition of carbides in the material of test pieces from 13CrMo4-5, 14MoV6-3 and 10CrMo9-10 steel steam pipelines after long-term service much beyond the design work time

<b>Materiał oznaczenie</b>	<b>Skład fazowy węglików</b>	<b>Materiał oznaczenie</b>	<b>Skład fazowy węglików</b>
13CrMo4-5 A	<b>Fe<sub>3</sub>C - faza główna</b> Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> – dużo Mo <sub>2</sub> C - mało Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> - śladowo Mo <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> C - śladowo	14MoV6-3 E	<b>Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> – faza główna</b> V <sub>8</sub> C <sub>7</sub> – średnio Mo <sub>2</sub> C – mało Mo <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> C - mało Fe <sub>3</sub> C – mało Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> - niewiele
14MoV6-3 B	<b>V<sub>8</sub>C<sub>7</sub> - faza główna</b> Fe <sub>3</sub> C – bardzo dużo Mo <sub>2</sub> C - średnio Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> - mało Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> - niewiele Mo <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> C - śladowo	10CrMo9-10 F	<b>Fe<sub>3</sub>C - faza główna</b> Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> – średnio Mo <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> C - mało Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> - mało Mo <sub>2</sub> C - mało
14MoV6-3 C	<b>Fe<sub>3</sub>C - faza główna</b> Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> - mało Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> - mało Mo <sub>2</sub> C - mało V <sub>8</sub> C <sub>7</sub> - mało	10CrMo9-10 G	<b>Mo<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>C - faza główna</b> Fe <sub>3</sub> C - mało Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> – średnio Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> - mało Mo <sub>2</sub> C - mało
14MoV6-3 D	<b>Fe<sub>3</sub>C - faza główna</b> Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> - mało Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> - mało Mo <sub>2</sub> C - mało V <sub>8</sub> C <sub>7</sub> - mało	10CrMo9-10 H	<b>Mo<sub>3</sub>Fe<sub>3</sub>C – faza główna</b> Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> – średnio Fe <sub>3</sub> C - średnio

gu z tej stali po 220 000 godzin pracy również granicy plastyczności w temperaturze 500°C są niższe od minimalnych wymaganych dla badanej stali w stanie wyjściowym. Obniżoną, w stosunku do wymagań dla materiału w stanie wyjściowym, wartość granicy plastyczności w temperaturze pokojowej uzyskano dla materiału rurociągu ze stali 10CrMo9-10 po 216 000 i 220 000 godzin pracy oraz wartość wytrzymałości na rozciąganie materiału rurociągu z tej stali po 220 000

godzin eksploatacji. Dla elementów z materiałów, które nie spełniają tych wymagań należy opracować odpowiednio zmodyfikowaną procedurę przeprowadzania wodnych prób ciśnieniowych oraz rozważyć konieczność ewentualnej modyfikacji procedury uruchamiania i odstawiania kotła. Pozwoli to uniknąć ewentualnych nieprzewidzianych awarii wynikając z braku zdolności do przenoszenia wymaganych nadmiernych obciążeń.

Tabela 6. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych materiału badanych wycinków rurociągu pary pierwotnej i wtórnej po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania

Table 6. Results of mechanical testing of the material of test pieces from primary and secondary steam pipeline after long-term service under creep conditions

Nazwa elementu	Materiał	Oznaczenie wycinka	Czas eksploatacji, h	Własności wytrzymałościowe			
				$R_m$	$R_e$	$A_5$	$R_{p0,2}^{500}$
				MPa	MPa	%	MPa
1	2	3	4	5	6	7	8
Rurociąg pary wtórnej	13CrMo4-5	A	140 000	503	304	30,0	192
WYMAGANIA DLA MATERIAŁU W STANIE WYJŚCIOWYM WG PN-75/H-84024				440÷570	min 295	min 22	min 176
Rurociąg pary pierwotnej	14MoV6-3	B	200 000	503	313	29,0	251
		C	220 000	492	324	31,2	196
		D	216 000	535	326	24,0	238
		E	227 000	499	285	32,1	217
WYMAGANIA DLA MATERIAŁU W STANIE WYJŚCIOWYM WG PN-75/H-84024				440÷690	min 355	min 22	min 216
Rurociąg pary wtórnej	10CrMo9-10	F	227 000	449	285	29,3	228
		G	220 000	437	243	37,8	217
		H	216 000	482	239	29,6	186
WYMAGANIA DLA MATERIAŁU W STANIE WYJŚCIOWYM WG PN-75/H-84024				440÷590	min 265	min 20	min 186

■ – nie spełnia wymagań dla materiału w stanie wyjściowym wg PN-75/H-84024

### 4.3. BADANIA UDARNOŚCI I WYZNACZENIE PRUGU KRUCHOŚCI

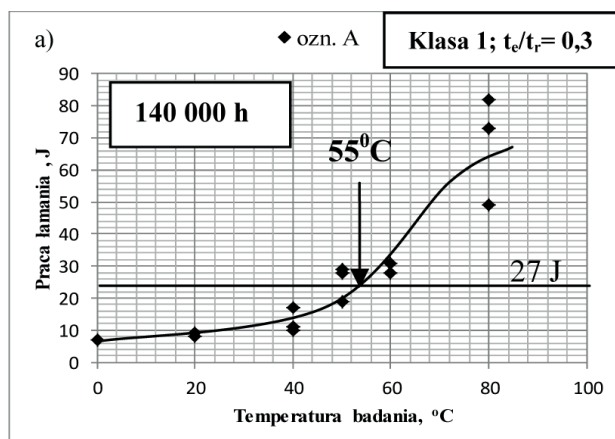
Badania udarności przeprowadzono na próbkach wzdłużnych z karbem V naciętym prostopadle do powierzchni płaszcza pobranych do badań wycinków rurociągów. Próbki łamano młotem udarnościowym wahadłowym firmy Mohr-Federhaff o maksymalnej energii łamania 294 J. Wyniki badań pracy łamania w zależności od temperatury badania z zaznaczoną wyznaczoną temperaturą przejścia w stan kruchy dla materiału wycinka rurociągu ze stali 13CrMo4-5 po 140 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania i oszacowanym stopniu wyczerpania  $t_e/t_r = 0,3$  pokazano na rys. 9.

Wyznaczoną temperaturę przejścia w stan kruchy dla materiałów rurociągów pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po eksploatacji od 200 000 do 227 000 godzin różniących się stanem struktury i stopniem wyczerpania  $t_e/t_r$  oraz poziomem temperatury przejścia w stan kruchy przedstawiono na rys. 10.

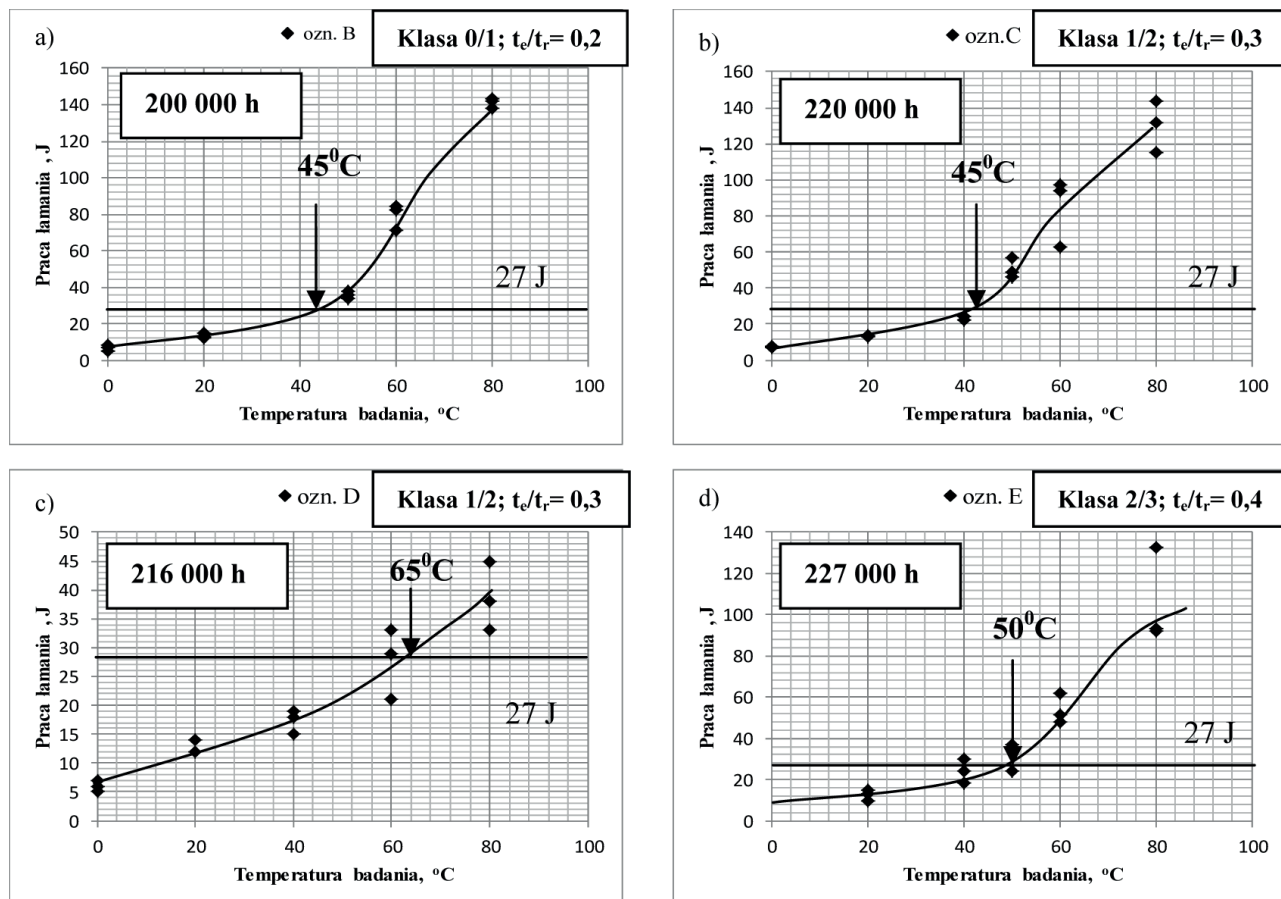
Natomiast na rys. 11 przedstawiono zależność pracy łamania od temperatury badania dla materiałów wybranych wycinków rurociągów pary wtórnej ze stali 10CrMo9-10 po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania w czasie od 200 000 do 227 000 godzin.

Dla badanych materiałów wyznaczono poziom temperatury przejścia w stan kruchy, który jest nieco zróżnicowany w zależności od stanu mikrostruktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania.

Zbiórce zestawienie uzyskanych wyników badań przedstawiono w tabeli 7 pokazujące wpływ stanu mikrostruktury i odpowiadającego jej stopnia wyczerpania na poziom temperatury przejścia w stan kruchy. Ze wzrostem stopnia wyczerpania następuje przesuwanie się jej w kierunku wyższej temperatury niezależnie od gatunku stali. Natomiast dynamika wzrostu poziomu tej temperatury jest zróżnicowana w zależności od gatunku stali. Na podstawie dotychczas uzyskanych wyników, nie tylko zamieszczonych w niniejszym opracowaniu, można stwierdzić, że największa dynamika

Rys. 9. Zależność pracy łamania KV od temperatury badania  $T_b$  oraz wyznaczona temperatura przejścia w stan kruchy badanego materiału rurociągu parowego ze stali 13CrMo4-5 po 140 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzaniaFig. 9. Relationship between impact energy KV and test temperature  $T_b$  and the brittle fracture appearance transition temperature determined for tested material of 13CrMo4-5 steam pipeline after 140 000 h service under creep conditions





Rys. 10. Zależność pracy łamania KV od temperatury badania  $T_b$  oraz wyznaczona temperatura przejścia w stan kruchy badanego materiału rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV6-3 o oszacowanym stopniu wyczerpania  $t_e/t_r$ , po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przez: a) 200 000 h;  $t_e/t_r = 0,2$ , b) 220 000 h;  $t_e/t_r = 0,3$ , c) 216 000 h;  $t_e/t_r = 0,3$ , d) 227 000 h;  $t_e/t_r = 0,4$   
 Fig. 10. Relationship between impact energy KV and test temperature  $T_b$  and the brittle fracture appearance transition temperature determined for tested material of 14MoV6-3 primary steam pipeline with estimated exhaustion  $t_e/t_r$ , after long-term service under creep conditions for: a) 200 000 h;  $t_e/t_r = 0,2$ , b) 220 000 h;  $t_e/t_r = 0,3$ , c) 216 000 h;  $t_e/t_r = 0,3$ , d) 227 000 h;  $t_e/t_r = 0,4$

Tabela 7. Temperatura przejścia w stan kruchy badanych materiałów rurociągów pary pierwotnej i wtórnej po długotrwałej eksploatacji

Table 7. Brittle fracture appearance transition temperature of tested materials of primary and secondary steam pipelines after long-term service

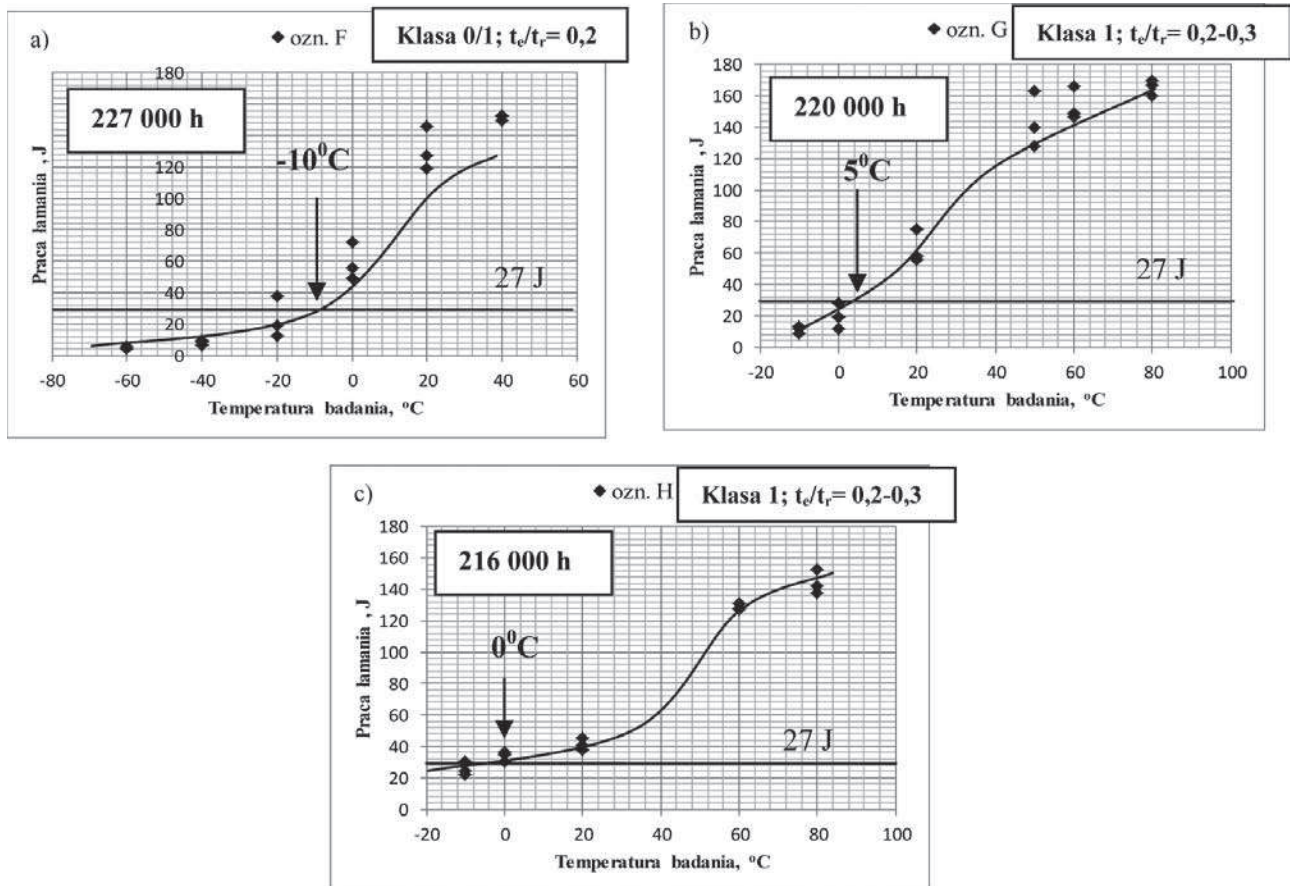
Wyznaczona temperatura przejścia w stan kruchy wg kryterium 27 J								
	+55°C	+45°C	+45°C	+65°C	+50°C	-10°C	+5°C	0°C
Gatunek stali	13CrMo4-5	14MoV6-3			10CrMo9-10			
Oznaczenie	A	B	C	D	E	F	G	H
Czas eksploatacji, h	140 000	200 000	220 000	216 000	227 000	227 000	220 000	216 000
Stan materiału	KLASA 1	KLASA 0/1	KLASA 1/2	KLASA 1	KLASA 2/3	KLASA 0/1	KLASA 1	KLASA 1
Stopień wyczerpania	0,3	0,2	0,3	0,2-0,3	0,4	0,2	0,2-0,3	0,2-0,3

przesuwania się tej temperatury w kierunku wyższego jej poziomu, spośród analizowanych w opracowaniu materiałów, występuje w stali 14MoV6-3 [1].

#### 4.4. OCENA TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ W SKRÓCONYCH PRÓBACH PEŁZANIA

Wskaźnikiem decydującym o przydatności do pracy materiałów elementów części ciśnieniowej bloków energetycznych będących w eksploatacji przez czas dłuższy od założonego i wymaganego obliczeniowe-

go jest wytrzymałość na pełzanie. Dla materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania nazywamy ją resztkową wytrzymałością na pełzanie. Jej wyznaczenie wymaga długotrwałych prób pełzania trwających minimum kilka lat. Dlatego IMŻ opracował i pozytywnie zweryfikował wynikami długotrwałych prób pełzania metodologię wyznaczania trwałości resztkowej materiałów eksploatowanych w warunkach pełzania w oparciu o tzw. skrócone próby pełzania prowadzone przy stałym naprężeniu odpowiadającym ro-



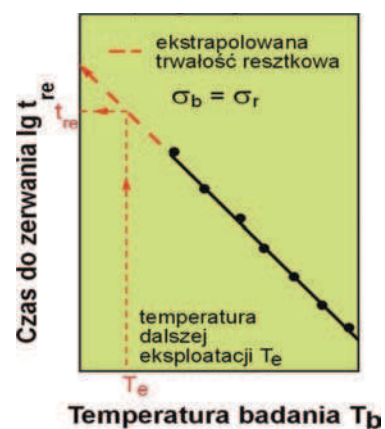
Rys. 11. Zależność pracy łamania KV od temperatury badania  $T_b$  oraz wyznaczona temperatura przejścia w stan kruchy badanego materiału rurociągu pary wtórnej ze stali 10CrMo9-10 o oszacowanym stopniu wyczerpania  $t_e/t_r$ , po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przez: a) 227 000 h;  $t_e/t_r = 0,2$ , b) 220 000 h;  $t_e/t_r = 0,2\div 0,3$ , c) 216 000 h;  $t_e/t_r = 0,2\div 0,3$

Fig. 11. Relationship between impact energy KV and test temperature  $T_b$  and the brittle fracture appearance transition temperature determined for tested material of 10CrMo9-10 secondary steam pipeline with estimated exhaustion extent  $t_e/t_r$ , after long-term service under creep conditions for: a) 227 000 h;  $t_e/t_r = 0,2$ , b) 220 000 h;  $t_e/t_r = 0,2\div 0,3$ , c) 216 000 h;  $t_e/t_r = 0,2\div 0,3$

boczemu. Umożliwiło to jej stosowanie w praktyce inżynierskiej dla dotychczas stosowanych stali na elementy krytyczne części ciśnieniowej kotłów, tzn. pracujących w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych [1, 3, 8]. Czas trwania poszczególnych skróconych prób pełzania wynosi od kilkudziesięciu godzin do maks. od 3 do 10 tysięcy godzin, w zależności od gatunku i stanu materiału. Stwarza to możliwość uzyskania wyników badań w ciągu maksimum kilkunastu miesięcy dając dobre oszacowanie trwałości. Przyspieszenie procesu pełzania oraz skrócenie okresu wykonywania badań uzyskuje się w próbach pełzania wykonywanych przy jednoosiowym rozciąganiu na próbkach pobranych z materiału elementu instalacji pracującej w warunkach pełzania. Próby prowadzone są zatem przy stałym naprężeniu badania odpowiadającym eksploatacyjnemu i w różnych poziomach temperatury badania, wyższej od temperatury eksploatacyjnej. Na rys. 12 pokazano w postaci graficznej sposób wyznaczania trwałości resztkowej z zastosowaniem skróconych prób pełzania.

Badania pełzania, w próbach skróconych, wytypowanych do badań materiałów wycinków rurociągów parowych prowadzono w jednopróbkowych sześciostanowiskowych maszynach do prób pełzania wykonanych przez IMŻ. Maszyny te posiadają układy dźwigniowe do zadawania obciążenia, a próbki są umieszczone

w piecach grzewczych o stałej temperaturze zapewniających stałość poziomu temperatury badania na długości pomiarowej próbki i w czasie trwania próby z dokładnością do  $\pm 0,25$  stopnia przy temperaturze ba-



Rys. 12. Stosowana w praktyce inżynierskiej metoda wyznaczania trwałości resztkowej na podstawie skróconych prób pełzania prowadzonych przy stałym naprężeniu odpowiadającym eksploatacyjnemu

Fig. 12. Method for determination of residual life based on the abridged creep tests carried out at constant stress corresponding to the operating one, used in the engineering practice

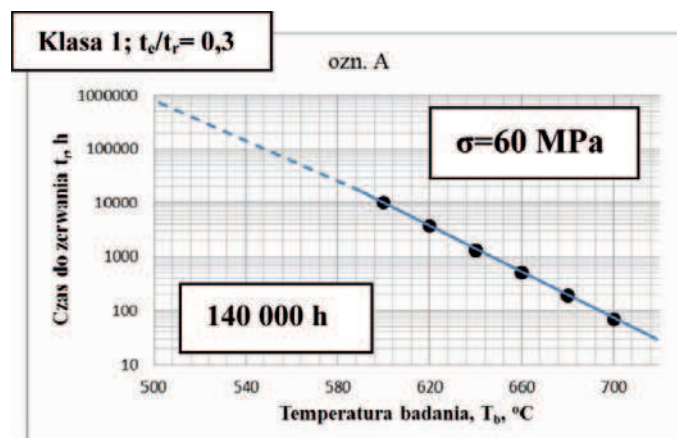
Tabela 8. Wyniki skróconych prób pełzania badanych materiałów rurociągów pary  
Table 8. Results of abridged creep tests of tested materials of steam pipelines

Oznaczenie material	Naprężenie badania $\sigma_b$ , MPa	Temperatura badania $T_b$ , °C					
		600	620	640	660	680	700
		Czas do zerwania $t_r$ , h					
1	2	3	4	5	6	7	8
A 13CrMo4-5	60	9850	3775	1330	515	187	68
B 14MoV6-3	50	17757	4991	1885	722	238	85
C 14MoV6-3	50	-	4800	1900	760	254	92
D 14MoV6-3	50	-	5633	1863	784	295	71
E 14MoV6-3	55	-	3430	1288	419	181	60
F 10CrMo9-10	55	-	1485	516	287	137	29
G 10CrMo9-10	50	-	1001	967	492	109	35
H 10CrMo9-10	55	-	1770	597	222	75	22

dania do 800°C. Badania przeprowadzono na próbkach standardowych o stosunku  $l_0/d_0 = 10$ , długości pomiarowej  $l_0 = 50$  mm i średnicy pomiarowej próbki  $d_0 = 5$  mm, pobranych wzdłuż osi rury.

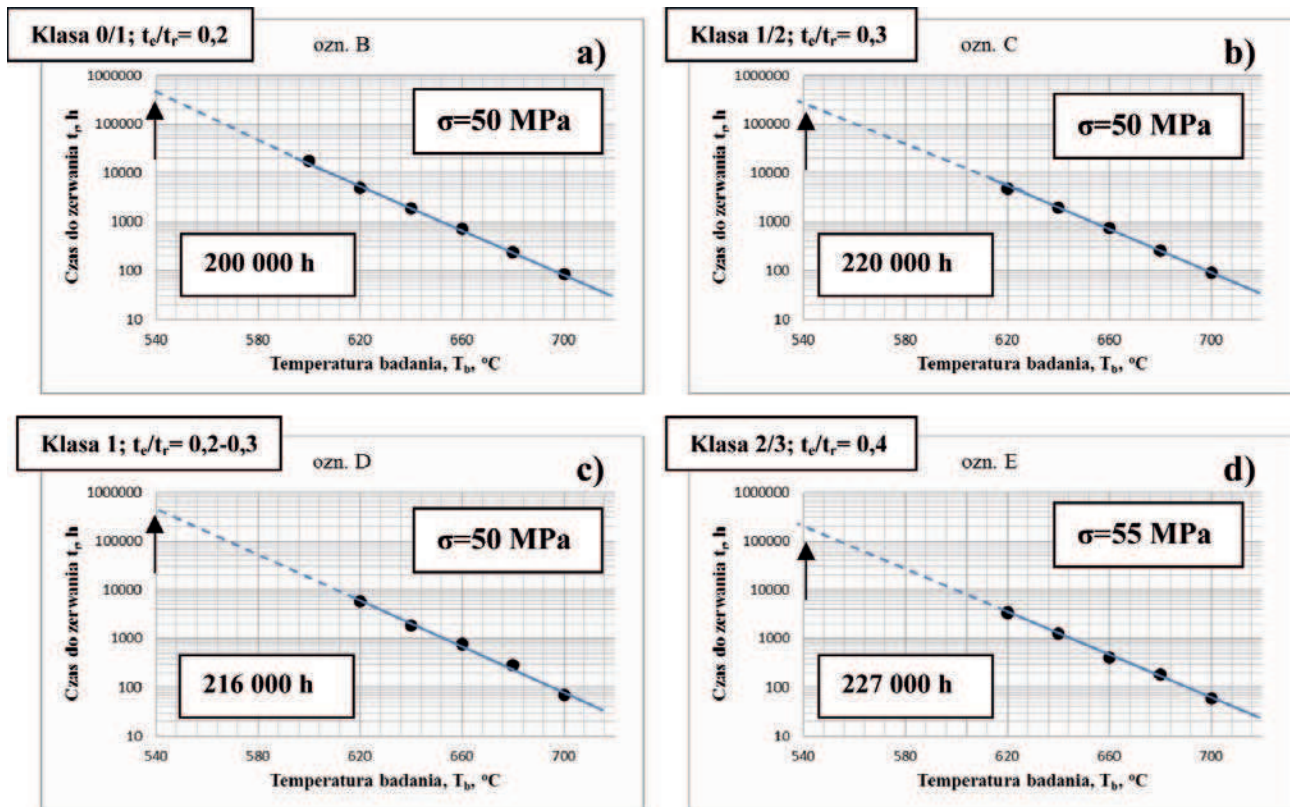
Uzyskane wyniki badań skróconych prób pełzania prowadzonych przy stałym naprężeniu badania dla każdego z materiału badanych wycinków po eksploatacji o różnej wartości, wynoszącej od 50 do 60 MPa, odpowiadającej dotychczasowej eksploatacji, oraz w stałej temperaturze badania dla każdej z prób w zakresie od 600 do 700°C zestawiono w tabeli 8. Ponadto uzyskane rezultaty przedstawiono graficznie w postaci zależności czasu do zerwania  $t_r$  od temperatury badania  $T_b$  przy stałym poziomie naprężenia badania  $\sigma_b$  odpowiadającym naprężeniu dotychczasowej eksploatacji  $\sigma_e$  ( $\log t_r = f(T_b)$ ;  $\sigma_b = \sigma_e = \text{const}$ ). Na rys. 13 przedstawiono zależność tę uzyskaną dla materiału rurociągu zestali 13CrMo4-5 po 140 000 godzin eksploatacji. Natomiast na rys. 14 pokazano uzyskane zależności dla materiałów rurociągów pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po eks-

ploatacji od 200 000 do 227 000 godzin a na rys. 15 materiałów rurociągów pary wtórnej po czasie eksploatacji od 200 000 do 227 000 godzin. Uzyskane proste ekstrapolowano w kierunku temperatury odpowiadającej zadeklarowanej temperaturze dalszej eksploatacji (linie przerywane) wyznaczając czas do zerwania  $t_r$  będący trwałością resztkową dla parametrów dalszej pracy. Na jej podstawie wyznaczono rozporządzalną trwałość resztkową będącą czasem dalszej bezpiecznej pracy dla tych parametrów. Wyznaczone wartości trwałości resztkowej i resztkowej rozporządzalnej odniesione do stanu materiału i jego stopnia wyczerpania zestawiono w tabeli 9. Zarówno trwałość resztkowa jak i rozporządzalna maleją ze wzrostem klasy struktury i odpowiadającym jej większemu stopniowi wyczerpania. Wskazuje to na zgodność pomiędzy oszacowanym stopniem wyczerpania na podstawie wykonanych badań struktury oraz wyznaczoną resztkową wytrzymałością na pełzanie w skróconych próbach pełzania.



Rys. 13. Zależność czasu do zerwania  $t_r$  w próbie pełzania od temperatury badania  $T_b$  ( $\log t_r = f(T_b)$ ;  $\sigma_b = \text{const}$ ) na podstawie skróconych prób pełzania wycinku rurociągu parowego ze stali 13CrMo4-5 po 140 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania

Fig. 13. Relationship between time to rupture  $t_r$  in creep test and test temperature  $T_b$  ( $\log t_r = f(T_b)$ ;  $\sigma_b = \text{const}$ ) based on the abridged creep tests of test piece of the 13CrMo4-5 steam pipeline after 140 000 h service under creep conditions



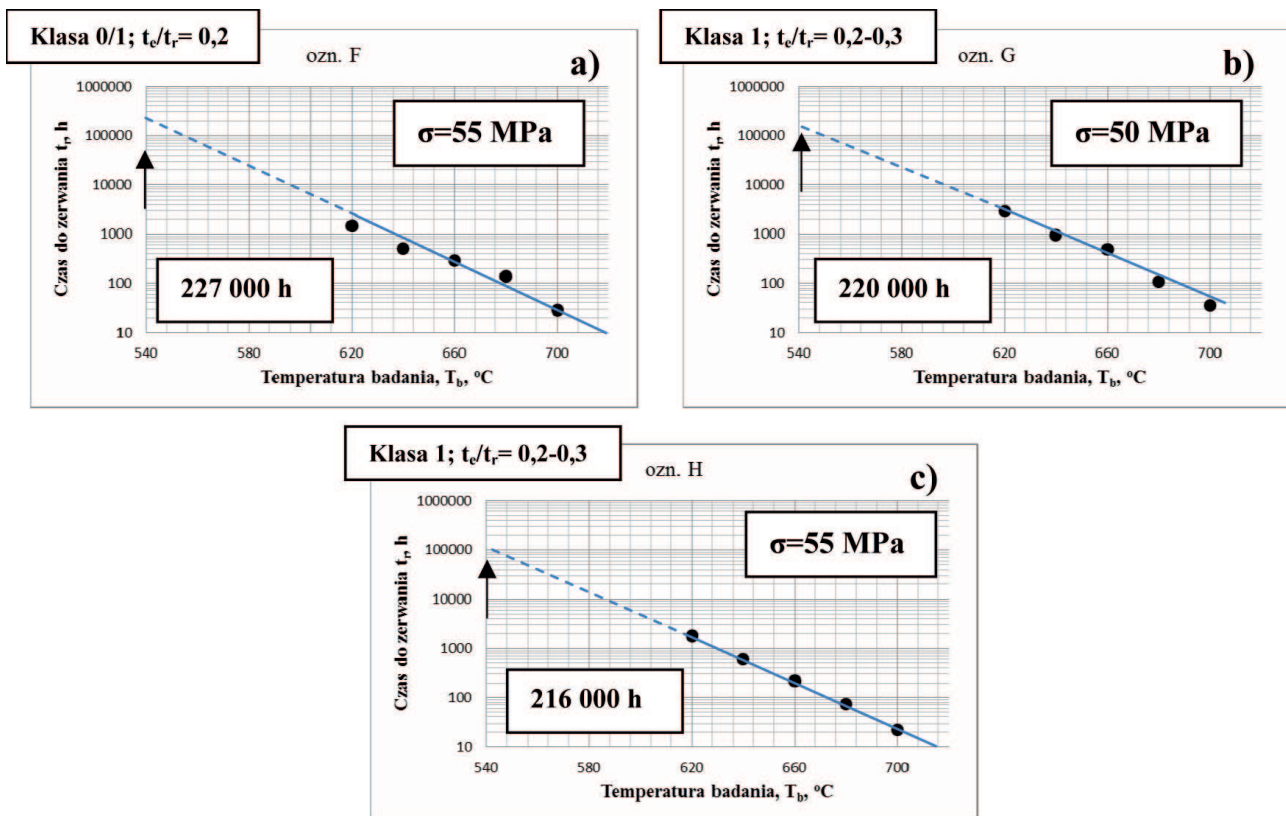
Rys. 14. Zależność czasu do zerwania  $t_r$  w próbie pełzania od temperatury badania  $T_b$  ( $\log t_r = f(T_b)$ ;  $\sigma_b = \text{const}$ ) na podstawie skróconych prób pełzania wycinków rurociągów pary świeżej ze stali 14MoV6-3 o różnym stopniu wyczerpania po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przez: a) 200 000 h, b) 220 000 h, c) 216 000 h, d) 227 000 h

Fig. 14. Relationship between time to rupture  $t_r$  in creep test and test temperature  $T_b$  ( $\log t_r = f(T_b)$ ;  $\sigma_b = \text{const}$ ) based on the abridged creep tests of test pieces of the 14MoV6-3 primary steam pipelines with different exhaustion extents after long-term service under creep conditions for: a) 200 000 h, b) 220 000 h, c) 216 000 h, d) 227 000 h

Tabela 9. Wyznaczona na podstawie skróconych prób pełzania trwałość resztkowa i rozporządzalna trwałość resztkowa dla badanych materiałów rurociągów pary pierwotnej i wtórnej ze stali 13CrMo4-5, 14MoV6-3i 10CrMo9-10 o różnym stanie struktury i stopniu wyczerpania po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania

Table 9. Residual life and disposable residual life for tested materials of the 13CrMo4-5, 14MoV6-3 and 10CrMo9-10 primary and secondary steam pipelines with different structural conditions and exhaustion extents after long-term service under creep conditions, determined based on the abridged creep tests

Lp.	Oznaczenie Gatunek stali	Przyjęte napężenie robocze dalszej eksploatacji $\sigma_r$ , MPa	Przyjęta temperatura dalszej eksploatacji $T_r$ , °C	Stan materiału; Klasa Stopień wyczerpania	Oszacowana trwałość, h	
					resztkowa	rozporządzalna resztkowa (bezpieczny czas dalszej pracy)
1	2	3	4	5	6	7
1	A 13CrMo4-5	60	490	KLASA 1 0,2	800 000	480 000
2	B 14MoV6-3	50	540	KLASA 0/1 0,2	450 000	270 000
3	C 14MoV6-3	50	540	KLASA 1/2 0,3	280 000	165 000
4	D 14MoV6-3	50	540	KLASA 1 0,2-0,3	380 000	230 000
5	E 14MoV6-3	55	540	KLASA 2/3 0,4	180 000	100 000
6	F 10CrMo9-10	55	540	KLASA 0/1 0,2	210 000	125 000
7	G 10CrMo9-10	50	540	KLASA 1 0,2-0,3	160 000	95 000
8	H 10CrMo9-10	55	540	KLASA 1 0,2-0,3	100 000	60 000



Rys. 15. Zależność czasu do zerwania  $t_r$  w próbie pełzania od temperatury badania  $T_b$  ( $\log t_r = f(T_b)$ ;  $\sigma_b = \text{const}$ ) na podstawie skróconych prób pełzania wycinków rurociągów pary wtórnej ze stali 10CrMo9-10 o różnym stopniu wyczerpania po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przez: a) 227 000 h, b) 220 000 h, c) 216 000 h

Fig. 15. Relationship between time to rupture  $t_r$  in creep test and test temperature  $T_b$  ( $\log t_r = f(T_b)$ ;  $\sigma_b = \text{const}$ ) based on the abridged creep tests of test pieces of the 10CrMo9-10 secondary steam pipelines with different exhaustion extents after long-term service under creep conditions for: a) 227 000 h, b) 220 000 h, c) 216 000 h

## PODSUMOWANIE

Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski.

1. Dla wytypowanych do badań materiałów rurociągów wykonanych z niskostopowych stali w gatunkach 13CrMo4-5, 14MoV6-3 i 10CrMo9-10 w badaniach struktury przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego oszacowano wg klasyfikacji IMŻ stopień wyczerpania. Największym stopniem wyeksploatowania spośród badanych materiałów charakteryzuje się materiał rurociągu pary świeższej po 227 tys. godzin eksploatacji ozn. E, wykonany ze stali 14MoV6-3 o oszacowanym stopniu wyczerpania na poziomie 0,4 (Rys. 5). Potwierdza to również analiza fazowa występujących wydzielen, gdzie jako fazę główną zidentyfikowano wydzielenia węgla typu  $M_{23}C_6$  oraz niewielkie ilości węglików typu  $M_6C$  (Tab. 5).
2. Przeprowadzone badania właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej jak i w temperaturze zbliżonej do temperatury pracy w sposób znaczący nie odbiegają od wymagań dla badanych materiałów w stanie wyjściowym (Tab. 6). Materiały badanych wycinków rurociągów ze stali 14MoV6-3 oraz ze stali 10CrMo9-10 nie spełniają jednak wymagań granicy plastyczności  $R_e$  w temperaturze pokojowej, a ponadto materiał wycinka ze stali 14MoV6-3 po 220 000 godzin eksploatacji nie spełnia wymagań granicy plastyczności w temperaturze 500°C

( $R_{p0,2}^{500}$ ). Nie świadczy to jednak o nieprzydatności badanego materiału do dalszej eksploatacji, gdyż w przypadku materiałów pracujących powyżej temperatury granicznej tzn. w warunkach pełzania elementy są projektowane w oparciu o wartości naprężenia dopuszczalnego  $k$  wyznaczanego ze średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie  $Rz/t/T$  lub granicy pełzania  $Rz/t/T$  na obliczeniowy czas pracy. Dla elementów z takich materiałów, które nie spełniają tych wymagań należy opracować odpowiednio zmodyfikowaną procedurę przeprowadzania wodnych prób ciśnieniowych oraz rozważyć konieczność ewentualnej modyfikacji procedury uruchamiania i odstawiania kotła. Pozwoli to uniknąć ewentualnych nieprzewidzianych awarii wynikających z braku zdolności do przenoszenia wymaganych nadmiernych obciążeń w tych warunkach.

3. Wyznaczona temperatura przejścia w stan kruchy badanych materiałów rurociągów po długotrwałej eksploatacji, według kryterium 27 J, wykonanych ze stali 13CrMo4-5 i 14MoV6-3 jest znacznie przesunięta w kierunku temperatury dodatniej i mieści w zakresie od +45 do +55°C. Materiał wycinków rurociągów wykonanych ze stali 10CrMo9-10 charakteryzuje się znacznie niższym poziomem temperatury przejścia w stan kruchy w zakresie od -10 do -5°C. Uzyskane wartości są istotną informacją w ocenie zdolności materiału do odkształceń w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej. Dla elementów, których materiały po eksploatacji mają temperaturę

przejścia w stan kruchy przesuniętą do temperatury pokojowej i powyżej, należy odpowiednio zmodyfikować procedurę przeprowadzania wodnych prób ciśnieniowych oraz uwzględnić w postaci korekty w instrukcji uruchamiania i odstawiania kotła. Pozwoli to uniknąć ewentualnych nieprzewidzianych awarii związanych z ograniczoną zdolnością do odkształceń, szczególnie w temperaturze zbliżonej do pokojowej.

4. Wyznaczona trwałość resztkowa i resztkowa rozporządzalna maleją ze wzrostem klasy struktury i odpowiadającego jej większego stopnia wyczerpania. Świadczy to o zgodności pomiędzy oszacowanym stopniem wyczerpania na podstawie wykonanych badań struktury oraz wyznaczoną resztkową wytrzymałością na pełzanie w skróconych próbach pełzania (Tab. 9).

Zróżnicowane wartości uzyskanej wytrzymałości na pełzanie związane są ze stanem wyjściowym oraz historią eksploatacji tzn.: czasem, temperaturą i rze-

czywistym naprężeniem dotychczasowej eksploatacji badanych wycinków rurociągów oraz parametrami przyjętymi w skróconych próbach pełzania. Wyznaczona trwałość resztkowa oraz rozporządzalna trwałość resztkowa dla dotychczasowych parametrów eksploatacji pozwala dopuścić materiały badanych głównych rurociągów parowych do dalszej pracy pomimo znacznego przekroczenia obliczeniowego czasu pracy.

Dla rurociągów, które osiągnęły lub przekroczyły obliczeniowy czas pracy tylko kompleksowy program nieniszczących badań materiałowych, wykonanych na elementach rurociągu umożliwiający wyznaczenie reprezentatywnego wycinka do badań niszczących i ich wykonanie, umożliwiając ocenę stanu materiału rurociągu i wyznaczenie czasu dalszej jego bezpiecznej eksploatacji dla zdefiniowanych parametrów dalszej pracy umożliwiając dalszą bezpieczną eksploatację tych urządzeń.

## LITERATURA

1. J. Dobrzański, Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki, Wyd. Open Access Library, Volume 3, 2011
2. A. Zieliński, J. Dobrzański, D. Renowicz, A. Hernas, The estimation of residual life of low-alloy cast steel Cr-Mo-V type after long-term creep service, Fifth International Conference on Advances in Material Technology for Fossil Power Plants, Marco Island, Florida USA. EPRI, 2007, 34
3. A. Hernas, J. Dobrzański, Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2003
4. J. Dobrzański, Charakterystyki materiałowe stali 14MoV63 (13HMF) po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania jako niezbędne składowe oceny stanu i przydatności do dalszej eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych, Energetyka; Zeszyt tematyczny nr XIX, p. 33-39. Listopad 2009
5. J. Okrajni, A. Marek, G. Junak, Description of the deformation process under thermo-mechanical fatigue, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 21, 2, 2007, 15-24
6. J. Dobrzański, Charakterystyki materiałowe stali 10CrMo910 (10H2M) po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania niezbędne w ocenie stanu i przydatności do dalszej eksploatacji materiału elementów ciśnieniowych kotłów energetycznych, Energetyka, Zeszyt tematyczny XIX (2009) 27-33
7. J. Dobrzański, A. Zieliński, Ocena przydatności do dalszej pracy materiału elementów rurociągu pary świeżej ze stali 14MoV63 (13HMF) po 200 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania, Energetyka, Zeszyt tematyczny XVIII (2008) 32-36
8. J. Dobrzański, Ocena przydatności do eksploatacji stali 14MoV63 (13HMF) i naprawczych złączy spawanych grubościennych elementów rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania przez 100 000 i 200 000 godzin, Energetyka, Zeszyt tematyczny XVIII (2008) 23-28
9. J. Dobrzański, A. Zieliński, H. Krztoń, Mechanical properties and structure of the Cr-Mo-V low-alloyed steel after long-term service in creep condition, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 23/1 (2007) 39-42
10. J. Dobrzański, H. Krztoń, A. Zieliński, Development of the precipitation processes in low-alloy Cr-Mo type steel for evolution of the material state after exceeding the assessed lifetime, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 23/2 (2007) 19-22
11. J. Dobrzański, A. Hernas, H. Klimas, Materiałoznawcze podstawy przedłużenia czasu bezpiecznej eksploatacji elementów krytycznych kotła, Energetyka 10 (1997) 549-556
12. J. Dobrzański, A. Zieliński, Trwałość resztkowa stali 13HMF po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przez 200 tys. godzin, Prace IMŻ 59/4 (2007) 54-57
13. J. Dobrzański, A. Zieliński, H. Paszkowska, Wyznaczanie trwałości resztkowej i czasu dalszej bezpiecznej pracy na przykładzie materiału rodzimego i złącza spawanego, Prace IMŻ 61/1 (2009) 9-25
14. J. Dobrzański, H. Paszkowska, A. Zieliński, Welded repair joints of boiler steels following operation in creep conditions exceeding the design time of operation, 9th Liege Conference on Materials for Advanced Power Engineering, Liege, Belgium, 2010, 400-411
15. 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; Politechnika Śląska, Prace IMiUE, Zeszyt 23 T1, s. 85-126., Październik 2009
16. J. Dobrzański, Diagnostyka materiałowa w ocenie stanu i prognozie czasu eksploatacji poza czas obliczeniowy rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania, Energetyka 12 (2002) 937-946
17. J. Dobrzański, A. Zieliński, J. Wodzyński, Diagnostyka materiałowa w badaniach mechanizmów i przyczyn powstawania awarii elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych, X Sympozjum Informacyjno-Szkoleniowe, Diagnostyka i Remonty Długoeksploatowanych Urządzeń Energetycznych. Wydłużanie czasu pracy urządzeń energetycznych – szanse i ograniczenia, Ustroń, Biuletyn Pro Novum, 2008, 91-102
18. PN-EN 12952-4/2002, Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze. Część 4: Obliczenia oczekiwanej trwałości kotłów podczas eksploatacji
19. J. Dobrzański, Internal damage processes in low alloy chromium-molybdenum steels during high-temperature creep service, Journal of Materials Processing Technology 157-158 (2004) 297-303