

Maria DZIUBA-KAŁUŻA, Janusz DOBRZAŃSKI, Hanna PURZYŃSKA,  
Zofia KANIA-PIFCZYK, Radosław ROZMUS

# OCENA STOPNIA WYEKSPLOATOWANIA MATERIAŁU WIRNIKÓW TURBIN PAROWYCH Z NISKOSTOPOWEJ STALI Cr-Mo-V PO EKSPLOATACJI W CZASIE ZNACZNIE PRZEKRACZAJĄCYM CZAS OBLICZENIOWY

*Celem pracy była ocena stanu rozwoju procesów wydzieleniowych, wyznaczenie odpowiadającej mu prędkości pełzania i wyznaczenie odpowiadającego im stopnia wyczerpania badanych stali 23H2MF, 26H2MF oraz 21HMF po długotrwałej pracy w warunkach pełzania. Przeprowadzono identyfikację występujących wydzieleni w oparciu o ich obraz dyfrakcyjny. Wykonana została próba pełzania z pomiarem wydłużenia w czasie jej trwania dla wyznaczenia prędkości pełzania na materiale wirnika po eksploatacji znacznie poza obliczeniowym czasem pracy. Wykonano badania mikrostruktury w skaningowym mikroskopie elektronowym, wyznaczono skład fazowy węglików metodą rentgenowskiej analizy fazowej.*

*Słowa kluczowe:* turbiny, stal 23H2MF, 26H2MF, 21HMF, próby pełzania, mikrostruktura

## ASSESSMENT OF THE DEGREE OF EXHAUSTION OF STEAM TURBINE ROTORS MATERIAL MADE OF LOW-ALLOY Cr-Mo-V STEEL AFTER USE IN A PERIOD OF TIME SIGNIFICANTLY EXCEEDING COMPUTATIONAL TIME

*The aim of the work was to assess the state of development of precipitation processes, determine the corresponding creep speed, and determine the corresponding degree of exhaustion of 23H2MF, 26H2MF and 21HMF steels after long-term work under creep conditions. The identification of precipitates based on their diffraction pattern was carried out. A creep test was performed with the measurement of elongation during its duration to determine the creep speed on the rotor material after use in time significantly exceeding its computational working time. Microstructure investigations were carried out using a scanning electron microscope, and phase composition of carbides was determined with the use of X-ray phase analysis.*

*Keywords:* turbines, 23H2MF, 26H2MF, 21HMF steel, creep tests, microstructure

### 1. WPROWADZENIE

Problematyka oceny trwałości długo eksploatowanych elementów ciśnieniowych bloków energetycznych i wydłużania czasu bezpiecznej ich eksploatacji ma niezwykle istotne znaczenie dla funkcjonowania gospodarki kraju. Elementami wymagającymi oceny stanu, przydatności do dalszej eksploatacji oraz wyznaczania czasu dalszej bezpiecznej pracy są tzw. elementy krytyczne, które są definiowane jako pracujące w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych. Należą do nich zarówno elementy części ciśnieniowej kotła i główne rurociągi parowe jak i elementy turbin parowych. Wśród elementów turbin parowych oprócz korpusów turbin i łopatek należy wyróżnić wały wirnika.

Ocena stopnia wyeleksploatowania materiału wirników turbin parowych po eksploatacji wpisuje się w oczekiwania energetyki zawodowej ponieważ nie-

zbędnym dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju jest przedłużenie eksploatacji pracujących jednostek, głównie 52 bloków o mocy nominalnej 200 MW, 16 bloków 360 MW i 2 bloków 500 MW, do 350 000 godzin ich pracy, czyli co najmniej jeszcze przez 10 lat. Problematyka trwałości eksploatacyjnej, przydatności materiału wirników do eksploatacji po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy, stanu mikrostruktury i zespołu właściwości użytkowych jest tematem poniższej pracy [1–7].

### 2. MATERIAŁ, ZAKRES BADAŃ

Materiał do badań stanowiły wycinki części wysokoprężnej WP i średnioprężnej SP wirników turbiny TK-200 bloku energetycznego o mocy nominalnej 200 MW po 250 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania oraz wycinki części wysokoprężnej WP i średniopręż-

nej SP wirnika turbiny 18K360 bloku energetycznego o mocy nominalnej 360 MW po 220 000 godzin eksploatacji ze stali odpowiednio 23H2MF, 26H2MF i 21HMF w warunkach pełzania.

Zakres badań umożliwia zdefiniowanie stanu mikrostruktury, w szczególności stopnia degradacji podstawowych składników fazowych oraz stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych oraz odpowiadający im zespół właściwości mechanicznych, w tym odporności na pełzanie.

Program badań obejmował:

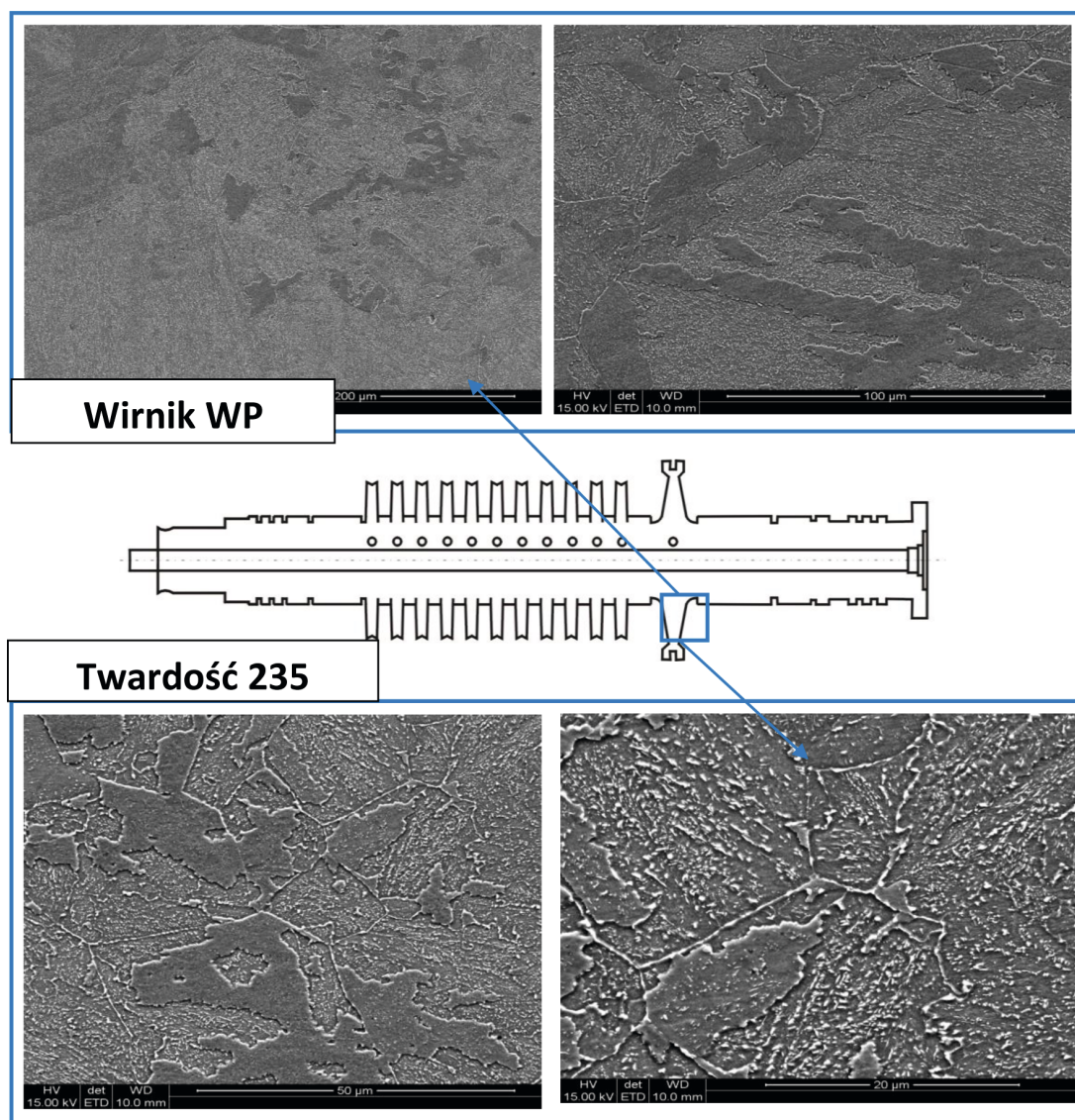
- badania mikrostruktury w skaningowym mikroskopie elektronowym,
- badania stanu rozwoju procesów wydzieleniowych węglików oraz identyfikacja typów występujących wydzieleni w transmisyjnym mikroskopie elektronowym,
- rentgenowską analizę fazową wydzieleni,
- badania właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej i podwyższonej zbliżonej do temperatury pracy,

- badania udarności celem określenia temperatury przejścia w stan kruchy,
- badania odporności na pełzanie.

### 3. WYNIKI I ICH DYSKUSJA

#### 3.1. BADANIA METALOGRAFICZNE

Badania metalograficzne – obserwacje mikrostruktury materiału przeprowadzono na zglądach metalograficznych. Badania mikrostruktury przeprowadzono w elektronowym mikroskopie skaningowym Inspect F przy powiększeniu do 5 000 razy. Badania te wykonano dla wszystkich badanych materiałów. Opis wyników badań mikrostruktury i twardość materiału ze stali, 23H2MF, 26H2MF i 21HMF po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania przedstawiono w tabeli 1 oraz pokazano przykładowo mikrostrukturę materiału części wysokoprężnej WP wirnika turbiny TK 200 w obszarze otworu centralnego po 250 000 godzin eksploatacji na rys. 1.



Rys. 1. Mikrostruktura materiału części wysokoprężnej ze stali 23H2MF wirnika turbiny TK 200 w obszarze otworu centralnego po 250 000 godzin eksploatacji

Fig. 1. Microstructure of the material of the high-pressure part made of 23H2MF steel of the TK 200 turbine rotor in the area of the central opening after 250,000 operating hours

**Tabela 1. Opis wyników badań mikrostruktury i twardość materiału odpowiednio ze stali 23H2MF, 26H2MF i 21HMF po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania**

**Table 1. Description of the microstructure investigation results and hardness of the material of 23H2MF, 26H2MF and 21HMF steels after long-term use under creep conditions**

Material	Miejsce badania ozn. (nr rys.)	Opis mikrostruktury Stan materiału	Twardość HV10
stal 23H2MF po 250 000 godz. eksploatacji	rejon otworu centralnego stopnia regulacyjnego części wysokoprężnej WP wirnika turbiny TK-200	Struktura bainitu z ferrytem. Obszary bainityczne charakteryzują się występowaniem znacznej ilości drobnych wydzieleni, prawdopodobnie węglików MC ze znacznym udziałem wanadu oraz węglików $M_2C$ z molibdenem, dość równomiernie rozmieszczonych w tych obszarach. Miejscami zaobserwowano tworzenie się subziarn z wydzieleniami na ich granicach. Na granicach ziarn ferrytu ujawniono występowanie niewielkich wydzieleni, prawdopodobnie węglików $M_{23}C_6$ wzbogaconych w chrom, tworzących lokalnie łańcuszki. Wewnątrz ziarn ferrytu zaobserwowano drobne wydzielenia, prawdopodobnie węglików MC ze znacznym udziałem wanadu.	235
stal 23H2MF po 250 000 godz. eksploatacji	rejon wrębu stopnia regulacyjnego części wysokoprężnej WP wirnika turbiny TK-200	Struktura bainitu z ferrytem. Obszary bainityczne ze znaczącą ilością drobnych wydzieleni. W niektórych obszarach bainitu proces tworzenia się subziarn z wydzieleniami na ich granicach. Na granicach ziarn ferrytu wydzielenia różnicowanej wielkości tworzące miejscami łańcuszki. Wewnątrz ziarn ferrytu drobne wydzielenia.	231
stal 26H2MF po 250 000 godz. eksploatacji	rejon otworu centralnego stopnia pierwszego części średnioprężnej SP wirnika turbiny TK-200	Struktura bainitu z ferrytem. Obszary bainityczne ze znaczącą ilością wydzieleni różnicowanej wielkości, w większości drobnych. W obszarach bainitu proces tworzenia się subziarn z wydzieleniami na ich granicach. Na granicach ziarn ferrytu wydzielenia, raczej niewielkie wydzielenia, tworzące miejscami łańcuszki. Wewnątrz ziarn ferrytu drobne wydzielenia dość równomiernie rozmieszczone.	216
	rejon wrębu stopnia pierwszego części średnioprężnej SP wirnika turbiny TK-200	Struktura bainitu z ferrytem zbliżona do ujawnionej w obszarze otworu centralnego pierwszego stopnia części SP wirnika. Znaczna ilość niewielkich wydzieleni w obszarach bainitycznych. Na granicach ziarn ferrytu drobne wydzielenia tworzące łańcuszki.	226
stal 21HMF po 219 416 godz. eksploatacji	W obszarze bębna w rejonie wlotu pary części średnioprężnej SP wirnika turbiny 18K-360	Strukturą materiału jest bainit z niewielką ilością ferrytu. Obszary bainityczne charakteryzują się występowaniem znacznej ilości drobnych wydzieleni, prawdopodobnie węglików MC ze znacznym udziałem wanadu oraz $M_2C$ z molibdenem, dość równomiernie rozmieszczonych w tych obszarach. Również wewnątrz ziarn ferrytu zaobserwowano drobne wydzielenia, prawdopodobnie węglików MC ze znacznym udziałem wanadu. Na granicach płytek bainitu jak i ziarn ferrytu ujawniono występowanie niewielkich wydzieleni, prawdopodobnie węglików $M_{23}C_6$ wzbogaconych w chrom, tworzących łańcuszki.	247
	w obszarze końcówki wirnika od strony regulatora bezpieczeństwa części wysokoprężnej WP wirnika turbiny 18K-360	Strukturą materiału jest bainit z licznymi wydzieleniami. Obraz mikrostruktury materiału końcówki wirnika jest zbliżony do typowej mikrostruktury stanu wyjściowego materiału wirnika z badanej stali.	244
stal 21HMF po 219 416 godz. eksploatacji	w obszarze osadzenia elementów urządzenia do obracania wirnika części wysokoprężnej WP wirnika turbiny 18K-360	Strukturą materiału jest bainit z licznymi wydzieleniami. W mikrostrukturze zaobserwowano występowanie wydzieleni na granicach płytek bainitu, co może ten materiał nieco różnić od typowego materiału wirnika w stanie wyjściowym.	238
	w obszarze czopa łożyskowego części wysokoprężnej WP wirnika turbiny 18K-360		235
	w obszarze bębna wirnika w rejonie 12-13 stopnia części wysokoprężnej WP wirnika turbiny 18K-360	Materiał charakteryzuje się bainitem z licznymi wydzieleniami na granicach płytek i wewnątrz nich. W materiale badanego obszaru można zaobserwować częściowy zanik płytek bainitu. Na granicach płytek bainitu zaobserwowano wydzielenia, prawdopodobnie węglika $M_{23}C_6$ tworzące łańcuszki. Również wewnątrz tych obszarów ujawniono znaczną ilość wydzieleni, które po ich cechach morfologicznych można identyfikować jako wydzielenia VC oraz $Mo_2C$ . Są one wyraźnie większe niż w pozostałych badanych obszarach części WP wirnika. Częściowy zanik płytek bainitu potwierdza niższa twardość.	210

### 3.2. RENTGENOWSKA ANALIZA SKŁADU FAZOWEGO WYDZIELEŃ

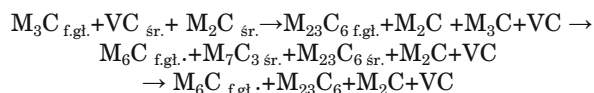
Badania wykonano z wykorzystaniem: dyfraktometru rentgenowskiego Empyrean stosując promieniowanie kobaltu w konfiguracji z detektorem Pixel. Wyniki badań przedstawiono w postaci dyfraktogramów a z-

identyfikowane rodzaje występujących węglików zestawiono w postaci tabelarycznej.

Na podstawie uzyskanych wyników badań rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej osadu wyizolowanych węglików ujawniono typy występujących węglików oraz określono ich udziały w badanych materiałach

części WP i SP wirnika turbiny TK-200 po 250 000 godzin eksploatacji. Typy występujących węglików oraz ich udziały zestawiono w tabeli 2.

Na rys. 2 pokazano typowy obraz mikrostruktury badanego obszaru oraz skład fazowy wydzieliń i udziały poszczególnych typów węglików. Sformułowano przewidywaną sekwencję wydzieliń w wyniku procesu pełzania badanych niskostopowych stali Cr-Mo-V (21HMF, 23H2MF, 26H2MF):



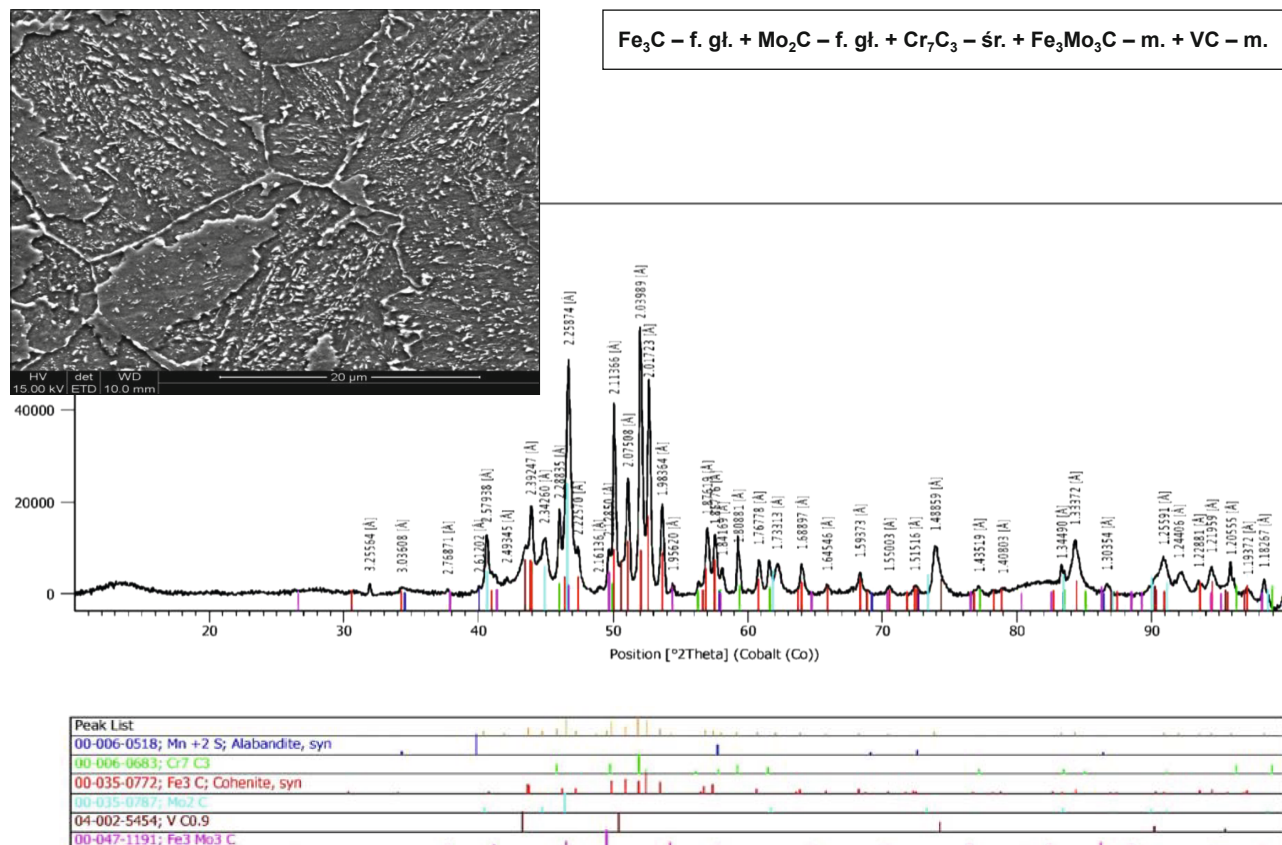
gdzie udziały oznaczono:

- f. gł. – faza główna,
- d. – dużo,
- śr. – średnio,
- m. – mało,
- nw. – niewiele

Tabela 2. Skład fazowy węglików materiału części wysokoprężnej WP i średnioprężnej SP wirnika turbiny TK-200 po 250 000 godzin eksploatacji

Table 2. Phase composition of the WP high-pressure and SP medium-pressure part material carbides of the TK-200 turbine rotor after 250,000 operating hours

Material	Rodzaj elementu	Miejsce badania	Skład fazowy węglików				
			faza główna	dużo	średnio	mało	śladowo
stal 23H2MF po 250 000 godzin eksploatacji	Część wysokoprężna WP wirnika turbiny TK-200	rejon otworu centralnego stopnia regulacyjnego	Fe <sub>3</sub> C, Mo <sub>2</sub> C	×	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> Mo <sub>3</sub> C, VC	×
		rejon wrębu stopnia regulacyjnego	Fe <sub>3</sub> C	Mo <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	VC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Fe <sub>3</sub> Mo <sub>3</sub> C
stal 26H2MF po 250 000 godzin eksploatacji	Część średnioprężna SP wirnika turbiny TK-200	rejon otworu centralnego stopnia pierwszego	Mo <sub>2</sub> C, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	×	Fe <sub>3</sub> C, Fe <sub>3</sub> Mo <sub>3</sub> C, VC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Fe <sub>2</sub> Mo
		rejon wrębu stopnia pierwszego	Mo <sub>2</sub> C, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> C	×	Fe <sub>3</sub> Mo <sub>3</sub> C, VC	Fe <sub>3</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Fe <sub>2</sub> Mo



Rys. 2. Dyfraktogram osadu węglików wyizolowanych elektrolitycznie ze stali 23H2MF po długotrwałej eksploatacji w rejonie otworu centralnego stopnia regulacyjnego

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of carbides electrolytically isolated from the 23H2MF steel after long-term operation in the area of the central opening of the control stage

### 3.3. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Badania właściwości wytrzymałościowych tj.: wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ , granicy plastyczności  $R_e$  w temperaturze pokojowej, granicy plastyczności  $R_e^t$  w temperaturze 500°C, wydłużenia  $A_5$  oraz przewężenia  $Z$  przeprowadzono w temperaturze pokojowej oraz w temperaturze 500°C. Uzyskane wyniki badań materiałów wycinków turbin zestawiono w tabeli 3.

#### Udarność

Badania udarności wykonano na próbkach z karbem V. Próbkę łamano młotem udarnościowym wahadłowym firmy Mohr-Federhaff o maksymalnej energii łamania 294 J. Wyznaczona temperatura przejścia w stan kruchy dla materiału z obszaru otworu centralnego tej części wirnika wynosi +50°C (Rys. 3a), a dla materiału z obszaru wrębu stopnia pierwszego tej czę-

ści wirnika + 65°C (Rys. 3b). Ponadto przeprowadzono obserwacje fraktografii przełomów złamanych próbek udarnościowych. Przykładowe obrazy fraktografii przełomów próbek złamanych w temperaturze pokojowej pokazano na rys. 3.

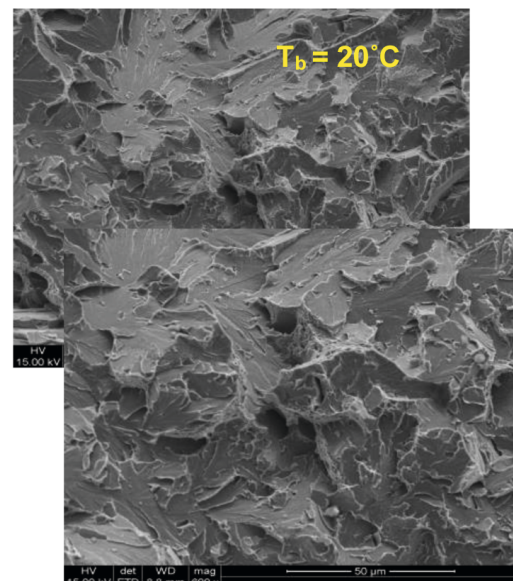
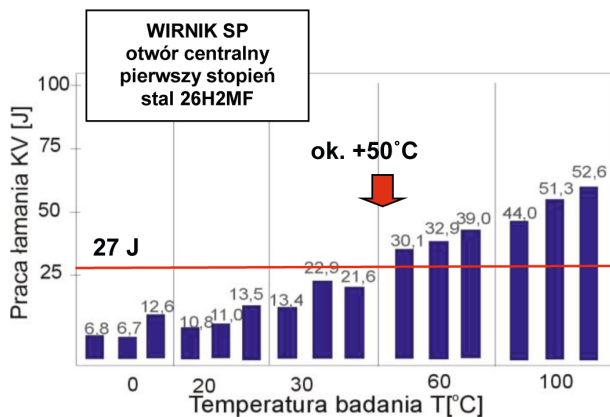
#### Odporność na pełzanie

Wysoka wytrzymałość na rozciąganie i granica plastyczności w temperaturze pokojowej oraz odpowiadającej temperaturze pracy przy wystarczających właściwościach plastycznych nie gwarantują wystarczającej zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń w temperaturze pracy. Dla elementów urządzeń, których temperatura pracy jest powyżej temperatury granicznej wskaźnikiem wytrzymałościowym, który decyduje o zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń jest wytrzymałość na pełzanie. Ponieważ nie ma bezpośredniej korelacji pomiędzy podstawowymi wła-

Tabela 3. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych  
Table 3. Test results of strength properties

Gatunek stali	Nazwa elementu, miejsce badania	Temperatura $T_b$ , °C	Właściwości wytrzymałościowe			
			$R_m$ ( $R_m^t$ ), MPa	$R_e$ ( $R_e^t$ ), MPa	$A_5$ , %	$Z$ , %
stal 23H2MF po 250 000 godzin eksploatacji	wirnik turbiny TK-200 część wysokoprężna WP rejon otworu centralnego stopnia regulacyjnego	20	728 (min. 637 <sup>1)</sup> )	589 (min. 441 <sup>1)</sup> )	19,2 (min. 16 <sup>1)</sup> )	62 (min. 40 <sup>1)</sup> )
		500	492 (brak wymagań)	450 (min. 343 <sup>2)</sup> )	18,8	67
	wirnik turbiny TK-200 część wysokoprężna WP rejon wrębu stopnia regulacyjnego części wysokoprężnej WP 0	20	720 (min. 637 <sup>1)</sup> )	588 (min. 441 <sup>1)</sup> )	18,8 (min. 16 <sup>1)</sup> )	65 (min. 40 <sup>1)</sup> )
		500	497 (brak wymagań)	453 (min. 343 <sup>2)</sup> )	18,4	69
stal 26H2MF po 250 000 godzin eksploatacji	wirnik turbiny TK-200 część średnioprężna SP rejon otworu centralnego stopnia pierwszego części średnioprężnej SP	20	649 (min. 637 <sup>1)</sup> )	506 (min. 441 <sup>1)</sup> )	19,6 (min. 16 <sup>1)</sup> )	62 (min. 40 <sup>1)</sup> )
		500	442 (brak wymagań)	397 (min. 343 <sup>2)</sup> )	20,0	69
	wirnik turbiny TK-200 część średnioprężna SP rejon wrębu stopnia pierwszego	20	682 (min. 637 <sup>1)</sup> )	554 (min. 441 <sup>1)</sup> )	18,0 (min. 16 <sup>1)</sup> )	61 (min. 40 <sup>1)</sup> )
		500	464 (brak wymagań)	426 (min. 343 <sup>2)</sup> )	18,4	66

(<sup>1</sup>) – w nawiasach podano wartości minimalne według wymagań dla materiału w stanie wyjściowym wg BN-71/0661-14<sup>1)</sup> i PN-70/H-94009<sup>2)</sup>



Rys. 3. Praca łamania mierzona na próbkach z karbem V ze stali 26H2MF w obszarze otworu centralnego

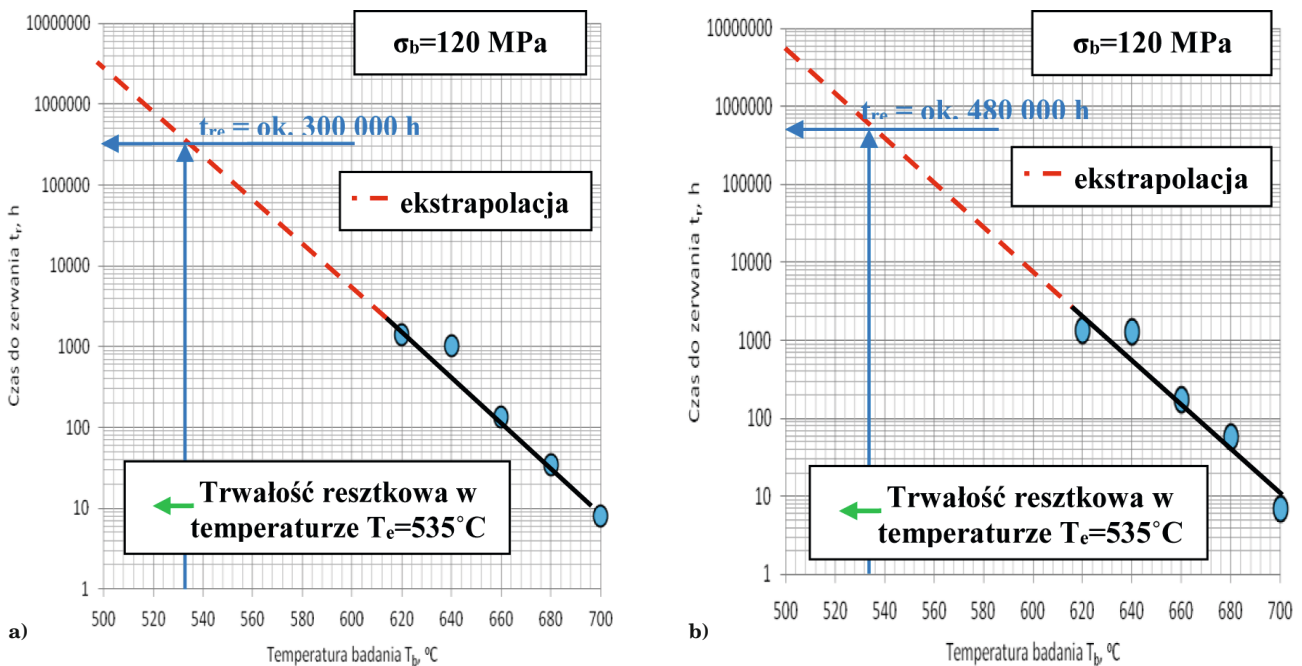
Fig. 3. Breaking operation measured on V-notch samples of the 26H2MF steel in the area of the central opening

ściwościami wytrzymałościowymi, a właściwościami na pełzanie niezbędnym jest wyznaczenie tych właściwości. Parametrem wynikowym w badaniach pełzania jest czas co powoduje, że badania te wymagają tysięcy godzin. Skrócone próby pełzania prowadzono przy stałym naprężeniu badania  $\sigma_0 = \text{const}$  odpowiadającym robocznemu  $\sigma$ , oraz w stałej temperaturze badania  $T_b$  dla każdej z prób, ale o różnych jej wartościach od 580°C do 700°C ze stopniowaniem co 20°C. Uzyskane wyniki skróconych prób pełzania materiałów wirnika turbiny TK-200 po 250 000 godzin eksploatacji w warunkach pełzania przeprowadzonych przy stałym poziomie naprężenia przedstawiono: dla badanego wycinka z rejonu stopnia regulacyjnego obszaru otworu centralnego

części wysokoprężnej WP na rys. 4a oraz dla badanego wycinka z rejonu oraz z rejonu otworu centralnego części średnioprężnej SP na rys. 4b

### Szybkość pełzania

Dla wyznaczenia szybkości pełzania wykonywane są próby pełzania z pomiarem wydłużenia w czasie próby prowadzone w stałej temperaturze badania  $T_b$  i dla różnych poziomów naprężenia o stałej wartości. Są one wykonywane w jednopróbkowych sześciostanowiskowych maszynach do prób pełzania wyposażonych w trójstrefowe piece grzewcze z systemem sterowania i regulacji opartej na wysokiej klasy sterownikach PLC oraz w ekstensometry do pomiaru wydłużenia, gdzie



Rys. 4. Trwałość resztkowa ( $t_{re}$ ) wyznaczona w skróconych próbach pełzania a) części wysokoprężnej WP w obszarze otworu centralnego (stal 23H2MF), b) części średnioprężnej SP w obszarze otworu centralnego (stal 26H2MF)

Fig. 4. Residual strength ( $t_{re}$ ) determined in short creep tests, a) WP high-pressure part in the area of the central opening (23H2MF steel), b) SP medium-pressure part in the area of the central opening (26H2MF steel)

Tabela 4. Szybkość pełzania  $\dot{\epsilon}_s$  materiału wirnika ze stali 23H2MF oraz ze 26H2MF

Table 4. Creep rate  $\dot{\epsilon}_s$  of the rotor material made of 23H2MF steel and 26H2MF steel

Rodzaj elementu	Miejsce badania	Temperatura badania $T_b$ , °C	Naprężenie badania $\sigma_b$ , MPa	Czas trwania próby $t$ , h	Szybkość pełzania $\dot{\epsilon}_s$ %/h $\cdot 10^{-5}$
część wysokoprężna WP wirnika turbiny TK-200	rejon otworu centralnego stopnia regulacyjnego	520	120	2235	1,61
			140	2345	3,02
		550	100	2772	5,12
			120	(21515)	415,35
	rejon wrębu stopnia regulacyjnego	500	100	2775	1,44
			120	2528	2,7
		535	100	2629	3,23
			120	(14774)	516,45
część średnioprężna SP wirnika turbiny TK-200	rejon otworu centralnego stopnia pierwszego	500	100	2235	6,71
			120	1788	11,75
		535	100	2772	15,87
			120	(19608)	160,84

(w nawiasach podano czas prób niezakończonych do dnia 21.12.2017)

miar jest wykonywany przez wysokorozdzielcze indukcyjne czujniki drogi. Maszyny są elementem komputerowego systemu sterowania, kontroli, zbierania i przetwarzania danych Systemu Prób Pełzania (SPP).

Uzyskane fragmenty krzywych pełzania z dostatecznie długim odcinkiem tych krzywych w stanie ustalonym tzn. w drugim okresie pełzania pozwalają na wyznaczenie szybkości pełzania w stanie ustalonym  $\dot{\epsilon}_s$ . Uzyskane wyniki szybkości pełzania na podstawie tych prób zestawiono w tabeli 4.

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie dotychczasowych wyników badań i ich analizy można stwierdzić, że:

1. Mikrostruktura materiału badanych wycinków pobranych z wirnika turbiny TK200 po 250 000 godzin eksploatacji, a w szczególności z obszaru otworu centralnego i z obszaru wrębu w rejonie stopnia regulacyjnego części wysokoprężnej WP wykonane ze stali 23H2MF oraz z obszaru otworu centralnego i obszaru wrębu w rejonie stopnia pierwszego części średnioprężnej SP turbiny ze stali 26H2MF jest bainitem z niewielką ilością ferrytu. Obszary bainityczne charakteryzują się występowaniem znacznej ilości drobnych wydzielen, prawdopodobnie węglików MC ze znacznym udziałem wanadu oraz  $M_2C$  z molibdenem, dość równomiernie rozmieszczonych w tych obszarach. Miejscami zaobserwowano tworzenie się subziarn z wydzieleniami na ich granicach. Natomiast na granicach płytek bainitu i ziarn ferrytu ujawniono występowanie niewielkich wydzielen, prawdopodobnie węglików  $M_{23}C_6$  wzbogaconych w chrom, tworzących lokalnie łańcuszki. Wewnątrz ziarn ferrytu zaobserwowano drobne wydzielenia, prawdopodobnie węglików MC ze znacznym udziałem wanadu, jednak nie występujących przy granicach ziarn. Stopień zaawansowania zmian w strukturze w wyniku pełzania jest podobny dla wszystkich badanych wycinków wirnika. W stosunku do mikrostruktury typowego stanu wyjściowego badanych stali po eksploatacji stwierdzono rozwój procesu wydzieleniowego wewnątrz obszarów bainitycznych, wydzielenia na granicach płytek bainitu i ziarn ferrytu oraz wewnątrz nielicznych ziarn ferrytu. W strukturze materiałów badanych części wysokoprężnej WP i średnioprężnej SP wirnika turbiny TK-200 po 250 000 godzin eksploatacji oraz wirnika turbiny 18K360 po 220 000 godzin eksploatacji nie zaobserwowano nieciągłości i mikropęknięć jak również nie ujawniono zapoczątkowania procesów wewnętrznych uszkodzeń w wyniku pełzania.
2. Ujawnione sekwencje węglików badanych materiałów na podstawie rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej osadów węglików wyizolowanych elektrolitycznie, potwierdzają stan mikrostruktury oszacowany na podstawie analizy obserwowanych jej obrazów.
3. Właściwości wytrzymałościowe ( $R_m$ ,  $R_e$ ,  $R_e^{500}$ ) badanych materiałów części wysokoprężnej WP i średnioprężnej SP wirnika turbiny TK-200 po 250 000 godzin eksploatacji są wyższe od wymagań dla odkuwek wirników turbin ze stali 23H2MF oraz 26H2MF

w stanie wyjściowym. Również uzyskane wartości wydłużenia i przewężenia w próbie rozciągania przeprowadzonej w temperaturze pokojowej spełniają wymagania dla odkuwek wałów wirnikowych turbin w stanie wyjściowym. Natomiast poziom pracy łamania w temperaturze pokojowej jest znacznie poniżej wartości granicznej 27 J, zarówno dla materiału pobranych wycinków części WP jak i części SP wirnika turbiny TK-200 po 250 000 godzin eksploatacji. Uzyskane dodatkowo wartości temperatury przejścia w stan kruchy na poziomie od +25 do +65°C, w zależności od miejsca badania, wymagają bezwzględnego przestrzegania wymaganych warunków uruchamiania i odstawiania turbiny.

4. Trwałość resztkowa i rozporządzalna trwałość resztkowa materiałów badanych wycinków części WP i SP wirnika turbiny TK-200 po 250 000 godzinach eksploatacji, wyznaczona na podstawie skróconych prób pełzania, odpowiednio wynosi:
  - dla materiału pobranego z obszaru otworu centralnego z rejonu stopnia regulacyjnego części WP wirnika wykonanego ze stali 23H2MF, dla przyjętej temperatury dalszej eksploatacji  $T_r = 535^\circ\text{C}$  i naprężenia roboczego  $\sigma_r = 120\text{ MPa}$ , trwałość resztkowa wynosi ok. 300 000 godzin a resztkowa rozporządzalna ok. 180 000 godzin,
  - dla materiału pobranego z obszaru otworu centralnego z rejonu stopnia pierwszego części SP wirnika wykonanego ze stali 26H2MF, dla przyjętej temperatury dalszej eksploatacji  $T_r = 535^\circ\text{C}$  i naprężenia roboczego  $\sigma_r = 120\text{ MPa}$ , trwałość resztkowa wynosi ok. 480 000 godzin. a resztkowa rozporządzalna ok. 290 000 godzin.
5. Przeprowadzone badania nie wyczerpują obszaru tworzenia niezbędnych charakterystyk materiału wirników turbin z badanych gatunków stali w ocenie stanu takich materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Dotychczas przeprowadzone badania elementów mikrostruktury, właściwości mechanicznych oraz badania pełzania należy kontynuować w latach przyszłych. Ich wyniki umożliwią budowanie charakterystyk materiałowych stali eksploatowanych w wirnikach turbin parowych, szczególnie tych które pracują w czasie znacznie dłuższym niż wyznaczony obliczeniowy. Pozwoli to na tworzenie modeli zmian mikrostruktury w zależności od stopnia wyczerpania. Budowane modele i opracowywane charakterystyki umożliwią ocenę stanu, stopnia „wyeksploatowania”, przydatności do dalszej eksploatacji, jak i również prognozy dalszej bezpiecznej pracy. Na badanych materiałach niezbędne będzie również przeprowadzenie badań wpływu odstawień i uruchomień na skrócenie trwałości resztkowej na bazie prób cyklicznego pełzania oraz oceny stanu rozwoju procesów wydzieleniowych poprzez ujawnienie miejsc występowania poszczególnych typów węglików w mikrostrukturze poprzez badania w TEM. Wykonanie tych badań przewiduje się w kolejnych etapach realizacji pracy.

**Artykuł zawiera częściowe wyniki badań uzyskanych w pracy statutowej Instytutu Metalurgii Żelaza S0-0959/2017 finansowanej z dotacji MNiSW na rok 2017.**

## LITERATURA

- [1] J. Dobrzański, *Materials science interpretation of the life of steels for power plants*, Open Access Library, 3 (2011), s. 1-228.
- [2] A. Hernas, J. Dobrzański, *Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [3] J. Dobrzański, H. Purzyńska, A. Zieliński, *Wpływ odstawiń i uruchomień na trwałość eksploatacyjną elementów kotłów energetycznych pracujących w warunkach pełzania wykonanych z austenitycznej stali super 304H*, W: Monografia, Praca zbiorowa pod redakcją J. Pasternaka, A. Hernasa, D. Dudzica Bloki o nadkrytycznych parametrach pracy. Nowe materiały hutnicze, technologie wykonania, procesy degradacji oraz ocena trwałości elementów ciśnieniowych kotła, Gliwice 2015, s. 109-120.
- [4] J. Dobrzański, H. Purzyńska, *Badania materiałowe w ocenie stanu i prognozowaniu dalszej bezpiecznej eksploatacji wirników turbin parowych po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy*, Energetyka, (11) (2015), s. 761-764.
- [5] J. Dobrzański, H. Paszkowska, A. Zieliński, *Wpływ temperatury i naprężenia na mikrostrukturę i właściwości martenzytycznych stali wysokochromowych X10CrMoVNb9-1 i X12CrCoWVNb12-2-2*, W: Monografia, Praca zbiorowa pod redakcją A. Hernasa, J. Pasternaka, Materiały i technologie stosowane w budowie kotłów o parametrach nadkrytycznych o temperaturze pary do 700°C, Gliwice 2013, s. 191-222.
- [6] A. Zieliński, H. Purzyńska, J. Dobrzański, G. Golański, *Changes in properties and structure of high-chromium 9-12% Cr steels due to long-term exposure at elevated temperature*, Archives of Metallurgy and Materials 61 (2B) (2016), s. 957-964.
- [7] J. Dobrzański, A. Rusin, H. Purzyńska, A. Zieliński, *Wysokochromowe stale nowej generacji na wirniki turbin parowych bloków energetycznych o nadkrytycznych parametrach pracy, Maszyny i urządzenia energetyczne węglowych bloków na wysokie parametry pary*, s. 95-124, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2015.