

Walidacja metody spektroskopii impedancji (MSID2/3) dla badań NDT i SHM w energetyce

Z. Żurek, B. Solecka, B. Chmiela, T. Jasiński

1. Wprowadzenie

Istotną sprawą, szczególnie dla branży energetycznej jest zapewnienie ciągłości działania, czyli bezawaryjna praca turbozespołów wsparta niezbędną cykliczną lub okresową diagnostyką. Analizy awaryjności w energetyce prowadzone w wielu krajach wskazują, że krytycznym elementem jest stal łopatek wirnika [1, 4–7, 8, 9, 28]. Koszt jej naprawy (wymiany) stanowi 40–50% kosztów ogólnych naprawy turbin. Za główną przyczynę uszkodzenia łopatek uważa się zmęczenie nisko-cykliczne wywołane wielokrotnym quasi statycznym obciążeniem spowodowanym siłami odśrodkowymi, czasem rozruchu i wygaszania jak i migracją gazów w materiale [4–7]. W takim przypadku za jeden cykl obciążenia łopatek uważa się narastanie od zera do wartości maksymalnej siły odśrodkowej w czasie uruchamiania. W następnym kroku siła odśrodkowa zmniejsza się do zera podczas zatrzymywania maszyny. Uszkodzenia łopatek powstają w miejscach karbów technologicznych lub konstrukcyjnych.

Łączne przyczyny uszkodzeń łopatek wynikają z obciążenia mechanicznego [28] takiego, jak własna siła odśrodkowa, oraz zginanie siłami od przepływu gazu i wywołanymi drganiami, zniszczenia korozyjnego (w szczególności erozji, od składu chemicznego materiału, obróbki cieplnej i stanu powierzchni). Szczególnie ważne są procesy wymiany gazowej w eksploatacji turbiny – rozruch i zatrzymanie.

Przed wszystkim rozróżnia się etap rozruchów i wygaszenia bloku energetycznego, który charakteryzuje typ pracy tzw. nieustalanej, kiedy w wyniku zmian temperatury pary w czasie w elementach grubościennych, takich jak korpusy i zawory, powstają lokalnie duże gradienty temperatury. Turbiny zostały zaprojektowane do pracy ciągłej z małą liczbą uruchomień i płynną, powolną zmianą parametrów pracy [28]. Jednym z efektów ewentualnego pełzania (co założono) jest ciągła zmiana odkształceń i przemieszczeń elementów zachodząca w czasie eksploatacji i wymiana gazowa podczas studzenia i ogrzewania w materiale [1, 4–7].

Metoda badawcza [17–24] zaproponowana w pracy [28] umożliwia dokonanie oceny stopnia wypracowania łopatek części wysokoprężnej wirnika turbin w okresie jej eksploatacji. Zastosowano Metodę Spektroskopii Impedancji 3D (MSI 3D), przez co należy rozumieć wielopunktową [9, 10] analizę zmian składowych impedancji cewki testującej wraz z przyległym materiałem w dobranym optymalnym zakresie częstotliwości magnetycznego pola testującego. Na rysunku 1 przedstawiono zakres zmian parametrów fizycznych trzech próbek [28] – 2, 6, 12 z materiału łopatek turbiny pracujących w tym samym okresie eksploatacji.

Streszczenie: Artykuł przedstawia metodę diagnostyki stalowych łopatek wysokoprężnej części turbiny parowej poprzez analizę częstotliwościową parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału, w funkcji czasu jego eksploatacji. Metodologia wywodzi się historycznie z analizy unormowanych składowych impedancji do wykrywania defektów i selekcjonowania materiałów. Została opracowanych przez F. Förstera i jego zespół badawczy [2, 3].

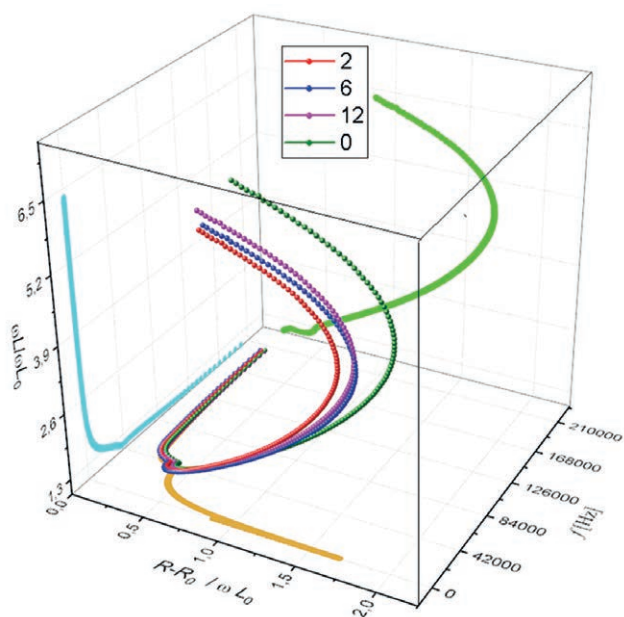
W opracowaniu przedstawiono możliwość badań diagnostycznych Wielopunktowej Spektroskopii Impedancji (WSI2/3) aż po procesy degradacyjne materiału (defekty ciągłości struktury), a nie tylko defekty ciągłości materiału. Wyniki badań porównano między innymi z badaniami strukturalnymi metodą elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM) i spektrometrii rentgenowskiej z dyspersją energii (EDS) i dyspersją długości fali (WDS).

Spektroskopia impedancji przyjmuje obecnie znaczące miejsce w badaniach diagnostycznych (NDT i SHM), tak w literaturze krajowej, jak i zagranicznej [11, 14, 23]. Tematyka prezentowana była także na Światowym Kongresie NDT w Monachium w 2018 roku [23]. Artykuły o tej tematyce można znaleźć na stronie NDT.net [24], Spektroskopia impedancji jest tematem dwóch prac doktorskich i promocji kolejnych doktorów nauk technicznych [27, 28]. Obszar tematyczny objęty niniejszym artykułem skierowano głównie na porównanie zagadnienia walidacji metody.

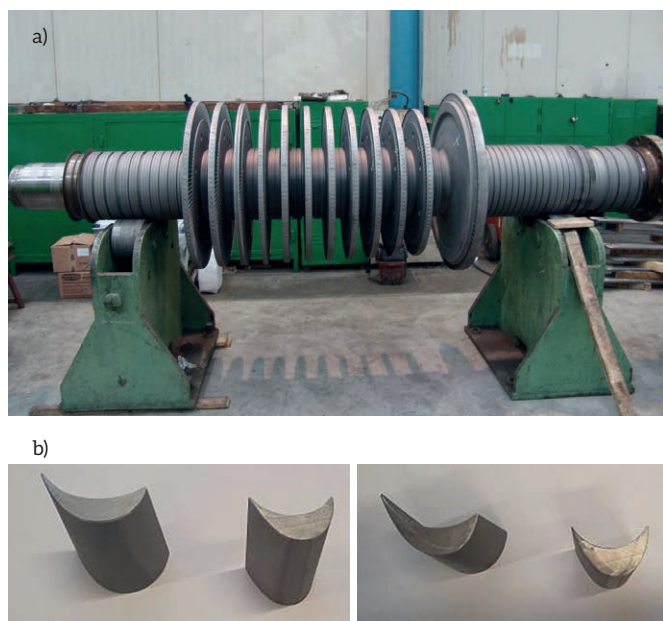
W czasie procesu eksploatacji turbiny parametry łopatek, tak elektryczne, jak i magnetyczne, ulegają nieliniowej zmianie. Zaproponowana i przetestowana na stalach austenitycznych metoda [27] podlega obecnie walidacji jako metoda wykrywania wczesnych zmian degradacyjnych na poziomie struktury materiału w materiałach ferromagnetycznych.

2. Eksperyment. Materiał, narzędzie badawcze – Metoda Spektroskopii Impedancji MSI3D/2D

Materiał badawczy pochodzi z remontu części wysokoprężnej (WP) turbiny parowej model 13k225. Remont turbiny parowej polegał na całkowitej wymianie układu łopatkowego przez wycięcie mechaniczne łopatek z kół wirnikowych po wieloletniej [40 lat] eksploatacji. Tak pozyskany materiał [28]



Rys. 1. Obrazowanie metodą MSID3 zmian parametrów magnetycznych i elektrycznych w szerokim zakresie zmian częstotliwości magnesowania (dla ferromagnetyka). Bazą odniesienia jest materiał „0”



Rys. 2. (a) Widok ogólny wału turbiny energetycznej; (b) przekroje łopatek

stanowił reprezentację dla łopatek poeksploatacyjnych, dla których poszukiwano zmian ciągłości strukturalnej ze względu na umiejscowienie łopatek w rzędzie wirnika (rys. 2 a).

Poważnym problemem badawczym był brak możliwości dokonania pomiarów na materiale [historycznym] wejściowym nieeksploatowanym. W zakładach energetycznych lub naprawczych nie zachowały się (niewykorzystane łopatek) historyczne materiały o tym samym numerze łopatek (z wytopu – próbki odniesienia). Było to powodem opracowania niestandardowej

metody porównawczej polegającej na porównaniu względnych zmian parametrów fizycznych z wybranymi stopniami turbiny.

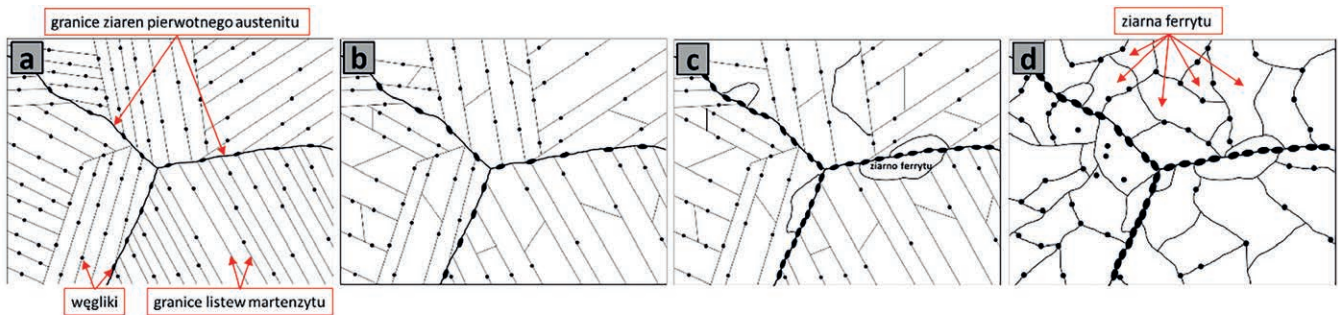
Do badań wykorzystano łopatek nowe (niepoddane eksploatacji) stopnia: 2, 6 i 12 turbiny oraz łopatek po długoletniej eksploatacji powyżej 350 000 godzin, pochodzące z odpowiadających stopni turbiny, oznaczone odpowiednio 2_1, 6_1 i 12_1 (rys. 2 a, b). Na rysunku 2 a, przedstawiającym wirnik WP, zaznaczono koła stopni 2, 6 i 12, z których zdemontowano łopatek do badań [28].

Materiał odniesienia to nowe łopatek o identycznym składzie chemicznym odpowiadającym oryginalnemu materiałowi jednak z modyfikowanymi przekrojami (czyli nie ten sam). Komplet łopatek stopnia: 2, 6, 12 jest reprezentacyjny ze względu na charakterystykę układu przepływowego turbiny wysokoprężnej (WP), ponieważ pozwala zanalizować wpływ warunków pracy turbiny wysokoprężnej w zakresie wybranych obszarów na jej długości, tj. od koła regulacyjnego (wejście pary) blisko stopnia 2, przez część środkową w rejonie koła stopnia 6, aż do wyjścia w rejonie koła stopnia 12 przy jednakowym czasie pracy.

Łopatek zostały wyprodukowane ze stali X22CrMoV12-1+QT2; identyczne z materiałem po eksploatacji. Stal X22CrMoV12-1+QT2 jest stalą nierdzewną, martenzytyczną, o niskiej przenikalności magnetycznej, o zawartości chromu powyżej 13%. Stale te są najczęściej uszlachetniane przez składniki stopowe, jak: Mo, V, W, Nb, Ni, podnoszące własności materiału w wyższych temperaturach (równych lub większych od 650°C).

Bazę badań próbek stanowiły jednostki zewnętrzne (niefinansowane przez zakład pracy doktoranta poza opłatami statutowymi dla Politechniki), lecz na drodze porozumienia stron o możliwości obopólnego korzystania z przeprowadzonych wyników, które uzyskano na urządzeniach zewnętrznych jednostek uczelnianych**:

- badania mikrostruktury i składu chemicznego wykonano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi S-3400N wyposażonego w spektrometry rentgenowskie z dyspersją energii (EDS – Energy Dispersive X-ray Spectrometer) Thermo Noran oraz z dyspersją długości fali (WDS – Wavelength Dispersive X-ray Spectrometer) Thermo Magna Ray. Obserwacje struktury wykonano w technice elektronów wtórnych (SE – Secondary Electrons) przy zastosowaniu energii elektronów pierwotnych równej 15 keV;
 - w opracowaniu wyników analizy ilościowej składu chemicznego EDS zastosowano metodę odcinania tła widma opartą na szybkiej transformacji Fouriera (FFT), wykorzystującej idealny filtr górnoprzepustowy (*top-hat*) o szerokości równej podwójnej szerokości połowkowej (FWHM – Full Width at Half Maximum) linii K_{α} manganu;
 - do korekcji wyników analizy wykorzystano metodę PROZA, opartą na dopasowaniu do wyników doświadczalnych krzywych wykładniczych opisujących rozkład jonizacji atomów w funkcji odległości od powierzchni materiału (Batin G.F., Heijligers H.J.M.).
- Poprawę interpretacji wyników analizy EDS wykonano poprzez symulacje numeryczne rozpraszania elektronów metodą Monte Carlo za pomocą programu Win X-Ray:
- analizę stężenia węgla wykonano metodą absorpcji promieniowania podczerwonego za pomocą analizatora elementarnego LECO CS844);



Rys. 3. Schemat degradacji mikrostruktury stali martenzytycznej X22CrMoV12-1+QT2 w wyniku eksploatacji w warunkach pełzania

- dentyfikację faz wykonano metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD – *X-Ray Diffraction*) za pomocą dyfraktometru Pan Analytical X'Pert 3 Powder;
- badania mikrotwardości wykonano metodą Vickersa na twarłościomierzu Struers Duramin A-300 przy obciążeniu 1 N. W badaniach metodą dyfrakcji rentgenowskiej wsparto się wynikami badań czystego żelaza elektrolitycznego i obrazu tych zmian w kwadracie pół szerokości linii dyfrakcyjnych opisanych w monografii profesora Józefa Raska [4–6]. W przypadku łopatek z wirnika turbiny ma się do czynienia ze złożonym stanem naprężenia o różnej intensywności pomiędzy łopatkami, ze względu na ich długość i siły odśrodkowe, a co za tym idzie – ze zmiennymi i złożonymi procesami obciążenia dynamicznego (założono możliwość pełzania).

Z wyznaczonych parametrów refleksów dyfrakcyjnych dla fazy Fe-Cr (tabela 1) dla poszczególnych próbek, korzystając z wartości oznaczonych FWHM left, otrzymano parametr Δ^2 charakteryzujący się najwyższą czułością rozróżnienia zmian eksploatacyjnych w strukturze materiału [4, 5].

3. Badania strukturalne

Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostruktury łopatek turbiny energetycznej wykonanych ze stali

Tabela 1. Wyznaczone parametry refleksów dyfrakcyjnych dla fazy Fe-Cr poszczególnych próbek

Pos. [2θ] –	położenie refleksu
Height [cts]	ilość zliczona
FWHM Left [2θ]	szerokość refleksu
d-spacing [Å] –	odległość między płaszczyznami krystalograficznymi
Rel. Int. [%]	natężenie względne refleksu

Tabela 2. Skład chemiczny stali nowych łopatek wg normy PN-75/H-84024

pierwiastek	C	Si	P	S	V	Cr	Mn	Ni	Nb	Mo	W	Fe
stężenie min.	0.20	0.10	–	–	0.25	11.0	0.30	0.30	–	0.80	–	reszta
stężenie max.	0.26	0.50	0.035	0.035	0.35	12.5	0.80	0.60	0.05	1.20	0.60	

Tabela 3. Skład chemiczny materiału łopatek poeksploatacyjnych (% mas.)

pierwiastek	C	Si	P	S	V	Cr	Mn	Ni	Nb	Mo	W	Fe
stężenie	0.22	0.31	–	–	0.30	12.51	0.77	0.32	–	0.69	–	reszta

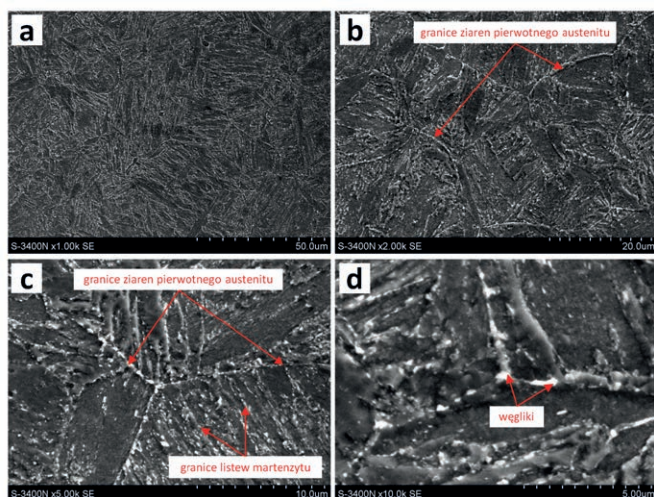
X22CrMoV12-1+QT2 można sformułować model degradacji mikrostruktury stali martenzytycznej w warunkach pełzania (rys. 3 a–d). Struktura pierwotna odpuszczonego martenzytu zawierała wydzielienia węglków $Cr_{23}C_6$ na granicach ziaren pierwotnego austenitu oraz na granicach listew martenzytu (rys. 3 b) wykazano częściowy zanik listew martenzytu, powstawanie podziarn i zapoczątkowanie koagulacji wydzielonych węglków (rys. 3 b), dalszy zanik martenzytu, pojawienie się ziaren ferrytu głównie przy granicach ziaren pierwotnego austenitu i listew martenzytu, dalsza koagulacja węglków (rys. 3 c) i zanik martenzytu – powstanie struktury ferrytu z węglkami (rys. 3 d).

Porównanie składu chemicznego materiału łopatek (tabela 1 i tabela 2) poeksploatacyjnych z nowym materiałem łopatek zmodernizowanych wykazało ich podobieństwo, co z punktu widzenia prowadzonych pomiarów elektromagnetycznych pozwala uznać ten materiał za bazę odniesienia. Decyzja producenta o ponownym dobraniu bardzo zbliżonego składu chemicznego materiału nowego podyktowana jest wieloletnim doświadczeniem w eksploatacji układów łopatkowych wirników turbin, co opisano w pracy [28].

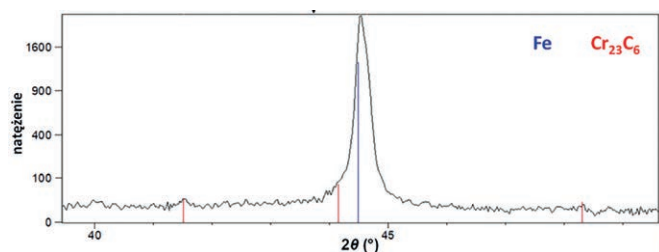
3.1. Mikrostruktura łopatek ze stali X22CrMoV12-1+QT2 w stanie dostawy

Łopátka turbiny energetycznej w stanie dostawy charakteryzowała się strukturą odpuszczonego martenzytu. Na granicach ziaren pierwotnego austenitu oraz na granicach listew martenzytu obecne były drobne wydzielienia węglków $Cr_{23}C_6$ (rys. 4) o przeciętnej wielkości mniejszej niż $0,5 \mu m$.

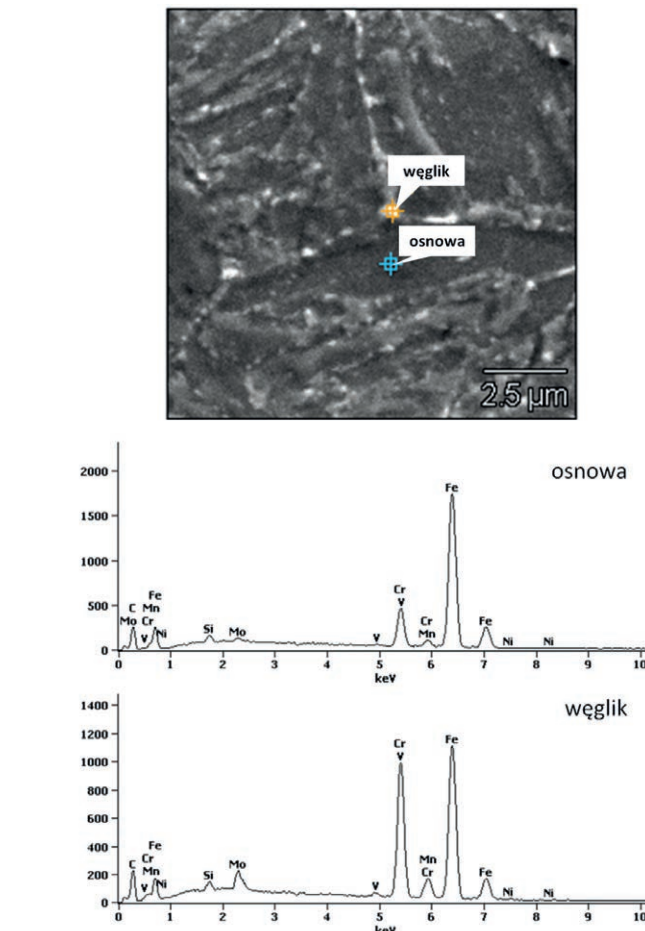
Analiza składu chemicznego EDS w wybranych mikroobszarach wykazała, że węgliki charakteryzowały się większym stężeniem chromu i molibdenu w stosunku do osnowy (rys. 5, 6).



Rys. 4. Obrazy mikrostruktury łopatki nowej (2 „0°) ze stali X22CrMoV12-1+QT2



Rys. 5. Dyfraktogramy XRD dla łopatki nowej (2) ze stali X22CrMoV12-1+QT2



Rys. 6. Widma EDS osnowy i węglika dla łopatki nowej (2) ze stali X22CrMoV12-1+QT2

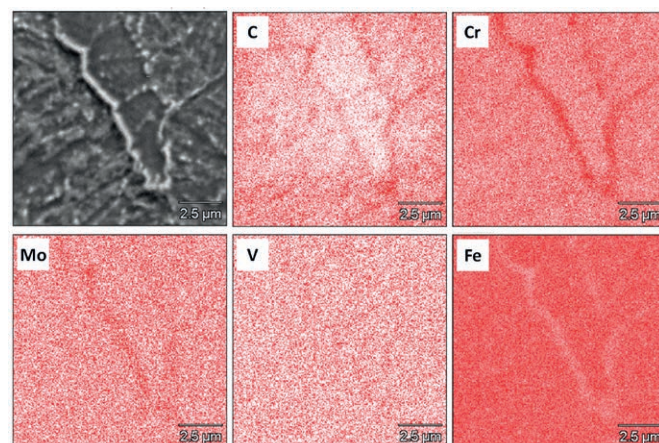
Tabela 4. Wyniki analizy ilościowej EDS dla łopatki nowej (2) ze stali X22CrMoV12-1+QT2

% masowe	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	0.6	0.2	11.7	0.9	85.6	0.4	0.6
węgliki	1.9	0.6	0.5	30.9	1.3	61.3	0.2	3.3
odch. std. % mas.	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	±0.0	±0.1	±0.3	±0.2	±0.9	±0.3	±0.1
węgliki	±0.3	±0.1	±0.1	±0.3	±0.3	±0.8	±0.3	±0.2

Wyniki analizy ilościowej EDS przedstawiono w tabeli 4. Ze względu na obecność węglików chromu $Cr_{23}C_6$ stężenie węgla zostało wyznaczone metodą obliczeń stechiometrycznych.

Obecność żelaza stwierdzona podczas analizy EDS węglików mogła wynikać z małych rozmiarów wydzieli węglików, wskutek czego obszar wzbudzenia promieniowania rentgenowskiego mógł charakteryzować się większą objętością niż wydzielenia węglików i obejmować także część osnowy bezpośrednio otaczającej te wydzielenia.

Mapy względnego stężenia pierwiastków uzyskane za pomocą techniki WDS (węgiel) oraz EDS (pozostałe pierwiastki), również ujawniły większe stężenie węgla, chromu, molibdenu oraz

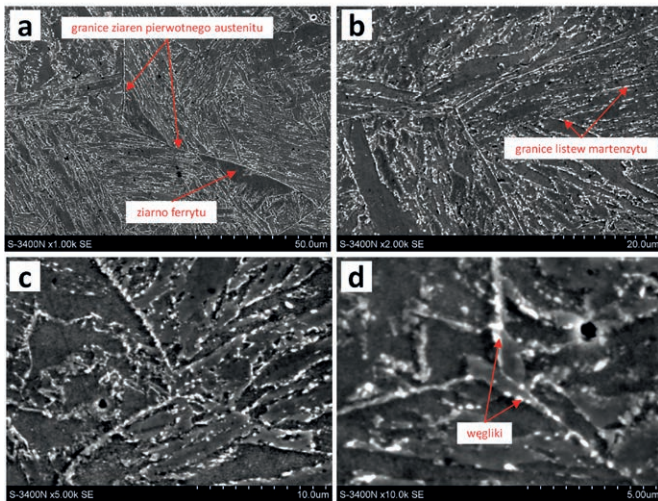


Rys. 7. Mapy względnego stężenia pierwiastków dla łopatki nowej (2) ze stali X22CrMoV12-1+QT2

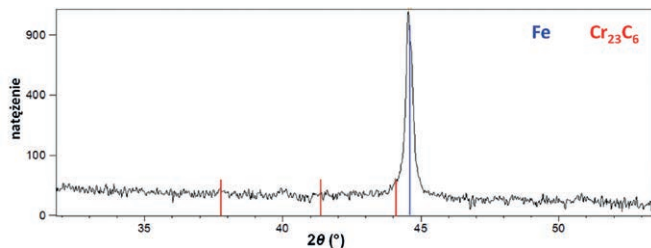
wanadu w wydzieleniu węglików względem osnowy badanej stali (rys. 7).

3.2. Mikrostruktura łopatki 2_1 ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji

Mikrostruktura łopatki drugiego stopnia turbiny (2_1) po eksploatacji charakteryzowała się nieznacznym rozpadem



Rys. 8. Obrazy mikrostruktury łopatki ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (2_1)



Rys. 9. Dyfraktogram XRD dla łopatki ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (2_1)

martenzytu, który przejawiał się w postaci częściowego zaniku listew martenzytu i powstawaniem ziaren ferrytu, obecnością ciągłych łańcuchów wydzielania węglików na granicach ziaren pierwotnego austenitu (rys. 8).

Analiza XRD wykazała obecność węglików chromu $Cr_{23}C_6$ (rys. 8). Refleksy odpowiadające wydzielaniu węglika $Cr_{23}C_6$ charakteryzowały się małą intensywnością.

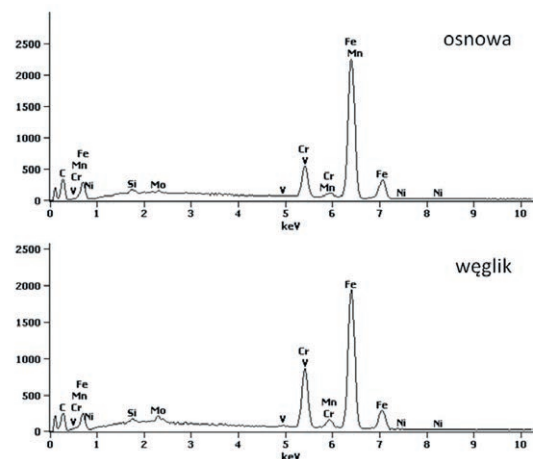
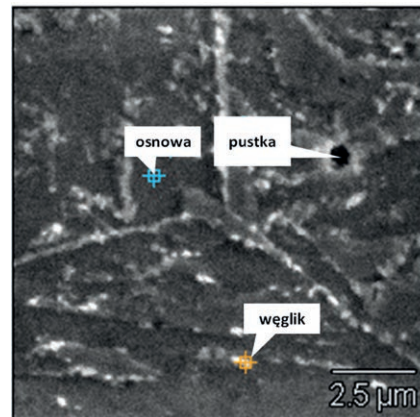
Zauważalne były także pustki wewnątrz ziaren pierwotnego austenitu, głównie na granicach listew martenzytu. Analiza składu chemicznego EDS również wykazała zwiększone stężenie chromu i molibdenu w węglkach względem osnowy (rys. 9 i tabela 5).

Ze względu na obecność węglików chromu $Cr_{23}C_6$ stężenie węgla zostało wyznaczone metodą obliczeń stechiometrycznych.

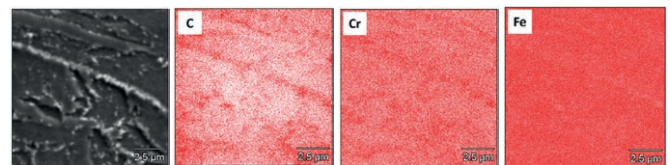
Mapy względnego stężenia pierwiastków uzyskane za pomocą techniki WDS (węgiel) oraz EDS (pozostałe pierwiastki) również ujawniły większe stężenie węgla, chromu, molibdenu oraz wanadu w wydzielonych węglkach względem osnowy badanej stali (rys. 10).

3.3. Mikrostruktura łopatki ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (6_1)

Mikrostruktura łopatki szóstego stopnia turbiny (6_1) charakteryzowała się większym stopniem degradacji w porównaniu do stopnia drugiego (2_1). Stwierdzono ciągłe wydzielania



Rys. 10. Widma EDS osnowy i węglika dla łopatki po eksploatacji (2/1) ze stali X22CrMoV12-1+QT2

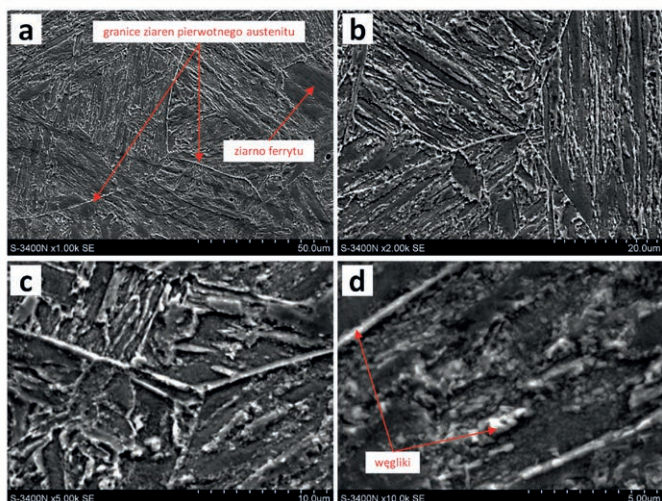


Rys. 11. Mapy względnego stężenia pierwiastków dla łopatki ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (2_1)

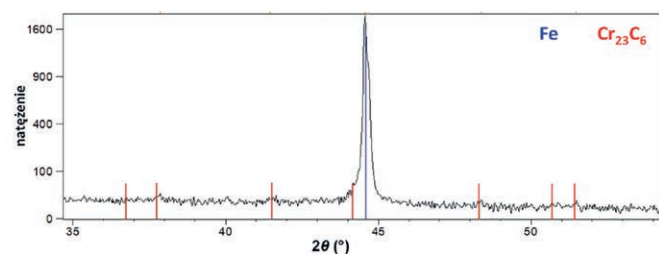
Tabela 5. Wyniki analizy ilościowej EDS dla łopatki ze stali X22CrMoV12-1+QT2 (2_1) po eksploatacji

% masowe	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	0.5	0.2	10.3	0.3	88.0	0.3	0.4
węgliki	1.0	0.4	1.4	15.9	0.3	80.3	-	0.7
odch. std. % mas.	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	±0.1	±0.1	±0.2	±0.2	±0.8	±0.2	±0.1
węgliki	±0.0	±0.1	±0.1	±0.2	±0.2	±0.8	-	±0.1

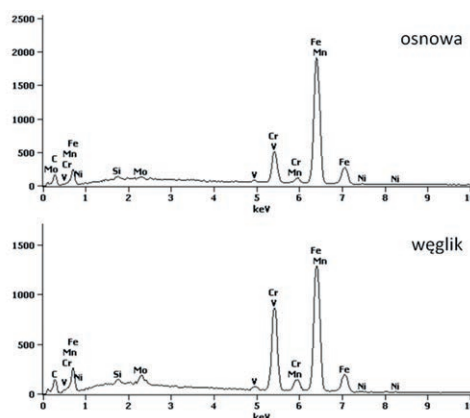
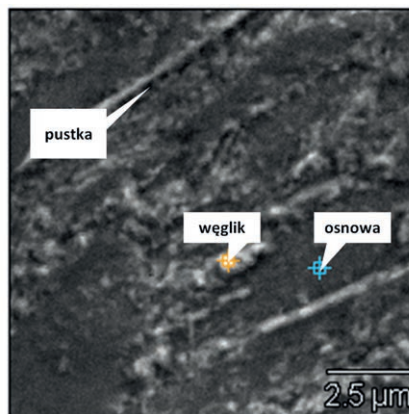
węglików $Cr_{23}C_6$ na granicach ziaren pierwotnego austenitu (rys. 11 i rys. 12), większą liczbę ziaren ferrytu oraz pustki na granicach listew martenzytu. Dyfraktogram XRD dla łopatki ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (6_1) pokazano na (rys. 13).



Rys. 12. Obrazy mikrostruktury łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (6_1)



Rys. 13. Dyfraktogram XRD dla łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (6_1)



Rys. 14. Widma EDS osnowy i węglika dla łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (6_1)

Tabela 6. Wyniki analizy ilościowej EDS dla łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 (6_1) po eksploatacji

% masowe	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	0.4	0.5	11.3	0.5	86.3	0.5	0.5
węgliki	1.5	0.4	0.9	25.6	0.7	68.4	0.4	2.0
odch. std. % mas.	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	±0.0	±0.1	±0.3	±0.2	±0.8	±0.2	±0.1
węgliki	±0.0	±0.0	±0.1	±0.3	±0.2	±0.8	±0.3	±0.2

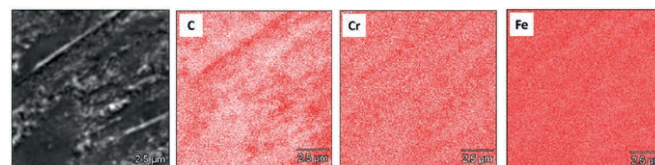
Analogicznie jak w przypadku łopatkę drugiego stopnia turbiny, wydzielenia węglików charakteryzowały się większym stężeniem chromu, molibdenu i wanadu niż osnowa (rys. 14 i tabela 6).

Ze względu na obecność węglików chromu $Cr_{23}C_6$ stężenie węgla zostało wyznaczone metodą obliczeń stechiometrycznych.

Mapy względnego stężenia pierwiastków uzyskane za pomocą techniki WDS (węgiel) oraz EDS (pozostałe pierwiastki nie prezentowano), również ujawniły większe stężenie węgla, chromu, molibdenu oraz wanadu w wydzieleniu węglików względem osnowy badanej stali (rys. 15).

3.4. Mikrostruktura łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (12_1)

Mikrostruktura łopatkę 12/1 charakteryzowała się większym stopniem degradacji niż łopatek 2/1 i 6/1. Zaobserwowano



Rys. 15. Mapy względnego stężenia pierwiastków dla łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (6/1)

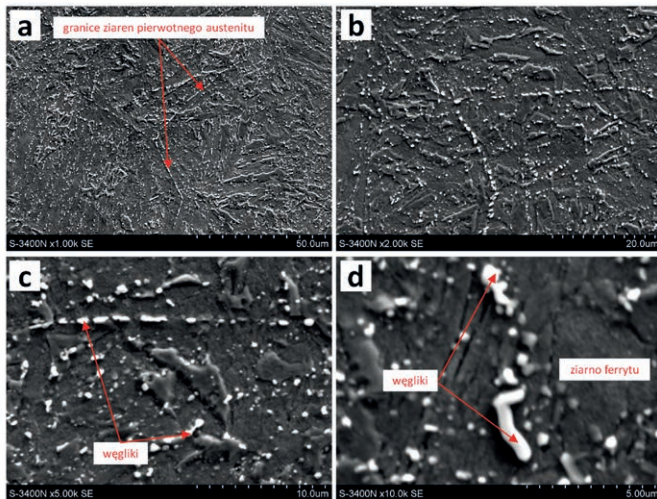
prawie całkowity zanik listew martenzytu, węgliki na granicach ziaren pierwotnego austenitu uległy koagulacji, zwiększając swoje rozmiary (rys. 15).

Analiza XRD potwierdziła obecność węglików $Cr_{23}C_6$ (rys. 16), natomiast nie stwierdzono występowania faz Lavesa, które mogą się pojawiać w stalach martenzytycznych po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania.

Wyniki analizy jakościowej EDS osnowy i węglików przedstawiono na rys. 17.

W tabeli 6 zamieszczono wyniki analizy ilościowej EDS dla osnowy i węglika chromu.

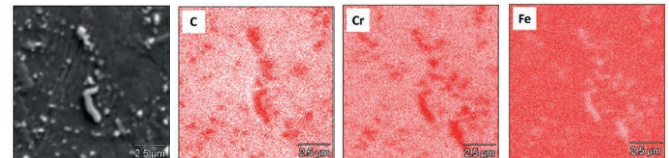
Mapy względnego stężenia pierwiastków uzyskane za pomocą techniki WDS (węgiel) oraz EDS (pozostałe pierwiastki), również ujawniły większe stężenie węgla i chromu w wydzieleniach węglików względem osnowy badanej stali (rys. 18).



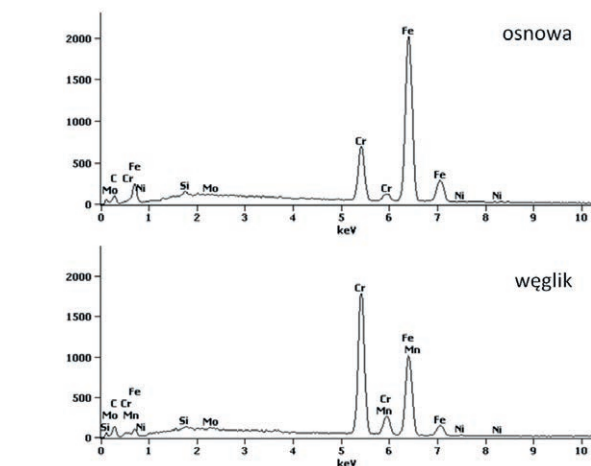
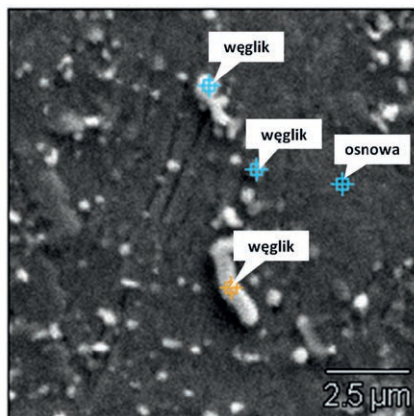
Rys. 16. Obrazy mikrostruktury łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (12/1)

Tabela 7. Wyniki analizy ilościowej EDS dla łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 (12/1) po eksploatacji

% masowe	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	0.4	0.1	14.9	-	84.3	0.2	0.1
węglik	3.0	0.2	0.1	49.0	0.5	46.2	0.6	0.5
odch. std. % mas.	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
osnowa	-	±0.0	±0.1	±0.3	-	±0.8	±0.2	±0.1
węglik	±0.1	±0.0	±0.1	±0.5	±0.3	±0.7	±0.2	±0.1



Rys. 18. Mapy względnego stężenia pierwiastków dla łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (12_1)



Rys. 17. Widma EDS osnowy i węglika dla łopatkę ze stali X22CrMoV12-1+QT2 po eksploatacji (12_1)

4. Wyniki badań mikrotwardości

Badania mikrotwardości wykonano metodą Vickersa na twardościomierzu Struers Duramin A-300, przy obciążeniu 1 N. Na każdej próbce wykonano 10 pomiarów w różnych miejscach na powierzchni łopatek poeksploatacyjnych stopni 2_1, 6_1, 12_1 oraz z łopatkę nowej stopnia 2, prezentuje poniższy rysunek.

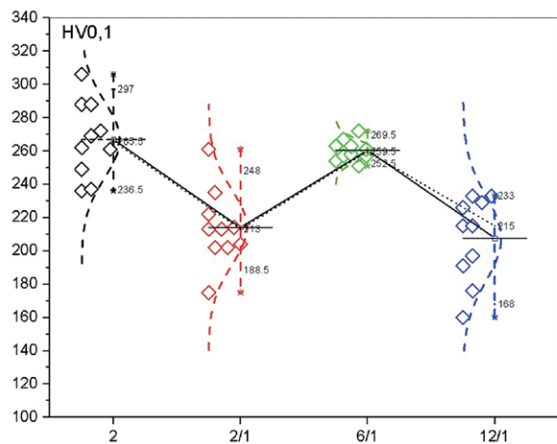
Badania mikrotwardości (rys. 12) metodą Vickersa ($HV_{0,1}$) ujawniły, że największą twardością charakteryzowała się łopatkę nowa stopnia 2. Łopatkę drugiego stopnia turbiny po eksploatacji (2_1) charakteryzowała się mniejszą twardością, co mogło wynikać z częściowego rozpadu martenzytu i powstawania ziaren ferrytu. Łopatkę szóstego stopnia (6_1) wykazała twardość porównywalną z łopatkę nową, co prawdopodobnie było skutkiem wydzielania pasm węglików. Natomiast w przypadku łopatkę dwunastego stopnia (12_1) twardość była najmniejsza, co można tłumaczyć skutkiem zaawansowanego rozpadu martenzytu, a zmniejszonej w ten sposób twardości nie kompensował proces koagulacji węglików chromu.

5. Wyniki badań metodą dyfrakcji rentgenowskiej

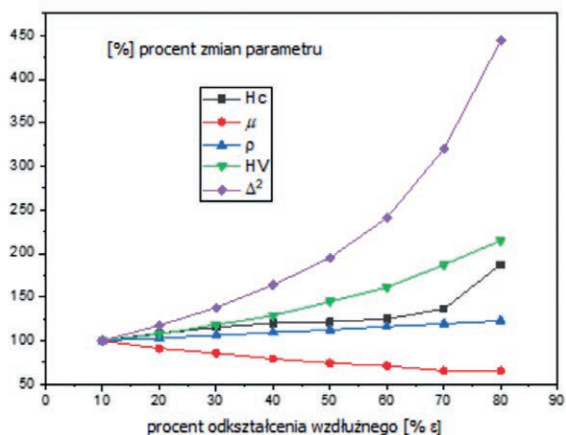
W badaniach skuteczności detekcji w stosunku do innych metod i parametrów pomiarowych rentgenowskich przeanalizowano wyniki badań dla czystego żelaza elektrolitycznego i obrazu tych zmian w kwadracie poł szerokości linii dyfrakcyjnych opisanych w monografii i pracach [4–7] (rys. 20). W przypadku łopatek z wirnika turbiny ma się do czynienia ze złożonym stanem naprężenia o różnej intensywności degradacji pomiędzy łopatkami, ze względu na ich długość i siły odśrodkowe, a co za tym idzie – ze zmiennymi i złożonymi procesami pełzania (co wyjaśniono w dalszych badaniach). Z wyznaczonych parametrów refleksów dyfrakcyjnych dla fazy Fe-Cr dla poszczególnych próbek, korzystając z wartości oznaczonych FWHM loft, można wyznaczyć Δ^2 .

Pełny dyfraktogram dla wyników badań pokazano na rys. 21 i w tabeli 8. Badania wykonano na Uniwersytecie Śląskim [20]. Czas ekspozycji był długi, co umożliwiło przeprowadzenie pełnej statystyki w interesującym zakresie zmian struktury i migracji węglików chromu. Ekspozycje prowadzono dla powierzchni 4×7 mm, dla każdej z próbek, zachowując proporcję położenia wycinka powierzchni.

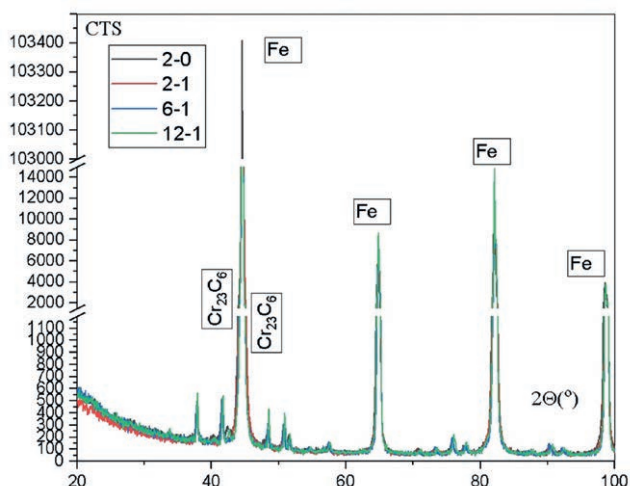
Analiza parametrów sieciowych metodą Rietvelde ujawniła kontrakcje sieci krystalicznej faz: Fe-Cr oraz $Cr_{23}C_6$ wraz ze wzrostem oznaczenia próbki, co zamieszczono w tabeli 9.



Rys. 19. Analiza porównawcza rozkładu pomiaru mikrotwardości dla łopatek kolejnych stopni. Widoczna normalizacja materiału 6_1 pod względem twardości na całej badanej powierzchni



Rys. 20. Porównanie przeliczonych procentowych czułości detekcji dla równoczesnych zmian natężenia koercji H_c , przenikalności magnetycznej μ , konduktywności ρ , twardości H_V i kwadratu szerokości połowowej linii dyfrakcyjnych Δ^2 promieni rentgenowskich



Rys. 21. Dyfraktogram analizy rentgenowskiej osnowy i węglików [20]

Tabela 8. Parametry refleksów dyfrakcyjnych dla fazy Fe-Cr próbek [20]

Próbka 2				
Pos.[-20]	Height [cts]	FWHM Left [20]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44,5334(2)	87718(248)	0,1649(6)	2,03289	100
64,728(1)	4813(45)	0,319(4)	1,43902	5,49
82,0260(8)	9043(61)	0,295(3)	1,17382	10,31
98,546(1)	3593(35)	0,362(5)	1,01645	4,1
115,723(2)	2717(24)	0,638(8)	0,90969	3,1
Próbka 2_1				
Pos.[-20]	Height [cts]	FWHM Left [20]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44,5985(2)	64586(232)	0,1605(8)	2,03007	100
64,813(1)	4512(49)	0,264(4)	1,43733	6,99
82,1071(7)	10514(76)	0,246(3)	1,17287	16,28
98,634(2)	2660(34)	0,309(6)	1,01578	4,12
115,852(2)	2846(28)	0,511(8)	0,90906	4,41
Próbka 6_1				
Pos.[-20]	Height [cts]	FWHM Left [20]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44,5627(2)	83083(255)	0,1334(5)	2,03162	100
64,8381(9)	6374(53)	0,246(2)	1,43684	7,67
82,1063(6)	12561(75)	0,221(2)	1,17288	15,12
98,633(1)	3272(34)	0,275(4)	1,01579	3,94
115,924(2)	3404(28)	0,488(5)	0,9087	4,1
Próbka 12_1				
Pos.[20]	Height [cts]	FWHM Left [20]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44,5527(2)	77450(248)	0,1370(5)	2,03205	100
64,7930(9)	7215(58)	0,250(2)	1,43773	9,32
82,0892(5)	13702(81)	0,221(2)	1,17308	17,69
98,632(1)	3561(39)	0,260(4)	1,0158	4,6
115,901(2)	3867(35)	0,473(6)	0,90881	4,99

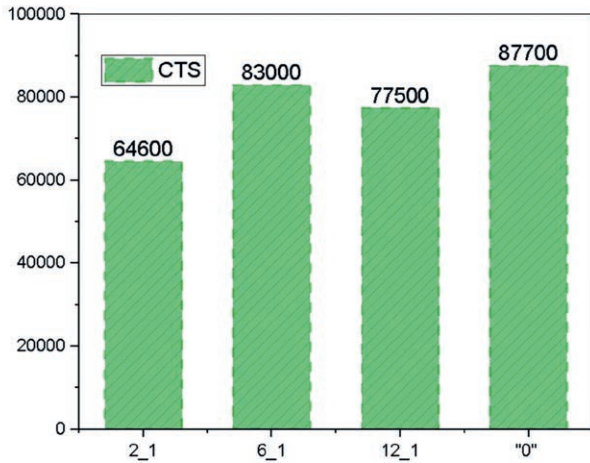
Tabela 9. Parametry sieciowe próbek [20]

Próbka	Parametr sieci [Å]	
	Fe-Cr	Cr ₂₃ C ₆
2	2,8762(7)	10,6612(4)
2_1	2,8754(6)	10,6511(5)
6_1	2,8732(4)	10,6385(5)
12_1	2,8736(5)	10,6173(5)

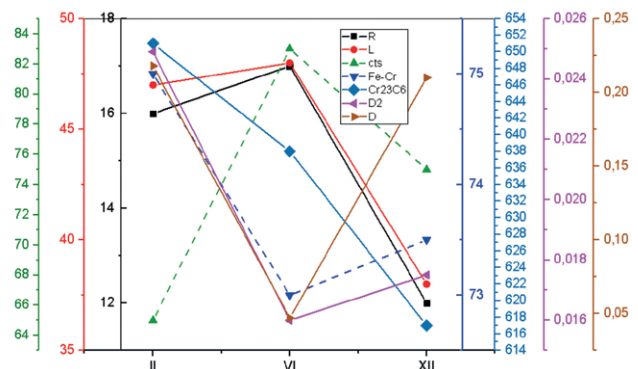
W konkretnym przypadku nie można oczekiwać liniowych zmian pomiędzy degradacją struktury od pełzania wysokotemperaturowego a pomierzoną twardością. Istotnym wyznacznikiem okazał się parametr sieciowy dla węglików chromu o rząd wielkości czulszy od zmian dla żelaza. Wyznaczono ilość zaliczeń refleksów dyfrakcyjnych (rys. 22), uważany w świecie naukowym za niemiernodajny.

Miarodajnym wskaźnikiem natomiast jest kwadrat szerokości połowowej linii dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich Δ^2 (rys. 23). Trend zmiany tego współczynnika od miejsca lokacji próbek jest zgodny z przebiegiem parametrów sieciowych dla żelaza (tabela 9).

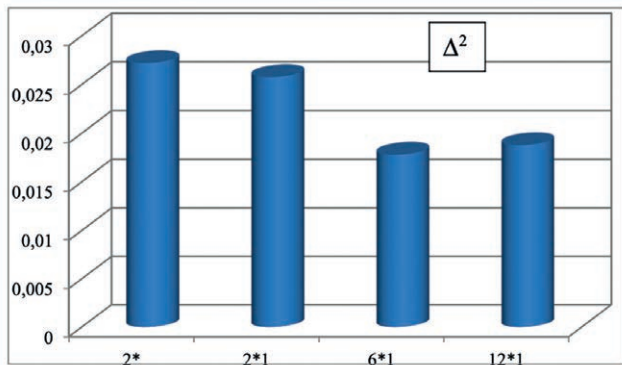
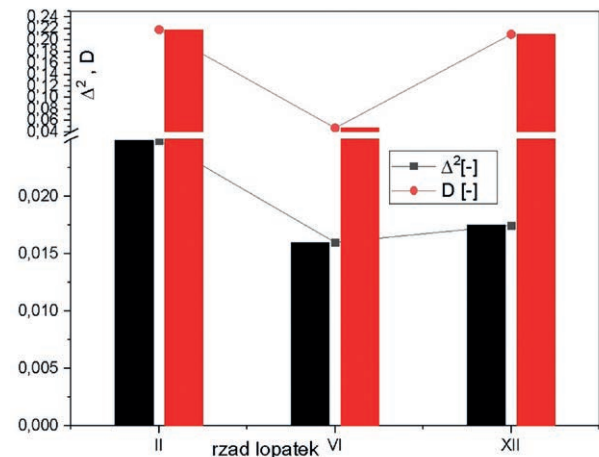
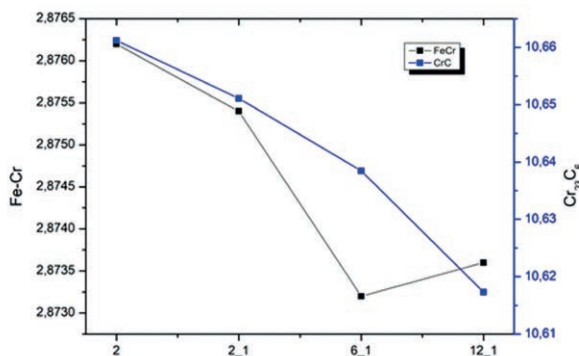
Także miarodajny parametr, jakim jest parametr sieciowy, trudny jest do uzyskania w pomiarach poligonowych, a głównie laboratoryjnych (badania niszczące laboratoryjne). Jest istotnym wzorcem do porównań walidacyjnych. W badaniach niszczących poszukujemy wiarygodnego odniesienia, jakim jest spektroskopia impedancji (MSID3/2).



Rys. 22. Parametr CTS dla badanych próbek (tabela 7)



Rys. 25. Przebiegi zmian parametrów mierzonych dla 2_1, 6_1, 12_1 (II, VI, XII)

Rys. 23. Miarodajny parametr Δ^2 [4-7] dla próbekRys. 26. Porównanie Δ^2 z parametrem zniszczenia D

Rys. 24. Parametry sieciowe [20] roztworu żelaza z chromem i węglików chromu [wg tab. 9]

Parametr sieciowy węgla chromu o rząd wielkości (analizując drugie miejsce po przecinku) odzwierciedla stan procesu degradacji.

W przeliczeniu skal wykresu wykazano wyższą czułość parametru dla węgla w stosunku do próbki wzorcowej nowej 2_0. Na rysunku 25 zebrano wyniki części badań. Dla węglików chromu zmiany odczytujemy na drugim miejscu po przecinku, dla roztworu żelaza z chromem na trzecim miejscu.

Porównanie wyników zastosowanych metod badawczych ujawniło wiele spostrzeżeń odnośnie do korelacji metod, korelacji wskazanej degradacji, a także zastosowanej metody badania przebiegu unormowanych składowych impedancji F. Förstera.

Oba te parametry pomimo wysokiej pewności związku z degradacją materiału są nieprzydatne w bezpośrednich badaniach poligonowych i są badaniami niszczącymi (jedynie dla SHM).

6. Spektroskopia impedancji MSI3D

Korzystając z metod spektroskopii impedancyjnej, można wykonać wielopunktową analizę stanu testowanego materiału poprzez zależności występujące między składowymi impedancjami oraz częstotliwością a zmianami występującymi w materiale eksploatowanym po okresie eksploatacji w funkcji częstotliwości – patrz (rys. 1).

Parametrem opisującym materiał testowany jest skuteczna przenikalność magnetyczna. Zmiany skutecznej przenikalności magnetycznej można badać pośrednio podczas obserwacji

zmian impedancji cewki, w której umieszczony jest testowany materiał. Skuteczną przenikalność magnetyczną przedstawia się jako wielkość zespoloną, charakteryzującą stan próbki w zmiennym polu magnetycznym, zależną od średnicy próbki, przewodności właściwej i przenikalności magnetycznej materiału próbki oraz od częstotliwości napięciowego sygnału pobudzającego f . Uzwojenie cewki pomiarowej ma rezystancję R . Pusta cewka sondy po podłączeniu do źródła napięcia przemiennego ma impedancję Z_0 . Włożenie rdzenia do cewki powoduje wzrost impedancji do wartości Z . Składowa R_0 impedancji Z wzrasta do wartości R .

Napięcie uzwojenia cewki przed włożeniem próbki wynosi ε_0 , a po włożeniu próbki ε zmienia się proporcjonalnie do impedancji Z . W rozważaniu analitycznym zaproponowanym przez Förstera [2, 3] wprowadzono pojęcie przenikalności skutecznej μ_{sk} oraz założenie, że część rzeczywista R_0 dla pustej cewki pomiarowej jest pomijana. Pozostaje jedynie składowa urojona ωL_0 i składowa rzeczywista R :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{Z}{\omega L_0} = j(1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{sk}) \quad (1)$$

Unormowane składowe impedancji są opisane wzorami Förstera [2–3]:

$$\frac{Re \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{R - R_0}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-Im \mu_{sk}) \quad (2)$$

$$\frac{Im \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (Re \mu_{sk}) \quad (3)$$

gdzie:

η – współczynnik wypełnienia cewki;

ε i ε_0 – napięcia indukowane w cewce z rdzeniem i w pustej cewce;

μ_r – względna przenikalność magnetyczna rdzenia;

μ_{sk} – skuteczna przenikalność magnetyczna zależna między innymi od przewodności właściwej γ .

Współczynnik wypełnienia cewki definiowany jest jako iloraz średnicy próbki D_p do średnicy cewki D_s

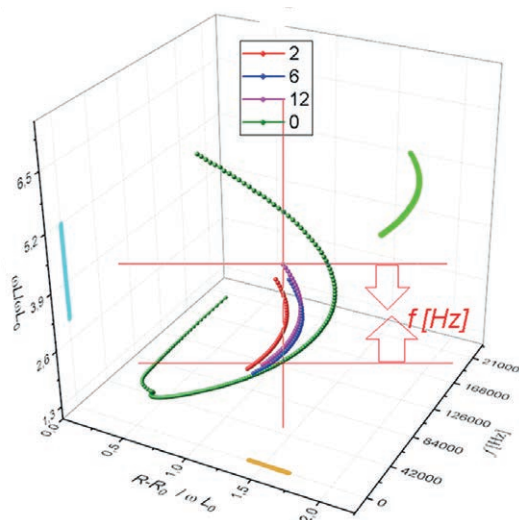
$$\eta = \left(\frac{D_p}{D_s} \right)^2 \quad (4)$$

D_p – średnica próbki;

D_s – średnica cewki.

Dla prostokątnego przekroju otworu cewki i uwzględniając złożony kształt łopatki, zmienny po jej długości i przekroju, współczynnik η zastąpiono zależnością η' równą stosunkowi powierzchni przekroju S_p dla próbki i S_s dla cewki:

$$\eta' = \left(\frac{S_p}{S_s} \right)^2 \quad (5)$$



Rys. 27. Ograniczony parametrem przenikalności skutecznej zakres pomiarowy dla materiału X22CrMoV12-1+QT2 łopatek 2_1, 6_1, 12_1

Szczególnie istotna jest analiza zmian degradacyjnych materiału z uwzględnieniem historii obciążeń materiału, która jest trudna i bardzo skomplikowana do przeprowadzenia wyżej wymienionymi metodami. Trudności tych można uniknąć, stosując analizę wyników składowych impedancji z F. Förstera.

F. Förster zaproponował, aby dla każdej częstotliwości pola magnetycznego wyznaczyć znormalizowane składowe

impedancji $\frac{\omega L}{\omega L_0}$, $\frac{\Delta R}{\omega L_0}$.

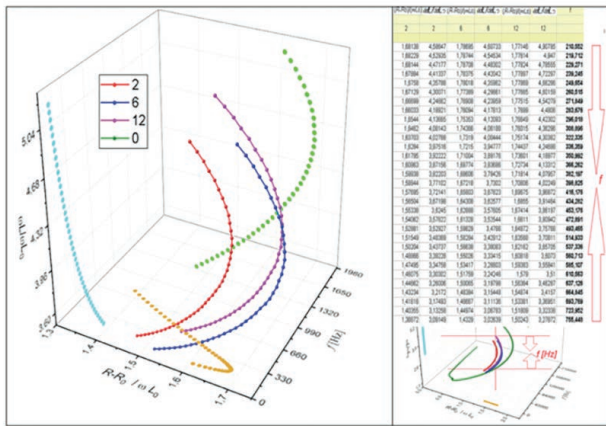
Zaproponowana metoda WSID3 obrazuje trzy parametry (czę-

stotliwość f , $\frac{\omega L}{\omega L_0}$, $\frac{\Delta R}{\omega L_0}$) w trójwymiarowej przestrzeni tworzącej

opis stanu parametrów poszczególnych próbek w danej chwili pomiaru. Dla materiałów ferromagnetycznych i austenitycznych stosowane są inne zakresy częstotliwości. A w tych zakresach poszukujemy ograniczonych zakresów częstotliwości charakterystycznych dla danego materiału, jak pokazuje rys 27.

Stal X22CrMoV12-1+QT2 na tle pełnego zakresu pomiarowego materiału nowego – „0” w zakresach użytecznych diagnostycznie jest badana w ograniczonym przedziale częstotliwości f . W tym zakresie częstotliwości postęp zmian degradacyjnych obserwuje się przez porównanie charakterystyk materiału testowanego przed i po eksploatacji w danym przedziale częstotliwości pomiarowej. Zaproponowane narzędzie diagnostyczne dostarcza informacji głównie o zmianach degradacyjnych materiału testowanego przy znanym wpływie elementów układu pomiarowego oraz linii przesyłowej. Pomiary impedancyjne zostały przeprowadzone za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4924 w zakresie częstotliwości od 40 Hz do 200 kHz w szeregowym układzie L_R .

W celu wyboru zakresu badań poszerzono obszar badań, zmieniono zakresy osi na obiekcie badawczym, jak pokazano na rysunku 26. Dla stali magnetycznych będzie to zakres niższy [25, 26, 27], dla paramagnetycznych wysoki i bardzo wysoki [28].



Rys. 28. Przebiegi w WSID3 z ograniczonym pomiarowym zakresem częstotliwości pola magnującego

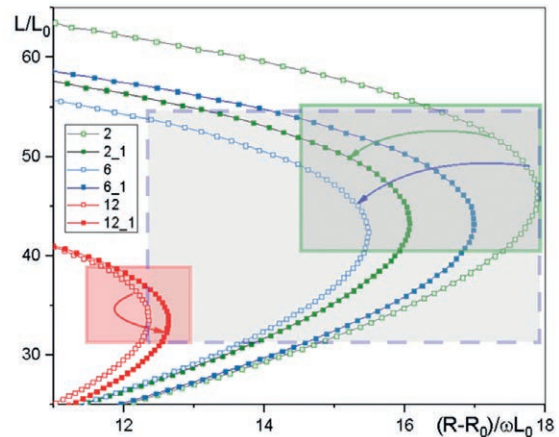
Zakres częstotliwości testującej ograniczany jest dla części przebiegu w największej czułości pomiaru i możliwości rozróżnienia zmian materiału.

6. Spektroskopia WSID2 – analiza uproszczona

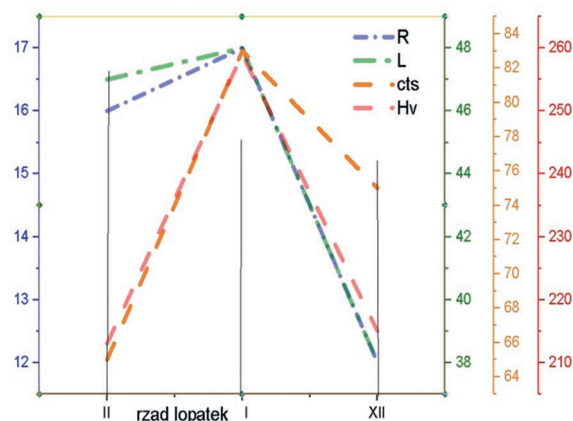
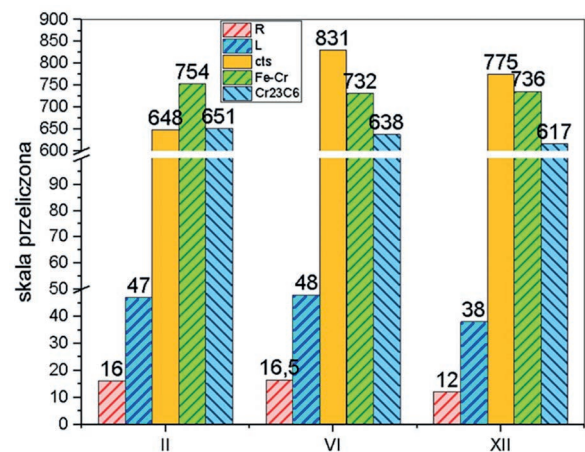
Materiał badawczy w postaci fragmentów łopatek turbiny WP przed i po eksploatacji przycięto do odpowiedniego rozmiaru i umieszczono wewnątrz cewki pomiarowej. Cewka pomiarowa została podłączona do precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A. Przeprowadzono badania i zarejestrowano wyniki dla nowych łopatek 2., 6. oraz 12. oraz fragmentów łopatek od 2_1 do 2_5, od 6_1 do 6_5 oraz od 12_1 do 12_5 po eksploatacji. Zarejestrowano charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności L_s i rezystancji R_s w układzie szeregowym oraz moduł impedancji Z i kąta przesunięcia fazowego.

Analizowano zmiany (rys. 29) wynikające z różnic pomiędzy materiałem łopatek eksploatowanych a materiałem wejściowym (rys. 19). Pomimo tego samego czasu eksploatacji stan złożonego naprężenia mechanicznego i temperaturowego wykazano zróżnicowany wpływ na powyższe parametry MSID3/2, jak przedstawia się to na rysunku 19. Przedział częstotliwości pomiarowej od 110 Hz do 550 Hz ujawnia znaczące zmiany składowych impedancji oraz zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych. W wysokich przedziałach częstotliwości pomiarowych (ferromagnetyk) nie zarejestrowano zmian o podobnym charakterze. Wysokie częstotliwości badań stosujemy dla stali paramagnetycznych

Przeprowadzona analiza bezwzględnych zmian składowych impedancji wskazuje na zróżnicowanie procesu degradacji struktury martenzytycznej stali X22CrMoC12-1 łopatek w poszczególnych testowanych grupach (przy jednakowym czasie eksploatacji), uwidocznione w istotnych zmianach przenikalności magnetycznej, a także przewodności elektrycznej. Zgodnie ze wzorami (2) i (3) uwzględnienie współczynnika wypełnienia η' (5) umożliwi wyznaczenie wartości przenikalności magnetycznej skutecznej i przewodności właściwej materiału. Zmiany rzeczywistej i urojonej części unormowanych składowych impedancji dla łopatek rzędu 2, 6, 12 przedstawia



Rys. 29. Wykres opisujący w WSID2 kierunek zmian wartości składowych impedancji łopatek z trzech rzędów wobec materiału bazowego [2 na rysunku – współcześnie produkowane zamienniki materiałowe łopatek]



Rys. 30. Zestawienie zmian parametrów wobec jednego z punktów dla częstotliwości f

rys. 29. Zbiorczy rysunek 30 przedstawia zestawienie zmian parametrów wobec jednego z punktów dla częstotliwości f ; wybrano charakterystyczny punkt porównania wobec łopatki 6_2.

W analizie bezwzględnej dzięki znormalizowaniu wymiarów przekroju S i uwzględnieniu współczynnika wypełnienia η' możliwe jest porównanie materiału łopatek eksploatowanych w stosunku do materiału wejściowego.

W przedziale częstotliwości pomiarowej wyraźnie uwidocznione zostały zmiany pomiędzy łopatkami poeksploatacyjnymi,

Analiza obu składowych impedancji (nieniszcząca) umożliwia szczegółowe odniesienie się do wybranych korelacji z badań (niszczących) pomiędzy stanem po procesie eksploatacji materiału a jego parametrami fizycznymi (elektrycznymi, magnetycznymi i mechanicznymi). Wszelkie stany magnetosprężyste i naprężenie resztkowe mają swój udział w wartościach składowych impedancji.

7. Wnioski końcowe

W procesie eksploatacji elementu maszyny także zmiany pomiędzy odkształceniem ϵ (kolejna publikacja) a zmianą parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału (składowe L, R) są zmianami zbliżonymi do liniowych, co upoważnia do zastosowania również metod korelacji liniowej Pearsona. Unikalne w klasie badań NDT i SHM wyniki korelacji zamieszczono w poniższej tabeli.

Korelacja Pearsona

	cts	Δ^2	R	L	Fe-Cr [A]	Cr ₂₃ C ₆ [A]	HV _{0,1}
cts	1	-0,98213	-0,04426	-0,20229	-0,99155	-0,56442	0,65906
Δ^2	-0,98213	1	0,23151	0,38301	0,99825	0,70971	-0,50571
R	-0,04426	0,23151	1	0,98732	0,1735	0,84966	0,72219
L	-0,20229	0,38301	0,98732	1	0,32765	0,9226	0,60322
Fe-Cr	-0,99155	0,99825	0,1735	0,32765	1	0,66675	-0,55591
Cr ₂₃ C ₆	-0,56442	0,70971	0,84966	0,9226	0,66675	1	0,24886
HV _{0,1}	0,65906	-0,50571	0,72219	0,60322	-0,55591	0,24886	1

1. Korelacja Pearsona. Silny związek ilości zaliczeń refleksów – Height [cts] z kwadratem szerokości linii dyfrakcyjnej Δ^2 oraz z parametrem sieciowym Fe-Cr [A] dla badanej stali łopatek (**powszechnie pomijany w metodach dyfrakcji rentgenowskiej jako nieistotny**).
2. Wysoki stopień podobieństwa przebiegu unormowanej składowej rzeczywistej Re oraz urojonej Im impedancji Z z wyznaczonymi parametrami sieciowymi dla węgla chromu Cr₂₃C₆.
3. Istotny związek twardości HV_{0,1} ze składową urojoną Im impedancji Z.
4. Korelację w wynikach prób ściskania (w kolejnym artykule), pomiarów twardości HV_{0,1} z badaniami magneto-indukcyjnymi (R, L oraz HV_{0,1}), widać szczególnie w przypadku utwardzenia przekroju eksploatacją w próbce 6_2.

Uzyskano podstawy do wniosku o ponowne zdefiniowanie rewersu dla eksploatowanych maszyn i urządzeń, np. turbin parowych i gazowych w elektrowniach zawodowych.

Literatura

[1] BOZORTH R.: *Ferromagnetism. The Institute of Electrical and Electronics Engineers*. IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1936, An IEEE Press Classic Reissue, Magnetic Society, 1993, 2001.

[2] FÖRSTER F.: *Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streuflusseverfahrens*. Materialprüfung, 23, 1981.

[3] HEPTNER H., STROPPE H.: *Magnetyczne i indukcyjne badania metali*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1972.

[4] RASEK J.: *Materiały amorficzne i ich właściwości [w:] W kręgu krystalografii i nauki o materiałach*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2002.

[5] RASEK J.: *Kinetyka zjawisk wydzielania i rozpuszczania w roztworach stałych α Fe-N/C/*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 1983.

[6] RASEK J.: *Wybrane zjawiska dyfuzyjne w metalach krystalicznych i amorficznych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2000.

[7] RASEK J., STOKŁOSA Z.: *Study of material characteristic by magnetic methods – study of mechanical characteristic of materials and construction*. IPPT PAN, Zakopane. 15–17 December 2004.

[8] ŻUREK H.: *Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ELEKTRYKA z. 196, MONOGRAFIA, str. 1–150, Gliwice 2005.

[9] ŻUREK H.: *Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali*. Gliwice: Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2012, 155 s, MONOGRAFIA; nr 423.

[10] ŻUREK H., DUKA P.: *Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.

[11] ŻUREK H., DUKA P.: *RLC CIRCUITS FOR MATERIAL TESTING, INSTITUTE OF ELECTRICAL DRIVES & MACHINES KOMEL*, 2015, MONOGRAPH.

[12] ŻUREK H.: *Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów NN 510 2385 38 (raport)*.

[13] ŻUREK H.: *Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych NN 507 0807 33 (raport)*.

[14] ŻUREK H., KUKLA D.: *LDC1000 converter for NDT material diagnostics and characterisation*, Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 60(7)/2018.

[15] ŻUREK H.: *Magnetic contactless detection of stress distribution and assembly defects in constructional steel element*, NDT & E International, 38(7)/2005.

[16] ŻUREK H.: *Magnetic monitoring of fatigue process of the rim material of railway wheel sets*, NDT&EInternational, 39/2006.

[17] ŻUREK ZBIGNIEW H., JANECZEK T., MACIEJEWSKI J.: *Steel magnetic parameters as material fatigue diagnostic criterion*, NDT.net, issue 2009-03.


[18] ŻUREK H., BARON D.: *Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów*, XXI Seminarium Naukowo-Techniczne KOMEL PEMINE – Ryto 2012.

[19] ŻUREK H., JANECZEK T., MACIEJEWSKI J.: *Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej*. PAK, „Pomiary Kontrola Automatyka” 9/2008.

[20] DERCZ G.: *Badanie stali X22CrMoV12-1+QT2 (dyfrakcja rentgenowska (XRD – X-Ray Diffraction) za pomocą dyfraktometru Pan Analytical X’Pert 3 – badania własne*, Uniwersytet Śląski, Katowice 2021.

[21] ŻUREK H., KURZYDŁOWSKI K.J., KUKLA D., BARON D.: *Material*

- Edge Conditions of Electromagnetic Silicon Steel Sheets*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2b/2013.
- [22] ŻUREK H., BARON D.: *Spektroskopia impedancji – uniwersalny parametr diagnostyki elementów maszyn i urządzeń*, XLIX Sympozjum SME, Gdynia 2013.
- [23] ŻUREK H.: 19th WCNDT 2016 in MUNICH, GERMANY, ISBN 978-3-940283-78-8, Członek Komitetu Naukowego (ponad 100 recenzji).
- [24] ŻUREK H.: NDT.net, The Largest Open Access Portal of Nondestructive Testing,
- [25] Doktorat Rok: 2008. TOMASZ JANECZEK, Politechnika Śląska Wydział Transportu. Tytuł oryginału: *Diagnostyka eksploatacyjna kolejowych zestawów kołowych metodą magnetyczną*. PROMOTOR, Dr Hab. inż. Żurek Zbigniew profesor Pol. Śl.
- [26] Doktorat Rok: 2011. MICHAŁ SZUDYGA, Politechnika Śląska Wydział Transportu. Tytuł oryginału: *Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych stali stosowanej do kół i obręczy kolejowych zestawów kołowych*. PROMOTOR, Dr Hab. inż. Żurek Zbigniew profesor Pol. Śl.
- [27] Doktorat Rok: 2016, Politechnika Opolska, DARIUSZ BARON, EthosEnergy Poland SA. Tytuł oryginału: *Badanie stanu technicznego kołpaków generatorów metodą spektroskopii impedancji*, PROMOTOR, Dr Hab. inż. Żurek Zbigniew profesor Pol. Śl.
- [28] DOKTORAT Rok: 2021, Politechnika Śląska Wydział MT, TOMASZ JASIŃSKI EthosEnergy Poland SA. Tytuł oryginału: *Diagnostyka stopnia wypracowania łopatek części wysokoprężnej wirnika turbiny 13K225 metodą magneto-indukcyjną*. PROMOTOR Dr Hab. inż. Żurek Zbigniew profesor Pol. Śl.
- * Autor prowadzący.
- ** Współpracujące laboratoria i wydziały uczelni: Politechnika Śląska Wydział Transportu, Uniwersytet Śląski, Politechnika Śląska Wydział Inżynierii Materiałowej, (Instytut Lotnictwa W-a, IPPT W-a, konsultacje).

 Z. Żurek – Silesian University of Technology, Faculty of Transport;
B. Solecka – Silesian University of Technology, Institute of Physics – Centre for Science and Education;
B. Chmiela – Silesian University of Technology, Faculty of Materials Engineering;
T. Jasiński – EthosEnergy Poland S.A.