

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

Wydział Transportu

**DIAGNOSTYKA STOPNIA  
WYPRACOWANIA ŁOPATEK  
CZĘŚCI WYSOKOPREŻNEJ  
WIRNIKA TURBINY 13K225  
METODĄ MAGNETO-INDUKCYJNĄ**

Rozprawa doktorska

**Mgr inż. Tomasz JASIŃSKI**

Promotor dr hab. inż. Zbigniew Hilary ŻUREK, prof. Politechniki Śląskiej  
Promotor pomocniczy dr inż. Iwona BEDNARCZYK

KATOWICE 2021

## STRESZCZENIE

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest, innowacyjne w energetyce, wykorzystanie metody magneto-indukcyjnej do diagnostyki stanu łopatek turbiny parowej 13K225. Praca dotyczy ważnego zagadnienia, jakim jest diagnostyka maszyn i urządzeń. Istotnymi sprawami, szczególnie dla branży energetycznej, dla elektrowni zawodowych, są zapewnienie ciągłości działania i możliwość dostarczania do sieci prądu elektrycznego, dlatego też bezawaryjna praca turbozespołów, bez przestojów lub z jak najkrótszymi przestojami, jest efektem nie tylko odpowiedniej konstrukcji m.in. turbin, ale również wynikiem odpowiedniej eksploatacji wraz z niezbędną diagnostyką. Diagnostyka prewencyjna pozwala uniknąć nieprzewidzianych awarii lub nawet katastrof, przez określenie stanu materiału i wskazanie obszarów o niepokojących zmianach struktury, które w przyszłości będą prowadzić do powstania nieciągłości materiałowych. Dotychczasowo powszechnie stosowane w energetyce metody diagnostyczne NDT, takie jak: badania ultradźwiękowe, badania prądami wirowymi, penetracyjne lub magnetyczno-proszkowe, pozwalają wykryć już istniejące nieciągłości materiałowe, takie jak np. pęknięcie. Metody te nie zapewniają wczesnego wykrycia procesu zmian w ciągłości struktury, który poprzedzony jest powstaniem nieciągłości materiału.

Celem pracy jest opracowanie nowej metody diagnostycznej pozwalającej na wczesne określenie stanu materiału łopatek turbin parowych w sposób skuteczny i efektywny. W pracy zaprezentowano wyniki badań magneto-indukcyjnych opracowanych za pomocą metodologii Förster Plot, która pozwala na analizę zmian własności magnetycznych i elektrycznych materiału. Zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych zachodzące w testowanym materiale analizowane zostały w zakresie częstotliwości od 3- do 7-krotności częstotliwości granicznej dla badanej stali X22CrMoV12-1+QT2, co daje przedział w zakresie częstotliwości od 150 Hz do 700 Hz. Badania strukturalne za pomocą mikroskopii transmisyjnej, rentgenowskiej analizy strukturalnej, a także pomiary mikrotwardości i badania podstawowych parametrów mechanicznych potwierdziły spójność ze zmianami parametrów elektrycznych i magnetycznych.

Wyniki badań unormowanych składowych impedancji (Förster Plot) zostały porównane z wynikami badań strukturalnych, mikrotwardości i kwadratu szerokości połówkowej linii dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich  $\Delta^2$ . W badaniach rentgenowskich wsparto się analizą wydzieleni węglików chromu w stali martenzytycznej. W przypadku łopatek z wirnika turbiny mamy do czynienia ze złożonym stanem naprężenia o różnej intensywności jego składowych pomiędzy łopatkami ze względu na ich długość i siły odśrodkowe, a co za tym idzie – zmiennymi i złożonymi procesami pełzania.

Dla małych odkształceń, jakie się rejestruje podczas badań międzyeksploatacyjnych, można przyjąć związki liniowe pomiędzy degradacją struktury od pełzania wysokotemperaturowego a pomierzoną twardością, ponieważ zniekształcenia te są wielokrotnie niższe [%] od odkształceń dla zakresu sprężystości i plastyczności badanej stali [z normy]. Natomiast dla stali o małej energii błędu ułożenia struktury nie można oczekiwać liniowych zależności od odkształceń materiału [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ], nawet przy rozciąganiu jednoosiowym [2], [3], [4]. Przykładem mogą być podobieństwa i związki wyników badań odkształceń, twardości, parametrów sieciowych itd. Potwierdza to literatura krajowa i zagraniczna dla żelaza  $\alpha\text{Fe}$  [2], [5], [6].

Istotnym wyznacznikiem okazał się parametr sieciowy dla węglików chromu, który jest o rząd wielkości czulszy od zmian parametru sieciowego dla żelaza. Parametr sieciowy węgla chromu w sposób bardzo czuły odzwierciedla stan procesu degradacji (jednak proces badań wymaga metod niszczących przygotowania próbek i jest kosztowny). Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostruktury łopatek turbiny energetycznej wykonanych ze stali X22CrMoV12-1+QT2 można sformułować powiązania parametrów elektrycznych i magnetycznych mikrostruktury stali martenzytycznej w warunkach pełzania wysokotemperaturowego. W celu lepszego zaprezentowania tych powiązań, wyznaczono parametr podobieństwa Poissona i wszystkie kluczowe wielkości ujęto w zestawieniu tabelarycznym.

Porównanie wyników zastosowanych metod badawczych ujawniło związek pomiędzy zmianami strukturalnymi wynikającymi z degradacji materiału a przebiegami unormowanych składowych impedancji – analizowanych metodą Förstera.

Analiza parametrów elektrycznych i magnetycznych w relacji do zmian parametrów strukturalnych pozwoliła wykazać:

- wysoki stopień podobieństwa przebiegu unormowanej składowej rzeczywistej  $\mathbf{Re}$  oraz urojonej  $\mathbf{Im}$  impedancji  $\mathbf{Z}$  z wyznaczonymi parametrami sieciowymi dla węgla chromu  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,

- istotny związek twardości  $HV_{0,1}$  ze składową urojoną  $\mathbf{Im}$  impedancji  $\mathbf{Z}$ ,
- silny związek ilości zliczeń refleksów – Height [cts] z kwadratem szerokości linii dyfrakcyjnej  $\Delta^2$  oraz z parametrem sieciowym Fe-Cr [Å] dla badanej stali łopatek (powszechnie pomijany w metodach dyfrakcji rentgenowskiej jako nieistotny).

Prace badawcze nad metodami magneto-indukcyjnymi należy niewątpliwie kontynuować, ponieważ ich aplikacja w warunkach przemysłowych będzie dużym postępem, nie tylko w badaniach materiałów, ale również w diagnostyce maszyn i urządzeń pracujących w energetyce i innych kluczowych gałęziach przemysłu, takich jak branża naftowo-gazowa lub energetyka źródeł odnawialnych.