

Zbigniew Hilary ŻUREK, Krzysztof BIZOŃ, Michał SZUDYGA
Politechnika Śląska, Wydział Transportu

OCENA STANU TECHNICZNEGO KAP CZÓŁ UZWOJEŃ WIRNIKÓW GENERATORÓW NA PODSTAWIE POMIARÓW MAGNETYCZNYCH NIESTABILNOŚCI AUSTENITU STALI G18H18

ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF GENERATOR ROTORS END WINDING CAPS BASED ON MAGNETIC MEASUREMENTS OF INSTABILITY OF G18H18 STEEL AUSTENITE

Abstract: Austenitic (non-magnetic) steels are used in construction of generator rotors caps and bandages as well as transformers' bandages and bolts. Such steels should be characterized by high specific resistance, magnetic permeability less than $1,5 \mu_r$ and high mechanical strength. In addition, these properties should not change due to possible mechanical and thermal load conditions. Since nickel austenite ($\gamma \rightarrow \alpha$), is not durable, some nickel is exchanged for manganese. The paper presents results of investigating stability of chromic-manganic austenite of used rotor caps. At present the assessment of caps, technical condition and their serviceability is conducted by ultrasonic wave attenuation tests. The magnetic measurements based on the detection of the instable austenite, which in the mechanical and thermal correlations constitute an alternative for the diagnostic testing and moreover they provide more complete picture of the cap exploitation.

1. Wprowadzenie

Stale austenityczne (niemagnetyczne) wykorzystywane są w budowie wirników generatorów w postaci kap i bandaży oraz w budowie transformatorów w postaci bandaży i sworzni. Stal o powyższych zastosowaniach powinna wyróżniać się dużą opornością właściwą, przenikalnością magnetyczną mniejszą od $1,5\mu_r$ oraz wysoką wytrzymałością mechaniczną. Dodatkowo o stali tej wymaga się niezmienności tych własności podczas obciążeń mechanicznych i termicznych. Ze względu na nietrwałość austenitu niklowego ($\gamma \rightarrow \alpha$), część niklu zastępuje się manganem. W artykule przedstawiono badania stabilności austenitu chromowo manganowego kap wirników po okresie eksploatacji. W chwili obecnej ocena zdatości kap do eksploatacji przeprowadzana jest metodami pomiaru tłumienia fali ultradźwiękowej. Pomiar magnetyczne polegające na detekcji niestabilności austenitu, w korelacjach mechanicznych i termicznych są alternatywą dla badań diagnostycznych a ponadto dają pełniejszy obraz wyeksploatowania kapy.

2. Badania austenitu chromowo-niklowego

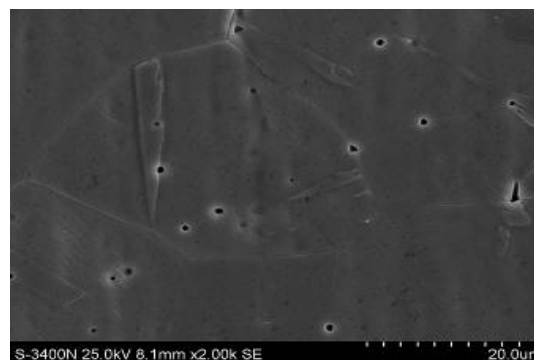
W stali chromowo-niklowej rozpad austenitu następuje przy ochłodzeniu do temperatury -20°C . Stosowanie do celów elektrotechnicznych kwasowej stali austenitycznej chromowo-niklowej uzasadnione jest jedynie jej odpornością na korozję. W stali tej po zgnieciu

lub wygrzewaniu, następuje wydzielanie węglików i częściowa przemiana $\gamma \rightarrow \alpha$, zmieniająca parametry magnetyczne. Trwałość austenitu regulowana jest między innymi dodatkiem tytanu i chromu. Badaniu poddano stal chromowo-niklową o składzie chemicznym podanym w tabeli 1.

Tabela 1. Składniki stopowe stali chromowo-niklowej

Skład chemiczny	Ni	Cr	Mn	Mo	Ti
Normatywny [%]	9-12	17-19	≤ 2	$\leq 0,15$	$\leq 0,7$
Zmierzony [%]	9,71	18,04	1,30	0,22	0,30

Dla tej stali niestabilność austenitu jest na tyle wysoka, że uwidacznia się po odkształceniu plastycznym. Strukturę stali austenitycznej w przed i po odkształceniu plastycznym zilustrowano na rysunku 1 i 2.

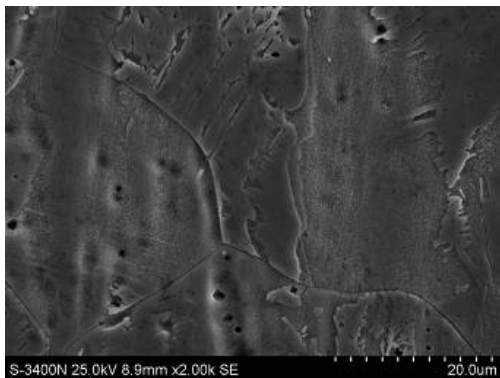


Rys. 1. Struktura stali X6CrNiTi 18-10 przed odkształceniem plastycznym

Odształcenia plastyczne powodują znaczne przyrosty przenikalności materiału o około $0,1\mu_r$. Przyrost ten jest mierzalny dla urządzeń pomiarowych konstruowanych na Wydziale Transportu politechniki Śląskiej.

Element poddany odkształceniu plastycznemu zawiera dwadzieścia jeden punktów pomiarowych przenikalności magnetycznej.

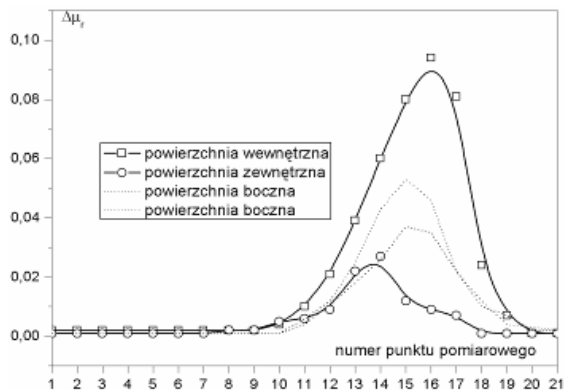
Na rysunku 3 przedstawiono element poddany odkształceniu plastycznemu. Rysunek nr 4 przedstawia zależności magneto - mechaniczne zachodzące w badanym materiale.



Rys. 2. Struktura stali X6CrNiTi 18-10 po odkształceniu plastycznym [2, 4]



Rys. 3. Element poddany odkształceniu plastycznemu [2, 4]



Rys. 4. Zmiana przenikalności magnetycznej w części odkształconej plastycznie [2, 4]

Pomiar przenikalności magnetycznej przeprowadzono za pomocą urządzenia wyposażonego w dotykową sondę pomiarową pokazaną na rysunku 5.



Rys. 5. Magnetoskop wykonany na potrzeby grantu własnego

3. Badania austenitu chromowo manganowego

Skład chemiczny austenitycznej stali manganowej charakteryzują się zawartością manganu w około 12,5 % Mn (stal Hadfielda). Czynnikiem powodującym rozkład austenitu w tej stali jest powolne chłodzenie i wygrzewanie. Nagrzewanie tej stali zwiększa jej przenikalność magnetyczną, która osiąga maksimum w temperaturze równej 400 °C. Odształcenia plastyczne jak i naprężenia mechaniczne wpływają na rozpad austenitu, zarówno w stalach manganowych, manganowo-niklowych jak i niklowych, jednak z różną intensywnością. Skład chemiczny badanego materiału przedstawiono w tabeli 2.

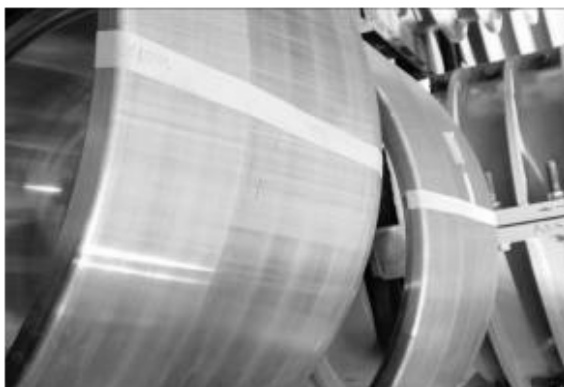
Tabela 2. Skład chemiczny stali G18H18

Skład chemiczny	Ni	Cr	Mn	Mo	Ti
pomiar [%]	0,57	18,3	19,1	0,07	0,06

Stal chromowo - manganową pozyskano z osłony uzwojenia (kapy) wirnika generatora. Fotografie przykładowych kap wirników turbin i badany wycinek elementu kapy zamieszczono na rysunku 6 i 7

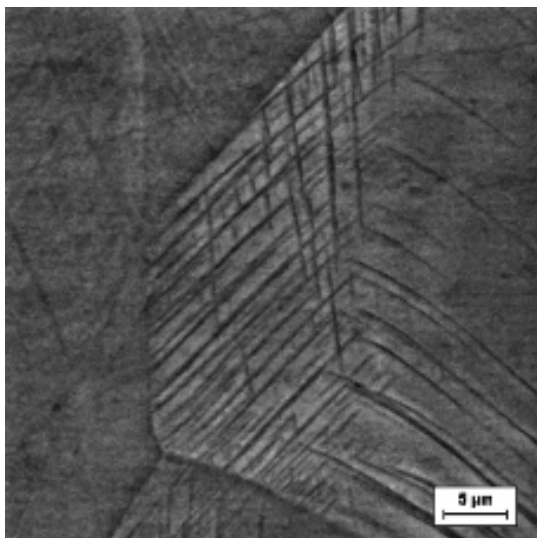


Rys. 6. Kapy wirników turbogeneratorów

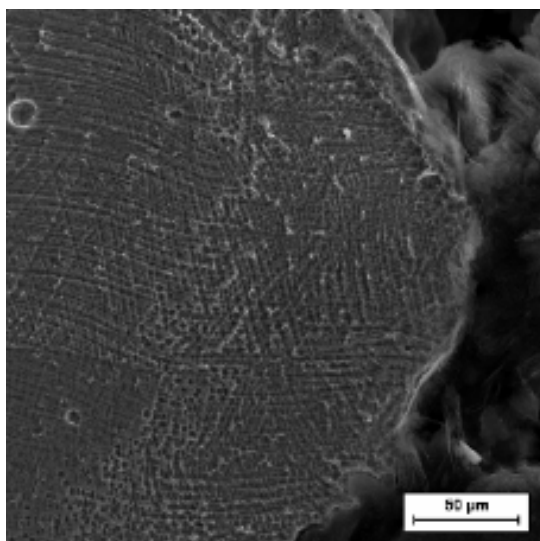


Rys. 7. Kapy wirników turbogeneratorów

Na rys. 8 i 9 pokazano strukturę stali G18H18 z widocznym przyrostem pasm poślizgu na zarysach ziaren austenitu.



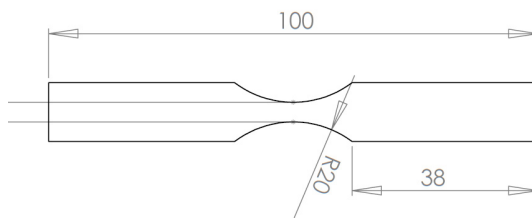
Rys. 8. Struktura stali G18H18 w stanie materiału eksploatowanego (do awarii)



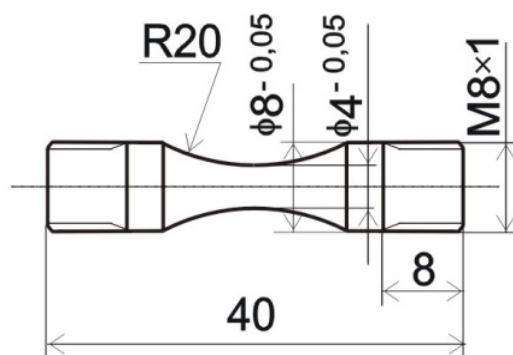
Rys. 9. Struktura stali G18H18 poddanej dodatkowemu zginaniu na zimno

4. Próbkki do badań

Do badań przygotowano próbki płaskie o prze-wężeniu klepsydrycznym oraz próbki cylindryczne o kształcie klepsydrycznym jak pokazano na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Kształt i wymiary próbki płaskiej



Rys. 11. Próbkka klepsydryczna - wymiary

Próbki poddano obciążeniom zmęczeniowym w temperaturze otoczenia równej 21°C. Cykle zmęczeniowe realizowano z ustalonym krokiem obciążenia i liczbą cykli. Oddzielną grupę próbek poddano rozciąganiu w celu uzyskania określonych odkształceń wzdłużnych lub zerwania. Fotografie próbek po obciążeniach zmęczeniowych zamieszczono na rysunku 12.



Rys. 12. Przykłady próbek płaskich i okrągłych poddanych obciążeniom zmęczeniowym

Numery próbek, wartości obciążeń mechanicznych oraz liczbę cykli i odkształcenia podano w tabeli 3.

Tabela 3. Charakterystyka obciążeń

Próbka	Amplituda MPa	Liczba cykli	Odształcenie [%]	Stan
P1	500	30 720		zerwana
P2	400	350 000	*	
P3	400	320 000	*	
P5	400	300 000	*	
D5	Rm 1190		19,7	zerwana
D6	Rm 1207		19,6	
K1	300	684 773	*	zerwana
K2	Próbka testowa			
K3	600	80 246	*	zerwana
K4	750	20 828	*	zerwana
K5	500	252 904	*	zerwana

* pomiar ekstensometrem laserowym – dane w trakcie opracowywania

Próbki płaskie oznaczono literą P, cylindryczne literą K, a próbki rozciągane literą D.

5. Pomiar wpływu odształceń plastycznych i zmęzeniowych na przenikalność materiału

W przypadku stali chromowo niklowej powierzchnię wygięcia (Rys. 3.) pomierzono prototypowym urządzeniem pomiarowym, wykonanym w ramach realizacji grantu własnego. Przyrząd ten umożliwia pomiar zmian przenikalności magnetycznej z rozdzielczością $10^{-3} \mu_r$. Przyrząd profesjonalny firmy Foerster umożliwia pomiar z rozdzielczością do $10^{-5} \mu_r$, zastosowano go ze względu na stabilność strukturalną stali chromowo - manganowej, Wyniki pomiarów zamieszczono w poniższych tabelach 4 i 5.

Tabela 4. Pomiar przenikalności magnetycznej

Próbka/ Pomiar $\Delta\mu \times 10^{-6}$	odcinek skrajny 1	odcinek środkowy	odcinek skrajny 2
P1		310	
P2		350	
P3		860	
P5		820	
D5		410	
D6		560	
	przełom		przełom
K1	160		
K2	240		
K3	260		
K4	200		

Tabela 5. Pomiar indukcji magnetycznej

Próbka Pomiar B [μT]	odcinek skrajny 1	odcinek środkowy	odcinek skrajny 2
P1	1,51	2,33	1,51
P2	1,22	2,51	1,62
P3	1,32	2,51	1,58
P5	1,27	2,54	1,44
D5	2,03	2,81	1,67
D6	1,85	2,57	2,07
	Dla przełomu ↓		Dla przełomu ↓
K1	1,81		1,67
K2	1,41		1,84
K3	0,32		0,11
K4	0,71		0,41

Wyznaczano przyrost przenikalności magnetycznej po zetknięciu próbki z powierzchnią w stosunku do przenikalności powietrza w pobliżu próbki. W pomiarach zachowano stałe ułożenie próbek i sąsiedztwo instalacji ferromagnetycznych.

6. Podsumowanie

Pomiary niskich pól magnetycznych oraz przenikalności początkowej elementu nowego i eksploatowanego ze stali paramagnetycznych są jedną z metod wykorzystywanych w badaniach procesu wyeksploatowania (łopatki turbin lotniczych).

Sposobu badań oraz stosowanej aparatury nie ujawnia się w literaturze. Wyniki przedstawione w opracowaniu potwierdzają taką możliwość [1, 2, 3, 4].

Badania muszą być poprzedzone dokładną analizą zmian parametrów fizycznych materiału od obciążeń eksploatacyjnych mechanicznych i termicznych. Metoda wymaga specjalnie ekranowanych stanowisk badawczych lub uwolnienia strefy badań od elementów magnetycznych. Pomiary pola magnetycznego muszą uwzględniać kierunek pola ziemskiego. Pomiary przenikalności magnetycznej takiego warunku nie wymagają. Wyniki badań przedstawione w pracy mają charakter unikalny. Badania są kontynuowane w ramach grantu.

7. Literatura

[1] Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: *Steel Magnetic Parameters as Material Fatigue Diagnostics Criterion*. NDT.net, Issue 2009-03, s. 251-257.
 [2] Żurek Z.H., Czastkiewicz Z.: *Pomiary magnetyczne stali paramagnetycznych*. PAK, Pomiar Kontrola Automatyka, IV/2009, s. 229-232.
 [3] Żurek Z.H.: *Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęzeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych N N507 0807 33*.
 [4] Żurek Z.H., Madej H., *Parametryczno magnetyczna procedura wczesnej diagnostyki wyeksploatowania elementów ze stali konstrukcyjnych stosowanych w instalacjach energetycznych i transporcie*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr88/2010, s. 217-223.

Artykuł powstał w ramach grantu własnego: Żurek Z.H.: Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów N N510 238538.

Autorzy

Dr hab. inż. Zbigniew Hilary ŻUREK,
 Dr inż. Krzysztof BIZOŃ,
 Mgr inż. Michał SZUDYGA
 Politechnika Śląska, Wydział Transportu
 zbigniew.zurek@polsl.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński