

Ocena stanu technicznego kołpaków generatorów na podstawie pomiarów magnetycznych niestabilności austenitu dla stali G18H18

Assessment of technical condition of generator rotors end winding retaining rings based on magnetic measurements of instability of G18H18 steel austenite

Streszczenie

Austenityczne stale są wykorzystywane do wykonania kołpaków wirników generatorów oraz bandaży, a także na bandaże do transformatorów i nakrętki. Takie stale powinny charakteryzować wysoka oporność, przenikalność magnetyczna mniejsza niż $1,3 \mu_r$ i wysoka wytrzymałość mechaniczna. Te właściwości nie powinny się także zmieniać pod wpływem obciążenia mechanicznego i cieplnego. Ze względu na nietrwałość austenitu niklowego, część niklu zastępuje się manganem.

W artykule przedstawiono wyniki badań stabilności austenitu chromowo-manganowego w eksploatowanych kołpakach wirników generatorów. W chwili obecnej ocena przydatności kołpaków do dalszej eksploatacji oparta jest na badaniach ultradźwiękowych. Pomiar magnetyczny polegający na detekcji niestabilności austenitu w korelacjach mechanicznych i termicznych są alternatywą dla pomiaru tłumienia fali ultradźwiękowej, a ponadto dają pełniejszy obraz wyeksploatowania kołpaków.

Abstract

Austenitic (non-magnetic) steels are used in construction of generator rotors retaining rings and bandages as well as transformers' bandages and bolts. Such steels should be characterized by high specific resistance, magnetic permeability less than $1,3 \mu_r$ 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 retaining rings. At present the assessment of retaining rings, 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 retaining ring exploitation.

Wstęp

Stale austenityczne (niemagnetyczne) wykorzystywane są w budowie wirników generatorów w postaci kołpaków i bandaży oraz w budowie transformatorów

Zbigniew Hilary Żurek – Politechnika Śląska, Gliwice, **Stefan Sieradzki, Jan Adamek** – Turbocare Poland S.A.

w postaci bandaży i sworzni. Stal o powyższych zastosowaniach powinna wyróżniać się dużą opornością właściwą, przenikalnością magnetyczną mniejszą od $1,3 \mu_r$ (mniejsza od 1,05 dla stali G18H18). Kołpaki są najbardziej wyłożonymi elementami generatorów. Naprężenia obwodowe w czasie rozruchu wznoszą się do 350 MPa, a przy próbie nadobrotów mogą dochodzić do 550 MPa. Stale kołpaków charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, która przy temperaturze 100°C obniża się nie więcej jak 10%.

Tablica I. Klasyfikacja ryzyka uszkodzeń [5]

Table I. Damage risk classification [5]

Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia	Bardzo wysokie					
	Wysokie					
	Średnie					UK
	Niskie		UE			
	Bardzo niskie	UM				
		Bardzo Niskie	Niskie	Średnie	Wysokie	Bardzo wysokie
Znaczenie skutków						

Dla stali tej wymaga się niezmienności właściwości magnetycznych podczas obciążeń mechanicznych i termicznych. Ze względu na nietrwałość austenitu niklowego ($\gamma \rightarrow \alpha$), część niklu zastępuję się manganem. Kołpaki narażone są na uszkodzenia mechaniczne -UM, ciepłe – UE i korozyjne – UK. Wagę uszkodzeń, znaczenie skutków oraz prawdopodobieństwo uszkodzenia kołpaków zamieszczono w tablicy I.

Obecnie ocena przydatności kołpaków do dalszej eksploatacji oparta jest na badaniach nieniszczących (badania penetracyjne i ultradźwiękowe) oraz pomiarze tłumienia fali ultradźwiękowej po długoletniej eksploatacji kołpaków. Pomiar magnetyczny polegający na detekcji niestabilności austenitu w korelacjach mechanicznych i termicznych są alternatywą dla badań pomiaru tłumienia fali ultradźwiękowej a ponadto dają pełniejszy obraz wyeksploatowania kołpaków (ocena stanu degradacji materiału).

W artykule przedstawiono badania stabilności austenitu chromowo-manganowego kołpaków po okresie długoletniej eksploatacji.

Badania austenitu chromowo-niklowego

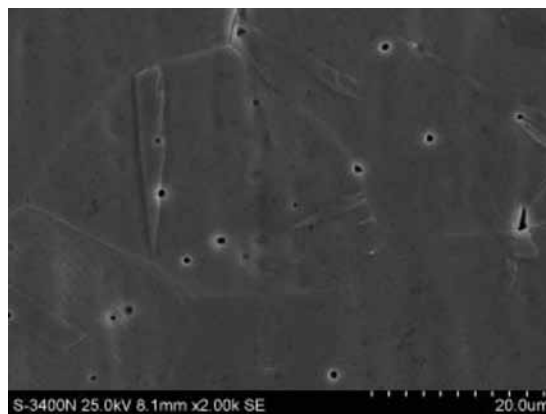
W stali chromowo-niklowej rozpad austenitu następuje przy ochłodzeniu do temperatury -20°C . Stosowanie do celów elektrotechnicznych stali austenitycznej chromowo-niklowej uzasadnione jest jedynie jej odpornością na korozję elektrochemiczną. W stali tej, po zgnieciu lub wygrzewaniu, następuje wydzielanie węglików i częściowa przemiana fazy $\gamma \rightarrow \alpha$, zmieniająca parametry magnetyczne. Trwałość austenitu regulowana jest między innymi dodatkiem tytanu i chromu. Badaniu poddano stal chromowo-niklową o składzie chemicznym podanym w tablicy II.

Tablica II. Składniki stopowe stali chromowo-niklowej

Table II. Alloying elements of chromium-nickel steel

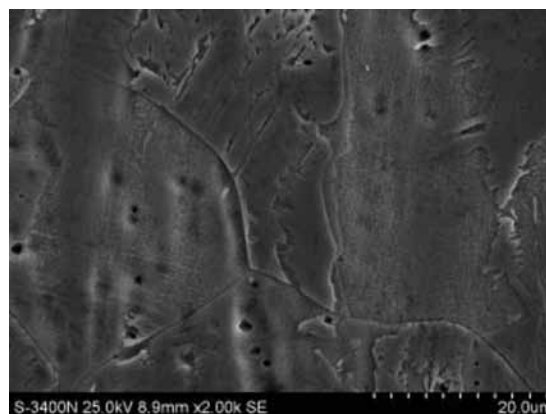
Skład chemiczny	Ni	Cr	Mn	Mo	Ti
Normatywny, %	9-12	17-19	≤ 2	$\leq 0,15$	$\leq 0,7$
Zmierzony, %	9,71	18,04	1,30	0,22	0,30

Niestabilność austenitu powyższej stali jest na tyle wysoka, że uwidacznia się po odkształceniu plastycznym. Strukturę stali austenitycznej w przed i po odkształceniu plastycznym zilustrowano na rysunkach 1 i 2. Odkształcenia plastyczne powodują znaczne przyrosty przenikalności materiału o ok. $0,1 \mu_r$. Przyrost ten jest mierzalny dla urządzeń pomiarowych konstruowanych na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej. Element poddany odkształceniu plastycznemu zawiera dwadzieścia jeden punktów pomiaru przenikalności magnetycznej. Na rysunku 3 przedstawiono



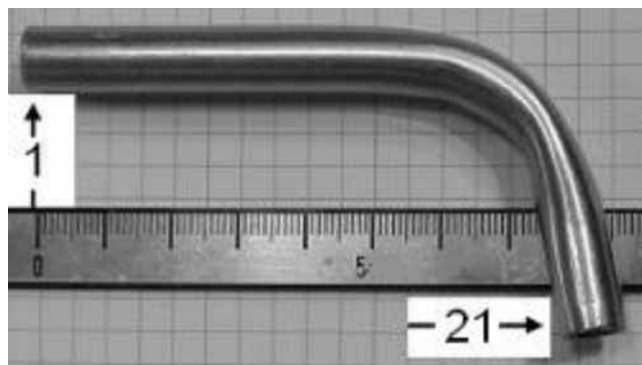
Rys. 1. Struktura stali X6CrNiTi18-10 przed odkształceniem plastycznym

Fig. 1. X6CrNiTi18-10 steel structure before plastic strain



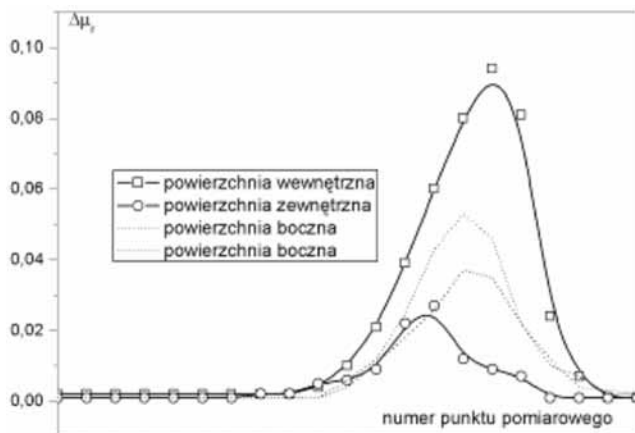
Rys. 2. Struktura stali X6CrNiTi 18-10 po odkształceniu plastycznym [2, 4]

Fig. 2. X6CrNiTi18-10 steel structure after plastic strain [2, 4]



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

Fig. 3. Element subjected to plastic deformation [2, 4]



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

Fig. 4. Magnetic permeability change in the plastic deformed element [2, 4]



Rys. 5. Magnetoskop wykonany na potrzeby grantu własnego

Fig. 5. Magnetoscope made during own research project

element poddany odkształceniu plastycznemu. Rysunek 4 przedstawia zależności magneto – mechaniczne zachodzące w badanym materiale.

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

Badania austenitu chromowo manganowego

Skład chemiczny austenitycznej stali manganowej charakteryzują się zawartością w ok. 12,5 % Mn przy zawartości ok. 1,3 % C (stal Hadfielda). Czynniki powodującymi rozkład austenitu dla tej stali jest powolne chłodzenie i wygrzewanie. Nagrzewanie tej stali zwiększa jej przenikalność magnetyczną, która osiąga maksimum w temperaturze 400°C. Odkształcenia 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 metalu

Tablica III. Skład chemiczny stali G18H18 wg danych producenta

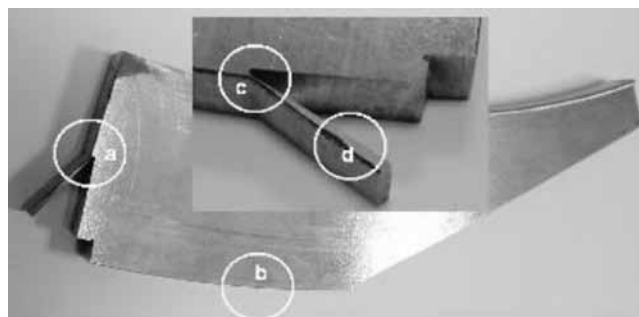
Table III. Chemical composition of G18H18 steel acc. to producer data

Skład chemiczny	C	Si	Cr	Mn	P	S	N
%	Max 0,12	Max 0,80	17,5+20,0	17,5+20,0	Max 0,05	Max 0,015	Min 0,5



Rys. 6. Kołpaki wirników generatorów

Fig. 6. Generator rotors cap



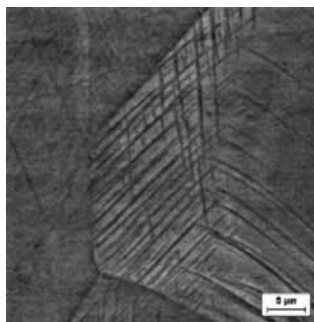
Rys. 7. Wycinek kołpaka z zaznaczonymi strefami struktur (b – rys. 8, a – rys. 9)

Fig. 7. A part of cap with signed structure areas (b – fig. 8, a – fig. 9)

przedstawiono w tablicy III.

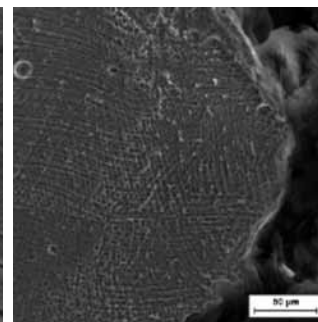
Stal chromowo – manganową pozyskano z osłony połączeń czołowych uzwojenia wirnika generatora (kołpaka). Fotografie przykładowych kołpaków wirników generatorów i badany wycinek elementu kołpaka zamieszczono na rysunkach 6 i 7.

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



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

Fig. 8. Structure of G18H18 steel in the material (till damage)



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

Fig. 9. Structure of G18H18 subjected to additional cold bending

Próbki do badań

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

Próbki poddano obciążeniom zmęczeniowym w temperaturze otoczenia 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.

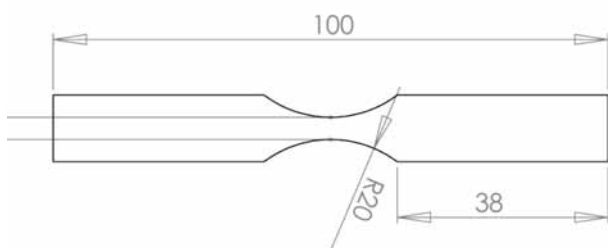
Numery próbek, wartości obciążeń mechanicznych oraz liczbę cykli i odkształcenia podano w tabelicy IV.

Tablica IV. Charakterystyka wprowadzonych obciążeń mechanicznych

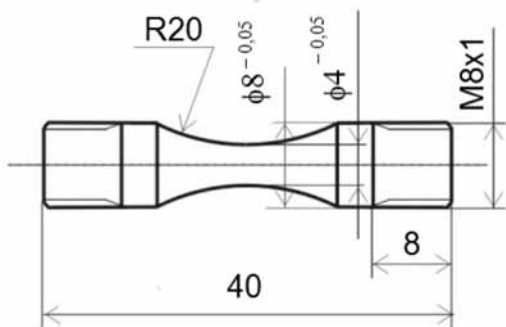
Table IV. Characteristic of mechanical loads

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	
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

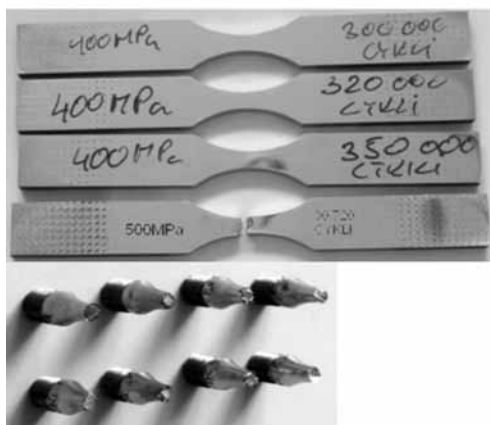
Próbki płaskie oznaczono literą P, cylindryczne literą K, a próbki rozciągane literą D.



Rys. 10. Kształt i wymiary próbki płaskiej
Fig. 10. Shape and dimensions of flat sample



Rys. 11. Kształt i wymiary próbki klepsydrycznej
Fig. 11. Shape and dimensions of cylindrical sample



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

Fig. 12. Examples of flat and cylindrical samples after fatigue strength test

Pomiar wpływu odkształceń plastycznych i zmęczeniowych 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, umożliwiający natomiast pomiar z rozdzielczością do $10^{-5} \mu_r$,

Tablica V. Wyniki pomiaru przenikalności magnetycznej
Table V. Magnetic permeability measurements results

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		160
K2	240		240
K3	260		260
K4	200		200

Tablica VI. Wyniki pomiaru indukcji magnetycznej
Table VI. Magnetic induction measurements results

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

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 badań przedstawione w opracowaniu potwierdzają możliwość wykorzystywania magnetyzmu w ocenie degradacji materiału [1÷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.

zastosowano ze względu na stabilność strukturalną stali chromowo – manganowej.

Wyniki pomiarów zamieszczono w poniższych tablicach V i VI.

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

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., Cząstkiewicz Z.: Pomiary magnetyczne stali paramagnetycznych, PAK, Pomiary Kontrola Automatyka, IV/2009, s. 229-232.
- [3] Żurek Z.H.: Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych 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.
- [5] Dobosiewicz J., Adamek J.: Ocena stanu kołpaków wirników turbogeneratorów, Energetyka 3/2006.

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.

W następnym numerze

Paweł Cegielski, Andrzej Kolasa, Krzysztof Skrzyniecki, Paweł Kołodziejczak

Komputerowy system do badań właściwości statycznych i dynamicznych źródeł energii elektrycznej do spawania łukowego

Aneta Ziewiec, Paweł Zbroja, Edmund Tasak

Skłonność do pęknięć gorących austenitycznej stali Super 304H przeznaczonej do pracy w podwyższonej temperaturze

Krzysztof Pańcikiewicz, Sławomir Kwiecień, Edmund Tasak

Właściwości połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) po obróbce cieplnej

Anthony B. Murphy

Wpływ oparów metalicznych na spawanie łukowe – część 1

Jerzy Kozłowski

Certyfikacja zakładowej kontroli produkcji wg EN 1090-1 na przykładzie Kromiss-Bis