

Maciej Roskosz^{1*}, Krzysztof Fryczowski², Jerzy Kwaśniewski¹, Jakub Janisz¹

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

²Politechnika Śląska, Gliwice

Identyfikacja stopnia deformacji plastycznej stali X2CrNi18-9 na podstawie zmian parametrów połowego efektu Barkhausena

Identification of the plastic deformation degree of X2CrNi18-9 steel based on changes of the Barkhausen noise parameters

ABSTRACT

In austenitic chromium - nickel steels under the influence of cold working, a change of dislocation structure occurs, as a result of which metastable austenite undergoes partial transformation into martensite ϵ and ferromagnetic martensite α' . For samples made of austenitic X2CrNi18-9 steel a significant influence of the degree of plastic deformation on the parameters of the Barkhausen noise was found. Quantitative correlations between the degree of plastic deformation of the X2CrNi18-9 steel and modules of extremes values of envelope were developed. These correlations can be used as calibration curves in reverse problems of non-destructive testing.

Keywords: X2CrNi18-9 steel; Barkhausen effect; cold working; inverse problems of non-destructive testing

STRESZCZENIE

W austenitycznych stalach chromowo-niklowych pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno następuje zmiana struktury dyslokacyjnej, w wyniku czego metastabilny austenit przechodzi częściową przemianę w martenzyt ϵ oraz ferromagnetyczny martenzyt α' . Dla próbek ze stali austenitycznej X2CrNi18-9 stwierdzono znaczący wpływ stopnia deformacji plastycznej na parametry połowego efektu Barkhausena. Uzyskane korelacje ilościowe pomiędzy stopniem deformacji plastycznej stali X2CrNi18-9 a modułem wartości maksymalnych obwiedni U_{ENV} wykazują możliwość wykorzystania ich przy rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych badań nieniszczących.

Słowa kluczowe: Stal X2CrNi18-9; efekt Barkhausena; odkształcenie plastyczne; zagadnienie odwrotne badań nieniszczących

1. Wprowadzenie i cel badań

W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania zmierzające do opracowania metod określania wpływu odkształcenia na zimno [1 - 3], zmęczenia mechanicznego [4, 5] oraz pełzania [6] na stan i własności elektromagnetyczne stali austenitycznych. Jako sygnały diagnostyczne wykorzystuje się wielkości opisujące pętlę histerezy magnetycznej, prądy wirowe, parametry opisujące efekt Barkhausena oraz zmiany anizotropii własności elektromagnetycznych. Zmiany tych parametrów wynikają ze związków pomiędzy stanem mikrostruktury, wielkością ziaren i gęstością dyslokacji a własnościami elektromagnetycznymi tworzyw.

W wysokostopowych stalach chromowo-niklowych typu 18-8, zależnie od stężenia Cr i Ni oraz innych dodatków stopowych, w temperaturze pokojowej występuje struktura austenityczna, może też pojawiać się pewna zawartość ferromagnetycznego ferrytu δ .

Stale austenityczne są materiałami szeroko stosowanymi, a występująca w nich odkształceniowa przemiana martenzytowa może mieć zarówno pozytywne następstwa, powodując umocnienie materiału, jak i niepożądane, powodując spadek odporności na korozję oraz pojawienie się fazy ferromagnetycznej [7-13].

Austenityczne stale chromowo-niklowe pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno ulegają znacznemu

umocnieniu, zależnie od składu chemicznego, wielkości gniotu i temperatury odkształcenia. Pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno następuje zmiana struktury dyslokacyjnej, w wyniku czego metastabilny austenit przechodzi częściową przemianę w martenzyt ϵ oraz ferromagnetyczny martenzyt α' o strukturze regularnej przestrzennie centrowanej [11-13]. Mechanizmy tych przemian opisano w [13-15].

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule była analiza możliwości ilościowej oceny stopnia deformacji plastycznej próbek płytowych ze stali X2CrNi18-9 na podstawie wielkości ilościowo opisujących połowy efekt Barkhausena.

2. Szczegóły badań

Badano próbki płytowe ze stali austenitycznej X2CrNi18-9 (EN 10088-1, grupa materiałowa 1.4307). Skład chemiczny stali pokazano w tab. 1. Geometrię badanych próbek przedstawiono na rys. 1. Uzyskane w trakcie badań relacje pomiędzy odkształceniem względnym ϵ , a naprężeniem inżynierskimi σ zaprezentowano na rys. 2.

Skład fazowy badanej stali określono, posługując się kryteriami Schaefflera i stwierdzono, że stal X2CrNi18-9 posiada strukturę austenityczną z udziałem ferrytu i martenzytu (przy szybkim chłodzeniu dla spoin).

Badane próbki były obciążane za pomocą maszyny wytrzymałościowej Galdabini Sun 10P. Po osiągnięciu zadanych obciążeń próbki były odciążane i badane poza maszyną. Jako

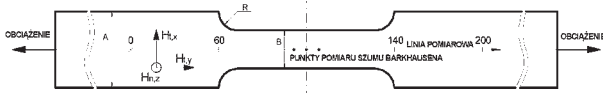
*Autor korespondencyjny. E-mail: mroskosz@agh.edu.pl

miarę odkształcenia plastycznego ε_p przyjęto odkształcenie plastyczne próbki badanej na odcinku pomiędzy 60-tym a 140-tym punktem pomiarowym, pierwotnie o długości 80 mm (rys. 1).

Tab. 1. Skład chemiczny stali X2CrNi18-9.

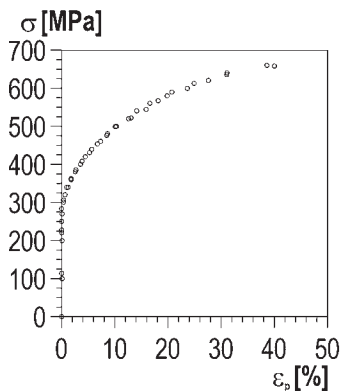
Tab. 1. Chemical composition of X2CrNi18-9 steel.

Pierwiastek	% masowy
C max	0,02
Si max	0,45
Mn max	1,43
P max	0,031
S	0,008
N max	-
Cr	18
Mo	0,3
Nb	0,017
Ni	7,94
Ti	0,01



Rys. 1. Próbkę do badań, A=40 mm, B=20 mm, R=10 mm.

Fig. 1. Experimental sample, A=40 mm, B=20 mm, R=10 mm.



Rys. 2. Relacje pomiędzy odkształceniem trwałym ε_p a rozciągającym naprężeniem inżynierskim σ dla badanej stali X2CrNi18-9.
Fig. 2. Relationship between plastic strain ε_p and engineering tensile stress σ for X2CrNi18-9.

Pomiary szumu Barkhausena prowadzono w każdej próbce w trzech punktach pomiarowych (patrz rys. 1) w stanie po odciążeniu. W każdym punkcie dokonywano dwóch pomiarów, dla dwóch kierunków magnesowania:

- kierunek X - prostopadły do osi obciążenia
- kierunek Y - współosiowy z obciążeniem.

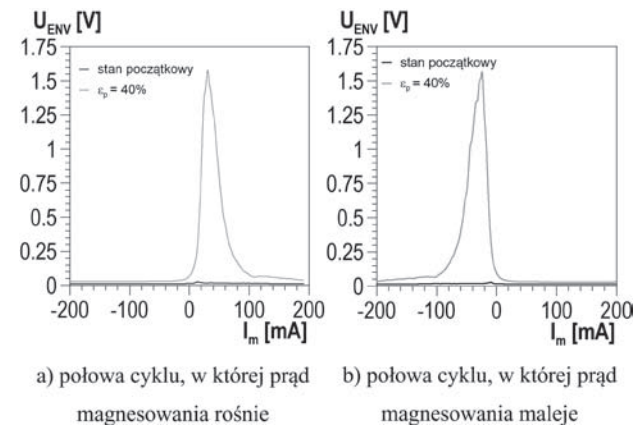
Próbki były magnesowane prądem, którego sygnał charakteryzował się kształtem symetrycznego trójkąta o częstotliwości ok. 2 Hz i amplitudzie 200 mA a częstotliwość próbkowania sygnału wynosiła 800 kHz.

W prezentowanych wynikach skupiono się na wynikach uzyskanych dla punktu środkowego.

3. Wyniki badań i ich analiza

Przykładowe fragmenty obwiedni połowego efektu Barkhausena zmierzono na powierzchni badanych próbek

dla stanu początkowego i dla znacznych odkształceń plastycznych pokazano na rys. 3a i 3b.

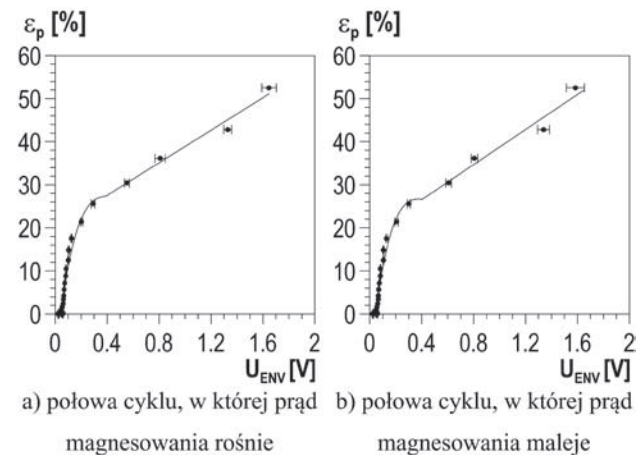


Rys. 3. Fragmenty obwiedni szumu Barkhausena w stanie początkowym i w stanie znacznego odkształcenia plastycznego uzyskane dla stali X2CrNi18-9.

Fig. 3. Barkhausen noise envelopes in the initial state and in state of significant plastic deformation - X2CrNi18-9 steel: a) half of the cycle in which the magnetizing current rises; b) half of the cycle in which the magnetizing current decreases.

Widoczna jest bardzo wyraźna różnica w przebiegu fragmentów obwiedni odpowiadających stanowi początkowemu i stanowi znacznego odkształcenia plastycznego (rys. 3a i 3b), co świadczy o znaczących zmianach struktury stali X2CrNi18-9 na skutek odkształcenia plastycznego na zimno. Kolejne analizy przeprowadzono dla wielkości ilościowo opisujących połowy efekt Barkhausena [16]. Skupiono się na analizie takich wielkości, jak:

- energia szumu Barkhausena;
- punkty charakterystyczne obwiedni (ekstremum napięcia U_{ENV} oraz prąd magnesowania odpowiadający ekstremum napięcia).



Rys. 4. Zależność odkształceń plastycznych od wartości ekstremów modułów obwiedni dla stali X2CrNi18-9.

Fig. 4. Relationship between plastic deformation and modules of extremes values of envelope for X2CrNi18-9 steel: a) half of the cycle in which the magnetizing current rises; b) half of the cycle in which the magnetizing current decreases.

Najbardziej jednoznaczne korelacje diagnostyczne (szczególnie w zakresie małych odkształceń plastycznych)

otrzymano dla ekstremum napięcia obwiedni U_{ENV} , rozpa-
trując oddzielnie połowę cyklu, w której prąd magnesowania
rośnie oraz połowę cyklu, w której maleje. Otrzymane za-
leżności pokazano odpowiednio na rysunkach: 4a – połowa
cyklu magnesowania, w której prąd wzrasta, 4b – połowa
cyklu magnesowania, w której prąd maleje.

Przedstawione na rysunkach 4a i 4b zależności opisano
funkcjami, które można wykorzystać jako krzywe kalibra-
cyjne w zagadnieniach odwrotnych badań nieniszczących,
dotyczących w tym przypadku wyznaczenia stopnia defor-
macji plastycznej stali X2CrNi18-9 na podstawie wartości
ekstremum modułu obwiedni U_{ENV} :

- połowa cyklu, w której prąd magnesowania rośnie:
dla $U_{ENV} < 0,4$

$$\varepsilon \cong -10,44 + 277,06 \times U_{ENV} - 687,81 \times U_{ENV}^2 + 579,19 \times U_{ENV}^3$$

$$\text{dla } U_{ENV} \geq 0,4$$

$$\varepsilon \cong 19,99 + 18,9 \times U_{ENV}$$

- połowa cyklu, w której prąd magnesowania maleje:
dla $U_{ENV} < 0,4$

$$\varepsilon \cong -10,34 + 273,22 \times U_{ENV} - 668,55 \times U_{ENV}^2 + 541,84 \times U_{ENV}^3$$

$$\text{dla } U_{ENV} \geq 0,4$$

$$\varepsilon \cong 18,39 + 20,37 \times U_{ENV}$$

4. Podsumowanie

Istotne znaczenie w diagnostyce i zmianach sygnału
pomiarowego badanych stali austenitycznych ma obecność
i zmiany ilościowe tworzącej się fazy ferromagnetycznej pod-
czas odkształcenia plastycznego. W stali X2CrNi18-9 faza
ferromagnetyczna – ferryt δ w niewielkiej ilości występuje
już w stanie nieodkształconym, a następnie w miarę wzrostu
odkształcenia i po przekroczeniu pewnego odkształcenia
krytycznego występuje wyraźny przyrost sumarycznego
udziału faz ferromagnetycznych na skutek występowania
przemiany martenzytycznej i tworzenia martenzytu α' .

Przedstawiono wyniki pomiarów połowego efektu
Barkhausena na powierzchni próbek ze stali austenitycznej
X2CrNi18-9 o różnych stopniach trwałej deformacji wska-
tek osiowego rozciągania. Stwierdzono znaczący wpływ
stopnia deformacji plastycznej na parametry połowego
efektu Barkhausena. Opracowano ilościowe korelacje po-
między stopniem deformacji plastycznej stali X2CrNi18-9
a wartościami ekstremum modułu obwiedni U_{ENV} . Korelacje
te można wykorzystać jako krzywe kalibracyjne w zagadnie-
niach odwrotnych badań nieniszczących.

5. Literatura/References

- [1] P. Novotny, P. Macha, P. Sajdl, "Diagnostics of austenitic steels by coercivity mapping", *NDT&E International*, vol. 41, pp.530-533, 2008.
- [2] D. O'Sullivan, M. Cotterell, I. Meszaros, "The characterisation of work-hardened austenitic stainless steel by NDT micro-magnetic techniques", *NDT&E International*, vol. 37, pp. 265-269, 2004.
- [3] I. Meszaros, J. Prohaszka, "Magnetic investigation of the effect of a-martensite on the properties of austenitic stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 161, pp. 162-168, 2005.
- [4] Z. H. Żurek, S. Sieradzki, J. Adamek, "Ocena stanu technicznego kołpaków generatorów na podstawie pomiarów magnetycznych niestabilności austenitu dla stali G18H18", *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 13, pp. 8-12, 2011.
- [5] A. Vincent i inni, "Magnetic Barkhausen noise from strain-induced martensite during low cycle fatigue of 304L austenitic stainless steel", *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 4579-4591, 2005.
- [6] Augustyniak, B., Chmielewski, M., Sablik, M.J., Augustyniak, M., Walker, S., "A new eddy current method for nondestructive testing of creep damage in austenitic boiler tubing", *Nondestructive Testing and Evaluation 24 (1-2) 2009*, pp. 121-141
- [7] M. Roskosz, S. Griner, P. Sosnowski, "Analiza możliwości oceny stopnia deformacji plastycznej stali austenitycznych przy użyciu metody magnetycznej pamięci metalu", *Przegląd Spawalnictwa*, vol.12, pp.130-135, 2013.
- [8] J. Echigoaya, T. Ueda, X. Li, "Martensitic transformation due to plastic deformation and magnetic properties in SUS 304 stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, pp. 213-216, 2001.
- [9] W. Babiński, S. Griner, "Badania drutów ze stali austenitycznych chromowo niklowych przeznaczonych na sita tkane", *Prace Instytutu Efektywności Wykorzystania Materiałów*, vol. 1/2, pp. 25-30, 1980.
- [10] E. Nagy, V. Mertinger, F. Tranta, J. Sólyom, "Deformation induced martensitic transformation in stainless steels", *Materials Science and Engineering A*, pp. 308-313, 2004.
- [11] Hong Chul Shin, Tae Kwon Ha, Young Won Chang, "Kinetics of deformation induced martensitic transformation in a 304 stainless steel", *Scripta Materialia*, pp. 823-829, 2001.
- [12] M. Milad, N. Zreiba, F. Elhalouanin, "The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, pp. 80-85, 2008.
- [13] B. Cina, "Effect of Cold Working on the g-a Transformation In Some Fe-Ni-Cr Alloys", *Journal of the Iron and Steel Institute* vol. 406, 1977.
- [14] G. Blanc, R. Tricot, "Transformations martensitiques dans les aciers inoxydables austenitiques Fe-Cr-Ni", *Mem. Sci. Rev. Metall*, vol. 527, pp. 7-8, 1973.
- [15] J. Adamczyk, K. Szkaradek, "Materiały metalowe dla energetyki jądrowej", *Wyd. Pol. Śl. Gliwice*, pp. 236, 1992.
- [16] K. Fryczowski, M. Roskosz, "Metody ilościowej analizy Szumu Barkhausena", *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88, pp. 133-138, 2016.