

Wpływ naprężeń czynnych i resztkowych na własne pole magnetyczne ferromagnetyków

The impact of active and residual stress on the residual magnetic field of ferromagnetics

Streszczenie

Wpływ naprężeń na zmiany namagnesowania jest jednym z najbardziej złożonych zagadnień magnetyzmu. W artykule analizowano wpływ naprężeń czynnych i resztkowych na zmiany własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR mierzonego na powierzchni elementu oraz możliwości wykorzystania tych zmian jako sygnału diagnostycznego pozwalającego na określenie stanu naprężeń. Stwierdzono wpływ zarówno naprężeń czynnych jak i resztkowych na rozkład składowych WMPR. Wykorzystanie pomiarów WMPR do oceny naprężeń czynnych na obecnym etapie badań wydaje się problematyczne. Ocena makroskopowych naprężeń resztkowych na podstawie pomiarów WMPR jest zagadnieniem nad którym kontynuowane są prace badawcze.

Abstract

The impact of stress on changes in magnetisation is one of the most complex issues of magnetism. The paper presents an analysis of the impact of active and residual stress on the changes in the residual magnetic field (RMF) measured on the surface of the component, and of the possibility of using the changes as a diagnostic signal which allows the determination of the stress state. It was found that both active and residual stress had an impact on the distribution of the RMF components. The use of the RMF measurements to assess active stress seems debatable at the present stage of research development. Research work now continues on the assessment of macroscopic residual stress based on the RMF measurements.

Wstęp

Wpływ naprężeń na zmiany namagnesowania jest jednym z najbardziej złożonych zagadnień magnetyzmu. Na skutek działania efektu magnetosprężystego, naprężenia mechaniczne wpływają na anizotropię energii domen magnetycznych, najczęściej powodując zmiany przepuszczalności. Kierunek tej anizotropii zależy od magnetostrykcji. Dla materiałów z dodatnią magnetostrykcją momenty magnetyczne dążą do ustawienia się równoległe do kierunku naprężenia rozciągającego a prostopadłe do ściskającego. W materiałach o ujemnej magnetostrykcji zachodzą zjawiska przeciwne, momenty magnetyczne dążą do ustawienia

się prostopadłe do kierunku naprężenia rozciągającego a równoległe do ściskającego [1, 2].

Wpływ jednoosiowych naprężeń na strukturę domenową można porównać z działaniem równoważnego naprężeniu pola magnetycznego o natężeniu H_{σ}

$$H_{\sigma}(\varphi) = \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \left(\frac{d\lambda}{dM} \right)_T (\cos^2 \varphi - \nu \sin^2 \varphi) \quad (1)$$

gdzie: σ – naprężeniem, λ – magnetostrykcja, μ_0 – przenikalnością magnetyczną próżni, M – namagnesowaniem, φ – kątem pomiędzy osią naprężenia a kierunkiem pola magnetycznego H_{σ} , ν – współczynnik Poisson'a [1÷5].

Dla opisu wpływu złożonego stanu naprężenia wprowadzono pojęcie naprężenia ekwiwalentnego, czyli fikcyjnego naprężenia jednoosiowego, którego amplituda doprowadzi do tej samej zmiany podatności jak rzeczywiste wieloosiowe naprężenia [6÷11]. Zagadnienia wpływu złożonego stanu naprężeń na zmiany namagnesowania są to zagadnienia, których

opis i modelowanie, ze względu na potencjalne możliwości zastosowań do pomiaru naprężeń, są przedmiotem badań [6÷11].

Celem prowadzonych badań była analiza wpływu naprężeń czynnych i resztkowych na zmiany własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR mierzonego na powierzchni elementu oraz określenie możliwości wykorzystania tych zmian jako sygnału diagnostycznego pozwalającego na określenie stanu naprężeń.

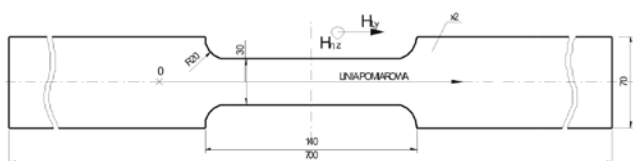
Wyniki badań

Badano próbki z niskostopowej stali węglowej o postaci geometrycznej pokazanej na rysunku 1. Skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe materiału próbki zawarto w tabelicy. Początkowy stan namagnesowania wynikał z historii ich przygotowania i nie był jednorodny.

Obciążenia próbek zadawano na maszynie wytrzymałościowej Galdabini Sun 10P. Pomiarów dokonywano pod obciążeniem oraz po odciążeniu na próbce znajdującej się w maszynie wytrzymałościowej.

Pomiary WMPR prowadzono z krokiem 1 mm wzdłuż linii pomiarowej pokazanej na rysunku 1. Do pomiarów wykorzystywano magnetometr TSC-1M-4 z czujnikiem pomiarowym TSC-2M produkcji firmy Energodagnostika Co. Ltd Moskwa. W wyniku pomiarów uzyskano wartości 2 składowych natężenia WPM na powierzchni próbki (rys. 1):

- $H_{T,Y}$ – składowa styczna mierzona w kierunku równoległym do działania obciążenia,
- $H_{N,Z}$ – składowa normalna.



Rys. 1. Próбка do badań
Fig. 1. Sample for testing

Tablica. Skład chemiczny (%) i właściwości wytrzymałościowe materiału próbek

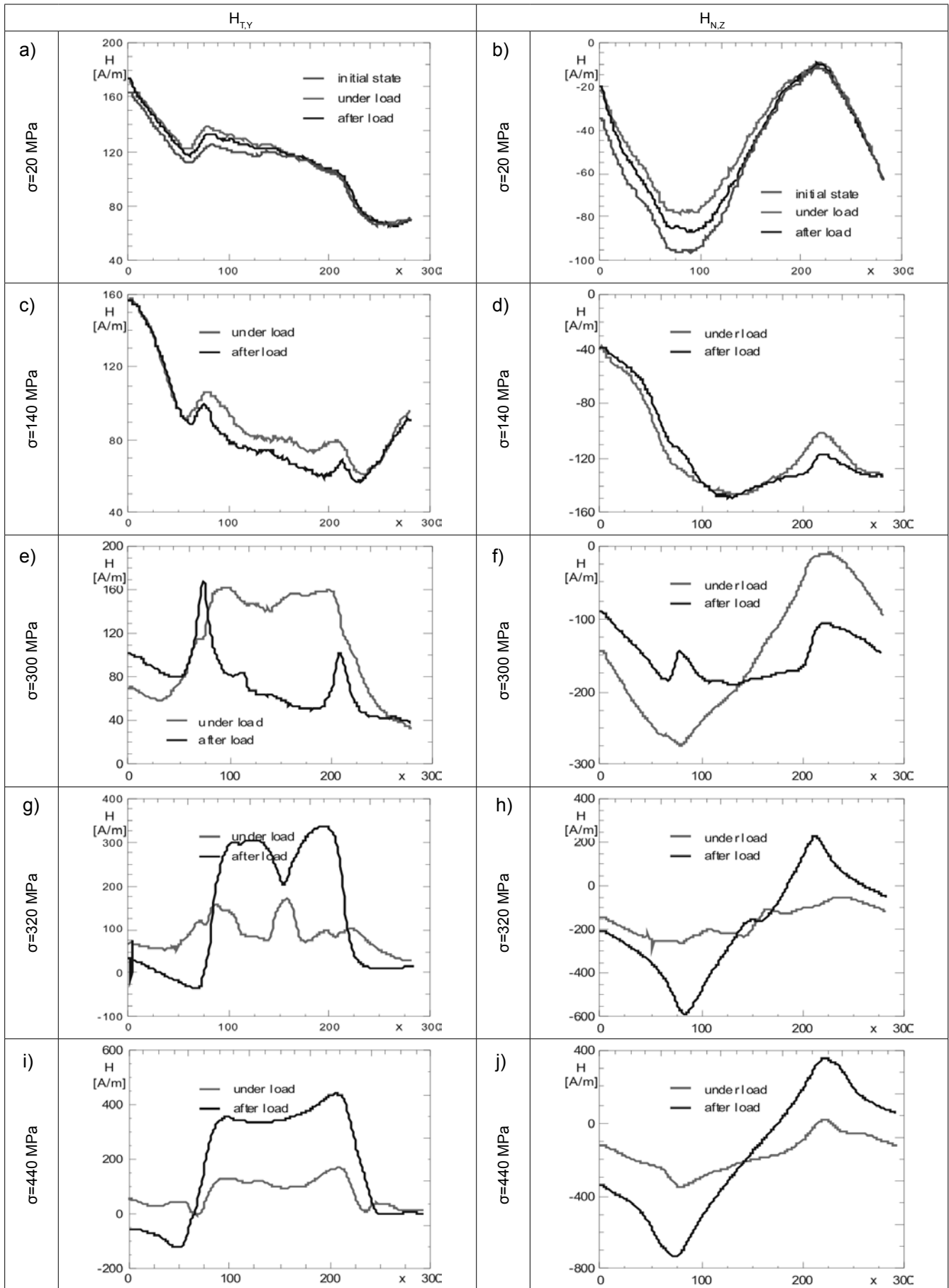
Table. Chemical composition (%) and mechanical properties of sample material

C	Si	Mn	Cr	V	P	S	R_e MPa	R_m MPa
max 0,22	0,1- 0,35	max 1,1	0,3	0,3	0,05	max 0,05	320	380- 520

Dyskusja

Wybrane, reprezentatywne wyniki pomiarów WMPR wzdłuż linii pomiarowej (rys. 1) przeprowadzonych na powierzchni próbek pod obciążeniem i po odciążeniu pokazano na rysunkach 2a÷2j. Rozkłady składowych WMPR w stanie początkowym (linie jaśniejsze na rys. 2a, 2b) są wynikiem historii przygotowania próbek oraz wpływu geometrii na wyciek strumienia magnetycznego. Zakładając że wpływ geometrii jest niezmienny, obserwowane zmiany namagnesowania są wynikiem działania odkształceń i naprężeń. W początkowym zakresie odkształceń sprężystych obserwowane zmiany namagnesowania są niewielkie (rys. 2a, b). Trudno w tym przypadku mówić o wykorzystaniu ich jako sygnału diagnostycznego. Po przekroczeniu pewnego poziomu naprężeń (ok. 100÷120 MPa) wartości WMPR zmierzone pod obciążeniem i po jego zdjęciu zaczynają się wyraźnie różnić. Zaczyna być również wyraźnie widoczny wpływ zróżnicowanego poziomu naprężeń wynikający z różnicy przekrojów. Dodatkowo w okolicach miejsca zmiany przekroju pojawia się zaburzenie przebiegów składowych WMPR w postaci lokalnych ekstremów składowej $H_{T,Y}$ (rys. 2c). Wraz ze zbliżaniem się z naprężeniami do granicy plastyczności zaburzenia te są coraz większe (rys. 2e) i zaczynają być widoczne również na przebiegach składowej normalnej $H_{N,Z}$ (rys. 2f). Przekroczenie granicy plastyczności w części próbki o mniejszym przekroju poprzecznym widoczne jest w obrazie składowej stycznej $H_{T,Y}$ zmierzony po odciążeniu w postaci obszaru o ostrych granicach i wartościach bardzo różniących się od pozostałej części próbki (rys. 2g, 2i). Z kolei w obrazie składowej normalnej $H_{N,Z}$ obszar odkształcony plastycznie charakteryzuje się lokalnymi ekstremami na jego granicach oraz innym trendem zmian (intensywność, kierunek) niż pozostała część próbki (rys. 2h, 2j). Dalszy wzrost stopnia odkształcenia plastycznego powoduje zwiększenie zmian składowej stycznej $H_{T,Y}$ w miejscu zmiany przekroju oraz zwiększenie różnicy wartości składowej normalnej $H_{N,Z}$ pomiędzy lokalnymi ekstremami występującymi w miejscach zmiany przekroju. Na uwagę zasługuje fakt, że wartości składowych WMPR po odciążeniu w stanie plastycznym osiągają wartości znacząco różniące się od wartości pod obciążeniem. W przypadku pomiarów pod obciążeniem przekroczenie granicy plastyczności prowadzi do spłaszczenia ich rozkładu.

Po przekroczeniu określonego poziomu naprężeń w okolicach zmiany przekroju próbki występują nierównomierne odkształcenia plastyczne, które po odciążeniu powodują pojawienie się makroskopowych naprężeń resztkowych. Obszary ich występowania pokrywają się z opisanymi powyżej obszarami anomalii (lokalne ekstrema) w przebiegach składowych WMPR. Wskazuje to na związek pomiędzy naprężeniami resztkowymi a rozkładami składowych WMPR.



Rys. 2. Rozkłady składowych WMPR próbek pod obciążeniem i po odciążeniu dla różnych poziomów obciążenia
 Fig. 2. Distributions of RMF components of samples under load and after it for different levels of loads

Podsumowanie

Wykorzystanie pomiarów WMPR do oceny naprężeń czynnych na obecnym etapie badań wydaje się problematyczne. Natomiast ocena naprężeń resztkowych jest zagadnieniem nad którym kontynuowane są prace badawcze. Najnowsze wyniki prowadzonych

badań nad wykorzystaniem pomiarów WMPR do oceny naprężeń resztkowych pokazano w [12]. Stwierdzono relacje pomiędzy naprężeniami resztkowymi I rzędu a gradientami składowych WMPR. Opracowano algorytm oceny zredukowanych naprężeń resztkowych.

Literatura

- [1] Mierczak L., Jiles D. C., IEEE TRANS. G.: ON MAGN., Vol. 47, nr. 2/2011 s. 459-65.
- [2] Tomohiro Yamasaki i inni, NDT&E International, Vol. 29, No. 5/ 1996 s. 263-268.
- [3] Kaminski D.A. i inni: J. of Magnetism and Magnetic Materials 104-107, 1992, 382 384
- [4] Lu Li, David C. Jiles IEEE TRANS. ON MAGNETICS, Vol. 39, nr. 5, 09 2003 3037.
- [5] D. C. Jiles, J. Phys. D, Appl. Phys., vol. 28, s. 1537, 1995.
- [6] K. Kashiwaya, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30, s. 2932, 1991.
- [7] C. S. Schneider, J. M. Richardson, J. Appl. Phys., vol. 53, s. 8136, 1982.
- [8] M.J. Sablik i inni Journal of Magnetism and Magnetic Materials 132 1994, s. 131-148.
- [9] J. Pearson i inni IEEE TRANS. ON MAGNETICS, VOL. 36, nr. 5, 09 2000, s. 3251-3.
- [10] Laurent Daniel, Olivier Hubert IEEE TRANS. ON MAGNETICS, Vol. 46, nr. 8, AUGUST 2010 s. 3089-92.
- [11] Daniel Peter Bulte IEEE TRANS. ON MAGNETICS, Vol. 45, nr. 1, 01 2009 83.
- [12] M. Roskosz, M. Bieniek, NDT&E International, doi:10.1016/j.ndteint.2011.09.007.

Wykaz recenzentów artykułów naukowych opublikowanych w miesięczniku naukowo-technicznym Przegląd Spawalnictwa w 2011 roku

Prof. Andrzej Ambroziak
Dr inż. Piotr Białucki
Prof. Julian Deputat
Dr inż. Krzysztof Dragan
Prof. Kazimierz Granat
Dr hab. inż. Dariusz Golański
Prof. Andrzej Gruszczyk
Grzegorz Hottowy
Prof. Andrzej Kolasa
Dr inż. Paweł Kołodziejczak
Prof. Jerzy Łabanowski
Prof. Mirosław Łomozik
Dr Sławomir Mackiewicz
Dr Wojciech Manaj

Prof. Zbigniew Mirski
Dr inż. Jerzy Niagaj
Prof. Jerzy Nowacki
Dr inż. Ryszard Pakos
Dr inż. Adam Pietras
Prof. Jan Pilarczyk
Prof. Zbigniew Ranachowski
Dr inż. Adam Sajek
Prof. Jacek Senkara
Prof. Jacek Słania
Prof. Edmund Tasak
Prof. Eugeniusz Turyk
Prof. Józefa Żurek