

Badania wpływu warunków magnetycznych w trakcie procesu obciążania na własne magnetyczne pole rozproszenia próbek ferrytycznych

Experimental studies of the impact of magnetic conditions during loading process on residual magnetic field in samples made of ferritic steel

Streszczenie

Przeprowadzono badania i analizę wpływu warunków magnetycznych w trakcie procesu obciążania na składowe WMPR i ich gradienty. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych na powierzchni próbek płytowych ze stali ferrytycznej do głębokiego tłoczenia. Warunki magnetyczne modyfikowano, zmieniając sposób mocowania próbek w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Próbki mocowano bezpośrednio w szczękach lub pośrednio z wykorzystaniem przekładek ze stali austenitycznej, powodując zmianę reluktancji w obwodzie magnetycznym utworzonym pomiędzy próbką a maszyną wytrzymałościową. Stwierdzono znaczny wpływ warunków magnetycznych na otrzymywane wartości WMPR w badanych elementach. Różnice w rozkładach składowych WMPR wzdłuż próbki mają głównie charakter ilościowy, zachowując jakościowe podobieństwo. Stanowi to dodatkowy problem algorytmów ilościowej oceny stanu elementów maszyn, których warunki magnetyczne eksploatacji są najczęściej trudne do określenia.

Słowa kluczowe: magnetyczne pole rozproszenia, stal ferrytyczna

Abstract

The tests and analysis of the impact of the magnetic conditions during loading process on the residual magnetic field (RMF) components and their gradients were performed. The paper presents the results of measurements on the surface of plate samples made of ferritic steel to deep drawing. The magnetic conditions were modified by changing the method of fixing the samples in the grips of the testing machine. Samples were fixed directly in the grips or indirectly using the austenitic steel spacers, causing a change in the reluctance of the magnetic circuit formed between the sample and the testing machine. It was found a significant impact of the magnetic conditions on the RMF components values in testing elements. Differences in the distribution of RMF components along the samples are mainly quantitative, maintaining qualitative similarity. This is an additional problem of algorithms of the quantitative evaluation for machine elements whose magnetic conditions of exploitation are the most difficult to determine.

Keywords: residual magnetic field, ferritic steel

Dr inż. Maciej Roskosz, mgr inż. Krzysztof Fryczowski, mgr inż. Marceli Majcherczyk, mgr inż. Piotr Kuśmider – Politechnika Śląska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: maciej.roskosz@polsl.pl

Wstęp

Metoda magnetycznej pamięci metalu MPM wykorzystuje jako sygnał diagnostyczny składowe wektora natężenia własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR (oraz ich gradienty) zmierzone na powierzchni badanego obiektu [1]. O WMPR elementu decydują cechy konstrukcyjne [2], historia obciążeń (eksploatacji) [3] oraz warunki magnetyczne, które występują zarówno w trakcie zadawania obciążeń, jak i podczas pomiaru WMPR.

Wpływ cechy geometrycznej elementu na wartości składowych WMPR i ich gradientów analizowano w [4]. Wykazano możliwość opracowania korelacji pomiędzy naprężeniem i składową styczną WMPR. W korelacji tej dominuje wpływ historii obciążenia, choć wpływ geometrii też jest widoczny. Stwierdzono również znaczny wpływ geometrii próbek na zmiany wartości gradientów wskutek działania naprężeń (czynnych i reszkowych) zarówno w ujęciu ilościowym jak i jakościowym.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu warunków magnetycznych w trakcie procesu obciążania próbek ze stali ferrytycznej na składowe WMPR i ich gradienty mierzone na powierzchni próbek ferrytycznych. Analiza wyników tych badań będzie kolejnym krokiem w kierunku opracowania ogólnej metodyki badań z wykorzystaniem WMPR, uwzględniającej istotne czynniki wpływające na WMPR.

Podstawy teoretyczne

W skali makroskopowej występują ścisłe związki pomiędzy własnościami mechanicznymi i magnetycznymi ferromagnetyków. Ferromagnetyk poddany działaniu pola magnetycznego zmienia zarówno swój stan namagnesowania, jak również swoje wymiary. Z kolei pod wpływem naprężeń mechanicznych w ferromagnetyku dochodzi do odkształceń, którym towarzyszy zmiana namagnesowania. Sprzężenie magnetomechaniczne można formalnie opisać zależnościami, w których tensor całkowitego odkształcenia ε jest wynikiem jednoczesnego działania naprężeń σ powodujących odkształcenia ε_σ oraz pola magnetycznego H wywołującego odkształcenia ε_H . Podobnie indukcja B jest sumą indukcji B_σ będącej skutkiem działania naprężeń i indukcji B_H wynikającej z pola magnetycznego H .

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_\sigma + \varepsilon_H = S\sigma + D^\sigma H \\ B &= B_\sigma + B_H = D^H\sigma + \mu H \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie D^σ i D^H to współczynniki magnetomechaniczne

Tablica I. Skład chemiczny i własności mechaniczne badanej stali
Table I. Chemical composition and mechanical properties of tested steel

C	Si	Mn	Cr	Cu	Al	V	W	P	S	R_e , MPa	R_m , MPa
0,046	<0,006	0,260	0,010	0,052	0,053	0,009	0,094	<0,002	0,019	150	310

wyznaczane odpowiednio przy stałych naprężeniach i stałym polu magnetycznym, S to macierz podatności. Natężenie WMPR w pobliżu obiektu ferromagnetycznego można opisać zależnością (2).

$$H(r) = H_a(r) + H_d(r) \quad (2)$$

gdzie H_a jest natężeniem zewnętrznego pola magnetycznego, a H_d jest natężeniem pola magnetycznego wywołanego namagnesowaniem ferromagnetyka. H_d nazywamy polem rozmagnesowania i opisuje je równanie (3).

$$H_d(r) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{-\nabla \cdot M(s)}{|r-s|^3} (r-s) dV(s) + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{n \cdot M(s)}{|r-s|^3} (r-s) dS(s) \quad (3)$$

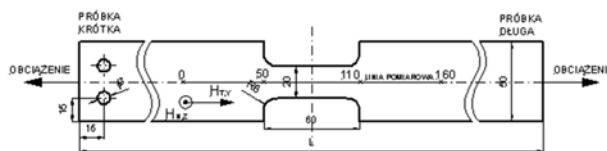
gdzie M jest magnetyzacją, V jest objętością, S jest polem powierzchni ferromagnetyka a s jest wektorem położenia dowolnego punktu wewnątrz lub na powierzchni ferromagnetyka. Wartości i rozkład magnetyzacji $M(s)$ skutkuje unikatowym rozkładem i wartościami natężenia pola magnetycznego $H(r)$.

Szczegóły badań

Badano dwa rodzaje próbek płytowych ze stali do głębokiego tłoczenia (skład chemiczny oraz własności mechaniczne podano w tabl. 1), których geometrię pokazano na rysunku 1. Próbki, przy jednakowej geometrii przewężenia i jednakowej szerokości poza przewężeniem, różniły się długością L oraz sposobem zamocowania w uchwytach maszyny wytrzymałościowej. Wykorzystano dwa rodzaje próbek:

- Próbki długie o długości $L = 520$ mm mocowane bezpośrednio w szczękach maszyny wytrzymałościowej,
- Próbki krótkie o długości $L = 280$ mm mocowane pośrednio w szczękach maszyny wytrzymałościowej za pomocą przekładek wykonanych ze stali austenitycznej przytwierdzonych do próbek przy użyciu połączeń śrubowych.

Zmiana w sposobie zamocowania próbek miała na celu modyfikację warunków magnetycznych podczas obciążania próbek poprzez zmianę reluktancji (oporności magnetycznej) w obwodzie magnetycznym utworzonym pomiędzy próbką i maszyną wytrzymałościową.



Rys. 1. Próbki do badań
Fig. 1. Experimental samples

Próbki obciążano do zadanej wartości siły rozciągającej, następnie odciążano i badano poza maszyną wytrzymałościową. Wszystkie próbki poddano takiej samej sekwencji narastających obciążeń rozciągających. Obciążanie przerywano w momencie pojawienia się widocznej szyjki przewężenia plastycznego.

Do badań wykorzystywano magnetometr TSC-1M-4 z głowicą pomiarową TSC-2M dostarczony przez Energo diagnostika Co. Ltd Moscow. Mierzono dwie składowe WMPR na powierzchni próbki (rys. 1):

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

Celem prowadzonych badań było określenie istotności wpływu szeroko rozumianych warunków magnetycznych panujących w trakcie działania obciążeń na WMPR elementu, które jest sygnałem diagnostycznym w metodzie magnetycznej pamięci metalu. Dodatkowo sprawdzono, czy metodyka magnetycznej pamięci metalu [6, 7] uwzględnia wpływ warunków magnetycznych, w trakcie eksploatacji badanych elementów, na wyniki ich oceny diagnostycznej.

Omówienie wyników badań

W analizie wyników skupiono się na pomiarach dotyczących stanów próbek, w których wskutek zadawanych obciążeń doszło do odkształceń plastycznych w obszarze zmniejszonego przekroju. Prezentowane wyniki są uśrednieniem pomiarów kilku próbek o takiej samej geometrii (próbki długie lub krótkie) dla danego stanu obciążenia.

Analiza składowych WMPR

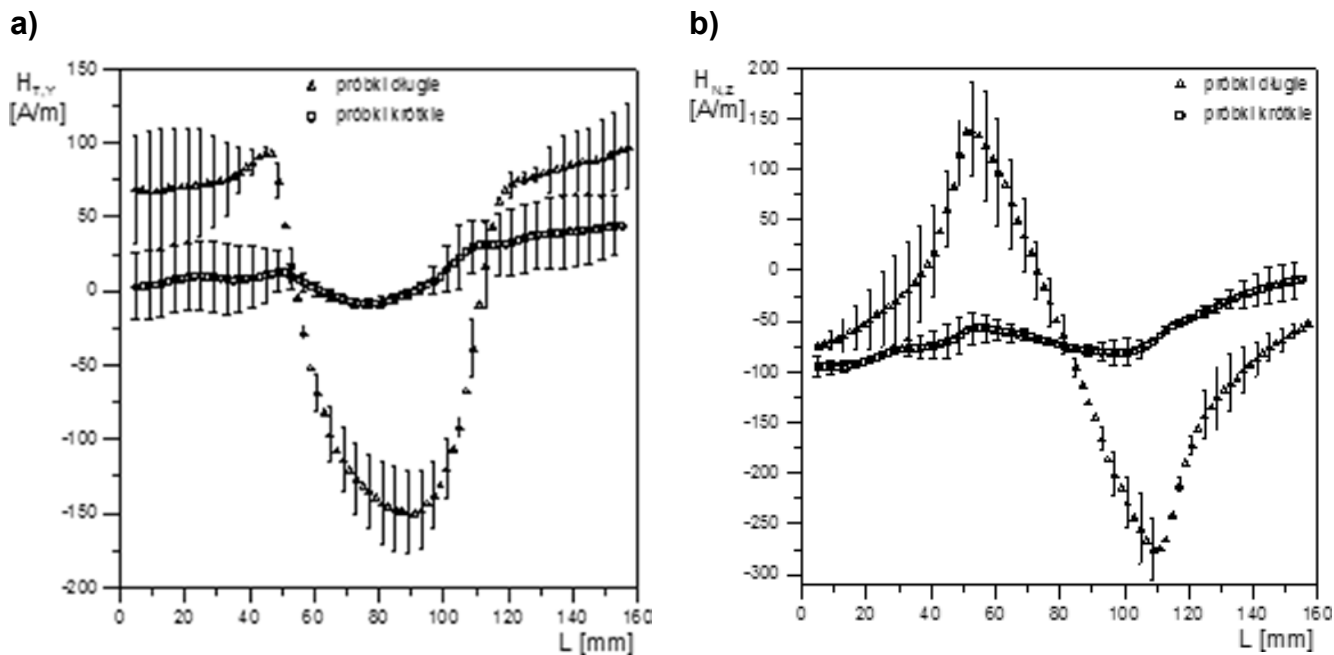
W analizie składowych WMPR uwzględniono dwa stany odkształcenia plastycznego próbek w obszarze zmniejszonego przekroju:

- stan równomiernych odkształceń plastycznych (rys. 2)
- stan nierównomiernych odkształceń plastycznych – z szyjką (rys. 3)

Rozkłady wzdłuż długości próbek dla składowej stycznej $H_{T,Y}$ przedstawiono na rysunkach 2a i 3a, a rozkłady dla składowej normalnej $H_{N,Z}$ na rysunkach 2b i 3b.

Pojawienie się odkształceń plastycznych w obszarze próbki o mniejszym przekroju powoduje, że w okolicy zmiany przekroju składowa styczna $H_{T,Y}$ gwałtownie zmienia swoją wartość, a dla składowej normalnej $H_{N,Z}$ następuje odwrócenie trendu zmian. Szerokie maksimum składowej stycznej $H_{T,Y}$ oraz dwa maksima składowej normalnej $H_{N,Z}$ są wynikiem efektu geometrycznego, mikrostrukturalnego oraz naprężeniowego. Spadek przenikalności magnetycznej wskutek odkształcenia plastycznego i pojawienia się ściskających naprężeń własnych w odkształconej plastycznie części próbki powoduje efekt wycieku strumienia magnetycznego, co w połączeniu z geometrią próbki skutkuje stwierdzonymi rozkładami składowych WMPR [3, 5].

Na rysunkach 2 i 3 widoczne są wyraźne, opisane powyżej, podobieństwa jakościowe dotyczące obszaru odkształconego plastycznie. Widać również jak znaczne są różnice ilościowe, wynikające z różnych warunków magnetycznych podczas procesu obciążania. Natomiast dla obszaru szyjki (odcinka $L \approx 90\text{mm}$ na rys. 3a i 3b), czyli obszaru zdeformowanego najbardziej, nawet jakościowe podobieństwa zanikają. W przypadku próbek krótkich, w rozkładzie obydwu składowych obszar szyjki charakteryzuje się lokalnym maksimum wartości. W próbkach



Rys. 2. Rozkłady składowych WMPR zmierzone wzdłuż linii pomiarowej – stan równomiernych odkształceń plastycznych w przewężeniu: a) składowa styczna $H_{T,Y}$; b) składowa normalna $H_{N,Z}$

Fig. 2. Distributions of the RMF components along measurement line – state of uniform plastic deformation in the reduced cross-sectional area: a) tangential component $H_{T,Y}$; b) normal component $H_{N,Z}$

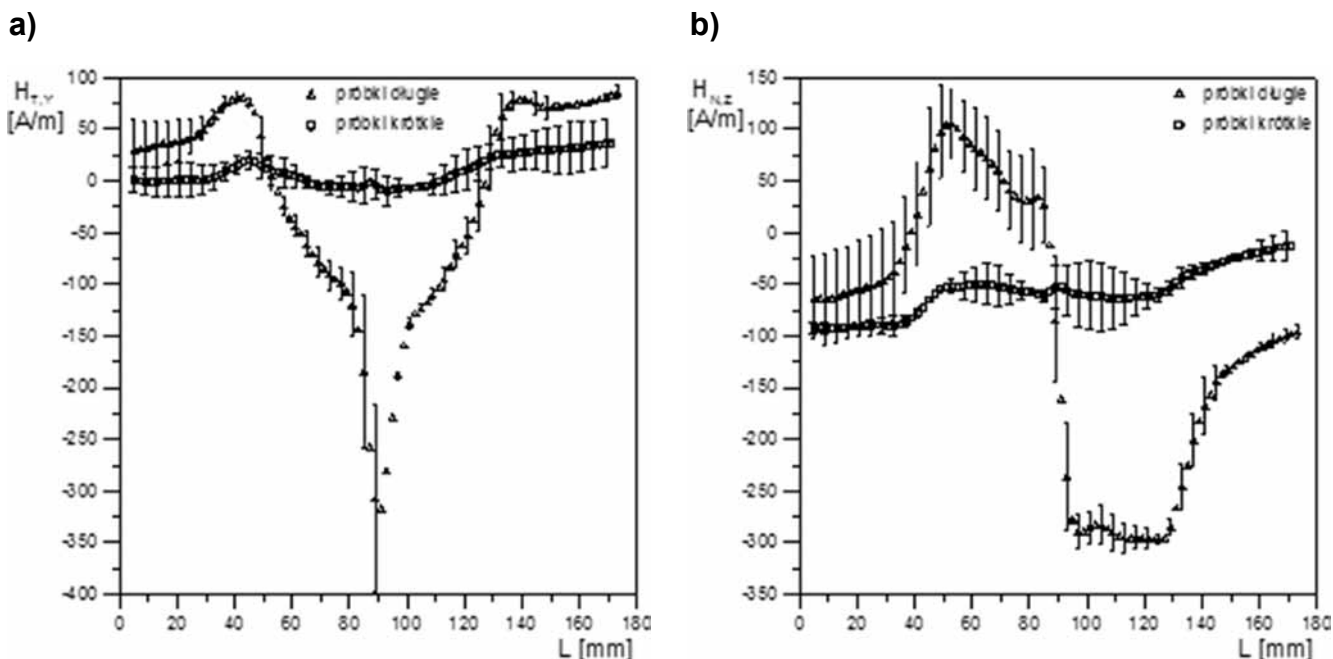
długich obszar szyjki charakteryzuje się minimum wartości składowej stycznej $H_{T,Y}$ oraz gwałtowną, połączoną ze zmianą znaku, zmianą wartości składowej normalnej $H_{N,Z}$.

Na rysunku 4 pokazano zależność pomiędzy zadanymi wcześniej naprężeniami rozciągającymi a wartościami średnimi składowej stycznej $H_{T,Y}$ (uśrednione z odcinka o długości 10 mm leżącego w środku przewężenia). Warunki magnesowania mają znaczący wpływ na przebieg tej zależności.

Analiza gradientów składowych WMPR

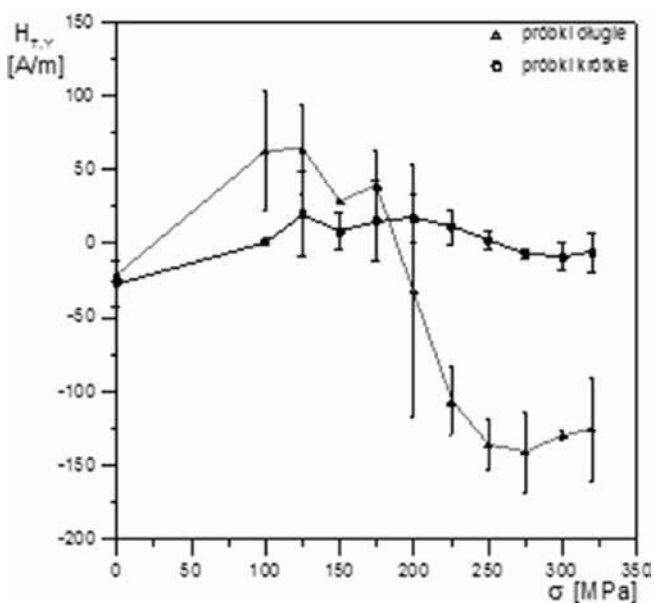
Na rysunkach 5a i 5b przedstawiono przykładowe rozkłady gradientów składowych WMPR zmierzone na

linii pomiarowej dla próbek z obszarem nierównomiernych odkształceń plastycznych – szyjką. Występują w nich, opisane już wielokrotnie w literaturze [1, 3÷5, 7], maksima wartości gradientów w miejscach zmian przekroju – karbach, oraz maksimum w miejscu szyjki. Jakościowo rozkłady gradientów są podobne dla próbek długich i krótkich, lecz ilościowo różnią się znacząco – o rząd wielkości. Podobną zależność obserwuje się dla wartości maksymalnych gradientów w strefie karbu (zmierzonych po odciążeniu) od naprężeń rozciągających. Zależności te pokazano na rysunku 6a dla składowej stycznej $H_{T,Y}$ oraz 6b dla składowej normalnej $H_{N,Z}$.



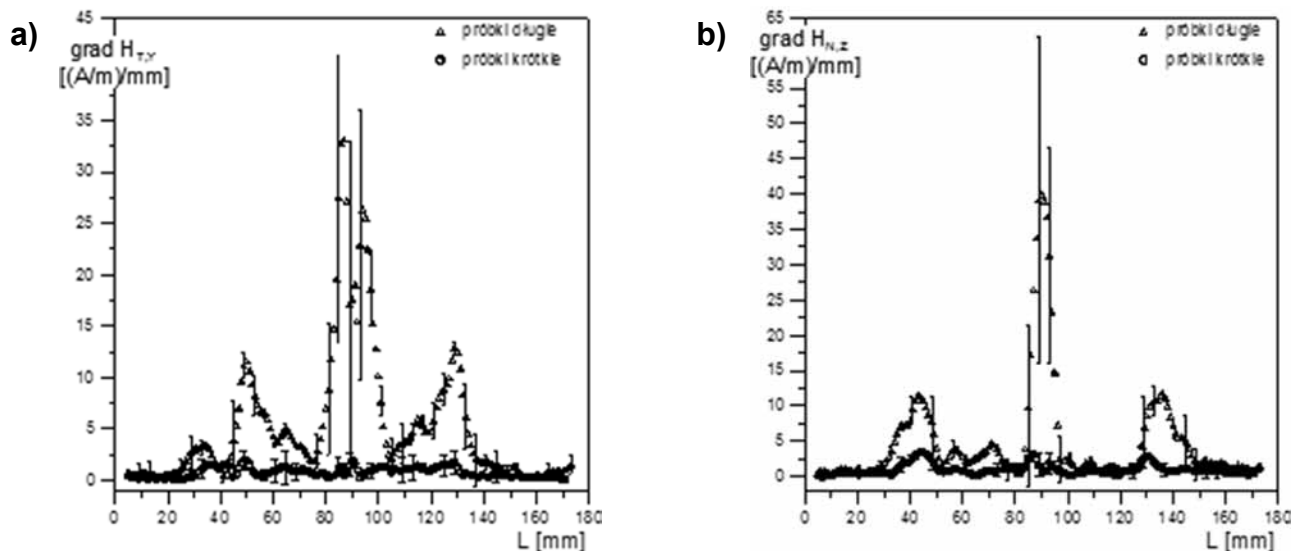
Rys. 3. Rozkłady składowych WMPR zmierzone na linii pomiarowej – stan z obszarem nierównomiernych odkształceń plastycznych (szyjką): a) składowa styczna $H_{T,Y}$; b) składowa normalna $H_{N,Z}$

Fig. 3. Distributions of the RMF components along measurement line – state of non-uniform plastic deformation in the reduced cross-sectional area (with the neck): a) tangential component $H_{T,Y}$; b) normal component $H_{N,Z}$



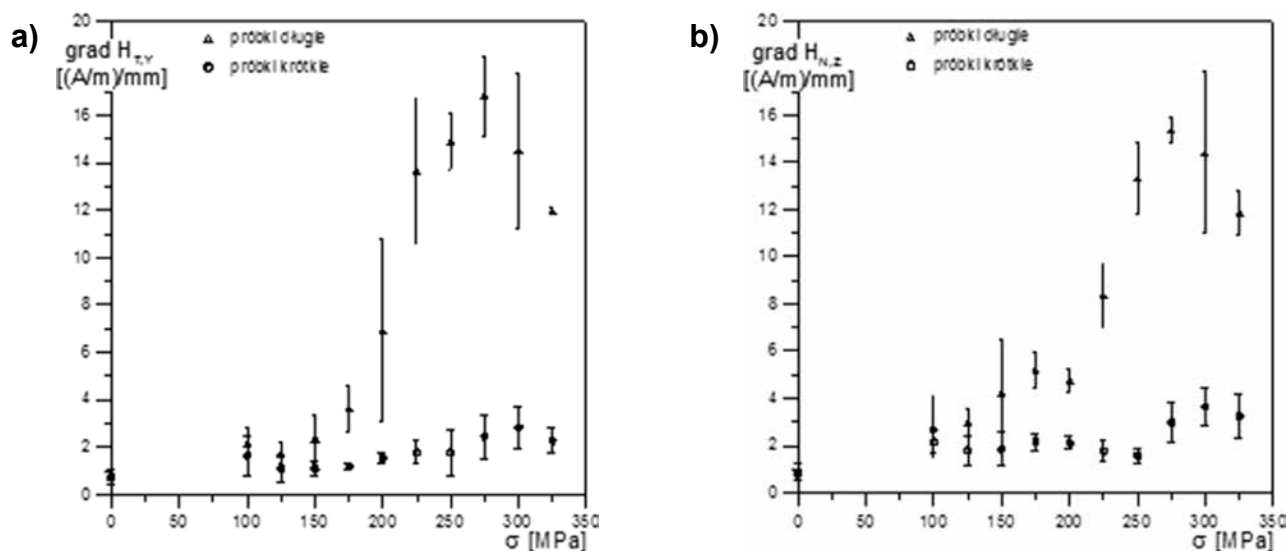
Rys. 4. Zależność pomiędzy naprężeniami rozciągającymi a wartością średnią składowej stycznej $H_{T,Y}$

Fig. 4. Dependence between the average values of tangential components $H_{T,Y}$ and tensile stress



Rys. 5. Rozkłady gradientów składowych WMPR wzdłuż linii pomiarowej - stan z obszarem nierównomiernych odkształceń plastycznych (szyjką): a) składowa styczna $H_{T,Y}$; b) składowa normalna $H_{N,Z}$

Fig. 5. Distributions of gradients of the RMF components along measurement line – state of non-uniform plastic deformation in the reduced cross-sectional area (with the neck): a) tangential component $H_{T,Y}$; b) normal component $H_{N,Z}$



Rys. 6. Zależność pomiędzy naprężeniami rozciągającymi a wartościami maksymalnymi gradientów składowych WMPR: a) składowa styczna $H_{T,Y}$; b) składowa normalna $H_{N,Z}$

Fig. 6. Dependence between the maximum value of gradient of the RMF components and tensile stress: a) tangential component $H_{T,Y}$; b) normal component $H_{N,Z}$

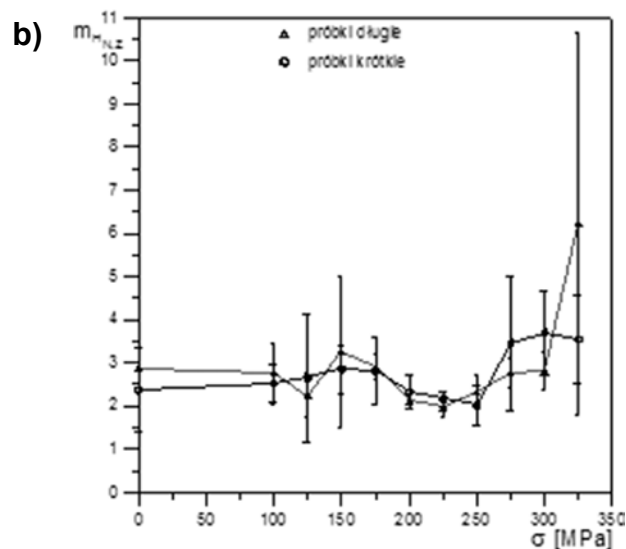
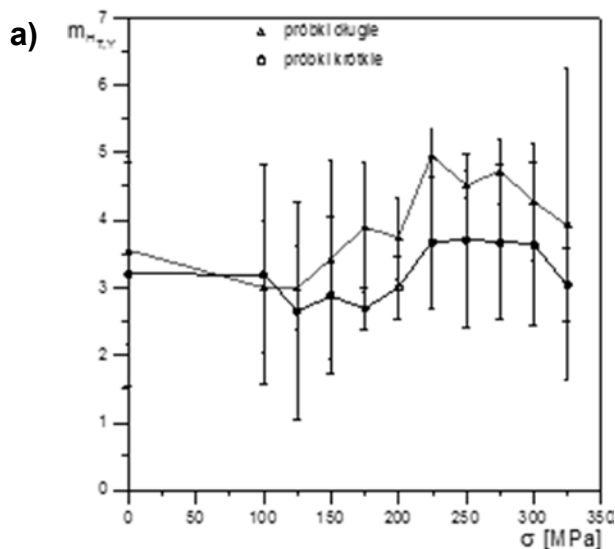
Analiza metodyki metody magnetycznej pamięci metalu

Do oceny stanu materiału w metodzie MPM wykorzystywany jest tzw. *indeks magnetyczny* m_H [6, 7], będący stosunkiem lokalnego maksimum gradientu $grad H_{max}$ do wartości średniej gradientu $grad H_{med}$ w badanym elemencie.

$$m_H = \frac{grad H_{max}}{grad H_{med}} \quad (4)$$

Wyznaczone, na podstawie zależności (4), wartości indeksu magnetycznego m_H dla poszczególnych stanów

obciążenia próbek długich i krótkich, w funkcji tegoż obciążenia pokazano na rysunkach 7a i 7b. Porównując rysunki 6a i 7a oraz 6b i 7b widać, że odniesienie wartości lokalnej lub maksymalnej gradientu do wartości średniej w elemencie dla danego stanu wyężenia, niweluje częściowo wpływ różnej magnetyzacji będącej skutkiem występujących w trakcie obciążania zróżnicowanych warunków magnetycznych. Pojawia się natomiast problem wykorzystania wartości indeksu magnetycznego m_H w ocenie stanu wyężenia, ponieważ pokazane na rysunkach 7a i 7b korelacje $\sigma - m_H$ są bardzo niejednoznaczne.



Rys. 7. Zależność pomiędzy wartościami indeksu magnetycznego m_H i naprężeniami rozciągającymi: a) składowa styczna $H_{T,Y}$; b) składowa normalna $H_{N,Z}$

Fig. 7. Dependence between magnetic index values m_H and tensile stress: a) tangential component $H_{T,Y}$; b) normal component $H_{N,Z}$

Wnioski

W pracy analizowano wpływ warunków magnetycznych w trakcie procesu obciążania na WMPR próbek wykonanych ze stali ferrytycznej. Warunki magnetyczne zmieniano poprzez zmianę sposobu mocowania próbek w maszynie wytrzymałościowej. Próbki mocowano bezpośrednio w szczękach maszyny lub za pomocą przekładek wykonanych ze stali austenitycznej, co zmieniało oporność magnetyczną w obwodzie magnetycznym związanym z próbką i maszyną wytrzymałościową. Zmiany magnetyzacji próbek są skutkiem działania sprzężenia magnetomechaniczne-

go oraz magnesowania w obwodzie magnetycznym związanym z maszyną wytrzymałościową. Stwierdzono znaczny wpływ warunków magnetycznych na wartości WMPR badanych elementów. Zmiany te, przy zachowaniu jakościowego podobieństwa rozkładów WMPR, mają przede wszystkim charakter ilościowy. Stanowi to dodatkowy problem algorytmów ilościowej oceny stanu elementów maszyn, których warunki magnetyczne eksploatacji są najczęściej trudne do określenia. Warunki magnetyczne, wpływając na wartości czułości magnetosprężystej [8], są czynnikiem decydującym o ilościowym stanie magnetyzacji a przez to mierzonym na powierzchni elementów WMPR.

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO_2 ze spalin.

Literatura

- [1] Deputat J.: Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu. Dozór Techniczny 5/2002 s. 97-105.
- [2] Dietrych J.: System i konstrukcja, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [3] Roskosz M.: Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia w diagnostyce elementów ferromagnetycznych, Gliwice 2014, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 530, ISBN 978-83-7880-244-0.
- [4] Roskosz M., Dedyk M., Sołtysik A.: Badania eksperymentalne wpływu geometrii na sygnał diagnostyczny w metodzie magnetycznej pamięci metalu, Przegląd Spawalnictwa 12/2013 s. 125-9.
- [5] Augustyniak M., Roskosz M.: Hierarchia czynników wpływu w diagnostyce metodą statycznego pola rozproszonego, 41 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Toruń 2012.
- [6] PN-ISO 24497-1, 2, 3 Badania nieniszczące – Magnetyczna pamięć metalu. Część 1: Słownictwo, Część 2: Wymagania ogólne, Część 3: Kontrola złączy spawanych.
- [7] Własow W.T., Dubow A.A.: Ocena poziomu naprężeń w strefach ich koncentracji według metody magnetycznej pamięci metalu. XIV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2008.
- [8] Żurek Z. H.: Magnetic contactless detection of stress distribution and assembly defects in constructional steel element NDT&E International 38 (2005) 589–595.