

# Analiza możliwości identyfikacji stanu naprężeń czynnych na podstawie własnego magnetycznego pola rozproszenia ferromagnetyka

Analysis of the possibility of identification of stress state based on residual magnetic field of ferromagnetic material

## Streszczenie

Przeprowadzono badania mające na celu analizę możliwości wykorzystania własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR do szacowania naprężeń czynnych. Badano wpływ historii obciążania na WMPR elementu. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych na powierzchni próbek płytowych ze stali ferrytycznej do głębokiego tłoczenia. Jedna grupa próbek poddana została narastającym w sposób ciągły obciążeniom rozciągającym, natomiast drugą grupę próbek poddano cyklom obciążenie-odciążenie z narastającą w kolejnych cyklach wartością naprężenia maksymalnego. Stwierdzono, że naprężenia czynne wpływają na wartości składowych WMPR. Dla narastającego w sposób ciągły obciążenia możliwe jest opracowanie korelacji naprężenie - wartości składowych WMPR. Dla narastających obciążeń cyklicznych, które są sytuacją najczęściej spotykaną w praktyce, opracowanie takiej korelacji nie jest możliwe.

**Słowa kluczowe:** własne magnetyczne pole rozproszone, naprężenie, ferromagnetyk

## Abstract

A study to analyze the possibility of using Residual Magnetic Field RMF to estimate the stress state was carried out. The impact of loading history was studied. In paper presents the results of measurements carried out on surface of the plate sample of deep drawing steel. One group of samples was subjected to continuously increasing tensile loads, while a second group of samples were subjected to load-unload cycles with increasing the value of maximum stress in subsequent cycles. It was found that the stress effect on the value of RMF components.

For the continuously increasing load, it is possible to determine the correlation between stress and RMF components values. For increasing cyclic loading, which are the most common situation in practice, determination of this type correlation is not possible.

**Keywords:** residual magnetic field, stress, ferromagnetic material

## Wstęp

W skali makroskopowej występują ścisłe związki pomiędzy własnościami mechanicznymi i magnetycznymi ferromagnetyków. Pod wpływem naprężeń mechanicznych w ferromagnetyku dochodzi do odkształceń, którym towarzyszy zmiana namagnesowania.

Ogólna relacja pomiędzy wielkościami magnetycznymi (pole magnetyczne  $H$ , namagnesowanie  $M$ ) a mechanicznymi (naprężenie  $\sigma$ , odkształcenie  $\epsilon$ ) może być zapisana w postaci zależności skalarnej (1) [1]:

$$\begin{bmatrix} M \\ \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(H, \sigma) \\ F_2(H, \sigma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \chi(H, \sigma) & f_1(H, \sigma) \\ f_2(H, \sigma) & s(H, \sigma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:  $\chi$  to podatność magnetyczna,  $s$  – podatność mechaniczna, a  $f_1$  i  $f_2$  to funkcje opisujące sprzężenie magneto-sprężyste.

Naprężenia i odkształcenia powodują zmianę oddziaływania sił wymiany między sąsiednimi atomami i prowadzą do zmiany rozkładu namagnesowania w domenach, a przez to do zmiany właściwości magnetycznych. Ogólnie zjawiska te nazywa się efektami magnetomechanicznymi, wśród których można wyróżnić efekty np. Villariego (magnesowanie przy rozciąganiu i ściskaniu) i Matteuciego (magnesowanie przy skręcaniu). Ze zjawiskiem magnetosprężystym związana jest magnetostrykcja [1], czyli efekt sprężystego odkształcenia i zmian właściwości mechanicznych, towarzyszący magnesowaniu ciał magnetycznych.

Natężenie WMPR w pobliżu obiektu ferromagnetycznego można opisać zależnością (2):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_a(\mathbf{r}) + \mathbf{H}_d(\mathbf{r}) \quad (2)$$

gdzie jest natężeniem zewnętrznego pola magnetycznego, a jest natężeniem pola magnetycznego wywołanego

Dr hab. inż. Maciej Roskosz, mgr inż. Krzysztof Fryczowski – Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska, Gliwice.

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

go namagnesowaniem ferromagnetyka. nazywamy polem rozmagnesowania i opisuje je równanie (3):

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

gdzie  $\mathbf{M}$  jest magnetyzacją, jest objętością,  $\mathbf{S}$  jest polem powierzchni ferromagnetyka a  $\mathbf{s}$  jest wektorem położenia dowolnego punktu wewnątrz lub na powierzchni ferromagnetyka.

Prowadzone są prace badawcze zmierzające do identyfikacji stanu wyętnienia konstrukcji stalowych na podstawie pomiarów WMPR [1÷5]. Celem prowadzonych badań było określenie wpływu historii obciążania na WMPR elementu, pod kątem analizy możliwości wykorzystania WMPR do szacowania naprężeń czynnych.

## Szczegóły badań

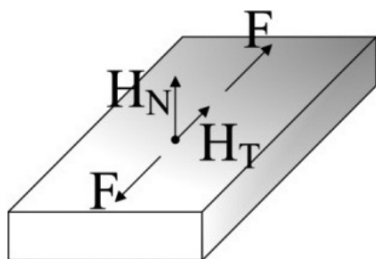
Badano próbki płytowe ze stali do głębokiego tłoczenia, której skład chemiczny oraz własności mechaniczne podano w tabelicy I.

Jedna grupa próbek poddana została narastającym w sposób ciągły obciążeniom rozciągającym, natomiast drugą grupę próbek poddano cyklom obciążenie-odciążenie z narastającą w kolejnych cyklach wartością naprężenia maksymalnego.

Do badań wykorzystywano magnetometr TSC-1M-4 z głowicą pomiarową TSC-2M dostarczony przez Energodiagnostika Co. Ltd Moscow.

Prowadzono pomiar punktowy dwóch składowych WMPR na powierzchni próbki (rys. 1):

- $H_T$  – składowa styczna mierzona w kierunku równoległym do kierunku zadawanego obciążenia,
- $H_N$  – składowa normalna.



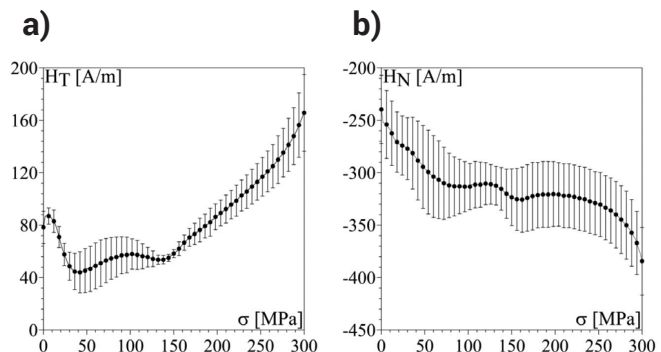
Rys. 1. Schemat pomiaru  
Fig. 1. Diagram of measurement

## Omówienie wyników badań

Na rysunku 2 pokazano uśrednione dla grupy badanych próbek, zmiany wartości składowych WMPR (pomiar punktowy) na skutek działania czynnych naprężeń rozciągających, które narastały w sposób ciągły. Analizując te zmiany, można stwierdzić, że składowa styczna  $H_T$  (rys. 2a) nie wykazuje jednolitego trendu zmian. Do osiągnięcia naprężeń zbliżonych do granicy plastyczności występują zarówno

spadki jak i wzrosty wartości. Dopiero po jej przekroczeniu ustala się stały trend wzrostowy. W prowadzonych pomiarach składowa normalna  $H_N$  (rys. 2b) wykazuje trend spadkowy, z niewielkim jego zaburzeniem w okolicach granicy plastyczności.

Widać, że w przypadku pomiarów punktowych, dla opracowania jednoznacznej korelacji umożliwiającej identyfikację stanu naprężeń czynnych konieczne jest wykorzystanie obydwu mierzonych składowych WMPR.



Rys. 2. Zmiany wartości składowych WMPR w funkcji naprężenia czynnego, a) składowa styczna  $H_T$ , b) składowa normalna  $H_N$   
Fig. 2. RMF component value changes as a function of stress, a) tangential component  $H_T$ , b) normal component  $H_N$

Na rysunkach 3 i 4 pokazano przykładowe, reprezentatywne dla badanego tworzywa zmiany wartości składowych WMPR dla próbki poddanej cyklom obciążania i odciążania z narastającą wartością naprężenia maksymalnego cyklu. Zmiany wartości składowej stycznej  $H_T$  dla wartości naprężenia maksymalnego w cyklu od 30 do 150 MPa pokazano na rysunku 3a, a dla wartości naprężenia maksymalnego w cyklu od 180 do 300 MPa na rysunku 3b. Analogiczny podział obowiązuje dla składowej normalnej  $H_N$ , której zmiany pokazano na rysunkach 4a i 4b.

Przebiegi zmian składowych WMPR podczas obciążania pokazują linie grube których początek i koniec opisane są kolejnymi liczbami naturalnymi (cykl dziesiąty literą A), natomiast podczas odciążania zmiany wartości reprezentują linie cienkie. Identyfikacja przebiegów zmian wartości składowych WMPR podczas kolejnych cykli obciążania możliwa jest również poprzez maksymalne naprężenie w cyklu. Stan początkowy wartości składowych  $H_N$  i  $H_T$  oznaczony jest symbolem „0”.

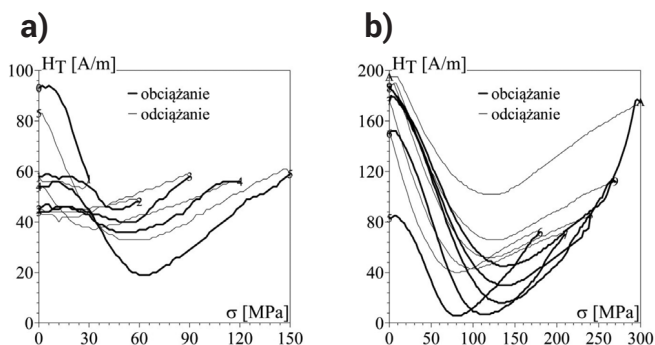
W analizowanym przypadku w cyklu obciążenie - odciążenie przebiegi zmian wartości WMPR nie pokrywają się, a ponadto występuje trwała zmiana wartości w stosunku do początku cyklu. Ogólnie przebieg zmian wartości składowych WMPR można opisać następująco: do osiągnięcia wartości naprężeń maksymalnych z poprzedniego cyklu, zmiany wartości składowej WMPR zbliżone są do zmian w trakcie odciążania, a po przekroczeniu tej wartości trend zmienia się na zbliżony do trendu występującego podczas obciążania w cyklu poprzednim. Przy czym, zarówno podczas obciążania, jak i odciążania trendy zmian nie są jednakowe i zmieniają się w zależności od wartości naprężeń.

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         |

Analizując otrzymane wyniki pod kątem możliwości oceny stanu naprężeń czynnych widoczny jest znaczący wpływ historii obciążania na wartość składowych WMPR.

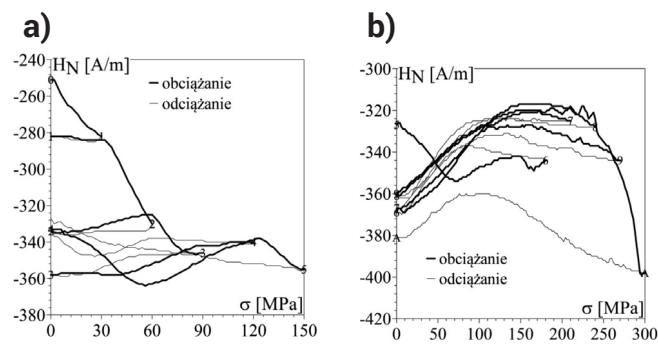
Tej samej wartości naprężenia w kolejnych cyklach obciążenia odpowiadają różne wartości składowych  $H_T$  i



**Rys. 3.** Przykładowe zmiany wartości składowej stycznej  $H_T$  dla próbki poddanej cyklom obciążania i odciążania, a) zakres zmian naprężenia maksymalnego cyklu od 30 do 150 MPa, b) zakres zmian naprężenia maksymalnego cyklu od 180 do 300

**Fig. 3.** Examples of changes in the value of the tangential component  $H_T$  for the sample subjected to cycles of loading and unloading, a) range of changes of maximum stress in cycle from 30 to 150 MPa, b) range of changes of maximum stress in cycle from 180 to 300 MPa

$H_N$ . Przykładowo dla czynnego naprężenia rozciągającego równego 150 MPa składowa styczna przyjmuje wartości od ok. 20 do ok. 100 A/m, natomiast składowa normalna  $H_N$  - 315 do -370 A/m. Niemożliwa jest jednoznaczna identyfikacja stanu naprężeń czynnych.



**Rys. 4.** Przykładowe zmiany wartości składowej stycznej  $H_N$  dla próbki poddanej cyklom obciążania i odciążania, a) zakres zmian naprężenia maksymalnego cyklu od 30 do 150 MPa, b) zakres zmian naprężenia maksymalnego cyklu od 180 do 300

**Fig. 4.** Examples of changes in the value of the normal component  $H_N$  for the sample subjected to cycles of loading and unloading, a) range of changes of maximum stress in cycle from 30 to 150 MPa, b) range of changes of maximum stress in cycle from 180 to 300 MPa

## Podsumowanie

Przeprowadzono badania mające na celu analizę możliwości wykorzystania WMPR do szacowania naprężeń czynnych. Badano wpływ historii obciążania na WMPR elementu. Stwierdzono, że naprężenia czynne wpływają na wartości składowych WMPR. Dla narastającego w sposób ciągły obciążenia możliwe jest opracowanie korelacji naprężenie - wartości składowych WMPR. Dla narastających obciążeń cyklicznych, które są sytuacją najczęściej spotykaną w praktyce, opracowanie takiej korelacji nie jest możliwe.

## Literatura

- [1] Roskosz M., „Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia w diagnostyce elementów ferromagnetycznych”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
- [2] Roskosz M., Fryczowski K., „Możliwości wykorzystania zmian własności magnetycznych do oceny stanu wyężenia stali kotłowych na przykładzie stali P265GH”, Energetyka, vol. 8, s. 430-435, 2012.
- [3] Iwaniec M., Witoś M., Roskosz M., Gontarz S., „Diagnosis of Supporting Structures of HV Lines Using Magneto-Mechanical Effects”, Solid State Phenomena, vol. 208, s. 70-85, 2014.
- [4] Witoś M., Zieja M., Żokowski M., Roskosz M., „Diagnosis of supporting structures of HV lines with using of the passive magnetic observer”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 39, s. 45-47, 2014.
- [5] Żurek Z. H., „Magnetic contactless detection of stress distribution and assembly defects in constructional steel element”, NDT&E International, vol. 38, s. 589-595, 2012.

## ZAMÓW NEWSLETTER

Zapraszamy Państwa do zapisania się na bezpłatny NEWSLETTER Przeglądu Spawalnictwa, w tym celu należy wysłać e-mail z tematem **“NEWSLETTER”** na adres: [redakcja@pspaw.pl](mailto:redakcja@pspaw.pl)

**przegląd  
SPAWALNICTWA**  
Welding Technology Review

