Zbigniew H. ŻUREK

## MAGNETYCZNE METODY DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ ELEMENTÓW MASZYN

Streszczenie. Zastosowanie nowych technik projektowania ułatwia i przyspiesza proces budowy nowych maszyn, pomimo to wytworzony produkt nie jest całkowicie wolny od wad. Tematyka artykułu dotyczy modelowania związanego z kontrolą stanu technicznego wyrobu gotowego podczas jego eksploatacji. Powszechnie stosowana ocena wibroakustyczna w niektórych przypadkach może zostać uzupełniona oceną zmian natężenia pola magnetycznego. Zagadnienie to opisano i zilustrowano przykładami badania stanów naprężeń metodami magnetycznymi w elementach utwierdzonych jak i wirujących. Modelowane zmiany pola magnetycznego porównywano z wynikami badań eksperymentalnych, jak i z badaniami zmian magnetyzacji pod wpływem obciążeń dla wybranych gatunków stali.

# MAGNETIC METHODS IN TECHNICAL DIAGNOSTICS OF MACHINES' ELEMENTS

**Summary**. New techniques of design make process of new machines building easier and quicker, besides the manufactured projects have some defects. The theme of the article deals with modelling connected with technical condition supervision of the product during its operating. General vibro-acoustic evaluation in some cases may be completed by the evaluation of magnetic emission changes. This problem has been presented and described with the examples of stresses condition research with the help of the magnetic method in held and vibrated elements. Modelling of magnetic changes are compared with the results of experimental research as well as with the research of magnetisation changes under the influence of the loads for selected types of steel.

## 1. WSTĘP

Przyłożenie zewnętrznych sił rozciągających, ściskających, skręcających lub zginających do ciała ferromagnetycznego będącego pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego powoduje zmianę jego magnetyzacji. Zmiany te są odwracalne w określonych zakresach natężeń pól magnetycznych i obciążeń mechanicznych dla większości materiałów ferromagnetycznych. Zapis termodynamiczny omawianych zależności przedstawia równanie (1) [1,2].

$$\left(\frac{\delta J}{\delta T}\right)_{H} = \left(\frac{\delta B}{\delta T}\right)_{H} = \left(\frac{\delta S}{\delta H}\right)_{T} = \left(\frac{\delta \lambda}{\delta H}\right)_{T} = \left(\frac{\delta I}{IdH}\right)_{T} = d$$
(1)

Zmiany odkształceń S i magnetostrykcji  $\lambda=\delta l/l$  równoważne zmianom magnetyzacji J oraz indukcji, B określane są jako czułość piezomagnetyczna –d. Zależnie od znaku magne- to-strykcji, który może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne, kierunek działania sił może zmniejszać lub zwiększać wypadkową magnetyzację. W artykule omówiono badania ferromagnetyka o magnetostrykcji dodatniej na przykładzie stali ST3.

#### 1.1. Związki magnetomechaniczne

Oprócz zmian długości  $\Delta L/L$  (magnetostrykcja) w ferromagnetykach poddawanych oddziaływaniu pola magnetycznego występują równolegle zmiany jego objętości  $\Delta V/V$ i modułu sprężystości E. Efekt ten odkryty został przez Joule'a w 1842 roku. Efektem odwrotnym do magnetostrykcji jest magnetoelastyczna konwersja, polegająca na zmianie parametrów magnetycznych ferromagnetyków pod wpływem naprężeń zewnętrznych, odkryta w 1865 roku przez Villariego. Odkrycie to stało się teoretyczną podstawą działania wszystkich późniejszych konstrukcji czujników magnetosprężystych, służących do pomiaru sił. Współczynnikiem, który łączy magnetostrykcję i magnetoelastyczną konwersję jest  $\lambda_s$ . Zamieszczone wzory (2) i (3) [4] opisują magnetomechaniczne związki w ferromagnetykach pomiędzy stanem naprężeń a parametrami magnetycznymi.

$$\sigma = \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{J_s^2}{3 \lambda \mu_0}$$
(2)

J<sub>s</sub> - magnetyzacja nasycenia,

μ0 - przenikalność magnetyczna próżni,

μr - przenikalność magnetyczna względna.

$$\mu_{r} = \frac{J_{s}^{2}}{3 \mu_{0} \lambda_{s} \sigma} = \frac{J_{s}^{2}}{3 \mu_{0} \lambda_{s} E} \frac{1}{\epsilon}$$
(3)

E - moduł Younga,

ε - odkształcenie,

 $\lambda_s$  - współczynnik magnetostrykcji nasycenia.

Gęstość energii magnetycznej określa zależność:

$$E_{\tau} = E_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda_{s} \sin^{2} \delta$$
<sup>(4)</sup>

gdzie:  $\lambda_s$  - jest współczynnikiem magnetostrykcji nasycenia,  $\delta$ - jest kątem między wektorem magnetyzacji a naprężeniami  $\sigma$ .

Teoretyczne i praktyczne badania magnetosprężystości skierowane są najczęściej, jeżeli nie wyłącznie na struktury krystaliczne o szczególnych składach chemicznych. Opracowanie podejmuje temat badań tych zjawisk w przypadkowo dobranych elementach ze stali ST3, dla których niewiadomy jest nawet kierunek obróbki plastycznej. Dla stali tej przeprowadzono wiele eksperymentów [6,7] z wykorzystaniem magnetorezystancyjnych przetworników pomiarowych [9,15] do pomiaru wpływu naprężeń na natężenia pola magnetycznego przy jej powierzchni.

#### 2. POMIARY NAPRĘŻEŃ W ELEMENTACH UTWIERDZONYCH

Wstępne pomiary pola magnetycznego przy powierzchni obciążanych dynamicznie stalowych płaskowników ze stali ST3 [5,6,7] potwierdziły istniejące związki magnetomechaniczne. Kolejny etap badań poświęcono wyznaczaniu zmian krzywych magnesowania drutu ze stali niskowęglowej o składzie zbliżonym do stali ST3 pod wpływem obciążeń mechanicznych. Pomiary te pozwoliły uzupełnić katalog danych w programie FEMM (Finite Element Method Magnetic) o interesujące nas zależności magneto- mechaniczne.

## 2.1. Symulacja wpływu naprężeń rozciągających na rozkład pola magnetycznego wokół próbki

Przed przystąpieniem do symulacyjnej oceny zmian natężenia pola magnetycznego od naprężeń wyznaczono metodą elementów skończonych równomierność rozkładu naprężeń w próbce poddanej rozciąganiu. Efekt symulacji przedstawiono na rysunku 1. Poza miejscem utwierdzenia i przyłożenia siły rozkład pozostaje równomierny.



Rys. 1. Obraz rozkładu naprężeń w próbce podczas rozciągania [8] Fig. 1. Stress distribution in sample while stretching [8]

Dla wykazanego równomiernego rozkładu naprężeń w środkowej części próbki wyliczono programem FEMM rozkład pola magnetycznego na odcinku 4 mm (rys.2). Założono odległość 0,5mm od powierzchni próbki nasycanej polem magnetycznym magnesów stałych. Założenia wynikały z budowy sondy, którą prowadzono następne badania eksperymentalne. W badanej próbce zmieniano parametry krzywej pierwotnego magnesowania, zgodnie z uprzed-



nio przeprowadzonymi pomiarami zmian krzywych magnetyzacji od naprężeń [9]. W przedziale odkształceń sprężystych próbki w zakresie  $\sigma_0$ .  $\sigma_1$  odnotowujemy znaczne przyrosty natężenia składowej stycznej pola magnetycznego. Składniki stopowe oraz podstawowe zależności magnetomechaniczne pomierzone dla badanego drutu przedstawiono w tabeli 1 [9].

- Rys. 2. Ilustracja rozkładu pola magnetycznego od naprężeń σ [8]
- Fig. 2. Distribution of magnetic field as function of stress

_			
Ta	hai	0	-1
1.2	nei	IA.	
	-		- 8

Тур	Podstawowe składniki			J, max	H max	σ0	σι	σ2	σ3
drutu	stopowe drutu [%]			[ [T]	[kA/m]	[MPa]	MPa	[MPa]	[MPa]
SG2	C 0,07	Si 0,085	Mn 1,2	0,477	5,86	0	240	360	600

#### 2.2. Badania eksperymentalne

Badania polegały na pomiarze zmian natężenia pola magnetycznego przy powierzchni rozciaganego drutu sondą pomiarową z wbudowanym przetwornikiem magneto- rezystancyjnym [8,13,15]. W przetworniku pomiarowym natężenie pola magnetycznego przetwarzane jest na proporcjonalna wartość S napięcia zgodnie zależnościa: Z  $S=16 \times w \times a \times [(mV/V)/kA/m]$  (gdzie: w - wzmocnienie wzmacniacza pomiarowego, a - krotność napięcia zasilania mostka w stosunku do napięcia 1V). Trzy kolejne pomiary wykonano w odstępach kilkuminutowych bez zmiany położenia czujnika. Wyniki przedstawiono wykreślnie na rysunku 3.



Rys. 3. Napięcie przetwornika w funkcji zmian naprężeń rozciągających Fig. 3. Dependence of stress at output voltage absolute value of sensor

## 2.3. Symulacja wpływu naprężeń zginających na rozkład pola magnetycznego wokół próbki

Belkę utwierdzoną w obu końcach zginano siłą skupioną, jak pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Mapa rozkładu naprężeń w próbce zginanej od siły skupionej Fig. 4. Map of stress distribution in bent sample by assembled force

Wyliczone w MES obszary zmian naprężeń widoczne na rysunku 4 wprowadzono do programu symulacyjnego FEMM. Granice obszarów zmian naprężeń przedstawiono na rysunku 5. Celem tych działań było wyznaczenie różnic w rozkładzie pola magnetycznego na powierzchni próbki zginanej i porównanie ich ze stanem naprężeń  $\sigma_1$ =240 MPa zbliżonych do jednorodnych jak dla belki rozciąganej.



Rys. 5. Wyznaczone granice zmian naprężeń dla programu FEMM Fig. 5. Imported to FEMM program bounds of stress changes

Symulacje przeprowadzano w kilku etapach Najpierw zadeklarowano dla całego obszaru stan naprężeń  $\sigma_0=0$  MPa, następnie uwzględniono pełny stan naprężeń. Przykłady rozkładu linii sił pola magnetycznego dla stanu bez obciążeń i dla pełnego obciążenia przedstawiono na rysunku 6 i rysunku 7.



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej w próbce bez obciążenia mechanicznego Fig. 6. Distribution of magnetic induction in the sample without mechanical loads



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej w próbce przy uwzględnieniu stref obciążeń (σ) jak na rys. 5
 Fig. 7. Magnetic flux density in sample and at its surface containing detailed stress distribution as on figure 5

Zmiany natężenia pola magnetycznego przy powierzchni badanej próbki w zależności od naprężeń zamieszczono na rysunku 8.



Rys. 8. Zmiany natężenia pola magnetycznego na powierzchni próbki od naprężeń Fig. 8. Distribution of magnetic field intensity over surface of sample as function of stress

## 3. BADANIA WIRUJĄCYCH ELEMENTÓW MASZYN

Najbardziej efektownym przykładem jest analiza zmian pola magnetycznego przy powierzchni bocznej u podstawy zęba współpracującego koła zębatego przekładni jak na rysunku 9. Zamodelowano koło zębate, w którym jeden ząb został podcięty. Oceniono stan naprężeń u podstawy zęba dobrego i uszkodzonego w MES. Następnie wprowadzono do programu FEMM strefy zmian naprężeń. W wyniku obrotu koła zębatego z uszkodzonym zębem w stosunku do sondy pomiarowej usytuowanej jak na rysunku 10 uzyskano przebiegi amplitudowo - czasowe i częstotliwościowe przedstawione na rysunku 12. Wpływ uszkodzenia koła zębatego na zmiany indukcji pola magnetycznego pokazano na rysunku 11.



- Rys. 9. Zmiany w rozkładzie naprężeń u podstawy zęba dla koła dobrego (lewy wycinek koła) i koła uszkodzonego (prawy wycinek koła)
- Fig. 9. Stress distribution in part of sprocket wheel: a- for not injured wheel, b- for cut at base cog



- Rys. 10. Sposób pomiaru naprężeń w kole zębatym przekładni metodą magnetyczna. MR- magnetorezystor
- Fig. 10. Measurement of gear wheel stresses by magnetic method, MR magnetoresistant element



Rys. 11. Rozkład indukcji magnetycznej w wycinku koła zębatego dobrego i uszkodzonego Fig. 11. Distribution of magnetic induction at gear pedestal in undamaged and damaged wheel



Rys. 12. Wyniki symulacji wpływu mikropęknięcia u podstawy zęba obciążonego na charakterystyki amplitudowo - czasowe i częstotliwościowe

Fig. 12. Results of micro- cracks influence of simulation at the basis of loaded sprocket on time -amplitude and frequency characteristic



Rys. 13. Wynik pomiaru z badań eksperymentalnych Fig. 13. Results of the experimental measurements

## 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W metodzie wibroakustycznej stan techniczny maszyny oceniany jest według krzywej wzrostu poziomu drgań czy emitowanego hałasu w funkcji czasu. Za pomocą takiej oceny jesteśmy w stanie określić procentowy stopień zużycia maszyny. Trudniej natomiast jest wykryć stan nadchodzącej awarii. Zmianę poziomu emisji wibroakustycznej w funkcji czasu pracy maszyny na przykładzie przekładni zębatej przedstawiono na rysunku 14 [16]. Rozpa-



trując dalej przekładnię zębatą, możemy udowodnić, że zmęczeniowe mikropęknięcie u podstawy zęba przekładni zębatej i nagły wzrost stanu naprężeń trudne do ujawnienia metodami wibroakustycznymi wykryte może być metodami magnetycznymi.

Rys. 14. Krzywa zmiany stanu technicznego przekładni zębatej Fig. 14. Curve of technical condition changes of the gear transmission

Dla ferromagnetyków, które pozostaną przez długi czas podstawowym surowcem do produkcji maszyn, przypisane są właściwości fizykochemiczne i odkryte efekty magnetyczne, które umożliwiają wcześniejsze wykrycie awarii. Umieszczenie bardzo czułego przetwornika pomiarowego pola magnetycznego z boku koła zębatego na wysokości podstawy zęba umożliwi wykrycie stanu naprężeń w przypadku zastosowania odpowiedniego układu pomiarowego. Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych zweryfikowane symulacją FEMM potwierdzają przydatność przyrządów pomiarowych i metody w pomiarach naprężeń i drgań. Zaproponowano nowe możliwości w diagnostyce technicznej.

## Literatura

- 1. Etienne du Trémolet de Lacheisserie, Theory and Applications of Magnetoelasticity, CRC PRESS Boca Raton, Ann Arbor, Boston, London 1992.
- Kaczkowski Z.: Magnetosprężystość Materiały piezomagnetyczne i ich zastosowanie praca zbiorowa pod redakcją Z. Kaczkowskiego, PAN Instytut Fizyki, PWN, Warszawa 1978.
- 3. Boll R.: Weichmagnetische Werkstoffe, 4., Erweiterte Auflage, VACUUMSCCHELCE GMBH, 1990.
- Hinz G., Voigt H.: Sensors. A comprehensive survey Magnetoelastic sensors, Vacuumschmelze GmbH, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990, s. 99-102, s. 31.

- ŻUREK Z. H.: Użyteczność wybranych metod i narzędzi pomiarowych w diagnostyce technicznej, XXVII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Politechnika Śląska, Wegierska Górka 2000.
- ŻUREK Z. H.: Przetworniki magnetorezystancyjne pola magnetycznego w badaniach stanów naprężeń mechanicznych próbki stalowej, Politechnika Śląska, Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, VIII Seminarium Naukowe, Katowice 2000.
- ŻUREK Z.H.: Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne jako narzędzia pomiarowe w diagnostyce technicznej, Politechnika Wrocławska, XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Naukowe Maszyn Elektrycznych, SME' 2000.
- ŻUREK Z. H.: Pomiary sił i naprężeń w stalach węglowych w oparciu o magnetomechaniczny efekt Villariego, Politechnika Śląska, Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, IX Seminarium Naukowe, Katowice 2001.
- 9. ŻUREK Z. H.: Efekty magnetyczne użyteczne w diagnostyce technicznej. Politechnika Śląska, XXXVII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME' 2001.
- ŻUREKZ.H.: Badania naprężeń w wirujących elementach maszyn, XVII Ogólnopolska Konferencja PRZEKŁADNIE ZĘBATE, Politechnika Śląska – Węgierska Górka 2000.
- TUMAŃSKI S.: Cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1997.
- BOZORTH Richard M.: Ferromagnetism, The institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1993.
- 13. ŻUREK Z.H.: Sonda defektoskopu magnetycznego, Zgłoszenie patentowe P 344 955. Politechnika Śląska Gliwice, 2000.
- WILK A., Żurek Z.H., Łazarz B., Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zębatych przekładni metodami magnetycznymi, Politechnika Śląska, XXVIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2001, str. 381-387.
- ŽUREK Z. H., Wilk A., Madej H.: Metoda diagnozowania wyłamania zęba koła zębatego, Zgłoszenie patentowe P 331 223, Politechnika Śląska, Gliwice, 1999.
- BARTELMUS W.: Diagnostyka maszyn górniczych, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. Józef Rasek

#### Abstract

This works concentrates on Joule's effect and Villarie's effects, which are the basis for the proposed magnetic measurements and suggests measuring transducers from among the group of magnetic bridge measurements. The field of application of the proposed method is limited and connected only with ferromagnetic materials.

The work is undertaken on the basis of a clear need for new measuring investigating methods, because the possibilities of vibro-acustive studies and currently employed transducers are not sufficient. The base property of the magnetic field and ferromagnetic materials permits the wide use of magnetic measurements as supplementary or even essential in technical diagnostics. The series of investigations were carried out in the area of technical and material research. The method of verification of measurement and measuring method was chosen forecasting the results of the measurements using FEMM simulating methods.

The results of the work and industry experience provide a basis for formulation of practical suggestions for the use of the proposed magnetic-measurement transducers in technical diagnostics and in material research.

The results of the work provide a basis for continuation of the interesting and useful research as well as industrial application.