

NOWE MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA EFEKTU MAGNETOSPREŻYSTEGO W BUDOWIE SENSORÓW NAPRĘŻEŃ I SIŁ

W referacie przedstawiono stosowane dotychczas oraz nowe metody obciążania mechanicznego rdzeni z materiałów magnetycznie miękkich. Zaprezentowano także wyniki badań wpływu naprężeń mechanicznych na magnetyki ceramiczne – ferryty oraz na magnetyki amorficzne. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania efektu magnetoelastycznego w ferrytach oraz magnetykach amorficznych do budowy sensorów naprężeń i sił.

NEW POSSIBILITIES OF UTILIZING MAGNETOELASTIC VILLARI EFFECT IN CONSTRUCTION OF FORCE AND STRESS SENSORS

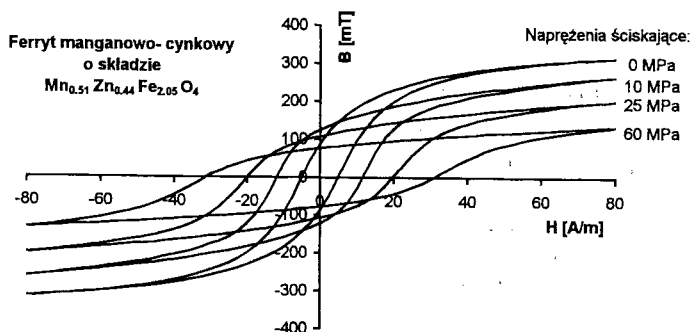
Paper presents previously and recently developed methods of applying stress to cores of the magnetoelastic sensors. Results of the magnetoelastic investigation performed at ferrite and amorphous materials are also presented. Obtained results confirmed possibility of utilizing the magnetoelastic Villari effect in ferrites and amorphous metals in construction of stress and force sensors.

1. EFEKT MAGNETOSPREŻYSTY W MATERIAŁACH MAGNETYCZNYCH

Efekt magnetoelastyczny został odkryty przez Villariego w 1863 roku. Efekt ten jest zjawiskiem odwrotnym do zjawiska magnetostrykcji i polega na zmianie stanu magnetycznego materiału magnetycznie miękkiego pod wpływem naprężeń wywołanych działaniem sił zewnętrznych. Efekt ten może być obserwowany między innymi jako zmiana kształtu pętli histerezy magnetycznej po przyłożeniu siły zewnętrznej do próbki materiału ferro- lub ferrimagnetycznego. Zmiany parametrów magnetycznych materiału należy odnosić do wartości naprężeń (σ) w materiale, gdyż to one, nie zaś wartość przyłożonej siły, decydują o wielkości efektu magnetoelastycznego. Przykład wpływu naprężeń wywołanych działaniem sił zewnętrznych na pętle histerezy magnetycznej opracowanego przez ZMM „Polfer” magnetyka ceramicznego – wysokoprzenikalnościowego ferrytu manganowo-cynkowego o składzie $Mn_{0.51}Zn_{0.44}Fe_{2.05}O_4$ przedstawiono na rysunku 1.

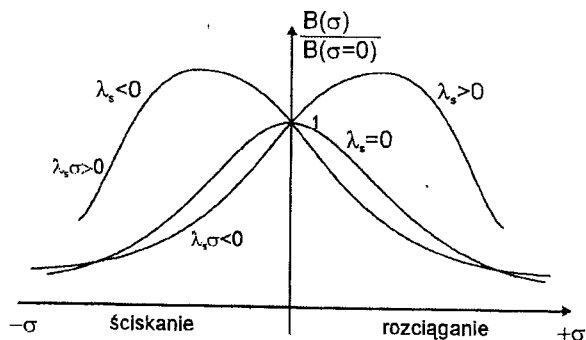
Wygodnym sposobem oceny ilościowej efektu magnetoelastycznego jest badanie wpływu naprężeń (σ) na wartość indukcji magnetycznej (B) w materiale, występującej przy określonej wartości zewnętrznego pola magnesującego (H_m). W ten sposób można wyznaczyć czułość magnetoelastyczną materiału, definiowaną jako względną zmianę indukcji magnetycznej (lub

przenikalności magnetycznej materiału) pod wpływem jednostkowych naprężeń. Uogólnioną formę unormowanych zmian wartości indukcji magnetycznej (B) w funkcji naprężeń (σ) przedstawiono na rysunku 2. Zgodnie z ogólnie przyjętą konwencją naprężenia ściskające są oznaczane jako ujemne, zaś naprężenia rozciągające jako dodatnie.



Rys. 1. Wpływ naprężeń na pętle histerezy magnetyka ceramicznego – ferrytu manganowo-cynkowego o składzie $Mn_{0.51} Zn_{0.44} Fe_{2.05} O_4$ (ferryt o wysokiej przenikalności)

W analizie zjawiska magnetosprężystego występującego w danym materiale ważną rolę odgrywa wartość magnetostrykcji nasycenia λ_s materiału. Magnetostrykcja nasycenia λ_s jest to łączna, względna zmiana liniowych wymiarów materiału następująca pod wpływem nasycającego pola magnetycznego. Magnetostrykcję oznaczamy jako dodatnią, gdy pod wpływem pola magnetycznego magnetyk wydłuża się, zaś jako ujemną, gdy się skraca. Należy zaznaczyć, że magnetostrykcja jest zjawiskiem parzystym, to znaczy wymiary materiału zmieniają się w określony, właściwy dla niego sposób, niezależnie od kierunku pola magnetycznego.



Rys. 2. Zależność unormowanej indukcji magnetycznej od naprężeń w materiałach magnetycznych o różnej wartości magnetostrykcji nasycenia [1]

Źródłem efektu magnetosprężystego jest zmiana łącznej energii swobodnej w materiale pod wpływem naprężeń od sił zewnętrznych. Na łączną energię swobodną materiału magnetycznego składają się takie czynniki jak:

- Energia anizotropii magnetokrystalicznej materiału związana ze strukturą sieci krystalicznej materiału
- Energia odmagnesowania spowodowana rozproszeniem pola magnetycznego na nieciągłościach materiału próbki
- Energia wymiany związana ze strukturą atomową materiału
- Energia magnetosprężysta związana ze zjawiskiem magnetosprężystym

W oparciu o analizę łącznej energii swobodnej [2] można stwierdzić, że dla małych wartości naprężeń (σ) kierunek zmian indukcji zależy od znaku iloczynu $\lambda_s \sigma$. Gdy wartość tego iloczynu jest dodatnia, pod wpływem naprężeń wartość indukcji magnetycznej rośnie, zaś gdy jest ujemna – maleje. Ponadto wielkość efektu magnetosprężystego jest na ogół tym większa, im większa jest wartość magnetostrykcji materiału (i związana z nią energia magnetosprężysta). Zwiększenie wartości energii anizotropii magnetokrystalicznej lub energii odmagnesowania powoduje zmniejszenie wielkości efektu magnetosprężystego, ponieważ udział energii magnetosprężystej w łącznym bilansie energii swobodnej materiału maleje.

2. METODY WPROWADZANIA NAPRĘŻEŃ DO RDZENIA SENSORA MAGNETOSPŘĘŻYSTEGO

Głównym problemem związanym z budową sensorów magnetosprężystych jest opracowanie odpowiedniej metody zadawania naprężeń w rdzeniu. Metoda ta powinna zapewniać wprowadzanie jednorodnych naprężeń do rdzenia z materiału magnetycznego. Jeżeli wprowadzane naprężenia będą niejednorodne, niektóre obszary rdzenia magnetycznego będą obciążone bardziej niż inne. Może to spowodować uszkodzenie (np. pęknięcie) rdzenia. Ponadto niejednorodny rozkład naprężeń w rdzeniu powoduje zmniejszenie czułości magnetosprężystej rdzenia, ponieważ łączne zmiany parametrów magnetycznych materiału są średnią zmianą stanu magnetycznego obszarów bardziej i mniej obciążonych mechanicznie.

Metoda obciążania rdzenia przetwornika magnetosprężystego powinna pozwalać na obciążanie rdzeni o zamkniętym obwodzie magnetycznym. W przypadku gdy obciążany jest rdzeń o otwartym magnetowodzie, jego czułość magnetosprężysta jest mniejsza niż rdzenia zamkniętego do którego zostały wprowadzone naprężenia o tej samej wartości. Jest to związane z pojawieniem się energii odmagnesowania w całkowitym bilansie energii swobodnej w magnetyku. Z tego względu wpływ energii magnetosprężystej na stan magnetyczny materiału maleje [1].

Ze względu na maksymalną czułość magnetosprężystą najkorzystniejsza sytuacja ma miejsce gdy naprężenia przyłożone do materiału są równoległe do kierunku pola magnetycznego w materiale. Gdy naprężenia σ_0 przyłożone do materiału nie są równoległe do pola magnetycznego H , na właściwości magnetyczne wpływają odpowiadające im naprężenia σ dane wzorem (1) [2]:

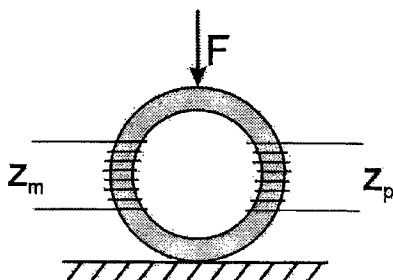
$$\sigma = \sigma_0 (\cos \varphi - \nu \sin \varphi) \quad (1)$$

w którym ν - stała Poissona materiału, zaś φ - kąt między kierunkiem naprężeń σ_0 i kierunkiem pola magnetycznego H .

W opisanych w literaturze badaniach w odniesieniu do magnetyków amorficznych stosowano głównie dwie metody obciążania: obciążano rdzeń pierścieniowy w kierunku średnicy lub

obciążano paskową próbkę z materiału magnetycznego naklejoną na zginaną niemagnetyczną belkę.

Ideę opracowanej przez K. Mohriego metody obciążania rdzenia pierścieniowego w kierunku średnicy przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Obciążanie pierścieniowego rdzenia magnetycznego w kierunku średnicy [3] (Z_m – uzwojenie magnesujące, Z_p – uzwojenie pomiarowe)

W metodzie tej wykorzystywany jest rdzeń o zamkniętym magnetowodzie, jednak rozkład naprężeń w rdzeniu jest niejednorodny i trudny do wyznaczenia. Ponadto w rdzeniu występują zarówno naprężenia ściskające jak i rozciągające. W rezultacie czułość magnetosprężysta rdzenia zostaje obniżona w stosunku do sytuacji, gdy naprężenia były by jednorodne.

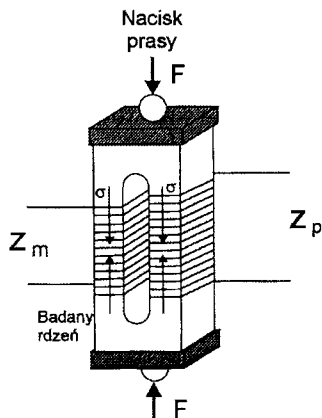
Zastosowanie próbek paskowych naklejonych na niemagnetyczną, zginaną belkę pozwalała uzyskać wyznaczalny i w przybliżeniu jednorodny rozkład naprężeń w obciążanej próbce [4]. Jednak otwarty obwód magnetyczny próbki paskowej zmniejsza czułość magnetosprężystą ze względu na pojawienie się energii odmagnesowania w próbce. Ponadto uzyskiwane w takim sensorze wyniki są uzależnione od wymiarów geometrycznych próbki.

2.1. Rdzenie okienne

W przypadku sensorów budowanych w oparciu o materiały magnetyczne lite (takie jak stale, alferu lub ferryty) możliwe jest zastosowanie metody obciążania rdzeni okiennych według metody przedstawionej w pracy [1]. Ideę metody obciążania rdzeni okiennych przedstawiono na rysunku 4.

Zaletą tej metody jest uzyskiwanie w rdzeniu okiennym o zamkniętym magnetowodzie jednorodnych naprężeń w całej długości kolumn. Z tego względu sensory magnetosprężyste naprężeń i sił konstruowane z użyciem rdzeni okiennych mają wysoką czułość magnetosprężystą. Ponadto ze względu na jednorodny i wyznaczalny rozkład naprężeń w kolumnach uzyskiwane charakterystyki magnetosprężyste mogą być interpretowane fizycznie, co pozwala na prowadzenie badań procesów magnesowania magnetyków w obecności naprężeń. Wadą tej metody są niejednorodności w rozkładzie naprężeń w łącznikach kolumn. Jednak wpływ tego czynnika na uzyskiwaną czułość magnetosprężystą jest niewielki, ze względu na mały udział długości łączników kolumn w całej długości obwodu magnetycznego.

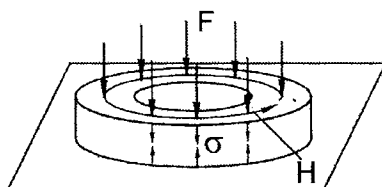
Kolejnym ograniczeniem metody rdzeni okiennych jest brak możliwości zastosowania jej do badania nowoczesnych materiałów magnetycznych (w tym magnetyków amorficznych i nanokrystalicznych), które są uzyskiwane w postaci taśm o grubości około 25 μm .



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie obciążania rdzenia okiennego [1]

2.2. Rdzenie pierścieniowe

W opracowanej przez autorów metodzie badania magnetosprężystych właściwości materiałów magnetycznych jako sensorów naprężeń i sił rdzeń pierścieniowy jest obciążany w kierunku prostopadłym do kierunku pola magnetycznego w sposób przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Idea zadawania naprężeń do rdzenia pierścieniowego

Przy takim sposobie obciążania rdzenia naprężenia efektywnie oddziałujące na parametry magnetyczne można wyznaczyć z zależności (1). Wynoszą one (dla kąta $\varphi=90^\circ$):

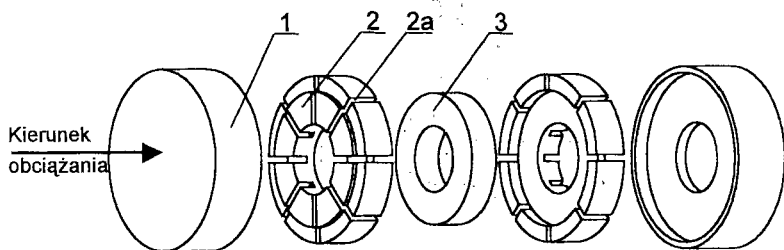
$$\sigma = -\nu \cdot \sigma_0 \quad (2)$$

Głównym problemem przy takim sposobie obciążania rdzenia pierścieniowego jest jego uzwojenie. Problem ten został rozwiązany przy pomocy urządzenia przedstawionego na rysunku 6 [5].

Obciążany rdzeń pierścieniowy (3) jest umieszczony między dwoma cylindrycznymi nakładkami (2) wykonanymi z materiału niemagnetycznego. W nakładkach zostały wycięte rowki umożliwiające uzwojenie badanego rdzenia. Obciążenia ściskające przykładane są do podkładek bazowych (1).

Główną zaletą tej metody jest uzyskanie jednorodnych i zdefiniowanych naprężeń wzdłuż całego, zamkniętego obwodu magnetycznego rdzenia pierścieniowego. Ponadto metoda ta pozwala na badanie rdzeni pierścieniowych litych oraz zwijanych z cienkiej taśmy (jak ma to miejsce w przypadku nowoczesnych magnetyków amorficznych i nanokrystalicznych).

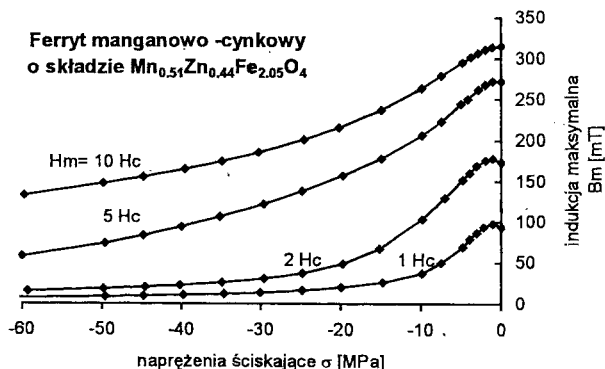
nych). Ponieważ rozkład naprężeń jest jednorodny, w rdzeniu nie występują obszary mocniej i słabiej obciążone. Dzięki temu rdzeń może być obciążany w szerszym zakresie naprężeń.



Rys. 6. Urządzenie do zadawania naprężeń do rdzenia pierścieniowego (zgłoszenie patentowe P-345758) [5] 1 – podkładki bazowe, 2 – cylindryczne nakładki z materiału niemagnetycznego, 2a – rowki na uzwojenie, 3 – badany rdzeń

3. WYNIKI BADAŃ

Na rysunkach 7 przedstawiono wyniki badania magnetosprężystych właściwości magnetyka ceramicznego - ferrytu manganowo-cynkowego, dla różnych wartości pola magnesującego H_m będącego wielokrotnością pola koercyjnego H_c . Badania przeprowadzono na rdzeniu okiennym. Uzyskane wyniki potwierdziły oczekiwaną wysoką czułość magnetyka na naprężenia mechaniczne od sił zewnętrznych, wyrażaną jako względne zmiany indukcji magnetycznej w rdzeniu (przy stałej wartości pola magnesującego w próbce).

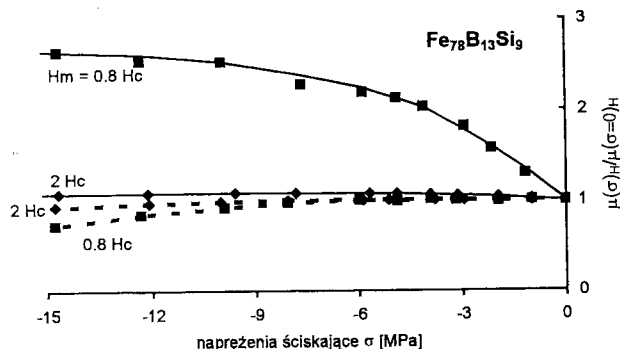


Rys. 7. Zależności $B_m(\sigma)$ dla rdzenia ferrytowego $Mn_{0.51}Zn_{0.44}Fe_{2.05}O_4$ (próbka okienna o polu koercyjnego $H_c=8$ A/m)

Badania przeprowadzono także dla próbek pierścieniowych wykonanych ze stopu amorficznego o składzie $Fe_{78}B_{13}Si_9$. Badania przeprowadzono dla próbek przed i po wyżarzaniu usuwającym naprężenia wewnętrzne wprowadzone do materiału w trakcie procesu produkcji. Do badań zastosowano metodę opisaną w punkcie 2.2. Także w tym przypadku uzyskano duże zmiany parametrów magnetycznych próbki pod wpływem naprężeń od sił zewnętrznych. Na rysunku 8 przedstawiono względne zmiany przenikalności magnetycznej rdzeni. Dla naprężeń

od 0 do 15 MPa, w przypadku próbki poddanej wyżarzaniu, zaobserwowano wzrost przenikalności magnetycznej próbki o 150%. Potwierdza to oczekiwania dużej czułości magneto-sprężystej przy obciążaniu rdzeni według opisaney metody.

Rys. 8. Względne zmiany przenikalności magnetycznej pod wpływem naprężeń dla próbek pierścieniowych z $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ (---- próbka przed wyżarzaniem $H_c=10$ A/m, — próbka po



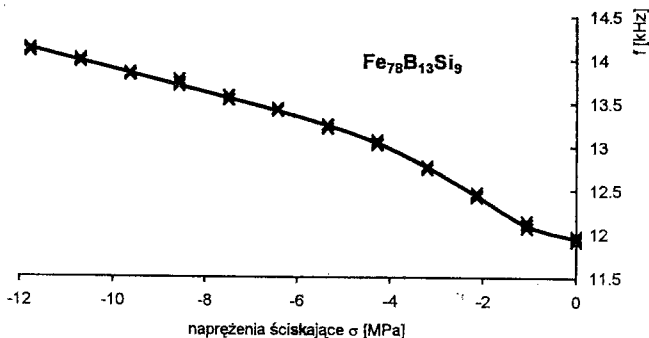
wyżarzaniu $H_c=5$ A/m) dla różnych wartości pola magnesującego H_m

4. BUDOWA SENSORA MAGNETOSPŘEŻYSTEGO

Główną zaletą sensorów magneto-sprężystych jest możliwość pominięcia przetwarzania mechanicznego w konstrukcji sensora. W przypadku np. sensorów tensometrycznych, konieczne jest użycie elementu sprężystego, którego odkształcenia są przenoszone na tensometr. Natomiast w sensorach magneto-sprężystych rdzeń czuły na naprężenia może być jednocześnie elementem konstrukcyjnym. Ponadto sensory magneto-sprężyste budowane na bazie niektórych materiałów amorficznych mogą pracować w zakresie temperatur do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, czyli znacznie wyższym niż przetworniki tensometryczne.

W opracowanym modelu sensora uzwojony rdzeń pierścieniowy z materiału amorficznego pracuje w równoległym układzie LC generatora rezonansowego, a częstotliwość generatora zmienia się na skutek zmiany przenikalności amplitudowej rdzenia pod wpływem obciążeń mechanicznych. Uzyskiwany sygnał częstotliwościowy jest dogodny do przetwarzania cyfrowego oraz odporny na zakłócenia przy przesyłaniu. Charakterystykę przetwarzania magneto-sprężystego sensora siły z rdzeniem z materiału $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ po wyżarzaniu podano na rysunku 8.

W opisywanym sensorze uzyskano zmianę częstotliwości o $\Delta f=2,2$ kHz dla naprężeń ściskających σ od 0 do 12 MPa (częstotliwość dla $\sigma=0$ wynosiła około 12 kHz). Estymator odchylenia standardowego rozrzutu wskazań w punkcie pomiarowym s wyniósł 0,02 kHz.



Rys. 8. Charakterystyki przetwarzania sensora magnetostrictywnego z rdzeniem pierścieniowym z amorficznego stopu o składzie $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ po wyżarzaniu

5. WNIOSKI

- a) Sensory magnetostrictywnego naprężeń i sił cechują się dużymi zmianami mierzonych parametrów magnetycznych (np. przenikalność amplitudowa zmienia się do 150 % w zakresie naprężeń do 12 MPa).
- b) Istnieje możliwość budowy sensora, w którym uzyskuje się jednorodny i zdefiniowany rozkład naprężeń wzdłuż obwodu magnetycznego rdzenia zamkniętego. W rezultacie uzyskuje się wzrost czułości magnetostrictywnego sensora.
- c) Uzyskiwany na wyjściu sensorów magnetostrictywnych sygnał częstotliwościowy jest wygodny do przesyłania i przetwarzania cyfrowego.
- d) Sensory magnetostrictywnego mogą być stosowane w szerokim zakresie temperatur, ograniczonym zmianami magnetyzacji wynikającymi z prawa Curie-Weissa.

LITERATURA

- [1] A. Bieńkowski: Magnetostrictywnego zjawisko Villariego w ferrytach i możliwość jego wykorzystania w budowie przetworników naprężeń i sił; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995
- [2] D.C. Jiles: Introduction to Magnetism and Magnetic Materials; Stanley Thornes Pub, 1998
- [3] K. Mohri: Application of amorphous alloys for sensors and transducers; Rapidly Quenched Materials, Vol. II, North-Holland Amsterdam 1984, p. 1687-1690
- [4] H. Chiriac, M. Pletea, E. Hristoforou: Fe-based amorphous thin film as a magnetoelastic sensor material; Elsevier. Sensors & Actuators A-Physical, vol. A81, no.1-3, 1 April 2000, p.166-9
- [5] A. Bieńkowski, R. Szewczyk: Urządzenie do obciążania pierścieniowego przetwornika magnetostrictywnego; Zgłoszenie Patentowe P-345758, 2001.