

Magnetosprężyste sensory naprężeń i sił

Nowe możliwości

Adam Bieńkowski
Roman Szewczyk

Przedstawiono dotychczas stosowane oraz nowe metody obciążania mechanicznego rdzeni magnetosprężystych sensorów naprężeń i sił. Zaprezentowano wyniki badań wpływu naprężeń ściskających na właściwości magnetyczne magnetyków ceramicznych – ferrytów oraz magnetyków amorficznych. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość zastosowania omawianych rozwiązań w budowie sensorów naprężeń i sił wykorzystujących efekt magnetosprężysty.

Efekt magnetosprężysty

Efekt magnetosprężysty, odkryty przez Villariego w 1863 roku, jest zjawiskiem termodynamicznie odwrotnym do zjawiska magnetostrykcji i polega na zmianie stanu magnetycznego magnetyka pod wpływem naprężeń σ spowodowanych działaniem sił zewnętrznych. Efekt ten może być obserwowany m.in. jako zmiana indukcji magnetycznej B , przy danym natężeniu pola magnesującego H , w wyniku zmiany naprężeń σ (w granicach sprężystości) w magnetyku. Zmiany parametrów magnetycznych materiału należy odnosić do wartości naprężeń σ w materiale, gdyż to one, nie wartość przyłożonej siły, decydują o efekcie magnetosprężystym.

Ważną rolę w zjawisku magnetosprężystym odgrywa magnetostrykcja nasycenia λ_s magnetyka, jako względna zmiana długości w wyniku przejścia magnetyka od stanu rozmagnesowania do stanu nasycenia magnetycznego. Magnetostrykcja jest dodatnia ($\lambda_s > 0$), gdy pod wpływem pola magnesującego magnetyk wydłuża się, lub ujemna ($\lambda_s < 0$) – gdy się skraca.

Całkowitą energię swobodną E próbki znajdującej się w polu magnetycznym można zapisać jako sumę energii swobodnych [1]

$$E = E_H + E_D + E_K + E_\sigma + E_\Omega \quad (1)$$

gdzie:

E_H – energia związana z magnesowaniem próbki w polu H ,

E_D – energia od magnesowania związana z własnym polem próbki,

E_K – energia anizotropii magnetokrystalicznej,

E_σ – energią magnetosprężystą,

E_Ω – energia wymiany.

E_σ określona jest następującym wyrażeniem [2]:

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \phi \quad (2)$$

Dr hab. inż. Adam Bieńkowski, prof. nzw. PW – Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej.
Mgr inż. Roman Szewczyk – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP.

gdzie: λ_s – magnetostrykcja nasycenia, σ – wartość naprężeń w rdzeniu, ϕ – kąt między kierunkiem wektora magnetyzacji M , a kierunkiem naprężeń σ .

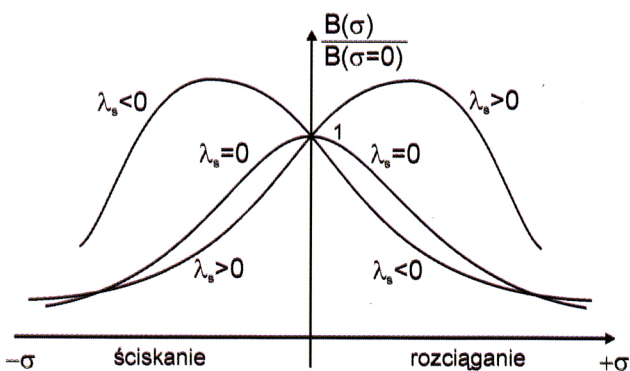
Zgodnie z ogólnie przyjętą konwencją naprężenia ściskające są oznaczane jako ujemne, zaś naprężenia rozciągające jako dodatnie.

Z zależności tej wynika, że sposób, w jaki materiał reaguje na naprężenia, zależy od znaku iloczynu $\lambda_s \sigma$.

- gdy $\lambda_s \sigma > 0$, czyli dla materiału o dodatniej magnetostrykcji λ_s poddanego działaniu naprężeń rozciągających $+\sigma$ energia magnetosprężysta E_σ osiąga minimum, gdy kierunek działania naprężeń σ i kierunek wektora magnetyzacji M w materiale są równoległe lub antyrównoległe ($\phi = 0^\circ$ lub 180°),
- gdy $\lambda_s \sigma < 0$, czyli dla materiału o dodatniej magnetostrykcji λ_s poddanego działaniu naprężeń ściskających $-\sigma$ energia magnetosprężysta E_σ osiąga minimum, gdy kierunek wektora magnetyzacji M i kierunek działania naprężeń σ tworzą kąt prosty ($\phi = 90^\circ$ lub 270°).

Z powyższych rozważań wynika, że charakter zmian indukcji zależy od znaku iloczynu $\lambda_s \sigma$. Jeżeli wartość tego iloczynu jest dodatnia, to pod wpływem naprężeń indukcja magnetyczna wzrasta, zaś gdy jest ujemna – maleje, w stosunku do wartości przy $\sigma = 0$.

Zwiększenie wartości energii anizotropii magnetykryystalicznej lub energii od magnesowania może powodować zmniejszenie efektu magnetosprężystego, ponieważ udział energii magnetosprężystej E_σ w całkowitym bilansie energii swobodnej materiału maleje.



Rys. 1. Schematyczna, unormowana zależność indukcji magnetycznej B od naprężeń $\pm\sigma$ (przy $H = \text{const.}$), w magnetykach zróżnicowanych ze względu na magnetostrykcję nasycenia λ_s [1]

Dogodnym sposobem ilościowej oceny efektu magneto-sprężystego jest badanie wpływu naprężeń σ na wartość indukcji magnetycznej B w materiale, przy ustalonej wartości pola magnesującego H_m . Badania takie umożliwiają wyznaczenie czułości magneto-sprężystej materiału, jako względnych zmian indukcji magnetycznej (lub przenikalności magnetycznej materiału) pod wpływem jednostkowych naprężeń. Schematyczne, unormowane zmiany indukcji magnetycznej B w funkcji naprężeń σ (przy ustalonej wartości pola magnesującego), dla materiałów zróżnicowanych ze względu na znak magnetostrykcji nasycenia λ_s , przedstawiono na rys. 1.

Wprowadzanie naprężeń do rdzenia sensora magneto-sprężystego

Głównym problemem związanym z budową sensorów magneto-sprężystych jest opracowanie metody zadawania naprężeń do rdzenia z materiału magnetycznego. Metoda taka powinna zapewniać wprowadzanie jednorodnych naprężeń do rdzenia. Jeżeli wprowadzone naprężenia nie są jednorodne, pewne obszary rdzenia są obciążone bardziej niż inne. Może to spowodować mechaniczne uszkodzenia rdzenia, np. pęknięcia. Ponadto niejednorodny rozkład naprężeń w rdzeniu powoduje zmniejszenie czułości magneto-sprężystej sensora, ponieważ łączne zmiany parametrów magnetycznych materiału są średnią zmianą stanu magnetycznego obszarów bardziej i mniej obciążonych mechanicznie.

Metoda obciążania rdzenia sensora magneto-sprężystego powinna umożliwiać obciążanie rdzeni o zamkniętym obwodzie magnetycznym. Gdy jest obciążany rdzeń o otwartym magnetowodzie, jego czułość magneto-sprężysta jest mniejsza niż rdzenia zamkniętego, przy wprowadzeniu naprężeń o tej samej wartości. Jest to związane z pojawieniem się energii od magnesowania w całkowitym bilansie energii swobodnej magnetyka. Z tego względu wpływ energii magneto-sprężystej na stan magnetyczny materiału maleje [1].

Ze względu na maksymalną czułość magneto-sprężystą najkorzystniej jest, gdy naprężenia σ w rdzeniu sensora są równoległe do kierunku pola magnesującego. Jeżeli naprężenia σ w rdzeniu nie są równoległe do pola magnesującego H , to na właściwości magnetyczne rdzenia mają wpływ odpowiadające im naprężenia efektywne σ_{eff} dane wzorem [2]:

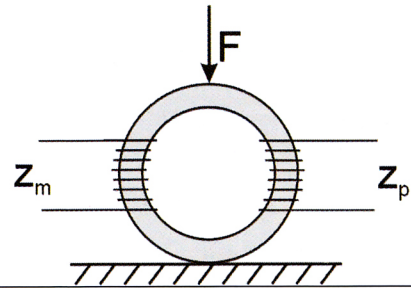
$$\sigma_{eff} = \sigma (\cos\varphi - v \sin\varphi) \quad (2)$$

gdzie:

v - stała Poissona materiału, φ - kąt między kierunkiem naprężeń σ a kierunkiem pola magnesującego H .

W odniesieniu do magnetyków amorficznych, w opisanych w literaturze badaniach efektu magneto-sprężystego stosowano głównie dwie metody: obciążanie rdzenia pierścieniowego w kierunku średnicy lub obciążanie paskowej próbki z materiału magnetycznego naklejonej na niemagnetyczną, zginaną belkę.

Ideę opracowanej przez K. Mohriego metody obciążania pierścieniowego rdzenia sensora w kierunku średnicy przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Obciążanie pierścieniowego rdzenia magnetycznego w kierunku średnicy, z_m - uzwojenie magnesujące, z_p - uzwojenie pomiarowe [3]

W metodzie tej stosuje się 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, co powoduje obniżenie czułości magneto-sprężystej sensora.

Zastosowanie rdzeni paskowych naklejonych na niemagnetyczną, zginaną belkę pozwala uzyskać wyznaczalny i w przybliżeniu jednorodny rozkład naprężeń w obciążanym rdzeniu [4]. Jednak otwarty obwód magnetyczny rdzenia paskowego zmniejsza czułość magneto-sprężystą sensora ze względu na pojawienie się energii od magnesowania.

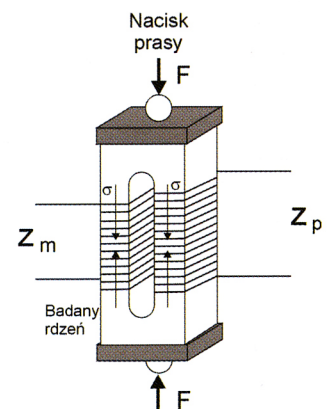
Rdzenie okienne

W przypadku sensorów budowanych z litych materiałów magnetycznych możliwe jest zastosowanie metody obciążania rdzenia okiennych [1]. Ideę tej metody przedstawiono na rys. 3.

Zaletą tej metody jest uzyskiwanie w rdzeniu okiennym o zamkniętym magnetowodzie jednorodnych naprężeń w całej długości kolumn. Z tego

względu sensory magneto-sprężyste naprężeń i sił konstruowane na rdzeniach okiennych mają dużą czułość magneto-sprężystą. Ponadto ze względu na jednorodny (i zgodny z kierunkiem pola magnesującego) rozkład naprężeń w kolumnach rdzenia, na podstawie uzyskanej charakterystyki magneto-sprężystej istnieje możliwość interpretacji fizycznej procesów magnesowania magnetyka w obecności naprężeń. Wadą tej metody są pewne niejednorodności rozkładu naprężeń w łącznikach kolumn. Wpływ tego czynnika na uzyskiwaną czułość magneto-sprężystą jest jednak niewielki, ze względu na mały udział łączników kolumn w całej długości obwodu magnetycznego.

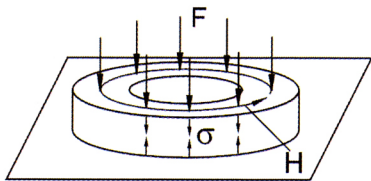
Istotnym ograniczeniem stosowania rdzeni okiennych jest brak możliwości stosowania tej metody w badaniach nowoczesnych materiałów magnetycznych, takich jak magnetyki amorficzne i nanokrystaliczne, wytwarzane w postaci taśm o grubości około 25 μm .



Rys. 3. Schematyczne przedstawienie obciążania rdzenia okiennego [1]

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 magnesującego (rys. 4).

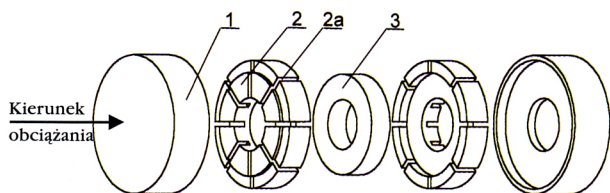


Rys. 4. Idea zadawania naprężeń do rdzenia pierścieniowego

Przy takim sposobie obciążania rdzenia, gdy $\varphi = 90^\circ$, naprężenia efektywnie σ_{eff} oddziałujące na parametry magnetyczne są wyznaczone z zależności (3):

$$\sigma_{eff} = -v \cdot \sigma \quad (3)$$

Głównym problemem przy takim sposobie obciążania rdzenia pierścieniowego jest jego uzwojenie. Problem ten został rozwiązany za pomocą urządzenia [5] (rys. 5).



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

Obciążany rdzeń pierścieniowy (3) jest umieszczony między dwoma cylindrycznymi nakładkami (2) z materiału niemagnetycznego. W nakładkach wykonano nacięcia umożliwiające uzwojenie rdzenia sensora. Obciążenia ściskające przykładane są do podkładek bazowych (1) poprzez przegub kulisty.

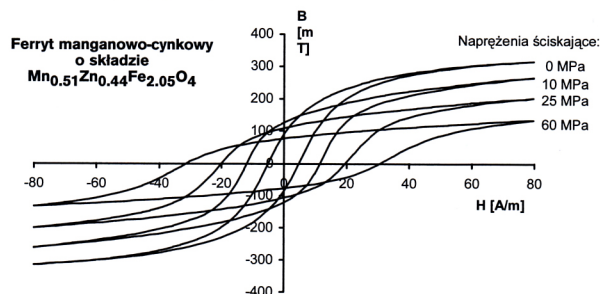
Główną zaletą tej metody jest uzyskanie jednorodnych i zdefiniowanych naprężeń wzdłuż całego, zamkniętego obwodu magnetycznego rdzenia pierścieniowego. Ponadto metoda ta pozwala na badanie zarówno rdzeni pierścieniowych litych jak i zwijanych z cienkiej taśmy (jak ma to miejsce w przypadku magnetyków amorficznych i nanokrystalicznych). Ponieważ rozkład naprężeń jest jednorodny, w rdzeniu sensora nie występują obszary spiętrzenia naprężeń. Z tego względu rdzeń może być obciążany w szerszym zakresie naprężeń.

Wyniki badań

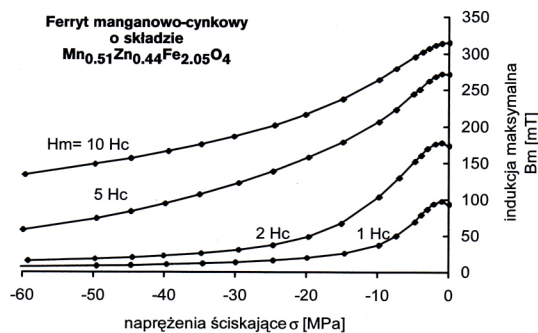
Na rys. 6 przedstawiono wpływ naprężeń σ na pętlę histerezy magnetycznej, magnetyka ceramicznego opracowanego przez ZMM „Polfer” - wysokoprzenikalnościowego ferrytu manganowo-cynkowego o składzie $Mn_{0.51}Zn_{0.44}Fe_{2.05}O_4$ i zbliżonej do zera magnetostrykcji λ_s . Charakterystyki wyznaczono na rdzeniu okiennym.

Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki magneto-sprężyste $B(\sigma)_H$ badanego rdzenia ferrytowego przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m , będącego wielokrotnością pola koercji $H_c = 8 \text{ A/m}$. Uzyskane wyniki potwierdziły oczekiwaną dużą czułość magnetosprężystą magnetyka, wyrażaną jako względne zmiany indukcji magnetycznej w rdzeniu (przy stałej wartości pola magnesującego).

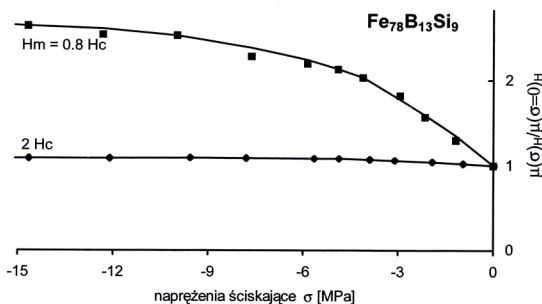
Przeprowadzono także badania dla pierścieniowych rdzeni sensorów magnetosprężystych ze stopu amorficznego o składzie $Fe_{78}B_{13}Si_9$. Badania te przeprowadzono dla rdzeni po wyżarzaniu zmniejszającym naprężenia własne materiału. Do badań zastosowano metodę rdzenia pierścieniowego. Także i w tym przypadku uzyskano znaczne zmiany parametrów magnetycznych rdzenia pod wpływem naprężeń σ . Na rys. 8 przedstawiono względne zmiany przenikalności magnetycznej rdzenia. W zakresie naprężeń od 0 do 15 MPa, zaobserwowano wzrost przenikalności magnetycznej rdzenia o 150 %, co jest potwierdzeniem oczekiwanej, dużej czułości magnetosprężystej.



Rys. 6. Wpływ naprężeń na pętlę histerezy magnetyka ceramicznego - ferrytu manganowo-cynkowego o składzie $Mn_{0.51}Zn_{0.44}Fe_{2.05}O_4$ (ferryt o wysokiej przenikalności)



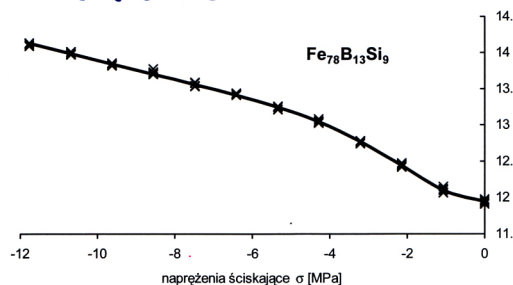
Rys. 7. Zależności $B(\sigma)_H$ okiennego rdzenia ferrytowego $Mn_{0.51}Zn_{0.44}Fe_{2.05}O_4$



Rys. 8. Względne zmiany przenikalności magnetycznej m w zależności od naprężeń ściskających σ , dla wyżarzonego rdzenia pierścieniowego z $Fe_{78}B_{13}Si_9$, przy ustalonych wartościach pola magnesującego H_m

Budowa sensora magnetoelastycznego

Główną zaletą sensorów magnetoelastycznych jest możliwość pominięcia w konstrukcji sensora przetwarzania mechanicznego, np. elementu sprężystego, którego odkształcenia są przenoszone na tensometr. W sensorach magnetoelastycznych czuły na naprężenia rdzeń jest jednocześnie elementem



Rys. 9. Charakterystyki przetwarzania sensora magnetoelastycznego z rdzeniem pierścieniowym z amorficznego stopu o składzie $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ po wyżarzaniu

konstrukcyjnym. Ponadto sensory magnetoelastyczne budowane na bazie niektórych materiałów amorficznych mogą pracować w temperaturze do 600 °C, czyli znacznie wyższej 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 w wyniku zmiany przenikalności amplitudowej rdzenia pod wpływem przyłożonej siły. Uzyskiwany sygnał częstotliwościowy jest dogodny do przetwarzania cyfrowego oraz odporny na zakłócenia przy przesyłaniu. Charakterystykę przetwarzania magnetoelastycznego sensora siły z rdzeniem z materiału $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ po wyżarzaniu podano na rys. 9.

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 ok. 12 kHz). Estymator odchylenia standardowego rozrzutu wskazań σ w punkcie pomiarowym wynosił 0,02 kHz.

Wnioski

1. Sensory magnetoelastyczne naprężeń i sił charakteryzują się dużymi zmianami parametrów magnetycznych (np. przenikalność amplitudowa zmienia się do 150 % w zakresie naprężeń do 15 MPa).
2. Sensor o jednorodnym i zdefiniowanym rozkładzie naprężeń wzdłuż obwodu magnetycznego rdzenia zamkniętego umożliwia uzyskanie dużej czułości magnetoelastycznej.
3. Uzyskiwany na wyjściu sensorów magnetoelastycznych sygnał częstotliwościowy jest wygodny do przesyłania i przetwarzania cyfrowego.
4. Sensory magnetoelastyczne mogą być stosowane w szerokim zakresie temperatury, ograniczonym zmianami magnetyzacji określonymi prawem Curie-Weissa.

Bibliografia

1. A. Bieńkowski: Magnetoelastyczne 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. 166-169.
5. A. Bieńkowski, R. Szewczyk: Urządzenie do obciążania pierścieniowego przetwornika magnetoelastycznego; Zgłoszenie Patentowe P-345758, 2001.

Streszczenia artykułów naukowych

Magnetoelastyczne sensory naprężeń i sił. Nowe możliwości. Adam Bieńkowski, Roman Szewczyk – s. 15

Przedstawiono stosowane dotychczas oraz nowe metody obciążania mechanicznego rdzeni magnetoelastycznych sensorów naprężeń i sił. Zaprezentowano wyniki badań wpływu naprężeń ściskających na właściwości magnetyczne magnetyków ceramicznych – ferrytów oraz magnetyków amorficznych. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość zastosowania omawianych rozwiązań w budowie sensorów naprężeń i sił wykorzystujących efekt magnetoelastyczny.

New possibilities of utilizing Magnetoelastic Villari effect in construction of force and stress sensors, Adam Bieńkowski, Roman Szewczyk – p. 15

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