

Józef KWICZALA

POLTECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

Właściwości magnetoelastyczne amorficznych i nanokrystalicznych materiałów magnetycznych

Dr inż. Józef KWICZALA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Pracuje w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki. Zajmuje się problematyką komputerowych systemów pomiarowych. Jest współtwórcą mikroprocesorowych stanowisk do wyznaczania błędów wzorcowych przekładników prądowych. Opracował konstrukcję oraz procedury oprogramowania systemu pomiarowego do wyznaczania parametrów materiałów magnetycznych. Jest rzeczoznawcą i weryfikatorem SEP oraz członkiem Komisji Metrologii PAN.

e-mail: jozef.kwiczala@polsl.pl



Streszczenie

Opisano przydatność materiałów amorficznych i nanokrystalicznych do zastosowania w magnetoelastycznych czujnikach siły. Wykazano istotne właściwości magnetoelastyczne badanych materiałów. Zaprojektowano i wykonano nowy typ przetwornika, zwłaszcza do pomiaru małych sił – do 100 N. Przedstawiono sposób doboru jego warunków pracy. Zaproponowano odmienny od dotychczasowego sposób prezentacji właściwości magnetoelastycznych. Zaprezentowano wpływ naprężeń na zmienność impedancji poprzecznej schematu zastępczego przetwornika siły. Przeprowadzone badania umożliwiają zaprojektowanie praktycznie użytecznych przetworników pomiarowych siły.

Słowa kluczowe: materiały amorficzne i nanokrystaliczne, magnetoelastyczność, efekt Villari'ego, czujnik siły.

Magnetoelastic properties of amorphous and nanocrystalline magnetic materials

Abstract

The utility of amorphous and nanocrystalline materials to application for magnetoelastic force transducers was described. The essential magnetoelastic properties of tested materials was indication. The new type of transducer was designed and executed, particularly to low measuring ranges - to 100 N. The methodology of selection of work conditions of transducer was presented. The new method of presentation of magnetoelastic properties, different from hitherto exist, was suggested. The influence of tension on transverse impedance of equivalent circuit of the force transducer was presented. The conducted investigations make possible to design the practically useful measuring force transducers.

Keywords: amorphous and nanocrystalline materials, magnetoelasticity, Villari effect, force sensor.

1. Wstęp

Alternatywą dla tensometrycznych przetworników pomiarowych siły są przetworniki magnetoelastyczne. Zasada działania tych przetworników oparta jest na zmianie właściwości magnetycznych materiału pod wpływem naprężeń mechanicznych. Zjawisko takie zostało zaobserwowane przez Villari'ego w ubiegłym wieku, a przetworniki do pomiaru siły, wykorzystujące to zjawisko, budowane były począwszy od lat dwudziestych. Problemem zasadniczym przy budowie magnetoelastycznych przetworników siły jest dobór materiału magnetycznego.

Wraz z opracowaniem technologii produkcji nanokrystalicznych materiałów magnetycznych pojawiło się zainteresowanie wykorzystaniem tych materiałów w konstrukcji przetworników pomiarowych siły, zwłaszcza wobec stwierdzenia bardzo wysokiej magnetostrykcji niektórych materiałów amorficznych.

Nie ma obecnie powszechnie uznanej konstrukcji siłomierzy wykonanych z materiałów magnetoelastycznych, zwłaszcza na małe zakresy mierzonych sił – do 100 N.

Akceptowalna konstrukcja musi charakteryzować się następującymi cechami:

- niedokładność całkowita poniżej 0,5 % zakresu pomiarowego,
- liniowa charakterystyki przetwarzania,
- niższy koszt zarówno czujnika jak i aparatury pomiarowej, w stosunku do czujników i aparatury tensometrycznej,
- małe gabaryty czujników.

Spełnienie przedstawionych wyżej wymagań możliwe jest jedynie poprzez dobór odpowiednich materiałów o właściwościach magnetoelastycznych jak również odpowiedniego kształtu czujników, co pociąga za sobą dalsze decyzje dotyczące warunków zasilania czujników, ich punktu pracy i wielkości wyjściowych. Dobór materiału do konstrukcji czujników, jak również określenie wpływu poprzecznej indukowanej anizotropii magnetycznej na właściwości metrologiczne przetworników siły i naprężeń, jest istotnym zagadnieniem do rozwiązania.

2. Konstrukcja czujnika i metodyka badań

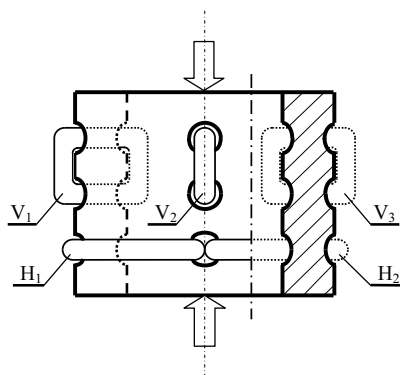
Tradycyjny sposób prezentowania właściwości magnetoelastycznych materiałów magnetycznych polega na przedstawieniu zmian indukcji B od natężenia pola H , dla różnych wartości naprężeń σ w materiale. W niektórych przypadkach bazuje się również na zmianach względnej przenikalności magnetycznej μ . Ten sposób prezentacji, z dwu powodów, jest daleki od potrzeb praktycznych, występujących przy projektowaniu przetworników magnetoelastycznych. Po pierwsze, nie uwzględnia on faktu, iż wszystkie przetworniki magnetoelastyczne pracują przy zmiennych polach magnetycznych i charakterystyki statyczne nie mają tu zastosowania. Po drugie, charakterystyka magnesowania $B(H)$ lub przenikalności $\mu(B)$ może być poprawnie wyznaczona jedynie dla próbek toroidalnych lub o zbliżonych kształtach.

W próbce toroidalnej nie można wywołać równomiernego rozkładu naprężeń o kierunku zgodnym z kierunkiem wektora H . Strumień magnetyczny zamyka się tam również przez fragmenty rdzenia gdzie kierunki pola magnetycznego i pola naprężeń są zasadniczo różne i zmienne. Dlatego też wyciąganie ogólnych wniosków o magnetoelastycznych właściwościach materiału na podstawie takich badań jest nieuzasadnione. Można jedynie wnioskować o metrologicznych właściwościach konkretnego typu czujnika bez uogólniania na magnetoelastyczne właściwości materiału. Ten sam materiał użyty do konstrukcji innego rodzaju czujnika, w którym kierunek naprężeń i strumienia magnetycznego jest odmienny, może wykazywać zupełnie różne właściwości.

Przy projektowaniu przetwornika pomiarowego siły przyjęto kształt i technologię jego wykonania tak, aby mierzona siła można było rozłożyć możliwie równomiernie na wiele elementów o małym przekroju. Warunki te spełnione są w zaprojektowanej konstrukcji czujnika przedstawionego na rys. 1.

W konstrukcji tej możliwe jest porównanie wyników oddziaływania pola poprzecznego i równoległego względem naprężeń, gdyż poprzez umieszczenie dodatkowego rzędu otworów możliwe jest wytworzenie obu tych pól równocześnie w tej samej konfiguracji geometrycznej. Wzajemne zależności pomiędzy naprężeniem i polem magnetycznym w próbce są łatwe do wyznaczenia.

Uzwojenia wywołujące pola równoległe do naprężeń oznaczone są literą "H" (horyzontalne), usytuowane poziomo, natomiast uzwojenia wywołujące pola prostopadłe do naprężeń oznaczone są odpowiednio literą "V" (wertykalne), gdyż uzwojenia te położone są pionowo.

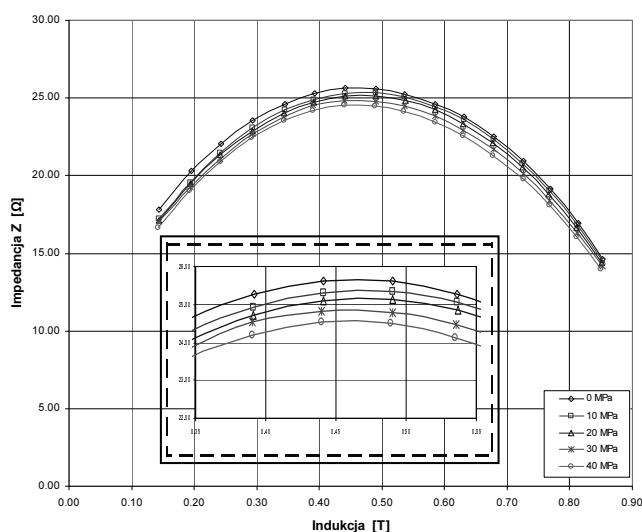


Rys. 1. Magnetyczny przetwornik siły
Fig. 1. Magnetic force transducer

Czujnik wykonany został z materiału nanokrystalicznego, o technicznej nazwie FINEMET, w ramach współpracy z grupą badawczą Instytutu Metali Nieżelaznych w Gliwicach. Naprężenia ściskające realizowane były na pomiarowej przekładni wagowej z tensometrycznymi czujnikami siły klasy 0,1, traktowanymi jako wzorcowe. Zakres naprężeń ustalono na podstawie dopuszczalnych obciążeń dla badanego materiału, z zachowaniem współczynnika bezpieczeństwa. Zakres ten wynosił 50 MPa.

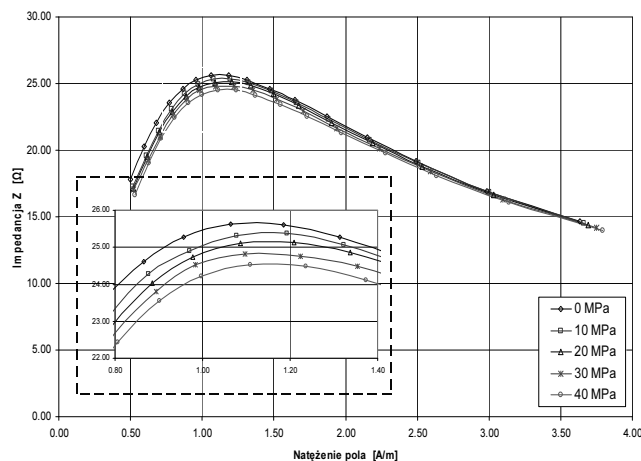
Badania zostały przeprowadzone za pomocą komputerowego systemu pomiarowego, zbudowanego z układu elektronicznego, wzmacniacza mocy do zasilania uzwojeń czujnika oraz przetwornika do pomiaru prądu. System pomiarowy umożliwiał zasilanie czujnika prądem o częstotliwości zmienianej w zakresie od 40 do 1000 Hz. Po wykonaniu szeregu wstępnych badań okazało się, iż najistotniejsze informacje dotyczące badanego przetwornika można uzyskać poprzez analizę sygnałów napięcia wtórnego U oraz prądu pierwotnego I uzwojeń. Pomiar tych dwu charakterystycznych wielkości umożliwiał wyliczenie pozostałych wielkości charakteryzujących badaną próbkę: wykresów czasowych (np: dynamiczna pętla histerezy), wykresów w funkcji natężenia pola {np: wykresy $B(H)$, $Z(B)$, $P(B)$ lub $\mu(B)$ }, przy stałej częstotliwości zadanego sygnału lub też wykresów w funkcji częstotliwości, przy stałej wartości amplitudy zadanego sygnału.

W pracy przedstawiono najistotniejsze wykresy zmienności impedancji Z gałęzi poprzecznej schematu zastępczego przetwornika w funkcji indukcji (rys. 2) oraz natężenia pola (rys. 3) dla różnych wartości naprężeń w badanym obiekcie.



Rys. 2. Zmiany impedancji gałęzi poprzecznej schematu zastępczego przetwornika siły w funkcji indukcji w przetworniku, dla różnych wartości naprężeń
Fig. 2. The variation of transverse impedance of equivalent circuit of force transducer vs. flux density, for different stress

System komputerowy umożliwiał również pomiary parametrów podłużnych próbki materiału magnetostrykcyjnego. Stwierdzono jednak, iż zarówno składowa reaktancyjna jak i składowa rezystancyjna impedancji podłużnej nie zależą od naprężeń, a jedynie dla wyższych częstotliwości (od około 500 Hz) w nieznanym sposób zmniejszają się wraz ze zwiększaniem pola. Dlatego też w dalszych badaniach nie uwzględniano zmian impedancji podłużnej schematu zastępczego przetwornika.



Rys. 3. Zmiany impedancji gałęzi poprzecznej schematu zastępczego przetwornika w funkcji natężenia pola w przetworniku, dla różnych wartości naprężeń

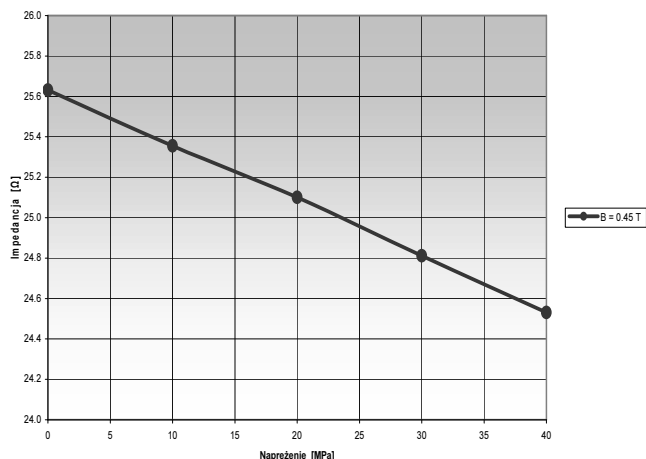
Fig. 3. The variation of transverse impedance of equivalent circuit of force transducer vs. magnetic field, for different stress

Istotnych informacji dostarczają również wykresy składowych R_{Fe} i X_{μ} impedancji gałęzi poprzecznej Z , które mogą być przedstawiane w formie zmian obu składowych przenikalności zespolonej w funkcji natężenia pola. Zmiana właściwości magnetycznych pod wpływem naprężeń nie polega bowiem wyłącznie na zmianie przenikalności magnetycznej lecz także na zmianie stratności materiału magnetycznego. Dlatego też dobrą formą prezentacji właściwości magnetosprężystych są charakterystyki dynamiczne właściwości materiałów magnetycznych. Charakterystyki te, z powodu trudności ich uzyskania (metody ferometryczne) nie znajdują praktycznego zastosowania.

Z przedstawionych na rysunkach 2 oraz 3 dynamicznych charakterystyk zmian impedancji wynika, że optymalnym punktem pracy przetwornika siły jest punkt, w którym charakterystyki te osiągają ekstremum. Osiąga się wówczas największą czułość przetwornika oraz zapewnia nieistotną zmianę impedancji przy zmianach indukcji lub natężenia pola wywołanego naprężeniem. Na rysunkach przedstawiono rozwinięcie tych charakterystycznych obszarów.

Z wykresów $Z = f(B)$ (rys. 2) wyznaczono charakterystykę zmian impedancji gałęzi poprzecznej schematu zastępczego przetwornika w funkcji zmiany naprężenia σ , przy stałej indukcji w rdzeniu ($B = 0,45$ T). Charakterystykę tę przedstawiono na rys. 4. Charakterystyka jest liniowa w całym zakresie naprężeń.

Postuluje się zatem, aby właściwości magnetosprężyste odnosić do określonej konstrukcji i przedstawiać w postaci charakterystyk odpowiadających zmianom impedancji materiału zastosowanego w konstrukcji konkretnego czujnika. Charakterystyki takie mogą być uzupełnione danymi o zmienności rezystancji i reaktancji poprzecznej. W przypadku wyższych częstotliwości, gdzie przebiegi prądów i napięć są w przybliżeniu sinusoidalne, dane te mogą być podane również w postaci składowych przenikalności zespolonej.



Rys. 4. Zmiany impedancji gałęzi poprzecznej schematu zastępczego przetwornika w funkcji zmiany naprężenia przy stałej indukcji w przetworniku ($B = 0,45$ T)

Fig. 4. The variation of transverse impedance of equivalent circuit of force transducer vs. stress, for constant magnetic field in transducer ($B = 0,45$ T)

3. Wnioski

Badania amorficznych materiałów magnetycznych wykazały, że materiały te mogą znaleźć zastosowanie w konstrukcji magneto-sprężystych przetworników pomiarowych siły i naprężeń. Istotnym zagadnieniem jest zbadanie czułości przetworników wykonanych z wyselekcjonowanych materiałów nanokrystalicznych.

Uzyskanie charakterystyk dla różnych co do wartości, ściśle określonych i jednorodnych stanów naprężeń w materiale jest praktycznie nieosiągalne. Dlatego też właściwości magneto-sprężyste materiałów należy przedstawiać zawsze w odniesieniu do konkretnego czujnika np. w postaci charakterystyk prądowo-napięciowych $U(I)$ uzwojeń tego czujnika, w przybliżeniu odpowiadających charakterystykom $B(H)$, nie materiału lecz konkretnej próbki. W tym celu zaprojektowano i wykonano nowy typ

przetwornika. Zaproponowano konstrukcję przetwornika przydatną do budowy czujników siły na niskie zakresy pomiarowe i przedstawiono metodykę doboru warunków pracy przetwornika. Stwierdzono istotne właściwości magneto-sprężyste badanych materiałów.

Przeprowadzone badania umożliwiają zaprojektowanie praktycznie użytecznych przetworników pomiarowych siły oraz współpracujących z nim układów pomiarowych.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Edukacji i Nauki w latach (2005 - 08) jako projekt badawczy zamawiany.

4. Literatura

- [1] A. Kolano-Burian, R. Kolano, J. Szynowski, N. Wójcik, L. Wilczura: Właściwości magnetyczne nanokrystalicznego materiału typu Finemet, *Archiwum Nauki o Materiałach* 24 (2003) 79
- [2] R. Kolano, N. Wójcik, A. Kolano: Construction and magnetic properties of the amorphous - nanocrystalline cores, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 503
- [3] A. Bieńkowski, R. Kolano, R. Szewczyk, "New method of characterization of magnetoelastic properties of amorphous ring cores", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 254 - 255 (2003) 67
- [4] R. Szewczyk, A. Bieńkowski, A. Kolano-Burian „Magnetostrictive properties of Fe40Ni38Mo4B18 alloy”, *Materials Science and Engineering A* 375 - 377 (2004) 1137
- [5] Kwiczala J., System pomiarowy do wyznaczania parametrów materiałów magnetycznych – *Pomiary, Automatyka, Kontrola* Nr 6, 2004
- [6] Wojcik N., Kolano R.: Construction and Magnetic Properties of the Amorphous Nanocrystalline Cores, *SMM Conference Abstract, Hungary* 1999

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Najnowsza książka Wydawnictwa PAK



założenia polityki krajów UE oraz strategii energetycznej Polski wobec OZE.

Na przełomie sierpnia i września ukazała się kolejna książka Wydawnictwa PAK autorstwa Tomasza Boczara pt.: *Energia wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*.

W niniejszej książce przedstawiono aktualne możliwości wykorzystania energii wiatru do produkcji energii elektrycznej na obszarze Europy, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnych zasobów i stopnia ich wykorzystania na terenie Polski, a także województwa polskiego. Ponadto scharakteryzowano podstawowe

Książka skierowana jest przede wszystkim do studentów oraz wykładowców prowadzących zajęcia dydaktyczne na kierunkach elektrycznych, jak również związanych z inżynierią i ochroną środowiska. Opisane zagadnienia mogą stanowić materiał dydaktyczny związany z aktualnymi możliwościami oraz przyszłymi kierunkami w pozyskiwaniu energii wiatru do produkcji energii elektrycznej.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl