

mgr inż. Jacek Salach, prof. nzw. dr hab. inż. Adam Bieńkowski  
Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej

dr inż. Roman Szewczyk  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów „PIAP”

## MAGNETOSPŘEŻYSTE SENSORY MOMENTU SKRĘCAJĄCEGO Z RDZENIEM PIERŚCIENIOWYM ZE SZKŁA METALICZNEGO NA BAZIE ŹELAZA

*W referacie przedstawiono nowe rozwiązanie konstrukcyjne magneto-sprężystego sensora momentu skręcającego z rdzeniem pierścieniowym ze szkła metalicznego. Jako rdzenie sensora zaproponowano zastosowanie wysokomagnetostrykcyjnego szkła metalicznego o składzie chemicznym  $Fe_{78}Si_{13}B_9$  zarówno w stanie wyjściowym jak i po termicznej relaksacji strukturalnej. Zbadano charakterystyki magneto-sprężyste  $B(H)_{M_s}$  (obejmujące zależność indukcji magnetycznej  $B$  od pola magnesującego  $H$ , przy ustalonym momencie skręcającym  $M_s$ ) oraz charakterystyki  $B(M_s)_H$  opisujące zależność indukcji magnetycznej  $B$  od momentu skręcającego  $M_s$  przy ustalonym polu magnesującym  $H$ . Wyniki badań wykazały znaczne zmiany parametrów magnetycznych badanych rdzeni pod wpływem momentu skręcającego, a w rezultacie praktyczną możliwość zastosowania rdzeni ze szkieł metalicznych do budowy magneto-sprężystych sensorów momentu skręcającego*

### MAGNETOELSTIC TORQUE SENSORS WITH IRON-BASED AMORPHOUS RING CORES

*The paper presents novel solutions in the area of development of magnetoelastic torque sensors. As a cores of sensors highly magnetostrictive amorphous ring cores in as-quenched and annealed state were utilized. The results of the tests of  $B(H)_{M_s}$  and  $B(M_s)_H$  characteristics indicated high changes of magnetic parameters under the influence of the torque. As a result it was proven, that the tested amorphous cores may be utilized as a cores of magnetoelastic torque sensors.*

## 1. WSTĘP

Ze względu na unikatowe właściwości magnetyczne, szkła metaliczne są powszechnie stosowane jako materiały do produkcji podzespołów indukcyjnych zarówno dla urządzeń energetycznych jak i mechatronicznych. Parametrami mającymi kluczowy wpływ na praktyczne zastosowanie tych materiałów jest bardzo duża początkowa przenikalność magnetyczna  $\mu_i$  oraz małe pole koercji  $H_c$ . Z tych względów elementy indukcyjne

na bazie stopów amorficznych charakteryzują się korzystnymi parametrami funkcjonalnymi, a w szczególności wysoką sprawnością [1].

Szkła metaliczne znalazły także zastosowanie w konstrukcji rdzeni magnetosprężystych sensorów sił ściskających. Zastosowanie tych magnetyków umożliwiło dokonanie przełomu w konstrukcji tych sensorów. Szkła metaliczne nie mają struktury krystalicznej, a w rezultacie w ich całkowitym bilansie energii swobodnej nie występuje energia anizotropii magnetokrystalicznej. Z tego względu cechują się one wysoką czułością magnetosprężystą w odniesieniu do sił ściskających. W rezultacie zmiany parametrów mierzalnych (takich jak np. przenikalność amplitudowa  $\mu_a$ ) w sensorach magnetosprężystych są około dwa rzędy wielkości większe, niż zmiany parametru mierzalnego (rezystancji) w sensorach tensometrycznych [2].

Doskonałe parametry magneto-mechaniczne szkieł metalicznych stwarzają także nowe możliwości ich zastosowania w konstrukcji sensorów momentów skręcających. Jednak znane z literatury światowej badania dotyczą tylko zastosowania cienkich prętów wykonanych z tych materiałów [3, 4] lub taśm naklejanych na element sprężysty [5]. W cienkich prętach obciążanych momentem skręcającym ma miejsce złożony, trudny do zdefiniowania i analizy niejednorodny stan naprężeń normalnych i tnących. Jednocześnie zarówno w przypadku cienkich prętów jak i taśm magnetowód badanych rdzeni jest otwarty. W rezultacie w bilansie energii swobodnej takiego rdzenia pojawia się energia odmagnesowania, co obniża czułość magnetosprężystą sensora.

Niedogodności te spowodowały konieczność rozpoczęcia poszukiwań nowej metodyki zadawania momentu skręcającego do rdzeni wykonanych ze szkieł metalicznych. Metodyka taka powinna umożliwiać równoczesne zastosowanie rdzeni o zamkniętym magnetowodzie jak i uzyskanie w tych rdzeniach jednorodnego i zdefiniowanego rozkładu zarówno naprężeń tnących jak i pola magnesującego rdzeń.

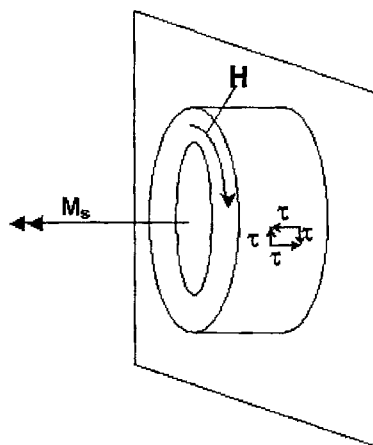
## **2. METODYKA ZADAWANIA MOMENTU SKRĘCAJĄCEGO DO RDZENIA PIERŚCIENIOWEGO SENSORA MAGNETOSPŘĘŻYSTEGO**

Dotychczasowe prace wykazały, że bezpośrednie przyłożenie momentu skręcającego do rdzenia (np. poprzez uchwyt, tak jak dla materiałów litych) nie jest możliwe, ze względu na pojawienie się znacznych odkształceń deformujących rdzeń. Wynika to bezpośrednio z konstrukcji rdzenia pierścieniowego zwiniętego ze szkła metalicznego o grubości około 25  $\mu\text{m}$  i stanowi główne ograniczenie w zastosowaniu tych rdzeni jako sensorów momentów skręcających.

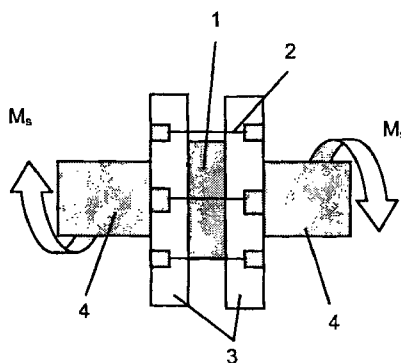
Z tego względu opracowano zupełnie nową metodykę w której kierunek wektora momentu skręcającego jest zgodny z osią rdzenia pierścieniowego, zaś uzwojenia magnesujące i pomiarowe są rozmieszczone współosiowo wzdłuż obwodu rdzenia. Ideę opracowanej metody przedstawiono na rysunku 1.

W urządzeniu realizującym praktycznie przedstawioną metodykę płaszczyzny czołowe rdzenia pierścieniowego zostały przytwierdzone do niemagnetycznych nakładek, które umożliwiają przyłożenie momentu skręcającego do rdzenia bez wprowadzania dodatkowych naprężeń. Nakładki te są na sztywno połączone ze wszystkimi zwojami taśmy

rdzenia, tak więc wszystkie zwoje taśmy przenoszą równomiernie występujące w rdzeniu naprężenia tnące. Dodatkowe nakładki mają prostokątne nacięcia współpracujące z wypustkami spręgieł przenoszących moment skręcający. W nacięciach tych mogą być umieszczone uzwojenia magnesujące oraz pomiarowe. Na rysunku 2 przedstawiono rdzeń z nakładkami i spręgielami oraz sposób rozmieszczenia uzwojeń magnesujących i pomiarowych.



Rys. 1. Idea metodyki przykładania momentu skręcającego do rdzenia magnetycznego sensora momentu skręcającego ( $H$  - pole magnesujące,  $M_s$  - moment skręcający,  $\tau$  - naprężenia tnące)



Rys. 2. Budowa urządzenia do zadawania momentu skręcającego do rdzenia pierścieniowego (1 - rdzeń pierścieniowy, 2 - uzwojenia pomiarowe i magnesujące, 3 - nakładki, 4 - spręgiła)

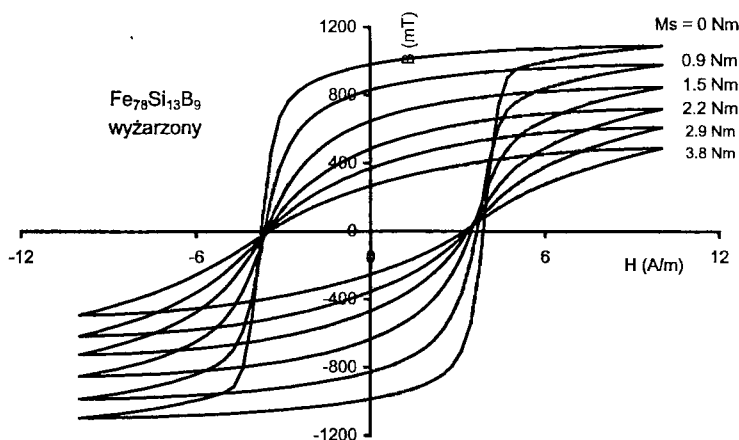
Należy podkreślić, że w przedstawionej metodyce moment skręcający zadawany jest do rdzenia pierścieniowego o zamkniętym magnetowodzie. Umożliwia to zarówno uzyskanie większej czułości magnetosprężystego sensora, niż ma to miejsce w przypadku rdzeni w formie prętów, jak i minimalizację wpływu zewnętrznych zakłóceń magnetycznych na pracę sensora [6].

Badania wstępne parametrów funkcjonalnych magnetosprężystego sensora momentu skręcającego wykonano na rdzeniach pierścieniowych o średnicy 22 mm, i polu przekroju (wzdłuż tworzącej) równemu  $20 \text{ mm}^2$ . Badane rdzenie zwinięto z taśmy o szerokości 25 mm i średniej grubości  $23 \mu\text{m}$ , wykonanej ze szkła metalicznego o składzie  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$  w stanie wyjściowym jak i po przeprowadzeniu relaksacji strukturalnej w temperaturze  $365^\circ\text{C}$  w czasie 1 godziny. Badania wpływu momentów skręcających wykonano w zakresie od 0 do 4 Nm. Rozkład punktów pomiarowych był uwarunkowany konstrukcją stanowiska pomiarowego i wynikał ze sposobu zadawania momentu skręcającego  $M_s$ , w którym ramię obciążane jest szalką z obciążnikami o znanej masie. Zastosowany sposób zadawania momentu skręcającego zapewniał powtarzalność wartości momentu przykładanego do rdzenia, ponieważ zadawany moment skręcający był kontrolowany czujnikiem momentu skręcającego.

Badane rdzenie były magnesowane quasistatycznym polem  $H_m$  o przebiegu trójkątnym i o częstotliwości 1 Hz. Pomiaru wykonano dla różnych wartości amplitud pola magnesującego  $H_m$  będącymi krotnościami wartości pola koercji  $H_c$ .

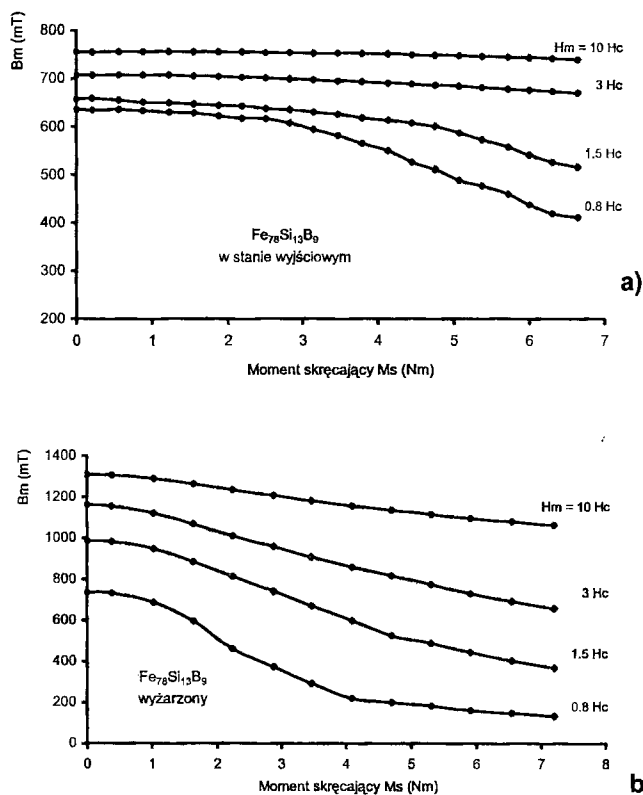
### 3. WYNIKI BADAŃ

Wpływ momentu skręcającego  $M_s$  na pętle histerezy magnetycznej rdzenia ze szkła metalicznego  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$  poddanego relaksacji termicznej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wpływ momentu skręcającego  $M_s$  na kształt pętli histerezy magnetycznej  $B(H)_{M_s}$  szkła metalicznego  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$  poddanego relaksacji termicznej

Pod wpływem momentu skręcającego  $M_s=3,8$  Nm wartość indukcji magnetycznej dla pola magnesującego  $H_m=11$  A/m maleje od około 1100 mT do 500 mT. Natomiast wartość pola koercji  $H_c$  w tym zakresie zmian  $M_s$  zmienia się nieznacznie, co wskazuje na niewielkie zmiany wartości magnetyzacji nieodwracalnej pod wpływem momentu skręcającego [7].



Rys. 4. Zależność indukcji maksymalnej  $B_m$  od momentu skręcającego  $M_s$  przy ustalonych wartościach pola magnesującego  $H_m$  dla szkła metalicznego  $Fe_{78}Si_{13}B_9$  a) rdzeń w stanie wyjściowym, b) rdzeń po relaksacji termicznej

Charakterystyki  $B(M_s)_H$  dla rdzenia ze stopu o składzie  $Fe_{78}Si_{13}B_9$ , w stanie wyjściowym oraz po relaksacji termicznej przedstawiono na rysunku 4. Pod wpływem momentu skręcającego 6,5 Nm indukcja  $B$  w rdzeniu w stanie wyjściowym maleje o około 35%, zaś w rdzeniu po relaksacji o około 80% (w obydwu przypadkach dla pola magnesującego  $H_m=0,8 H_c$ ). Wzrost czułości magnetosprężystej w rdzeniu poddanym relaksacji termicznej wynika ze zmniejszenia się wartości naprężeń własnych w relaksowanym rdzeniu, a w rezultacie ze wzrostem udziału energii magnetosprężystej w całkowitym bilansie energii swobodnej obciążanego rdzenia.

Ponadto zarówno w przypadku rdzenia w stanie wyjściowym jak i rdzenia poddanego relaksacji stwierdzono większe zmiany indukcji B w zakresie mniejszych pól magnesujących  $H_m$ . Zjawisko to było obserwowane także w przypadku magnetosprężystych sensorów sił ściskających i wynika ono ze zmniejszenia się udziału energii pola magnesującego w całkowitym bilansie energii swobodnej rdzeni. W rezultacie wpływ energii magnetosprężystej rośnie, co skutkuje wzrostem czułości magnetosprężystej.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono nową metodykę zadawania momentu skręcającego do zwijanego z taśmy rdzenia ze szkła metalicznego o składzie  $Fe_{78}Si_{13}B_9$ . Metodyka ta może być zastosowana zarówno w konstrukcji magnetosprężystych sensorów momentu skręcającego jak i w badaniach podstawowych związanych z poznaniem procesów magnesowania szkieł metalicznych poddanych działaniu naprężeń tnących.

Przedstawiono także wyniki badań wpływu momentu skręcającego na właściwości magnetyczne rdzeni o składzie  $Fe_{78}Si_{13}B_9$  zarówno w stanie wyjściowym jak i po relaksacji termicznej. Wyniki badań wskazują, że rdzenie pierścieniowe z taśmy ze szkła metalicznego po relaksacji termicznej, jako sensory momentu skręcającego, cechują się znacznymi zmianami parametrów magnetycznych (np. w zakresie zmian momentu skręcającego od 0 do 6,5 Nm indukcja magnetyczna maleje o 85 %). Ponadto zarówno w przypadku rdzenia w stanie wyjściowym jak i rdzenia poddanego relaksacji termicznej stwierdzono większe zmiany indukcji B w zakresie mniejszych pól magnesujących  $H_m$ .

W trakcie realizacji opisywanych w referacie prac badawczych dr inż. Roman Szewczyk był stypendystą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej.

#### LITERATURA

- [1] R. O'Handley "Modern magnetic materials – principles and applications" John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [2] R. Szewczyk, A. Bieńkowski „Compressive stress and force sensors with magnetoelastic ring-shaped sensing elements” *Elektronika* 8-9 (2004) 251 – 253.
- [3] H. Chiriac, C.S. Marinescu, T.A. Óvari, M. Neagu “Sensor applications of amorphous glass-covered wires” *Sensor and Actuators*, 76 (1999) 208-212.
- [4] E. Hristoforu “Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 249 (2002) 387-392.
- [5] J.Bydzowski, L.Kraus, P.Svec, M.Pasquale, M.Kollar “Strain sensors based on stress-annealed  $Co_{69}Fe_{2}Cr_7Si_8B_{14}$  amorphous ribbons” *Sensor and Actuators* 110 (2004) 82-86.
- [6] D. C. Jiles “Theory of magnetomechanical effect” *J. Appl. Phys.* 28 (1995) 1537-1546.
- [7] D. Jiles “Introduction to Magnetism and Magnetic Materials” Chapman&Hall, London 1998.