

Jacek BOMBA\*, Jerzy KALETA\*, Grażyna ZIĘTEK\*

## **BADANIE TŁUMIENIA W MATERIALE O GIGANTYCZNEJ MAGNETOSTRYKCJI**

W pracy przedstawiono metodykę i rezultaty badań tzw. gigantycznej magnetostrykcji w prętach wykonanych z Terfenolu-D. Wykazano wpływ natężenia pola magnetycznego i częstotliwości na odkształcenie pręta. Stworzono model drgań podłużnych w którym parametry uzależniono od natężenia pola magnetycznego. Wyrażono analitycznie związek pomiędzy częstotliwością rezonansową i natężeniem pola magnetycznego.

\* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

### **1. WSTĘP. ZNACZENIE PROBLEMATYKI BADAWCZEJ I CEL BADAŃ**

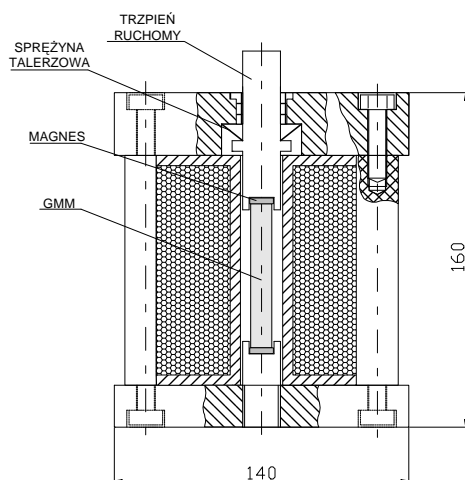
Materiały z grupy Smart (ang.: Smart Materials - SM) tworzą liczną już grupę nowych tworzyw konstrukcyjnych o ciekawych walorach poznawczych oraz interesujących cechach aplikacyjnych. Znaczą podgrupę stanowią materiały Smart, których główne cechy użytkowe można stymulować polem magnetycznym (ang.: Smart Magnetic Materials – SMM). Wśród nich rośnie z kolei rola Materiałów o Gigantycznej Magnetostrykcji (ang.: Giant Magnetostrictive Materials - GMM). Ich kluczowe znaczenie w wielu obszarach wynika z możliwości efektywnego przekształcania energii magnetycznej w mechaniczną (działanie typu aktuator) oraz mechanicznej w magnetyczną (działanie typu sensor), o bardzo dużym współczynniku sprawności. Szerzej o tej grupie tworzyw konstrukcyjnych powiedziano we wstępie do pracy stowarzyszonej [1].

Niezbędnym warunkiem efektywnych aplikacji GMM w układach adaptacyjnych jest identyfikacja zachowania się materiałów w warunkach występowania różnorodnych pól fizycznych. Dlatego kluczowe znaczenie ma tworzenie modeli magnetostrykcji, a dokładniej gigantycznej magnetostrykcji oraz ich identyfikacja. Poniżej poszukiwano również modelu drgań, który umożliwiłby w przyszłości stworzenie efektywnego algorytmu sterowania wzbudnikiem magnetostrykcyjnym. Zadania te uznano za cel główny pracy. Za kwestię kluczową uznano ponadto stworzenie metodyki i stanowiska do badań eksperymentalnych, umożliwiających badanie różnorodnych materiałów GMM z szerokim zakresem zmian parametrów mechanicznych i magnetycznych. Inne aspekty, takie jak wpływ naprężeń wstępnych na zjawiska magnetomechaniczne w materiałach typu GMM czy sprawność przekształcania energii magnetycznej w mechaniczną i odwrotnie, w Terfenolu-D, były przedmiotem prac wcześniejszych [2,6-12].

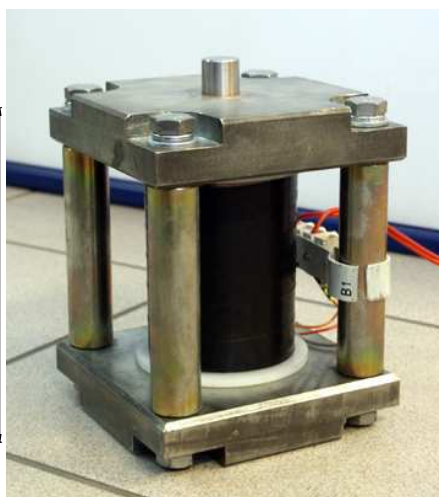
## 2. EKSPERYMENT. OBIEKT BADAŃ, METODYKA POMIARU, ANALIZA WYNIKÓW

Obiektem badań był dwa materiały GMM, a mianowicie: stop (Tb-Dy)-Fe<sub>2</sub> – pochodzący z firmy Gansu Tianxing Rare Earth Functional Materials Co. (Chiny) oraz Terfenol-D z firmy ETREMA Products Inc (USA). Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie walca o wymiarach  $\phi 10$  mm i długości 70 mm, którą wstawiono wewnątrz wzbudnika magnetostrykcyjnego (Rys. 1). Pręt ściśnięto wstępnie za pomocą sprężyny do wartości naprężenia wstępnego  $\sigma_0$  wynoszącego 10 MPa. Dodatkowo, umieszczając na obu końcach pręta dwa magnesy stałe, przyłożono stałe pole podmagnesowujące  $H_m = 55$  kA/m. Obiekt badań, stanowisko pomiarowe oraz inne aspekty, np. zasady doboru  $\sigma_0$ ,  $H_m$  opisano dokładniej w pracach [2, 3-12].

a)



b)

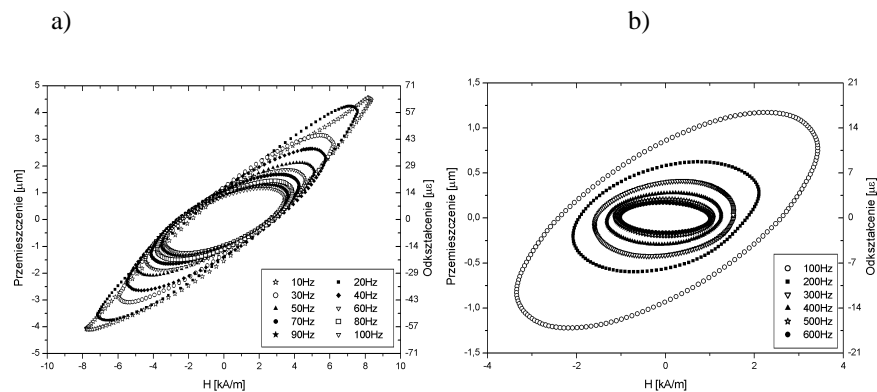


Rys. 1. Wzbudnik magnetostrykcyjny wykorzystujący materiał typu GMM: a) schemat; b) prototypowy układ laboratoryjny [2, 8-12]

Pomiary miały na celu określenie wpływu częstotliwości wymuszenia zmiennym polem magnetycznym  $H(t)$  przyłożonym wzdłuż osi próbki na wartości przemieszczenia  $u(t)$  ruchomego trzpienia wzbudnika magnetostrykcyjnego, połączonego bezpośrednio z końcem próbki magnetostrykcyjnej, co jest jednocześnie przemieszczeniem końca pręta drgającego.

Przeprowadzono serię badań polegających na identyfikacji krzywych magnetomechanicznych w układzie współrzędnych  $H-u$ , w warunkach cyklicznych zmian natężenia pola magnetycznego, dla częstotliwości wymuszenia odpowiednio  $f = \{10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 200; 300; 400; 500; 600\}$  Hz. Ze względu na ograniczenie techniczne układu zasilania wzbudnika magnetostrykcyjnego, amplituda natężenia zewnętrznego pola magnetycznego malała wraz ze wzrostem częstotliwości. Wszystkie analizowane rezultaty uzyskano dla temperatury  $T = 293$  K.

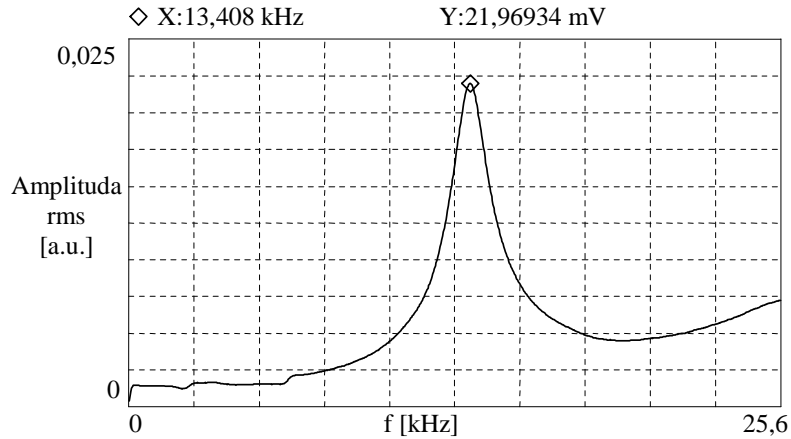
Na Rys. 2. przedstawiono wyniki pomiarów zależności przemieszczenia  $u(t)$  końca próbki od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego  $H(t)$  dla częstotliwości wymuszenia odpowiednio:  $f = \{10; 20; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600\}$  Hz. Widoczny jest silny wpływ częstotliwości wymuszenia polem magnetycznym na kształt charakterystyk magneto-mechanicznych. W zakresie częstotliwości  $10 \div 100$  Hz charakterystyki przyjmują kształt zbliżony do elipsy (Rys. 2. a). Natomiast dla wyższych częstotliwości otrzymano kształty owalne (Rys. 2. b).



Rys. 2. Zależność przemieszczenia od pola magnetycznego dla różnych częstotliwości zmiennego pola magnetycznego [2]

Na rysunku 2. przedstawiono pętle histerezy w układzie  $(H - u)$ . Pole takiej pętli możemy traktować jako „przeskalowaną” energię (w jednostkach  $\text{mA/m}^2$ ) rozproszoną w materiale jako wynik obu tłumień: mechanicznego i magnetycznego. Widać ponadto wyraźnie, iż przy kontrolowanym stałym napięciu zasilania amplitudy wymuszenia, wraz ze wzrostem częstotliwości, poza zmianą kształtu charakterystyki, maleje amplituda przemieszczenia. Dzieje się tak głównie na skutek występowania indukcyjności w układzie elektrycznym wzbudnika oraz ze względu na zjawisko prądów wirowych. Jest to istotna informacja w przypadku problemu optymalnego sterowania wzbudnikiem magnetostrykcyjnym w obszarze wyższych częstotliwości.

W kolejnym etapie zbadano wpływ pola magnetycznego na wartość częstotliwości rezonansowej. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie zmian  $H$ . Na rysunku 3. przedstawiono przykładowe widmo mocy z EAM dla wartości zewnętrznego pola magnetycznego  $H = 40 \text{ kA/m}$ . Problem ten rozważono dokładniej w rozdziale 3.



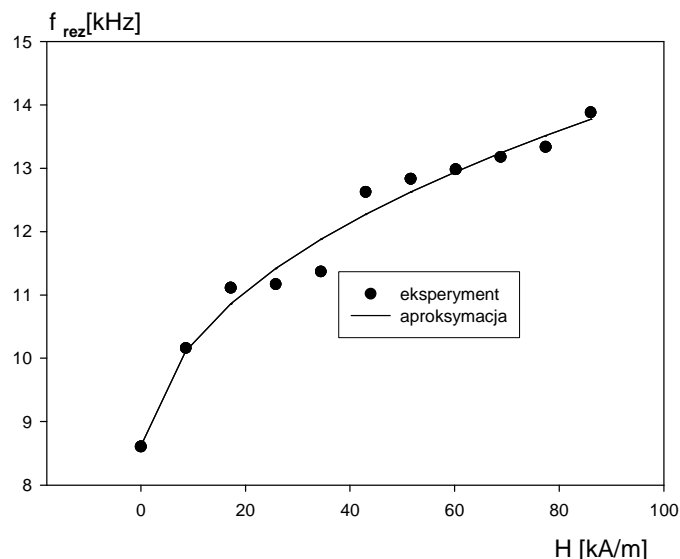
Rys. 3. Przykładowe widmo mocy badania rezonansu materiału magnetostrykcyjnego Terfenol-D metodą EAM dla wartości zewnętrznego pola magnetycznego  $H = 40 \text{ kA/m}$ .

### 3. MODEL DRGAŃ PRĘTA GMM I WYNIKI IDENTYFIKACJI.

Drgania materiału GMM możemy rozpatrywać podobnie jak drgania mechaniczne, z tym, że do tłumienia mechanicznego (związanego z lepkością) dochodzi jeszcze tłumienie wywołane prądami wirowymi, czyli pole magnetyczne powoduje powstanie siły przeciwdziałającej ruchowi (efekt Villariego). Z kolei odpowiednikiem siły wymuszającej jest siła powstająca na skutek działania pola magnetycznego (magnetostrykcja). Należy to uwzględnić budując równanie drgań podłużnych pręta GMM. W tym celu redukujemy pręt do układu o jednym stopniu swobody. Korzystając z zasady d'Alemberta otrzymujemy równanie:

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + cu + |g_1(H, \dot{H})| \text{sign}(\dot{u}) = g_2(H, \dot{H})$$

Na rysunku 4. przedstawiono zależność wartości częstotliwości rezonansowej od wartości stałego zewnętrznego pola magnetycznego  $f_{\text{rez}}(H)$ . Otrzymane wartości częstotliwości rezonansowej możemy interpretować jako zmianę sztywności próbki związaną ze zmianą sieci krystalicznej pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Ze względu na właściwości magnetostrykcyjne, wraz ze wzrostem wartości pola magnetycznego następuje wzrost wartości częstotliwości rezonansowej oraz także, w pewnym zakresie, wzrost wartości dekrementu tłumienia.



Rys. 4. Zależność częstotliwości rezonansowej od natężenia pola magnetycznego  $f_{rez}(H)$ .

Zależność między natężeniem pola magnetycznego i częstotliwością rezonansową zaprosymowano funkcją potęgową:

$$f_{rez} = a_1 + \sqrt{\frac{H}{H_o}},$$

gdzie  $a_1$  jest częstotliwością rezonansową przy zerowym polu magnetycznym, natomiast  $H_o$  jest charakterystycznym natężeniem pola magnetycznego. Na podstawie danych eksperymentalnych wyznaczono  $a_1 = 8.5 \text{ kHz}$ , natomiast  $H_o = 3.3 \text{ kA/m}$ . Wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego rośnie częstotliwość rezonansowa, z czego wynika, że rośnie sztywność materiału.

Szerzej całość zagadnienia metodyki badań, modelowania magnetostrykcji, drgań pręta i identyfikacji - omówiono w pracy [2].

#### 4. WNIOSKI

- Zbadano gigantyczną magnetostrykcję materiału Smart typu Terfenol-D, wykazując istotny wpływ amplitudy natężenia pola magnetycznego i częstotliwości na wartość odkształcenia pręta.
- Wykazano wzrost, wraz ze wzrostem częstotliwości - wartości prądów wirowych, co skutkuje przyrostem tłumienia w Terfenolu-D. Uzasadnia to prace nad wytworzeniem kompozytów z udziałem sproszkowanego Terfenolu-D, gdzie wpływ prądów wirowych można ograniczyć (patrz praca stowarzyszona [1], /ibidem.).

- Zaproponowano model opisujący wpływ natężenia pola magnetycznego na częstotliwość rezonansową drgającego podłużnie pręta GMM. Wykazano, iż wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego rośnie częstość rezonansowa, z czego wynika, że rośnie sztywność materiału.

## LITERATURA

- [1] Paweł Gąsior P., Kaleta J., Lewandowski D., Mech R, Budowa, metodyka badań i cykliczne właściwości magnetomechaniczne kompozytu na bazie proszków Terfenolu-D, /ibidem.
- [2] Bomba J., Tłumienie w materiale o gigantycznej magnetostrykcji. Eksperyment, modelowanie, identyfikacja. Praca doktorska wykonana w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem J. Kalety, Wrocław, 2008.
- [3] Bomba J., Kaleta J., Badanie własności cyklicznych materiałów o gigantycznej magnetostrykcji. Stanowisko i metodyka badań. Materiały XIX Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska, kwiecień 2002, s. 51-58.
- [4] Bomba J., Kaleta J., Giant magnetostrictive materials (GMM) as a functional material for construction of sensors and actuators. W: 19th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics. Abstracts., Polanica Zdrój, September 25-29, 2002.
- [5] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., Wpływ naprężeń wstępnych na zjawiska magnetomechaniczne w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji. W: II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Białystok, 2003.
- [6] Bomba J., Kaleta J., Sprawność przekształcania energii w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji. W: IX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Kielce-Cedzyna, 14-17 września 2003. Kielce, s. 47-54.
- [7] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., An initial investigation into change in magnetomechanical properties of terfenol-d rod due to prestress and temperature. Anyagvizsgalok Lapja. 2004 nr 1, s. 19-21.
- [8] Bomba J., Kaleta J., Sawa P., Application of giant magnetostrictive material into construction of broad spectrum vibration generator. Materials Science Forum [Dokument elektroniczny]. 2005 vol. 482, s. 395-398, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.scientific.net>
- [9] Bomba J., Kaleta J., Modelowanie wpływu naprężeń wstępnych na magnetostrykcję materiałów GMM. W: III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji. Materiały, Augustów, 1-4 czerwca 2005. s. 39-42.
- [10] Bomba J., Kaleta J., Investigation of magnetostrictive sensor in quasi-static conditions. W: 22nd Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics. Extended abstracts, Monticelli Terme-Parma, Italy, September 28 - October 1, 2005.
- [11] Bomba J., Kaleta J., Lewandowski D., Experimental methods in testing of smart magnetic materials. W: 22nd Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics. Extended abstracts. Italian Association for Stress Analysis [i in.], Monticelli Terme-Parma, Italy, September 28 - October 1, 2005.
- [12] Bomba J., Kaleta J., Przekształcanie energii w materiałach o gigantycznej magnetostrykcji w następstwie cyklicznego obciążania. W: Zmęczenie i mechanika pękania. Materiały XXI Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz-Pieczyska, 23-26 maja 2006. Bydgoszcz : Wydaw. Uczel. ATR, 2006. s. 43-50.

Pracę wykonano w ramach projektu 1577/2007/I-19 „Modelowanie materiałów sprężysto-lepkoplastycznych z uwzględnieniem pola magnetycznego”, realizowanego w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej.