

ANNA BOCZKOWSKA, STEFAN F. AWIETJAN*

WPŁYW MIKROSTRUKTURY NA WŁAŚCIWOŚCI
MAGNETOREOLOGICZNYCH ELASTOMERÓWINFLUENCE OF THE MICROSTRUCTURE ON THE
PROPERTIES OF MAGNETORHEOLOGICAL
ELASTOMERS

Streszczenie

Magnetoreologiczne elastomery (MREs) zawierające cząstki żelaza karbonylkowego w osnowie poliuretanowej były wytwarzane i badane. Dzięki charakterystycznej mikrostrukturze kolumnowej MREs odpowiadają na działanie pola magnetycznego poprzez zmianę właściwości reologicznych. Zbadano próbki o różnym ułożeniu łańcuchów cząstek względem linii pola magnetycznego zastosowanego podczas pomiarów. Wytwarzano także próbki o izotropowym rozmieszczeniu cząstek. Stwierdzono, że ukierunkowanie łańcuchów cząstek względem pola magnetycznego ma istotny wpływ na właściwości reologiczne MREs w polu magnetycznym. Moduł sprężystości postaciowej (G') silnie zależy od mikrostruktury MREs, a w szczególności od ułożenia cząstek. Uzyskane krzywe $G'(\omega)$ były aproksymowane równaniem zgodnym z modelem Cassona. Uzyskano i porównano wartości naprężenia uplastyczniającego τ_0 dla różnych MREs.

Słowa kluczowe: magnetoreologiczne elastomery, żelazo karbonylkowe, właściwości reologiczne, model Cassona

Abstract

In this work urethane magnetorheological elastomers (MREs) consisting of carbonyl-iron particles and a polyurethane matrix were manufactured and studied. Due to the characteristic columnar microstructure, MREs respond to the magnetic field by changing their rheological properties. The samples with different arrangement of particle chains relative to the magnetic field lines during measurement were studied. Also samples with the isotropic particles distribution were fabricated. The significant influence of the ferromagnetic particles arrangement on the rheological properties of the MREs in the relation to an external magnetic field was

* Dr inż. Anna Boczkowska, mgr inż. Stefan F. Awietjan, Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska.

found. Storage modulus (G') strongly depend on the MREs microstructure, in particular on particles arrangement. Measured $G'(\omega)$ curves were approximated with Casson's model. According to the approximation values of yield stress τ_0 for different MREs were compared.

Keywords: magnetorheological elastomers, carbonyl iron, rheological properties, Casson's model

1. Wprowadzenie

Magnetoreologiczne elastomery (MRE) to kompozyty o osnowie polimerowej, w której rozmieszczone są cząstki ferromagnetyczne. Na osnowę stosuje się najczęściej elastomery silikonowe, uretanowe lub gumy naturalne [1-4]. Wprowadzane do osnowy cząstki to przeważnie żelazo karbonylkowe, różne stopy żelaza [5] lub cząstki magnetostrykcyjne [6]. Zawartość cząstek ferromagnetycznych może zmieniać się od kilku do 50 % objętościowo [3, 4, 7]. Różne są również wielkości stosowanych cząstek: od kilku do kilkuset μm [8], a także różny może być ich kształt: od nieregularnego do kulistego [9].

Kształtowanie mikrostruktury MRE zachodzi podczas utwardzania w polu magnetycznym, powodując tworzenie tzw. struktury kolumnowej z cząstek ferromagnetycznych [1, 10]. Pole magnetyczne indukuje powstanie momentów dipolowych w ferromagnetycznych cząstkach, które z kolei dążą do obsadzenia położeń o minimalnej energii. Łańcuchy cząstek z liniowo zorientowanymi momentami dipolowymi zostają „zablokowane” po utwardzeniu elastomeru.

Oddziaływania pomiędzy cząstkami w polu magnetycznym powodują zbliżenie ich do siebie, a w efekcie wzrost sztywności materiału. Pod wpływem działania pola magnetycznego zmieniają się właściwości reologiczne MRE [11], głównie moduł sprężystości postaciowej, moduł stratności, a także tangens kąta przesunięcia fazowego, który jest miarą zdolności materiału do tłumienia drgań. Właściwości te silnie zależą od wartości indukcji pola magnetycznego. Reologiczne właściwości MRE mogą być zmieniane w sposób ciągły, a zmiany te są w pełni odwracalne [11].

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały i metodyka badań

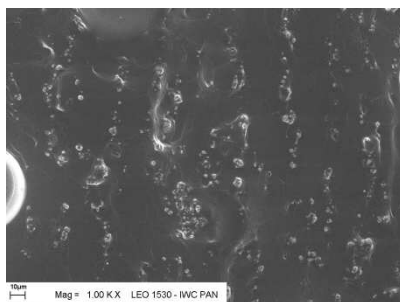
Do wytwarzania osnowy MRE zastosowano poliuretan będący trójskładnikową mieszaniną dwóch polioli eterowych o handlowych oznaczeniach VORALUX HF 505 i 14922 oraz izocyjanianu HB 6013, produkcji Dow Chemical Company. Otrzymywany elastomer poliuretanowy charakteryzuje się małą twardością (poniżej 10^9ShA) i sztywnością (około $0,1 \text{MPa}$), przy niezbyt dużej lepkości reaktywnej mieszaniny substratów ($\sim 1600 \text{mPa}\cdot\text{s}$). Daje to możliwość wytwarzania MRE o anizotropowej mikrostrukturze (cząstkach ukierunkowanych wzdłuż linii pola magnetycznego) i wyraźnym efekcie magnetoreologicznym (bezwzględna i względna zmiana właściwości MRE w polu magnetycznym). Jako cząstki ferromagnetyczne zastosowano: żelazo karbonylkowe o średnicy cząstek $6-9 \mu\text{m}$, produkcji Fluka, o zawartości żelaza $>99,5 \%$.

Wytwarzano MRE o udziale objętościowym cząstek 11,5 %, gdyż jak stwierdzono w wyniku wcześniejszych badań charakteryzują się one największym współczynnikiem anizotropii magnetycznej i efektem magnetoreologicznym [12-14]. Kierunkowanie cząstek prowadzono podczas utwardzania elastomeru w polu magnetycznym o natężeniu 300 mT w kierunku II, L i pod kątami 30° i 45° do kierunku pola magnetycznego. Wytwarzano również próbki izotropowe, utwardzane bez pola magnetycznego.

Obserwacje mikrostruktury kruchych przełomów przeprowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego HRSEM LEO 1530 Zeiss. Do badań reologicznych wykorzystano reometr ARES (TA Instruments) z przystawką do badań w polu magnetycznym. Umożliwia ona prowadzenie badań w polu magnetycznym 0-0,6T. Zastosowano układ typu płytka-płytkę o średnicy 20mm, przy grubości próbek 2mm. Badania prowadzono w funkcji częstotliwości kątovej (ω), przy stałym odkształceniu kątovej (γ) wynoszącym 0,1%, w temperaturze pokojowej (25°C).

2.2. Wyniki

Przykładowy obraz mikrostruktury otrzymywanych MRE pokazano na rys. 1. Wyraźnie widoczne są ścieżki utworzone z cząstek ferromagnetycznych wzdłuż linii pola magnetycznego przyłożonego podczas utwardzania elastomeru.



Rys. 1. Obraz SEM mikrostruktury kruchego przełomu MRE zawierającego 11,5 % obj. żelaza karbonylowego

Fig. 1. SEM image of MRE with 11,5 vol.% of carbonyl iron particles

Przeprowadzono pomiary reologiczne modułu sprężystości postaciowej G' , który jest miarą zdolności materiału do magazynowania energii odkształcenia. Zaobserwować można ogólną tendencję do wzrostu modułu G' wraz ze wzrostem częstotliwości i bardzo znaczący jego wzrost wraz ze wzrostem natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. W wyniku badań reologicznych stwierdzono również, że na wartości modułów G' oraz możliwość ich znaczącej zmiany w polu magnetycznym wpływ ma anizotropia mikrostruktury uzyskana podczas wytwarzania MRE, a w tym także kierunek ułożenia łańcuchów cząstek względem kierunku działania pola magnetycznego.

Próbki nie utwardzane w polu, a więc posiadające strukturę izotropową, wykazują nieznaczne zmiany modułu G' , natomiast próbki utwardzane w polu, o strukturze anizotropowej, znacznie zmieniają swoje właściwości wraz ze wzrostem pola.

Przykładowy wykres zmian modułu sprężystości postaciowej w funkcji częstotliwości kątowej, dla różnych wartości pola magnetycznego pokazano na rys. 2.

Krzywe uzyskane w wyniku badań reologicznych zostały aproksymowane modelem Cassona. Pozwala on dopasować dane do następującego równania:

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \eta^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} \quad (1)$$

gdzie:

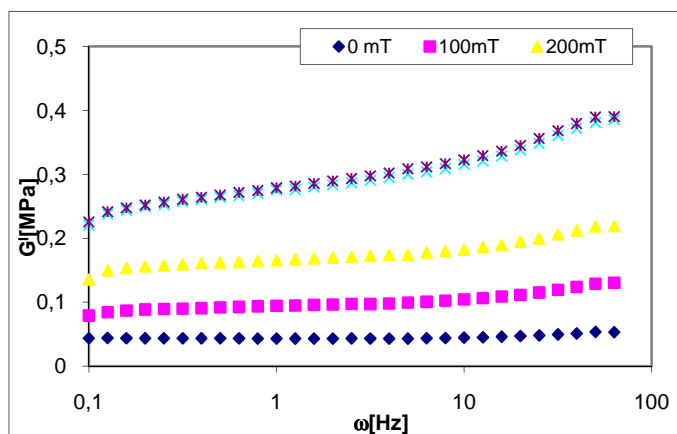
τ - naprężenie ścinające,

$\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania,

τ_0 - naprężenie uplastyczniające (granica plastyczności),

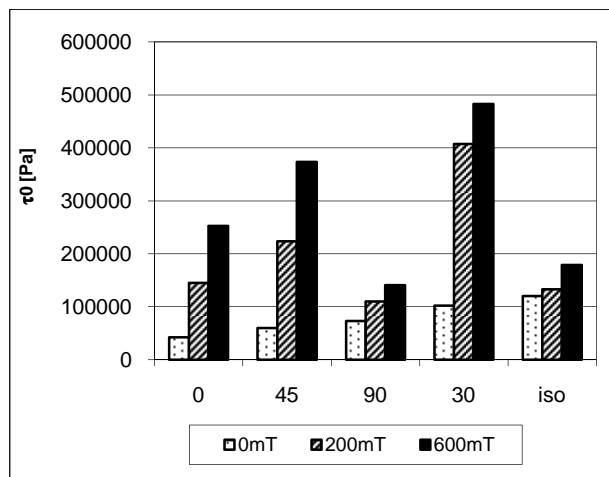
η - lepkość.

Model Cassona wykazał dobrą zgodność z przebiegami krzywych $G'(\omega)$ dla badanych MRE. Wyniki przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Zmiana modułu sprężystości postaciowej G' w zależności od natężenia pola magnetycznego dla MRE zawierającego 11,5 % obj. żelaza karbonylnego, ukierunkowanych II do linii pola magnetycznego

Fig. 2. Changes in storage modulus G' under the magnetic field for MRE with 11,5 vol.% of carbonyl iron particles, oriented parallel to the magnetic field direction



Rys. 3. Zmiana naprężenia uplastyczniającego w polu magnetycznym zależnie od kierunku ułożenia cząstek

Fig. 3. Yield stress calculated from Casson's model measured under different magnetic fields for samples with different arrangement of particles

Naprężenie uplastyczniające wzrasta wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego dla wszystkich próbek. Zmiany naprężenia uplastyczniającego są również zależne od ukierunkowania cząstek w kompozycie. Najkorzystniejsze rezultaty jeśli chodzi o wartości zmiany naprężenia uplastyczniającego w polu uzyskano kolejno dla próbek o ukierunkowaniu pod kątem 30° do linii pola, a następnie 45°.

3. Wnioski

Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że w odpowiednich warunkach wytwarzane są MREs o anizotropowej mikrostrukturze, w której cząstki ferromagnetyczne tworzą łańcuchy ukierunkowane wzdłuż linii pola magnetycznego. Zależnie od rozmieszczenia cząstek ferromagnetycznych w osnowie elastomerowej i nachylenia łańcuchów z cząstek w stosunku do kierunku działającego pola magnetycznego oraz jego natężenia można sterować zmianą właściwości reologicznych. Dla uzyskania najwyższego efektu magnetoreologicznego w polu optymalne ukierunkowanie łańcuchów cząstek wynosi 30°, a następnie 45° w stosunku do kierunku działania pola magnetycznego.

Model Cassona dobrze opisuje krzywe zmian modułu sprężystości postaciowej w funkcji częstotliwości kątowej i może być wykorzystywany do analizy zachowania MREs w polu magnetycznym.

Literatura

- [1] Zhou G.Y., *Shear properties of magnetorheological elastomer*, Smart Materials and Structures 12 (2003) 139-146.
- [2] Farshad M., Benine A., *Magnetoactive elastomer composites*, Polymer Testing 23 (2004) 347-353.
- [3] An Y., Shaw M.T., *Actuating properties of soft gels with ordered iron particles: basis for a shear actuator*, Smart Materials and Structures 12 (2003), 157-163.
- [4] Kallio M., Aalto S., Lindroos T., *Preliminary test on a MRE device*, AMAS Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03, Jadwisin, 2-5.09. 2003, conference proceedings, 353-360.
- [5] Vicente J., Bossis G., Laciš S., Guyot M., *Permeability measurements in cobalt ferrite and carbonyl iron powders and suspensions*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 251 (2002) 100-108.
- [6] Wang D., Chen J-S, Sun L., *Homogenization of magnetostrictive particle-filled elastomers using an interface-enriched reproducing kernel particle method*, Finite elements in Analysis and Design 39 (2003), 765-782.
- [7] Farshad M., Le Roux M., *A new active noise abatement barrier system*, Polymer Testing 23 (2004), 855-860.
- [8] Lokander M., Stenberg B., *Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials*, Polymer Testing 22 (2003) 677-680.
- [9] Lokander M., Stenberg B., *Performance of isotropic magnetorheological rubber materials*, Polymer Testing 22 (2003), 245-251.
- [10] Kankanala S.V., Triantafyllidis N., *On finitely strained magnetorheological elastomers*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 52 (2004), 2869-2908.
- [11] Lokander M., Reitberger T., Stenberg B., *Oxidation of natural rubber-based magnetorheological elastomers*, Polymer Degradation and Stability 86 (2004), 467-471.
- [12] Boczkowska A., Awietjan S.F., Wróblewski R., *Microstructure – property relationships of urethane magnetorheological elastomers*, Smart Materials and Structures 16 (2007), 1924-1930.
- [13] Boczkowska A., Awietjan S., *Elastomery uretanowe aktywowane polem magnetycznym*, Polimery 54 (1) (2009), 26-30.
- [14] Boczkowska A., Awietjan S.F., *Smart composites of urethane elastomers with carbonyl iron*, Journal of Materials Science 44 (2009), 4104-4111.