

ANNA BOCZKOWSKA¹⁾, STEFAN AWIETJAN²⁾Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej
ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

Inteligentne kompozyty magnetoreologiczne

Streszczenie — Prezentowane badania dotyczą nowej grupy materiałów inteligentnych, jakimi są magnetoreologiczne kompozyty elastomerowe (MRE), złożone z ferromagnetycznych cząstek rozmieszczonych w elastomerowej osnowie. Mikrostrukturę wytworzonych MRE oceniano stosując skaningową mikroskopię elektronową. W celu określenia anizotropii magnetycznej i strukturalnej wyznaczono właściwości magnetyczne MRE, ponadto w szerokim zakresie charakteryzowano ich właściwości reologiczne. Względny efekt magnetoreologiczny oznaczono na podstawie analizy wpływu zawartości i rozmiaru cząstek, a także ukierunkowania łańcuchów cząstek na kształtowaną mikrostrukturę wybranego kompozytu. Stwierdzono, że MRE o anizotropowej mikrostrukturze, kształtowanej na etapie wytwarzania w polu magnetycznym, charakteryzują się znacznie większym efektem magnetoreologicznym niż MRE o izotropowym rozmieszczeniu cząstek, dodanych do elastomerowej osnowy w takiej samej ilości. Zauważono również nieliniową zmianę właściwości reologicznych w funkcji udziału cząstek, będącą wynikiem anizotropii strukturalnej i magnetycznej, mającej najistotniejszy wpływ na zmianę właściwości MRE w polu magnetycznym. Zaobserwowano ponadto, że wartością efektu magnetoreologicznego można sterować zmieniając kierunek ułożenia łańcuchów cząstek względem kierunku działania pola. Oznacza to, że w celu uzyskania odpowiednio dużego efektu magnetoreologicznego nie jest konieczne wprowadzenie do osnowy polimerowej dużej ilości cząstek magnetycznych, wystarczy wytworzyć odpowiednią ich mikrostrukturę, co pozwala na korzystne zmniejszenie masy konstrukcji urządzeń, w których wykorzystano materiał na bazie MRE.

Słowa kluczowe: elastomery magnetoreologiczne, kompozyty, cząstki ferromagnetyczne, mikrostruktura, właściwości reologiczne.

INTELLIGENT MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMER COMPOSITES

Summary — The study is related to a new group of intelligent materials, namely magnetorheological elastomer composites (MRE), composed of ferromagnetic particles dispersed in an elastomeric matrix. They exhibit reversible changes of their properties and shape under the magnetic field, what makes them attractive for applications as dampers, sensors or actuators. The microstructure of the produced MRE was studied using scanning electron microscopy. In order to determine the magnetic and structural anisotropy of MRE, their magnetic properties were investigated. The rheological properties of MRE were also characterized in a broad range. The relative magnetorheological effect was evaluated by analyzing the influence of the volume fraction, size and arrangement of the particles on the microstructure of selected composite. It was found, that MRE with an anisotropic microstructure formed during the preparation under the magnetic field show much higher magnetorheological effect than MRE with an isotropic arrangement of the particles, added in the same amount to the elastomeric matrix. A non-linear change of the rheological properties versus particle fraction was also observed, as a result of the structural and magnetic anisotropy, which has a major influence on the change in MRE properties under the magnetic field. Moreover, it was found that the magnetorheological effect can be controlled by changes in the particle alignment according to the magnetic field direction. It means that to obtain a sufficiently high magnetorheological effect it is not necessary to introduce a large amount of magnetic particles into the polymer matrix, but it can be achieved by formation of an appropriate particle microstructure. This is beneficial for reducing the weight of devices based on MRE.

Keywords: magnetorheological elastomers, composites, ferromagnetic particles, microstructure, rheological properties.

WSTĘP

Magnetoreologiczne elastomery (MRE) zalicza się do grupy inteligentnych materiałów magnetoreologicznych (MR), zmieniających swoje właściwości pod wpływem działania pola magnetycznego. Materiały MR składają się najczęściej z magnetycznych cząstek rozproszonych w ośrodku o małej przenikalności magnetycznej. Na skutek przyłożonego, zewnętrznego pola magnetycznego w materiałach tych tworzy się specyficzna, ukierunkowana struktura z cząstek magnetycznych, powodująca wyraźną zmianę ich właściwości reologicznych. Odpowiedź materiału MR na zmieniające się pole magnetyczne zachodzi w czasie rzeczywistym w sposób ciągły, natychmiastowy i odwracalny [1]. Do najbardziej znanych materiałów magnetoreologicznych zalicza się przede wszystkim ciecze magnetoreologiczne (MRF), ferrociecze i ferrozęle, zastępowane ostatnio przez pianki i elastomery magnetoreologiczne (MRE) [1, 2].

Magnetoreologiczne elastomery to kompozyty ferromagnetycznych cząstek w osnowie elastomerowej, powstające w wyniku zastąpienia cieczy nośnej MRF ciałem stałym. MRE są taktowane jak odpowiedniki MRF, ponieważ zjawiska zachodzące pod wpływem pola magnetycznego w obu tych materiałach są oparte na tych samych podstawach fizycznych [1–5]. Wadą MRF jest jednak ich mała trwałość (następuje zagęszczanie oleju po wielu cyklach pracy) oraz tendencja do sedimentacji i aglomeracji cząstek. Udział elastomerów w kompozycie zapobiega takim niekorzystnym zjawiskom.

Kształtowanie struktury MRE zachodzi najczęściej podczas sieciowania w polu magnetycznym, z cząstek ferromagnetycznych tworzy się wówczas tzw. struktura kolumnowa [3, 6]. Pole magnetyczne indukuje powstanie momentów dipolowych w ferromagnetycznych cząstkach, a te z kolei dążą do obsadzenia położeń o minimalnej energii. Po utwardzeniu osnowy polimerowej łańcuchy cząstek z liniowo zorientowanymi momentami dipolowymi zostają „zablokowane”. Tworzenie ukierunkowanej struktury w MRE jest możliwe jedynie przed końcem procesu sieciowania osnowy. Osnowa MRE w postaci stałej, w odróżnieniu od MRF, uniemożliwia swobodny ruch cząstek magnetycznych, co wpływa na zupełnie inne parametry zależne od pola magnetycznego i związane z tym odmienny, charakterystyczny obszar użytkowania. W przypadku MRE zmianie ulega moduł ścinania, a charakterystycznym obszarem pracy jest zakres poniżej granicy plastyczności. Jest to istotna cecha odróżniająca MRE od MRF, wymagająca zupełnie innego podejścia do projektowania konstrukcji i urządzeń, w których mogą być one wykorzystywane [3, 5, 7].

Pod wpływem działania pola magnetycznego zmianie ulegają przede wszystkim właściwości reologiczne MRE [8], głównie wspomniany już moduł ścinania, ale także moduł sprężystości (wyznaczany w próbie ściskania) [9]. Cechy te silnie zależą od natężenia pola magnetycznego, mogą ulegać zmianie w sposób ciągły i

gwałtowny i w pełni odwracalny [8]. Ścinanie MRE w obecności pola magnetycznego powoduje przemieszczenie cząstek z położeń o minimalnej energii, wymaga to wykonania dodatkowej pracy o wartości rosnącej monotonicznie wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego. Dlatego też moduł ścinania jest zależny od natężenia pola i jest charakterystyczną właściwością MRE [1, 5].

Na rozmieszczenie cząstek w rzeczywistym MRE wpływa wiele czynników, takich jak: np. magnetyczne siły oddziaływań pomiędzy cząstkami, kierunek działania i natężenie pola magnetycznego, wymiary próbki, udział objętościowy cząstek, temperatura. Połączenie właściwości magnetycznych cząstek i wysokoelastycznych osnowy polimerowej oraz możliwość ich zmiany w wyniku płynnej regulacji natężenia pola magnetycznego sprawia, że materiały takie są bardzo interesujące zarówno pod względem poznawczym, jak i aplikacyjnym [10–13].

We wcześniejszych pracach autorzy ocenili [14–16] wpływ parametrów wytwarzania MRE, takich jak: natężenie pola magnetycznego podczas utwardzania i lepkość osnowy na mikrostrukturę oraz wybrane właściwości kompozytów. Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy jest określenie wpływu ilości, wielkości cząstek i ukierunkowania łańcuchów cząstek ferromagnetycznych w stosunku do kierunku działania pola magnetycznego, na mikrostrukturę i właściwości reologiczne MRE, mające umożliwić świadome kształtowanie i optymalizację ich mikrostruktury dla konkretnych zastosowań.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Osnowę kompozytów magnetoreologicznych wytworzono z poliuretanu (PUR), otrzymywanego z dwóch polioli eterowych o handlowych nazwach VORALUX HF 505 i 14922, o średnich ciężarach cząsteczkowych, odpowiednio, 3600 i 4350 oraz izocyjanianu HB 6013, produkcji Dow Chemical Company. Substraty mieszano w stosunku masowym 30:70:23 za pomocą szybkoobrotowego mieszadła mechanicznego, proces sieciowania prowadzono w temperaturze pokojowej. Cząstki ferromagnetyczne wprowadzono do mieszaniny polioli, a następnie dozowano składnik izocyjanianowy. W celu wytworzenia struktury kolumnowej z cząstek podczas sieciowania zastosowano pole magnetyczne. Wcześniej mieszaninę odgazowywano pod próżnią -0,1 MPa przez 15 min, usuwając pęcherze powietrza.

W charakterze cząstek ferromagnetycznych zastosowano dwa rodzaje, różniące się średnicą cząstek, handlowo dostępnego żelaza karbonylnkowego. Badania właściwości magnetycznych proszków, wykonane za pomocą histerezografu z wibrującą próbką, pozwoliły na wyznaczenie ich namagnesowania nasycenia. Obserwacje SEM umożliwiły określenie kształtu cząstek, a pomiary przy

Tabela 1. Charakterystyka cząstek ferromagnetycznych zastosowanych do wytwarzania MRE**T a b l e 1.** Characteristic of ferromagnetic particles used for MRE fabrication

Rodzaj cząstek	Producent	Oznaczenie	Kształt	Wielkość cząstek, μm (dane producenta)	Średnia wielkość cząstek μm (badania własne)	Namagnesowanie nasylenia, emu/g
Fe karbonylkowe	Fluka	Fe	kulisty	6–9	9,0	217
Fe karbonylkowe HQ	BASF	Fe HQ	kulisty	1–2	1,4	215

użyciu laserowego analizatora Horiba LA-950 – wyznaczenie ich wielkości. Charakterystykę cząstek wykorzystanych do wytwarzania MRE zestawiono w tabeli 1.

Sporządzanie próbek do badań

Wytworzono próbki MRE z jednorodnie rozmieszczonymi cząstkami żelaza karbonylkowego oraz z cząstkami ukierunkowanymi zgodnie z liniami pola magnetycznego, przy czym zmieniano kierunek osi próbki w odniesieniu do kierunku pola tak, aby uzyskać nachylenie łańcuchów cząstek pod różnymi kątami. Udział cząstek żelaza w kompozycie wynosił 1,5; 11,5; 18; 25 lub 33 % obj. Próbkę utwardzano w polu magnetycznym o natężeniu 240 kA/m.

Metody badań

– Obserwacje mikrostruktury kruchych przełomów prowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Hitachi 3500. Do przygotowania płaskich przekrojów MRE wykorzystano mikrotom rotacyjny LEICA RM2165 z przystawką chłodzącą LN21.

– Właściwości magnetyczne badano przy użyciu magnetometru z wibrującą próbką (VSM), produkcji Lake Shore.

– Właściwości reologiczne określano stosując reometr ARES firmy TA Instruments, z przystawką do badań w polu magnetycznym (układ płytka-płytko o średnicy płytek 20 mm). Próbkę miały kształt plasterków o średnicy 20 mm i wysokości 2 mm. Natężenie pola magnetycznego zmieniano w zakresie 0–480 kA/m. Właściwości oceniano w funkcji częstotliwości od 0 do 63 Hz, przy stałym odkształceniu próbki 0,1 %, w temperaturze pokojowej 25 °C. Rejestrowano zmiany modułu zachowawczego [modułu sprężystości lub magazynowania (G')] oraz modułu stratności [modułu lepkości (G'')].

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Wybrane obrazy SEM mikrostruktury przekrojów kompozytów magnetoreologicznych na osnowie PUR, z różną zawartością cząstek żelaza karbonylkowego o średniej średnicy 9 μm przedstawia rys. 1.

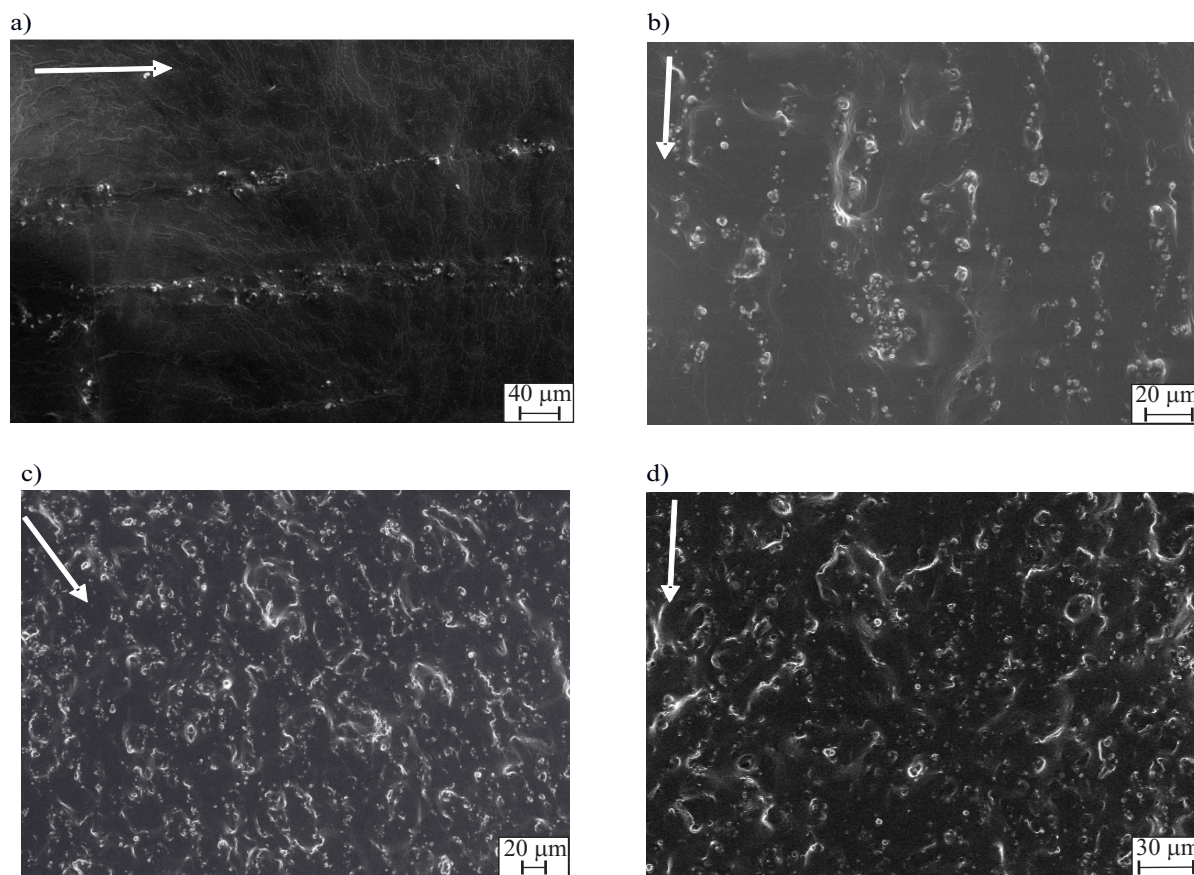
Ścieżki cząstek ferromagnetycznych są wyraźnie widoczne w przypadku kompozytów z udziałem 1,5 i 11,5 % obj. Fe (rys. 1a i 1b). Wraz ze wzrostem zawartości cząstek żelaza ścieżki stają się coraz mniej widoczne (rys.

1c i 1d), powstaje struktura izotropowej sieci. Dzieje się tak na skutek oddziaływań pomiędzy cząstkami magnetycznymi nie tylko wzdłuż łańcuchów, ale także z cząstkami sąsiednich łańcuchów. Takie oddziaływania pojawiają się wówczas, gdy cząstek jest dużo i tworzące się w polu łańcuchy układają się coraz bliżej siebie. Ilościowa analiza obrazu [17] pozwoliła na potwierdzenie, że odległości między łańcuchami cząstek maleją ze 150 μm przy zawartości 1,5 % obj. Fe do 15 μm przy zawartości 33 % obj. Fe, przy czym w przypadku tej ostatniej łańcuchy są jednakowo rozmieszczone w kierunku prostopadłym i równoległym. O możliwości tworzenia się takich sieci, składających się z pojedynczych łańcuchów donosili też autorzy [18].

Anizotropię strukturalną kompozytów MRE o różnej zawartości cząstek żelaza potwierdzono także badaniami magnetycznymi wykonanymi w kierunkach równoległym i prostopadłym do kierunku łańcuchów cząstek. Rysunek 2 przedstawia zmianę wyznaczonego w polu o natężeniu 160 kA/m (w sposób opisany w [19]), współczynnika anizotropii magnetycznej (A_b), w funkcji zawartości cząstek żelaza karbonylkowego (oznaczonych jako Fe i Fe HQ) różniących się średnią wielkością cząstek (Fe $\sim 9 \mu\text{m}$, Fe HQ $\sim 1,4 \mu\text{m}$).

Współczynnik anizotropii magnetycznej przybiera wyraźnie większe wartości w przypadku kompozytu z mniejszym udziałem cząstek, a swoje maksimum osiąga gdy zawartość ta wynosi 11,5 % obj., niezależnie od wielkości cząstek. Po osiągnięciu maksimum A_b maleje wraz ze wzrostem udziału cząstek, gdy zawartość wynosi 33 % obj. zanika anizotropia magnetyczna cząstek o większej średnicy.

Wyznaczone w funkcji częstotliwości odkształcenia moduły: zachowawczy G' i stratności G'' zalicza się do grupy parametrów opisujących właściwości reologiczne lepkosprężystych materiałów polimerowych, takich jak MRE. Moduł zachowawczy G' określony przez stosunek naprężeń sprężystych do odkształcenia, wyraża ilość zachowanej (zmagazynowanej) podczas procesu ścinania energii i jest miarą właściwości sprężystych materiału. Moduł stratności G'' wyrażony przez stosunek naprężeń lepkosprężystych do odkształcenia, obrazuje jaka ilość energii została rozproszona w cyklu deformacji w postaci ciepła i określa właściwości lepkie materiału [20]. W każdym badanym przypadku można zaobserwować ogólną tendencję do nieznacznego zwiększania się modułów wraz ze wzrostem częstotliwości. Na rys. 3 pokazano przykładowy charakterystyczny przebieg modułów G' i G'' kompozytów MRE badanych bez oddziaływania pola

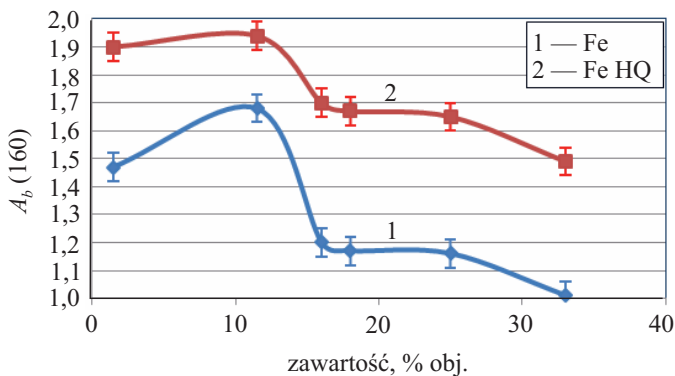


Rys. 1. Mikrostruktura kompozytów MRE na osnowie PUR z zawartością cząstek Fe: a – 1,5 % obj., b – 11,5 % obj., c – 18 % obj., d – 33 % obj. Strzałkami zaznaczono kierunek pola magnetycznego przy sieciowaniu

Fig. 1. Microstructure of MRE composites based on PUR matrix with volume fraction of Fe particles: a – 1.5 vol. %, b – 11.5 vol. %, c – 18 vol. %, d – 33 vol. %. The arrows show the direction of magnetic field during the crosslinking

i w polu magnetycznym. Wartości modułów G' i G'' rosną wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego.

Na podstawie krzywych reologicznych (por. rys. 3) wyznaczono względny efekt magnetoreologiczny (MR) w odniesieniu do badanych MRE, przy stałej częstotli-



Rys. 2. Współczynnik anizotropii magnetycznej A_b , w funkcji zawartości (% obj.) cząstek żelaza karbonylowego o średnicy $\sim 9 \mu\text{m}$ (Fe) i $\sim 1,4 \mu\text{m}$ (Fe HQ)

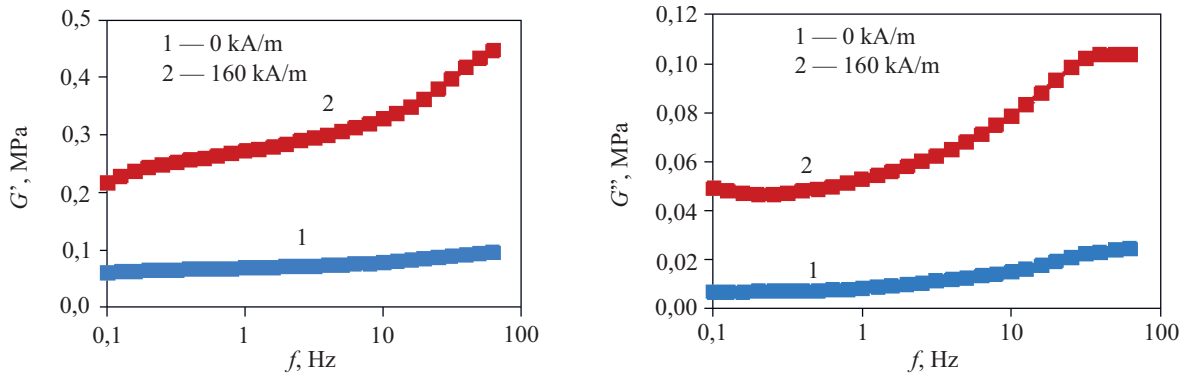
Fig. 2. The magnetic anisotropy coefficient A_b vs. volume fraction of carbonyl iron particles with a diameter of $\sim 9 \mu\text{m}$ (Fe) and $\sim 1.4 \mu\text{m}$ (Fe HQ)

wości 10 Hz. Termin „efekt magnetoreologiczny” dotyczy wyłącznie grupy materiałów magnetoreologicznych. Opisuje on odwracalną zmianę właściwości w polu magnetycznym w porównaniu z właściwościami materiału bez oddziaływania pola. Względny efekt magnetoreologiczny (ΔG_w) jest wyrażoną w procentach różnicą pomiędzy maksymalną wartością modułu ścinania G_{maks} osiągniętą w polu magnetycznym, a wartością modułu uzyskaną bez pola magnetycznego, tzw. modułu zerowego G_0 , odniesioną do modułu zerowego.

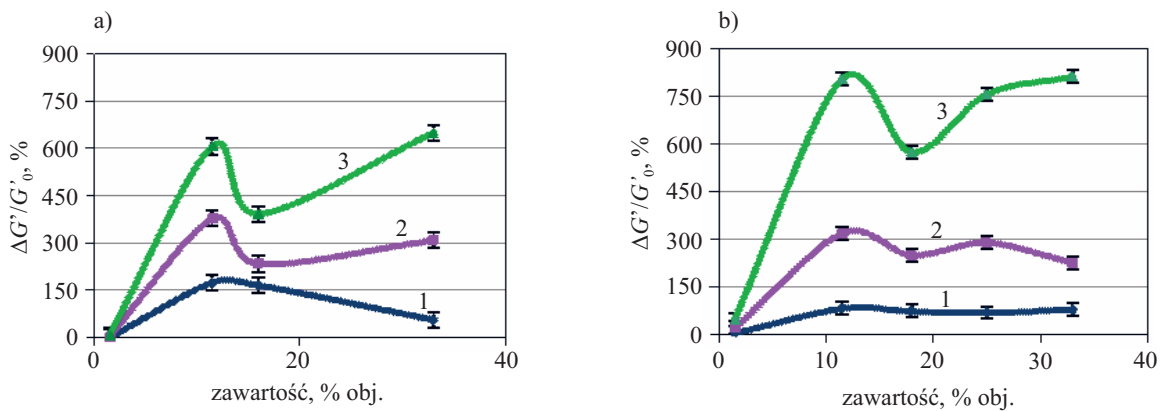
$$\Delta G_w = \frac{G_{maks} - G_0}{G_0} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Na rys. 4 pokazano zmiany efektu MR, wyrażone za pomocą względnej zmiany modułu zachowawczego w polu magnetycznym o natężeniu 80, 160 lub 320 kA/m, w funkcji zawartości cząstek o większej (Fe $\sim 9 \mu\text{m}$) i mniejszej średnicy (Fe HQ $\sim 1,4 \mu\text{m}$), przy czym w przypadku kompozytów z udziałem cząstek o mniejszej średnicy, łańcuchy cząstek były nachylone pod kątem 45° do kierunku przyłożonego podczas badania pola magnetycznego.

Charakter zmian modułów zachowawczego i stratności w funkcji zawartości cząstek jest podobny, niezależnie od średnicy cząstek i ukierunkowania łańcuchów w stosunku do pola magnetycznego. Można jednoznacznie

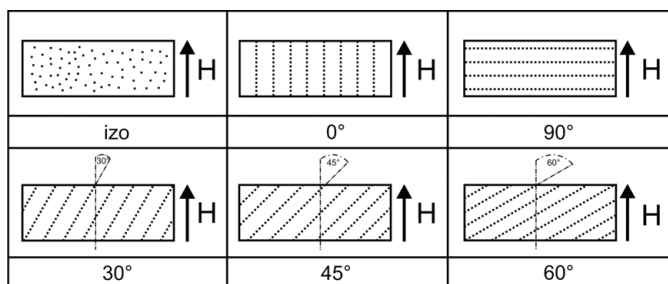


Rys. 3. Moduł zachowawczy (G') i moduł stratności (G'') w funkcji częstotliwości, kompozytów MRE z udziałem 11,5 % obj. Fe, bez pola i w polu o natężeniu 160 kA/m
 Fig. 3. Changes in storage G' and loss G'' modulus vs. frequency for MRE with 11.5 vol. % Fe, without and with magnetic field of 160 kA/m

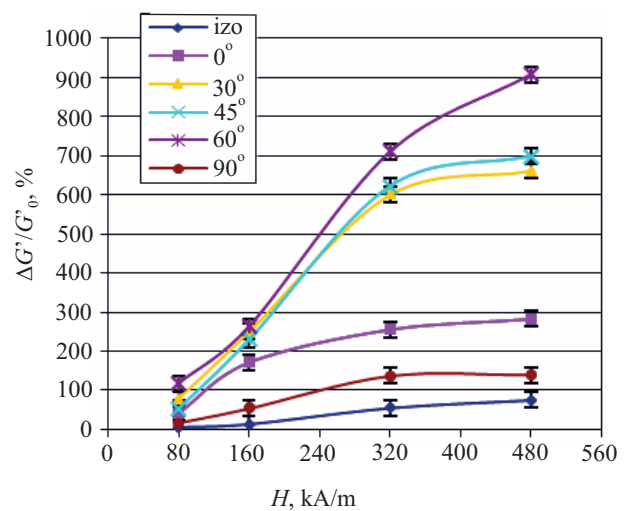


Rys. 4. Względna zmiana modułu zachowawczego ($\Delta G'/G'_0$) kompozytów MRE z udziałem cząstek o średnicy: a) $\sim 9 \mu\text{m}$, b) $\sim 1,4 \mu\text{m}$, w funkcji zawartości cząstek, przy natężeniu pola 80 — 1; 160 — 2; lub 320 kA/m — 3
 Fig. 4. Relative change in storage modulus ($\Delta G'/G'_0$) of MRE composites with particles of diameter: a) $\sim 9 \mu\text{m}$, b) $\sim 1,4 \mu\text{m}$ vs. volume fraction of the particles, for a magnetic field strength of 80 — 1; 160 — 2 or 320 kA/m — 3

stwierdzić, że względny efekt MR zmienia się nieliniowo wraz ze wzrostem zawartości cząstek ferromagnetycznych w kompozycie. W przypadku MRE z udziałem ok. 11 % obj. Fe pojawia się wyraźne maksimum, występuje też maksymalna wartość współczynnika anizotropii magnetycznej. Względny efekt MR zależy także od natę-



Rys. 5. Schematycznie przedstawione możliwe rozmieszczenie cząstek w stosunku do kierunku pola magnetycznego
 Fig. 5. Schematic presentation of possible particle arrangement in relation to the magnetic field direction



Rys. 6. Wpływ orientacji łańcuchów cząstek żelaza karbonylowego w osnowie elastomerowej na zmianę względnego efektu MR, w funkcji natężenia pola magnetycznego
 Fig. 6. Effect of the orientation of carbonyl iron particle chains in an elastomeric matrix on the relative change in MR effect as a function of magnetic field strength

zenia przyłożonego pola magnetycznego i rośnie wraz ze wzrostem jego natężenia.

Aby porównać uzyskane wartości względnego efektu MR w przypadku obu rodzajów cząstek, należy uwzględnić zarówno ich średnice jak i kierunek ułożenia łańcuchów cząstek w odniesieniu do kierunku przyłożonego pola magnetycznego. Przeprowadzono zatem bardziej szczegółowe badania wpływu na efekt MR kierunku ułożenia łańcuchów cząstek w stosunku do kierunku działania pola magnetycznego. Rys. 5 przedstawia wszystkie badane przypadki rozmieszczenia cząstek w elastomerowej osnowie: od izotropowego po anizotropowe z ukierunkowaniem łańcuchów.

W wyniku badań reologicznych kompozytów MRE z udziałem różnie ukierunkowanych cząstek ferromagnetycznych, w polu magnetycznym o różnym natężeniu, uzyskano szereg krzywych zmian modułu zachowawczego G' w funkcji częstotliwości odkształcenia. Na ich podstawie wyznaczono względny efekt MR, wyrażony względną zmianą modułu zachowawczego (rys. 6).

Można zauważyć, wyraźny podział krzywych na dwie grupy. Pierwsza grupa obejmuje krzywe odnoszące się do kompozytów MRE z udziałem łańcuchów cząstek nachylonych pod kątem 30–60° do kierunku pola. W grupie drugiej układają się krzywe odpowiadające strukturze izotropowej i anizotropowej, w której łańcuchy cząstek są ułożone równolegle lub prostopadle do kierunku pola. Największy bezwzględny i względny efekt MR uzyskano w przypadku ułożenia łańcuchów cząstek pod kątem 60° do kierunku pola. W polu magnetycznym wzdłuż łańcuchów cząstek ferromagnetycznych tworzy się kierunek łatwego magnesowania. Minimalizując energię Zeemana, łańcuchy cząstek przemieszczają się dążąc do ustawienia w kierunku działania pola magnetycznego. Ponieważ cząstki ferromagnetyczne są osadzone w osnowie elastomerowej i powiązane z nią poprzez oddziaływania na granicy faz, ich przemieszczanie się wywołuje dodatkowe naprężenia ścinające, powodujące wzrost koncentracji naprężeń w osnowie między cząstkami. Zjawisko takie stwierdzono w badaniach elastooptycznych i DIC modelowych makropróbek [21, 22]. Obrotu nie stwierdza się wówczas, gdy łańcuchy cząstek są prostopadłe do kierunku pola, uzyskany wówczas efekt MR jest niewiele większy niż w przypadku struktury izotropowej.

PODSUMOWANIE

Magnetoreologiczne kompozyty elastomerowe stanowią nową, atrakcyjną grupę materiałów inteligentnych. Stwierdzono, że mikrostrukturę, a w konsekwencji właściwości reologiczne MRE można kształtować na drodze odpowiedniego rozmieszczenia cząstek ferromagnetycznych w elastomerowej osnowie. Kompozyty MRE o anizotropowej mikrostrukturze, ukierunkowanej w polu magnetycznym, charakteryzują się znacznie większym efektem magnetoreologicznym niż MRE o takim samym

udziale cząstek ale izotropowym ich rozmieszczeniu. Jest to wynikiem oddziaływań magnetycznych pomiędzy cząstkami wewnątrz łańcuchów i ich wpływu na osnowę kompozytu.

Stwierdzono nieliniową zmianę właściwości reologicznych kompozytów MRE w funkcji udziału cząstek, co jest efektem nieliniowej zmiany anizotropii magnetycznej, w najistotniejszym stopniu wpływającej na zmianę właściwości MRE w polu magnetycznym.

Efektom magnetoreologicznym można sterować zmieniając kierunek ułożenia łańcuchów cząstek ferromagnetycznych względem kierunku działania pola magnetycznego. Oznacza to, że w celu uzyskania odpowiedniego efektu MR nie jest konieczne wprowadzenie do osnowy elastomerowej dużej ilości cząstek, wystarczy wytworzyć właściwą ich mikrostrukturę. Dzięki temu jest możliwe zmniejszenie masy urządzeń, w których zastosowano kompozyty MRE.

Badania finansowano w ramach projektu badawczego zamawianego PBZ-KBN-115/T08/04 oraz rozwojowego N R15 0010 04.

LITERATURA

- Carlson J. D., Jolly M. R.: *Mechatronics* 2000, **10**, 555.
- Ginder J. M.: „Rheology controlled by magnetic fields” w „Encyclopedia of Applied Physics”, VCH Publisher Inc., New York 1996, t. 16.
- Zhou G. Y.: *Smart Mater. Struct.* 2003, **12**, 139.
- Farshad M., Benine A.: *Polym. Test.* 2004, **23**, 347.
- Jolly M. R., Carlson J. D., Munoz B. C., Bullions T. A.: *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 1996, **7**, 613.
- Banks H. T., Pinter G. A., Potter L. K., Gaitens M. J., Yanyo L. C.: *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 1999, **10**, 820.
- Liu B., Shaw M. T.: *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2001, **12**, 57.
- Lokander M., Reitberger T., Stenberg B.: *Polym. Degrad. Stab.* 2004, **86**, 467.
- Farshad M., Le Roux M.: *Polym. Test.* 2005, **24**, 163.
- Kankanala S. V., Triantafyllidis N.: *J. Mech. Phys. Sol.* 2004, **52**, 2869.
- Böse H., Röder R.: *J. Phys. Conf. Series* 2009, **149**, 1.
- Nguyen V. Q., Ramanujan R. V.: *Macromol. Chem. Phys.* 2010, **211**, 618.
- Xu Z.B., Gong X. L., Liao G. J., Chen X. M.: *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2010, **21**, 1039
- Boczkowska A., Awietjan S. F., Babski K., Wróblewski R., Leonowicz M.: „Effect of the processing conditions on the microstructure of urethane magnetorheological elastomers”, Smart Structures and Materials 2006 Conference w: „Active Materials: Behavior and Mechanics” (red. W. D. Armstrong), Proc. of SPIE t. 6170, nr. 28.
- Boczkowska A., Awietjan S. F.: *Mater. Sci. Forum* 2008, **587–588**, 630.
- Boczkowska A., Awietjan S. F.: *Polimery* 2009, **54**, 26.
- Boczkowska A., Awietjan S. F., Wejrzanowski T., Kurzydłowski K. J.: *J. Mater. Sci.* 2009, **44**, 3135.

18. Kallio M., Aalto S., Lindroos T.: „Preliminary test on a MRE device”, AMAS Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03, Jadwisin, 2–5 września 2003, mat. konf. str. 353–360.
19. Boczkowska A., Awietjan S. F., Wróblewski R.: *Smart Mater. Struct.* 2007, **16**, 1924.
20. Gupta R. K.: „Polymer and Composite Rheology”, CRC Press, 2000.
21. Boczkowska A., Czechowski L., Jaroniek M., Niezgoda T.: *J. Theoret. Appl. Mech.* 2010, **48**, 659.
22. Szymczyk W., Boczkowska A., Niezgoda T., Zubko K.: *Solid State Phenom.* 2009, **154**, 113.

Otrzymano 2 IX 2012 r.

INSTYTUT INŻYNIERII MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH I BARWNIKÓW w TORUNIU
ODDZIAŁ FARB I TWORZYW w GLIWICACH

zaprasza do udziału w X Międzynarodowej Konferencji
pt.



ADVANCES IN PLASTICS TECHNOLOGY
(POSTĘPY W TECHNOLOGII TWORZYW POLIMEROWYCH)



8–10 października 2013 r., Sosnowiec, ul. Braci Mieroszewskich 124

Przewodniczący Komitetu Naukowego — prof. dr hab. inż. Marian Żenkiewicz, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

Przewodnicząca Komitetu Organizacyjnego — mgr inż. Anna Pająk, IIMPiB, Oddział Farb i Tworzyw w Gliwicach

Tematyka Konferencji obejmuje:

- **Nowości w zakresie bazy surowcowej dla tworzyw:** materiały polimerowe (żywice, mieszanki do formowania, polimery biodegradowalne, nanopolimery), kompozyty i nanokompozyty polimerowe, pigmenty i barwniki, koncentraty polimerowe, napelniacze i dodatki wzmacniające, środki pomocnicze i modyfikatory
- **Osiągnięcia w zakresie przetwórstwa tworzyw i ich stosowania**
- **Nowoczesne rozwiązania dotyczące maszyn i oprzyrządowania w przetwórstwie tworzyw**
- **Ochrona środowiska naturalnego, recykling, regulacje prawne**
- **Zagadnienia badawcze i rozwojowe oraz kontrolno-pomiarowe**
- **Trendy rynkowe**

Językiem konferencji będzie język angielski i polski z symultanicznym tłumaczeniem.

Odpłatność za uczestnictwo wynosi: 250 euro (brutto) dla osoby wygłaszającej referat lub prezentującej plakat.

Będzie możliwość promocji firmy w formie wkładki reklamowej do materiałów konferencyjnych, plakatu lub stanowiska promocyjnego przed salą konferencyjną.

Informacje o konferencji — Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników

Oddział Farb i Tworzyw, 44-100 Gliwice, ul. Chorzowska 50 A,

mgr inż. Anna Pająk, tel. +48 (32) 231 9043; fax: +48 (32) 231 2674; e-mail: a.pajak@impib.pl

www.impib.pl