УДК 629.1.032

В. В. ДУЩЕНКО, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;
О. М. АГАПОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТОРЕОЛОГІЧНИХ ЕЛАСТОМІРІВ В ЯКОСТІ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДВІСКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей і характеристик магнітореологічних еластомірів та діапазону зміни їх модуля пружності і модуля зсуву. Розглянуто вплив параметрів магнітної частини і еластомірної матриці та наявність побічних ефектів. Зроблено висновок про можливість застосування даних еластомірів у якості пружних елементів з характеристиками, що керуються, у підвісці транспортних засобів. Намічені напрямки подальших досліджень з метою урахування специфіки експлуатації транспортних засобів та створення працездатних вузлів.

Ключові слова: магнітореологічний еластомір, пружний елемент, підвіска, модуль пружності, модуль зсуву, магнітне поле, деформація, анізотропні властивості, керування.

Вступ. Одним з шляхів подальшого розвитку підвіски транспортних засобів (ТЗ) є реалізація керування характеристиками її пружних елементів, демпфіруючих пристроїв та кінематикою направляючих пристроїв. Однак, розробка систем керування на основі використання традиційних робочих тіл (газ, масла та ін.) зі звичайними властивостями призводить до надто складних, високовартісних та ненадійних технічних рішень. Саме тому, такі системи керування досі не отримали широкого розповсюдження. Таким чином, пошук альтернативних матеріалів з новими властивостями, які дозволять спростити системи керування і конструкцію вузлів, знизити їх вартість та підвищити надійність і довговічність є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень. У роботах [1,2] проведено функціонально-фізичній аналіз підвіски ТЗ та розроблено методологію аналізу і синтезу нових технічних рішень та фізичних принципів дії її вузлів. В результаті проведених досліджень встановлено, що одним з перспективних напрямків розвитку є перехід від механічного поля до більш керованого електромагнітного поля та розробка нової «основної речовини» або введення «додаткової речовини», чутливої до керуючого електромагнітного поля. Це значно полегшить реалізацію керування характеристиками вузлів підвіски, в залежності від механічного поля, що діє на ТЗ в процесі руху.

На сьогоднішній день відомі демпфіруючі пристрої підвіски ТЗ, де застосовуються магнітореологічні рідини. Однак, їх широкому впровадженню заважають такі недоліки, як осідання магнітних частинок з плином часу та високий абразивний знос пар тертя, що викликаний ними. Цих недоліків позбавлений новий тип матеріалів – магнітореологічні еластоміри (МРЕ), у яких під дією магнітного поля можна змінювати не лише в'язкість, а і модулі пружності та зсуву. Дані властивості, у перспективі, можуть зробити можливим розробку принципово нових пружних елементів та демпфіруючих пристроїв підвіски ТЗ і ці питання зовсім не досліджено.

Мета досліджень. Провести аналіз властивостей і характеристик МРЕ та оцінити можливість їх використання у вузлах керованої підвіски ТЗ, а саме у якості її пружних елементів. При цьому, у першу чергу, представляє інтерес діапазон керування зміною модуля пружності і модуля зсуву МРЕ та наявність можливих побічних ефектів.

Матеріали досліджень. Магнітореологічні матеріали відносяться до так званих «інтелектуальних» або «розумних» матеріалів (smart materials), фізико-хімічні властивості та характеристики яких можуть значно змінюватися під дією зовнішніх

© В. В. Дущенко, О. М. Агапов, 2015

впливів. Дані матеріали складаються з магнітних частинок, розміром приблизно від 10 нм до 50 мкм (тобто «додаткової речовини»), що знаходяться в діа або парамагнітній матриці («основній речовині»), в залежності від стану якої відрізняють магнітореологічні рідини, піни, гелі та еластоміри. Магнітна взаємодія між частинками залежить від наявності та напряму їх намагніченості, розподілу у просторі, орієнтації зовнішнього магнітного поля та розподілу деформацій.

МРЕ являють собою композити, в яких магнітні частинки розподілені у твердій еластомірній матриці, що полімеризується у формі. В якості матриці можуть застосовуватися натуральні або синтетичні гуми, силікон, поліуретан та ін. В результаті магнітні властивості, що виникають при взаємодії частинок, поєднуються з пружними властивостями матриці, а загальні властивості оборотно можуть змінюватися під дією зовнішнього магнітного поля.

Магнітні частинки всередині МРЕ можуть бути розподілені однорідно або згруповані в стовпчасті структури–ланцюжки. Для утворення впорядкованої структури, під час полімеризації матриці накладається зовнішнє однорідне магнітне поле. Під його дією частинки утворюють стовпчасті структури–ланцюжки, які в результаті полімеризації виявляються зафіксованими в матриці. За такий спосіб, в процесі виготовлення можна отримати в'язкопружні МРЕ з анізотропними властивостями.

Розглянемо відомі дослідження з впливу магнітних полів на механічні властивості МРЕ, в залежності від їх характеристик.

У роботі [3] представлено результати експериментальних досліджень циклічного навантаження зразка МРЕ з бутилкаучуку марки БК-ФМ (40% – карбонильное залізо) при різній індуктивності магнітного поля. Як видно з рис. 1, всі криві деформації мають значний гістерезис, крім того в матеріалі спостерігається залишкова деформація, яка зникає на протязі 10 хв. З представлених графіків випливає, що з ростом індуктивності магнітного поля, модуль пружності даного МРЕ зростає більше ніж у 2 рази, при цьому його ріст нелінійно зменшується, досягаючи насиченості по магнітному полю, подальше збільшення якого не призводить до істотної зміни кривих деформування.

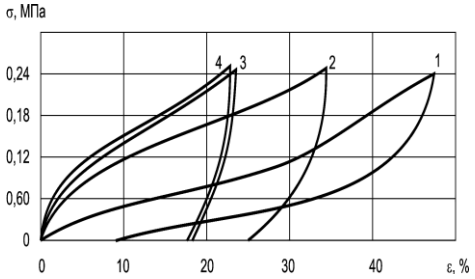

Рисунок 1 – Залежність напруг у зразку від деформації та величини магнітної індукції. Криві: 1 – 0 Тл; 2 – 0,3 Тл; 3 – 0,75 Тл; 4 – 1,2 Тл.

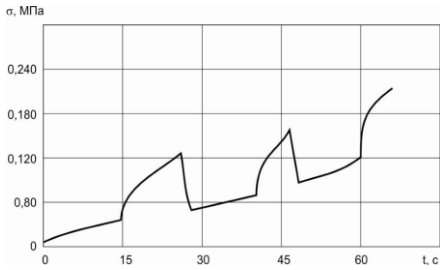

Рисунок 2 – Залежність напруги від часу деформації при накладанні та зняттю магнітного поля 1,2 Тл.

На рис. 2 наведено криву, що відповідає накладенню та зняттю магнітного поля в процесі деформації. Магнітне поле 1,2 Тл накладалося через певні проміжки часу. Включення магнітного поля викликало істотне зростання напруг.

У роботі [4] досліджено зразки МРЕ, що містили у собі 11% частинок карбонільного заліза (3,5 мкм), у матриці з натурального каучуку та добавок. Матриця полімеризувалася під дією зовнішнього магнітного поля B = 200; 400; 600; 800 та 1000

мТл, що призводило до анізотропних властивостей зразків. Також, досліджувався зразок з ізотропними властивостями. Результати представлено на рис. 3.

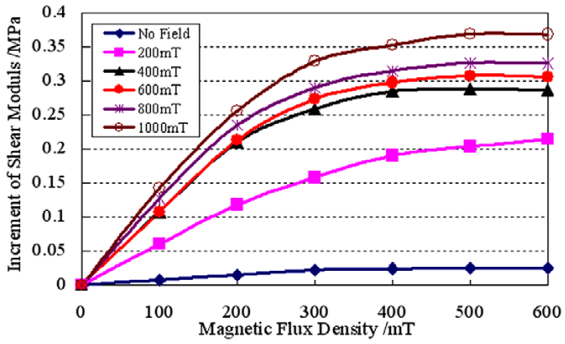

Рисунок 3 – Залежність приросту модуля зсуву від зовнішнього керуючого поля.

Відомо, що модуль зсуву МРЕ може бути розділений на дві частини: перша є модулем зсуву без накладення зовнішнього керуючого поля, яка у даному випадку для кожного зразка дорівнювала 1,3 МПа. Друга частина індукується керуючим полем, що накладається. З графіків випливає, що зі збільшенням індукції керуючого поля від нуля до 600 мТл, приріст модуля зсуву збільшується, досягаючи насиченості. Особливо це спостерігається у зразків з більш анізотропними властивостями.

Значний інтерес представляють результати досліджень, наведені у роботі [5]. Зразки МРЕ виготовлялися на основі силіконової матриці з концентрацією магнітних частинок від 0 до 35%. Частина зразків мала анізотропні властивості. Розмір магнітних частинок складав 5 мкм та 40 мкм. Еластомер без магнітних частинок мав модуль пружності 50 кПа. На рис. 4, рис. 5 представлено графіки модуля пружності відповідно ізотропного та анізотропного МРЕ з різною концентрацією частинок розміром 5 мкм. На рис. 6, рис. 7 представлено аналогічні графіки для частинок розміром 40 мкм.

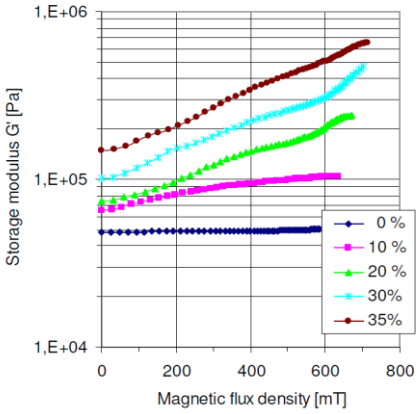

Рисунок 4 – Залежність модуля пружності ізотропного МРЕ з різною концентрацією магнітних частинок (5 мкм) від індукції зовнішнього керуючого поля.

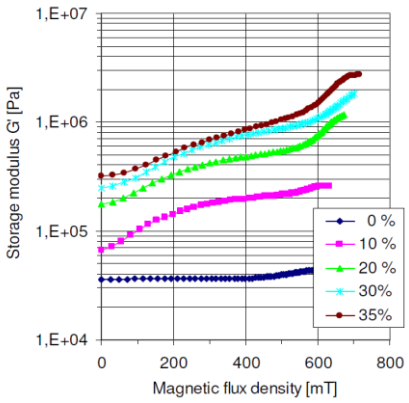

Рисунок 5 – Залежність модуля пружності анізотропного МРЕ з різною концентрацією магнітних частинок (5 мкм) від індукції зовнішнього керуючого магнітного поля.

У роботі [6] отримано значний магнітореологічний ефект на ізотропних зразках, з великою концентрацією магнітних частинок (35%). Дослідження залежності пружності від концентрації магнітних частинок для звичайного ізотропного матеріалу показали, що пружність в магнітному полі зростає, як правило, тим більше, чим більше концентрація магнітного наповнювача. Експерименти показали, що при загальному ефекті наростання пружності із збільшенням напруженості магнітного поля і концентрації магнітного наповнювача спостерігається ефект максимального підвищення пружності в області малих деформацій зразка.

На рис. 8*а* наведені первинні залежності напруги у зразку від його розтягування у магнітному полі і за його відсутності. Даний зразок мав об'ємну концентрацію

магнітних частинок 35% та модуль пружності 16 кПа. Як зазначено, це практично гранична концентрація, при якій зберігається достатня еластичність матеріалу. З аналізу кривих витікає, що напруги в зразку наростають значно швидше в області малих деформацій (0...5%), ніж в області більш високих.

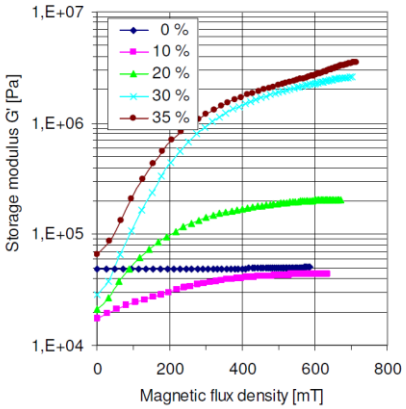

Рисунок 6 – Залежність модуля пружності ізотропного МРЕ з різною концентрацією магнітних частинок (40 мкм) від індукції зовнішнього керуючого поля.

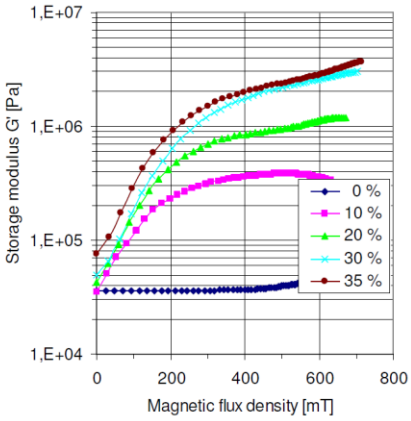

Рисунок 7 – Залежність модуля пружності анізотропного МРЕ з різною концентрацією магнітних частинок (40 мкм) від індукції зовнішнього керуючого поля.

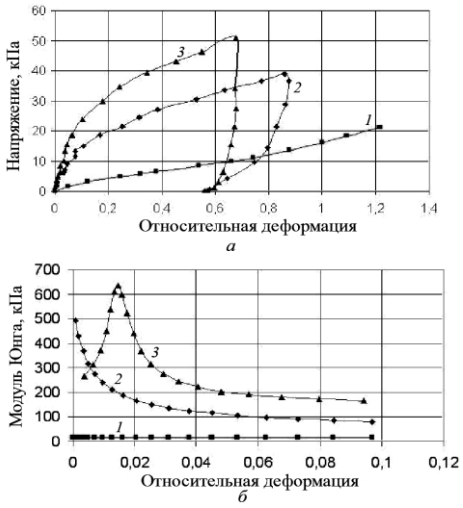

Рисунок 8 – Залежність напруг у зразку (а) і модуля пружності (б) від від деформації в магнітних полях: 1, 2 і 3 - 0; 120 і 260 мТл відповідно.

Диференційний модуль пружності в залежності від деформації представлений на рис. 8*б*. Як видно з рисунку, початковий модуль пружності зразка, рівний 16 кПа, в магнітному полі при малих деформаціях зростає до 500...600 кПа, тобто більш ніж в 30 разів. Аналогічні результати були отримані при вимірюванні напруги зсуву в магнітному полі. В цілому ж, модуль пружності зразка в області великих деформацій зростав більше ніж у 10 разів. Крім того, на графіках рис. 8*а* спостерігаються петлі гістерезису. Якщо прямі 1 навантаження і розвантаження зразка без магнітного поля збігаються, то при розвантаженні зразка в магнітному полі (криві 2,3) спостерігається залишкова деформація в розмірі ≈ 60%. При цьому залишкова деформація тим більше, чим сильніше магнітне поле і нижче пружність МРЕ.

У роботі [7] досліджено гігантське збільшення модуля зсуву: включення магнітного поля напруженістю 10 кЕ призвело до збільшення модуля зсуву для МРЕ на основі натуральної гуми на 130%, а на основі силіконової гуми – на 878%.

Аналогічні результати були отримані у роботах [8,9,10].

Результати досліджень. Аналіз розглянутих досліджень показав, що:

1. Збільшення індуктивності зовнішнього керуючого поля призводить до суттєвого зростання модуля пружності або модуля зсуву, яке, в залежності від зразка, склало від 25% до 10 і більше разів. При цьому це зростання нелінійно зменшується, досягаючи насиченості при магнітному полі у межах 0,6…1,0 Тл.

2. При малому розмірі магнітних частинок (5 мкм), найбільших приріст (900%) модуля пружності спостерігався для зразків з анізотропними властивостями. Для ізотропних зразків даним приріст складав 400%. Причому, чим більша була індукція поля при полімеризації матриці, тим більшим був приріст згаданих модулів. При збільшенні розміру частинок (40 мкм) різниця між ізотропним та анізотропним зразками практично нівелювалася, а приріст модулів пружності складав 5200…5500%.

3. Збільшення концентрації магнітних частинок від 0 до 35% призводило до суттєвого зростання модуля пружності навіть для зразків з ізотропними властивостями. Граничною концентрацією, при якій зберігається достатня еластичність матеріалу є концентрація 40%.

4. Збільшення розміру магнітних частинок в ізотропному зразку, викликало зростання приросту модуля пружності від 400% при 5 мкм, до 5500% при 40 мкм (для концентрації магнітних частинок 35%). Для анізотропного зразку аналогічний приріст складав від 900% при 5 мкм, до 5200% при 40 мкм.

5. Питання швидкодії зміни модуля пружності та залежності від часу деформації досліджено недостатньо. В одній з робіт ([3]) накладання та зняття магнітного поля змінювало модуль пружності із швидкодією близько 1 с.

6. Криві деформації деяких зразків МРЕ мають досить значний гістерезис, що робить можливим їх використання у якості демпфіруючих пристроїв підвіски.

7. При деформації окремих типів МРЕ можлива поява залишкової деформації, яка зникає на протязі до 10 хв. Цей ефект є негативним і може ускладнити застосування даних МРЕ у якості пружних елементів підвіски.

8. Відносна деформація зразків при дослідженнях складала до 100%, що дозволить забезпечити достатній динамічний хід підвіски. В області малих деформацій модуль пружності зростав значно швидше, ніж в області великих.

9. Для МРЕ характерний ефект пам'яті форми та досить значний магнітодеформаційний ефект, що можна використати у системі регулювання кліренсу .

10. Пружні характеристики зразків МРЕ залежать від їх конфігурації, виду, форми та розміру магнітних частинок, ступеню адсорбції матеріалу матриці на їх поверхні та параметрів самої полімерної матриці.

Висновки.

1. Дослідження МРЕ знаходяться у початковій стадії: розроблено стенди та проведенні дослідження, які в більшій мірі стосуються електричних і магнітних параметрів. Недостатньо досліджено значні деформації МРЕ, ресурсні показники, стабільність характеристик, енергоспоживання, вплив на працездатність температури, вологості та інших зовнішніх умов.

2. Проведений аналіз діапазону зміни модулів пружності та зсуву показав можливість застосування МРЕ у якості пружних елементів з характеристиками, що керуються, підвіски ТЗ.

3. Необхідно сформулювати чітки вимоги до фізико-хімічних характеристик МРЕ, з врахуванням специфіки їх експлуатації в якості пружних елементів підвіски ТЗ.

Список літератури: **1.** Математическое моделирование процессов возмущенного движения агрегатов и систем бронетанковой техники / *Е.Е. Александров, Д.О. Волонцевич, В.В. Дущенко* [и др.]; – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – 354 с. **2.** *Дущенко В.В.* Питання удосконалення методології аналізу та синтезу систем підресорювання військових гусеничних і колісних машин / *В.В. Дущенко* // Військово-технічний збірник Академії сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного. – Львів. – 2012. – Вип. 1(6). – С. 26–32. **3.** *Ковров В.Н.* Влияние магнитных полей на механические

свойства магнитореологических эластомеров /*В.Н. Ковров, А.И. Останин, К.В. Качалин*// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (2). – С. 468–469. **4.** *Chen L.* Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers /L. Chen, X. L. Gong, W. H. Li// Smart Materials and Structures. – 2007. – № 16. – pp. 1–6. **5.** *Böse H.* Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties / *H. Böse, R. Rödes* // 11th Conf. on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions. Journal of Physics. – 2009. – Series 149. – pp. 51–57. **6.** *Горбунов А.И.* Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов / *А.И. Горбунов, В.П. Михайлов, Г.В. Степанов и др.* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2008. – № 1(70). – С. 90–107. **7.** *Gong X. L.* Study of utilizable magnetorheological elastomers / *X. L. Gong, L. Chen и J. F. Li* // International Journal of Modern Physics B. – 2007. – т. 21. – № 28n29. – pp. 4875–4882. **8.** *Zhou G. Y.* Shear properties of a magnetorheological elastomer / *G. Y. Zhou // Smart Materials and Structures.* – 2003. – № 12. – pp. 139–146. **9.** *Степанов Г.В.* Магнитоуправляемые эластомеры: синтез, исследование свойств и разработка уплотнителей на их основе / *Г.В. Степанов, С.С. Абрамчук, Е.Ю. Крамренко и др.* //. Российские нанотехнологии. – 2008. – т.3. – № 5-6. – С. 29–31. **10.** *Столбов О.В.* Низкочастотная реология магнитоуправляемых эластомеров с изотропной структурой/ *О.В. Столбов, Ю.Л. Райхер, Г.В. Степанов и др.*// Высокомолекулярные соединения. Сер.А. Т.52. – 2010. – №12. – С. 1–12.

Bibliography (transliterated): **1.** Matematicheskoe modelirovanie processov vozmushhennogo dvizhenija agregatov i sistem bronetankovoj tehniki / *E.E. Aleksandrov, D.O. Voloncevich, V.V. Dushhenko* [i dr.]; – Kharkov: NTU «HPI». – 2012. – 354 p. **2.** *Dushhenko V.V.* Py`tannya udoskonalennya metodologiyi analizu ta sy`ntezu sy`stem pidresoryuvannya vijs`kovy`x guseny`chny`x i kolisny`x mashy`n / *V.V. Dushhenko* . Vijs`kovo-texnichny`j zbirny`k Akademiyi suxoputny`x vijs`k im. get`mana P. Sagajdachnogo. – L`viv. – 2012. – Vy`p. 1(6). – P. 26–32. **3.** *Kovrov V.N.* Vlijanie magnitnyh polej na mehanicheskie svojstva magnitoreologicheskih jelastomerov / *V.N. Kovrov, A.I. Ostanin, K.V. Kachalin.* Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. – 2011. – No 4 (2). – P. 468–469. **4.** *Chen L.* Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers / L. Chen, X. L. Gong, W. H. Li. Smart Materials and Structures. – 2007. – No 16. – pp. 1–6. **5.** *Böse H.* Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties / *H. Böse, R. Rödes* . 11th Conf. on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions. Journal of Physics. – 2009. – Series 149. – pp. 51–57. **6.** *Gorbunov A.I.* Issledovanie svojstv i novoe primenenie magnitnyh silikonovyh kompozitov / *A.I. Gorbunov, V.P. Mihajlov, G.V. Stepanov i dr.* . Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. Mashinostroenie. – 2008. – No 1(70). – P. 90–107. **7.** *Gong X. L.* Study of utilizable magnetorheological elastomers / *X. L. Gong, L. Chen u J. F. Li* . International Journal of Modern Physics B. – 2007. – Vol 21. – No 28n29. – pp. 4875–4882. **8.** *Zhou G. Y.* Shear properties of a magnetorheological elastomer / *G. Y. Zhou* . Smart Materials and Structures. – 2003. – No 12. – pp. 139–146. **9.** *Stepanov G.V.* Magnitoupravljaemye jelastomery: sintez, issledovanie svojstv i razrabotka uplotnitelej na ih osnove / *G.V. Stepanov, S.S. Abramchuk, E.Ju. Kramrenko i dr.* . Rossijskie nanotehnologii. – 2008. – Vol 3. – No 5-6. – P. 29–31. **10.** *Stolbov O.V.* Nizkochastotnaja reologija magnitoupravljaemyh jelastomerov s izotropnoj strukturoj /*O.V. Stolbov, Ju.L. Rajher, G.V. Stepanov i dr.* Vysokomolekuljarnye soedinenija. Ser.A. T.52. – 2010. – No12. – P. 1–12.

Надійшла (received) 19.02.2015