

УДК 629.1.032

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

ДО ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТОРЕОЛОГІЧНИХ ЕЛАСТОМІРІВ В ЯКОСТІ ДЕМПФІРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ПІДВІСКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей і характеристик магнітореологічних еластомірів. Розглянуто вплив параметрів магнітної частини і еластомірної матриці на модуль втрат та діапазон його зростання під дією магнітного поля, що керує. Зроблено висновок про можливість застосування магнітореологічних еластомірів у якості демпфіруючих пристроїв 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, демпфіруючий пристрій, модуль втрат, в'язкість, магнітне поле, керування.

Вступ. Найбільш поширеним і дієвим напрямком підвищення плавності ходу транспортних засобів (ТЗ) є реалізація керування характеристиками демпфіруючих пристроїв підвіски. Однак, розробка систем керування на основі використання традиційних робочих тіл (мінеральні або синтетичні масла, фрикційні матеріали та ін.) зі звичайними властивостями призводить до надто складних та високовартісних технічних рішень. Саме тому, такі системи керування досі не отримали широкого розповсюдження як на звичайних ТЗ, так і на ТЗ військового призначення. Таким чином, пошук альтернативних робочих матеріалів з новими властивостями, які дозволять спростити конструкцію демпфіруючих пристроїв, знизити їх вартість та підвищити надійність і довговічність є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень. У роботі [1] представлено методологію аналізу і синтезу нових технічних рішень та фізичних принципів дії вузлів підвіски ТЗ. 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 характеристик механічного поля, що діє на ТЗ в процесі руху по нерівностям. У роботі [2] розглянуто можливі напрямки використання електромагнітного поля для керування характеристиками вузлів підвіски.

Крім того, відомі демпфіруючі пристрої, де в якості робочого тіла 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 магнітні частинки розподілені у твердій еластомірній матриці, що полімеризується у формі. Таким чином, зберігається можливість взаємодії згаданих частинок між собою у керуючому магнітному полі, але повністю усувається абразивний знос вузла. Дані властивості, можуть привести до розробки принципово нових демпфіруючих пристроїв підвіски ТЗ і представляють певний інтерес для досліджень.

Мета досліджень. Провести аналіз властивостей і характеристик МРЕ та оцінити можливість їх використання у якості робочого тіла керованих демпфіруючих

пристроїв підвіски ТЗ. При цьому, у першу чергу, представляють інтерес діапазон зміни в'язкості (модуля втрат), енергоємність, швидкодія, та наявність побічних ефектів.

Матеріали досліджень. На сьогоднішній день відомі гумоджгутові підвіски [3,4], які спочатку використовувалися на дешевих автомобілях малого класу, але потім отримали широке розповсюдження на сучасних причепах, з гаммою навантаження від 500 кг до кількох тонн. При роботі такої підвіски (див. рис. 1) внутрішня профільна труба, що по'язана через важіль з колесом, повертається та стискає і деформує гумові джгути. Дані джгути розташовані між внутрішньою та зовнішньою трубами, при цьому остання нерухомо закріплена на підресореному корпусі. За рахунок в'язкопружних властивостей гуми така підвіска не потребує додаткових демпфіруючих пристроїв, що робить її компактною, легкою та дешевою. Крім того, вона забезпечує високу геометричну прохідність ТЗ та не потребує обслуговування. Внутрішня труба і джгути можуть бути розрізними, що робить підвіску незалежною. Якщо якість матеріалів висока, то гумоджгутова підвіска вважається надійною та довговічною, недоліком же є її низька ремонтпридатність, що обумовлено необхідністю, у разі поломки, заміни усього вузла в зборі.

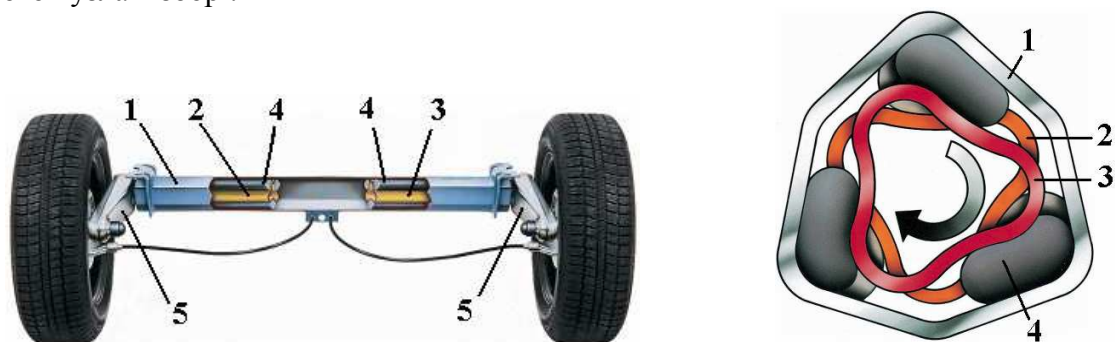


Рисунок 1 – Гумоджгутова підвіска: 1 – зовнішня труба; 2 і 3 – внутрішні труби; 4 – гумовий джгут; 5 – важіль підвіски.

Розглянемо можливість керування в'язкостними характеристиками гумоджгутової підвіски за рахунок заміни гуми на матеріал, який може змінювати свої в'язкопружні характеристики, в залежності від магнітного поля, що накладається (можливість керування пружними характеристиками було розглянуто авторами в окремій статті). Таким матеріалом є МРЕ.

В цілому, магнітореологічні матеріали відносяться до так званих «інтелектуальних» або «розумних» матеріалів (smart materials), фізико-хімічні властивості та характеристики яких можуть значно змінюватися під дією зовнішніх впливів. Дані матеріали складаються з магнітних частинок (порошок магнетита або заліза), розміром приблизно від 10 нм до 50 мкм, тобто «додаткової речовини», що знаходяться в діа або парамагнітній матриці («основній речовині»), в залежності від типу якої відрізняють магнітореологічні рідини, піни, гелі та еластомери. Магнітна взаємодія між частинками залежить від наявності та напрямку їх намагніченості, розподілу у просторі, орієнтації зовнішнього магнітного поля та розподілу деформацій, що діють у матеріалі. В якості еластомерної матриці можуть застосовуватися натуральні або синтетичні гуми, силікон, поліуретан та ін. Для поліпшення сумісності з органічним зв'язуючим порошки модифікують поверхнево-активними речовинами та кремнійорганічними сполуками. 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, яке накладається.

Необхідно зазначити, що враховуючи умови експлуатації, для застосування у підвісках ТЗ найбільш підходить поліуретан, який у порівнянні з гумою має такі переваги: високу зносостійкість та строк служби, здатність витримувати високі навантаження (вище межа міцності), стабільність в'язкопружних характеристик, нижчі залишкові деформації, стійкість до перепадів температур та агресивних середовищ. Важливим фактором є міцність клеєного з'єднання з металевими деталями, що виключає відрив навіть при екстремальних навантаженнях. Недоліком поліуретану є його висока вартість.

Мікрочастинки всередині МРЕ можуть бути розподілені однорідно або згруповані в стовпчасті структури - ланцюжки. Для утворення впорядкованої структури, під час полімеризації матриці, що містить магнітні частинки, прикладається зовнішнє однорідне магнітне поле. Під його дією мікрочастинки утворюють стовпчасті структури – ланцюжки, які в результаті полімеризації виявляються зафіксованими в матриці. За такий спосіб в процесі виготовлення можна отримати в'язкопружні МРЕ зі спеціальними анізотропними властивостями. Важливим параметром є середній розмір магнітних частинок та ступінь адсорбції матеріалу матриці на їх поверхні, що потрібно для формування безперервної структури еластомера.

Відомо, що у в'язкопружних матеріалах, до яких відноситься і МРЕ, частина вхідної енергії деформації накопичується і відновлюється протягом кожного циклу, а частина втрачається на нагрів. Дійсна частина модуля пружності G' являє собою здатність в'язкопружного матеріалу накопичувати енергію деформацій, уявна частина, (модуль втрат) G'' , являє собою здатність матеріалу розсіювати енергію деформацій.

Розглянемо відомі дослідження з впливу магнітних полів на в'язкісні та інші властивості МРЕ.

У роботі [5] експериментально досліджено динамічні властивості МРЕ при прикладенні гармонічного навантаження з амплітудами деформації у межах від 1% до 50% та частотами від 1Гц до 50 Гц, в залежності від індукції магнітного поля. Результати представлено на рис. 2.

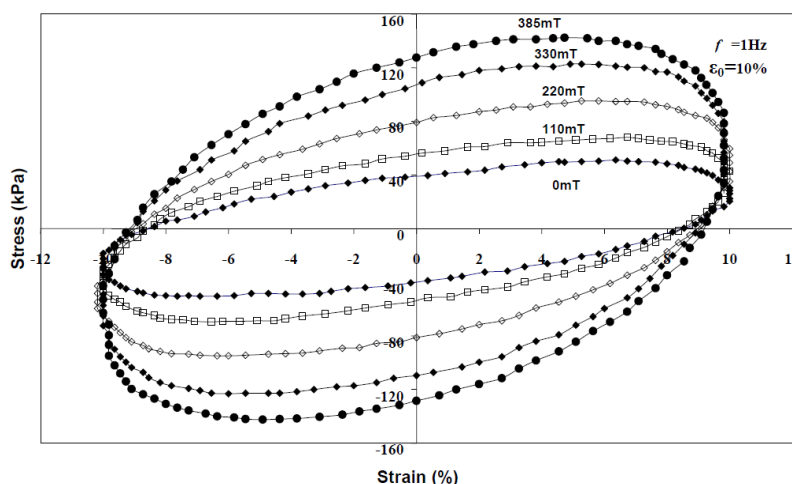


Рисунок 2 – Напружено-деформований стан у різних магнітних полях при постійній амплітуді відносної деформації 10% і частоті 1 Гц.

Представлені криві мають вид еліпсів (петель гістерезису), що свідчить про втрати енергії, які значно, у рази, збільшуються при зростанні індукції керуючого магнітного поля.

Для досліджень, що приведені у роботі [6], зразки МРЕ виготовлялися на основі силіконової матриці з полідиметилсилоксану, з концентрацією магнітних частинок від 0 до 35% (об). Частина зразків для отримання анізотропних властивостей полімеризувалася у магнітному полі. Зразки мали розмір магнітних частинок 5 мкм та 40 мкм. Еластомер без магнітних частинок мав модуль пружності близько 50 кПа. Експерименти проводилися при фіксованій частоті коливань 10 Гц, амплітуді деформації 1%, та різних значеннях магнітної індукції.

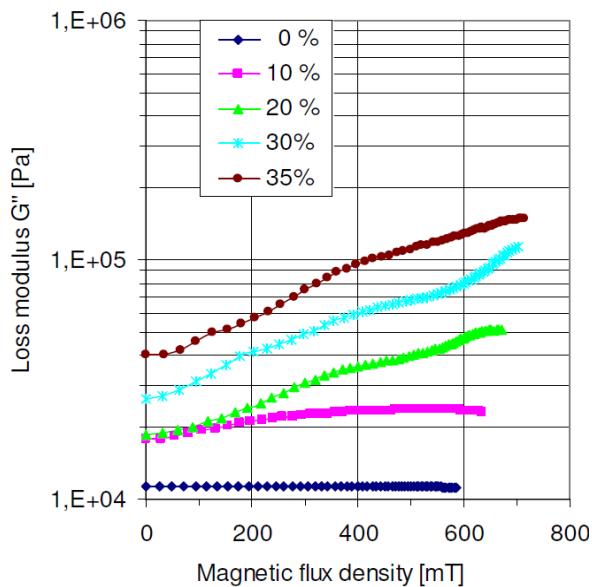


Рисунок 3 – Залежність модуля втрат ізотропного зразку МРЕ з різною концентрацією частинок (5 мкм) від щільності магнітного потоку.

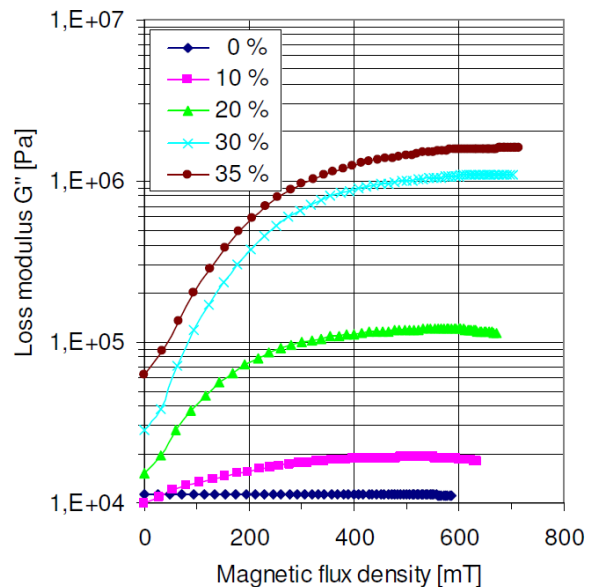


Рисунок 4 – Залежність модуля втрат ізотропного зразку МРЕ з різною концентрацією частинок (40 мкм) від щільності магнітного потоку.

З представлених на рис. 3., рис. 4. графіків випливає, що модуль втрат G'' суттєво залежить від розміру і концентрації частинок та магнітного поля що накладається. При розмірі частинок 5 мкм, найбільший ріст G'' складає близько 4-х разів (концентрація частинок 35%). Якщо ж розмір частинок збільшити до 40 мкм, то для тієї ж концентрації, зростання G'' буде складати 18 разів. Насичення відбувається при щільності магнітного потоку 600...800 мТл.

У роботі [7] представлені опис конструкції, характеристики та результати досліджень демпфера на основі МРЕ, яких призначений для віброзахисту прецизійного обладнання. Вказано, що швидкодія демпфера залежить від часу перехідних процесів в МРЕ. Час структурування реологічного середовища $t_{стр}$ і релаксації t_p напруг зсуву, визначався відношенням $\mu_{екв} (Н) / E$, де $\mu_{екв} (Н)$ - динамічна еквівалентна в'язкість реологічного середовища, а E - модуль його пружності. Ці параметри, а також і

швидкодія можуть регулюватися при зміні рівня напруженості магнітного поля силою струму в котушці. Досягнута швидкодія демпфірування складала 0,5 с.

У роботі [8] проведено порівняльну оцінку різних типів демпферів для прецизійного обладнання, у тому числі і на основі МРЕ та показано переваги останнього. Проведено експериментальні дослідження. Показано, що ефективність демпфірування, яка характеризується здатністю поглинати енергію коливань, зростає зі збільшенням об'ємної концентрації магнітних частинок.

Схожі результати були отримані і при дослідженнях, що представлені у роботах [9,10].

Висновки.

1. Дослідження властивостей та можливого застосування МРЕ знаходяться у початковій стадії: досліджено впливи, описано стени для проведення випробувань у різних умовах (більше по електричним і магнітним параметрам), для зразків невеликих розмірів та їх малих деформацій, не дано оцінку енергоспоживанню.

2. Шляхом регулювання керуючого магнітного поля, в залежності від розміру та концентрації магнітних частинок, можна змінювати енергію, що поглинає МРЕ (модуль втрат) від 4 до 18 і більше разів. Чим більші розмір і концентрація магнітних частинок та більше індукція магнітного поля, тим більший модуль втрат.

3. Результати досліджень МРЕ показали, що їх модуль пружності у 4...5 разів переважає модуль втрат, тобто пружні властивості МРЕ домінують над демпфіруючими.

4. Залишається малодослідженим питання швидкодії, яке є важливим при застосуванні МРЕ у демпфіруючих пристроях підвіски ТЗ, що керуються. Швидкодія залежить від співвідношення в'язких та пружних властивостей МРЕ.

5. Необхідно провести дослідження щодо матеріалу матриці (гума, силікон, поліуретан чи ін.), який би найбільше задовольняв вимогам застосування МРЕ у вузлах підвіски ТЗ.

6. Виходячи із зробленого попереднього аналізу, зокрема можливого діапазону зміни модуля втрат та швидкодії, МРЕ мають перспективу застосування у демпфіруючих пристроях, що керуються, підвіски ТЗ.

Список літератури: 1. 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. 2. Дущенко В.В. Использование электромагнитного поля для управления характеристиками узлов подвески транспортных средств/ В.В. Дущенко, Н.И. Кумосин // Автомобильный транспорт. Сб. науч. тр. ХНАДУ. – 2011. – Вып. 28. – С. 27–31. 3. Автомобильные подвески / А.В. Острецов, П.А. Красавин, В.В. Воронин и др. // Учеб. пособие, ч. 1. – М.: МГТУ «МАМИ». – 2011. – 162 с. 4. Канунников С. В связке одной с тобой: обзор прицепов /С. Канунников, М. Сачков // За рулем. – 1999. – №7. – С. 70 – 74. 5. Li. Magnetorheological elastomers and their applications /Li, W. H., Zhang, X. Z. & Du, H. // Advances in Elastomers I: Blends and Interpenetrating Networks. Berlin. – 2013. – pp. 357-374. 6. 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. **7. 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. **8. Михайлов В.П.** Управление виброизоляцией прецизионного оборудования / *В.П. Михайлов, К.Г. Шаков, А.С. Селиваненко и др.* // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – №9. – С. 1–12. **9. Gong X. L.** Study of utilizable magnetorheological elastomers / *X. L. Gong, L. Chen u J. F. Li* // *International Journal of Modern Physics B*. – 2007. – т. 21. – № 28n29. – pp. 4875–4882. **10. 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.

Bibliography (transliterated): **1. Dushhenko V.V.** Py`tannya udoskonalennyya metodologiyi analizu ta sy`ntezu sy`stem pidresoryuvannya vijs`kovy`x guseney`chny`x i kolisny`x mashy`n / *V.V. Dushhenko* . Vijs`kovo-texnichny`j zbirny`k Akademiyi suhoputny`x vijs`k im. get`mana P. Sagajdachnogo. – L`viv. – 2012. – Vy`p. 1(6). – P. 26–32. **2. Dushhenko V.V.** Ispolzovanie elektromagnitnogo polya dlya upravleniya karakteristikami uzlov podveski transportnyx sredstv/ *V.V. Dushhenko, N.I. Kumosin* . Avtomobilnyj transport. sb. nauch. tr. XNADU. – 2011. – Vyp. 28. – p. 27–31. **3. Avtomobilnye podveski** / *A.V. Ostrecov, P.A. Krasavin, V.V. Voronin i dr.* . ucheb. posobie, ch. 1. – M.: MGTU «MAMI». – 2011. – 162 sp. **4. Kanunnikov S. V** Svyazke odnoj s toboj: obzor pricepov / *S. Kanunnikov, M. Sachkov* . Za Rulem. – 1999. – No7. – p. 70–74. **5. Li.** Magnetorheological elastomers and their applications / *Li, W. H., Zhang, X. Z. & Du, H.* Advances in Elastomers I: Blends and Interpenetrating Networks. Berlin. – 2013. – pp. 357-374. **6. 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. **7. Gorbunov A.I.** Issledovanie svojstv i novoe primenenie magnitnyx silikonovyx kompozitov / *A.I. Gorbunov, V.P. Mixajlov, G.V. Stepanov i dr.* Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. ser. mashinostroenie. – 2008. – No 1(70). – p. 90–107. **8. Mixajlov V.P.** Upravlenie vibroizolyaciej precizionnogo oborudovaniya / *V.P. Mixajlov, K.G. Shakov, A.S. Selivanenko i dr.* Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman. – 2012. – No9. – p. 1–12. **9. 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. **10. Kovrov V.N.** Vlijanie magnitnyh polej na mehanicheskie svojstva magnitoreologicheskikh jelastomerov / *V.N. Kovrov, A.I. Ostanin, K.V. Kachalin.* Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. – 2011. – No 4 (2). – P. 468–469.

Надійшла (received) 20.02.2015