

УДК 53.09+53.043+537.3+541.64

Ю. О. Клименко¹, Є. П. Мамуня², В. В. Левченко², О. В. Семенів¹, Ю. В. Пруцко¹, В. О. Яценко¹

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ

² Інститут хімії високомолекулярних сполук Національної академії наук України, Київ

НОВІ НАНОКОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОСМІЧНИХ ДАВАЧІВ

Проведено серію лабораторних досліджень впливу зовнішніх механічних зусиль на деформацію і електроопір пружних електропровідних нанокompозитів, які містять різноманітні вуглецеві та металічні домішки. Розроблено та створено пружний нанокompозитний матеріал, який характеризується стійким електричним та деформаційним візуком на дію зовнішніх механічних зусиль. Деформаційні та струмові характеристики матеріалу демонструють практично лінійну залежність від зовнішньої сили. Розглянуто перспективи використання одержаних нанокompозитів у ролі активних елементів перспективних космічних сенсорів.

Ключові слова: нанокompозит, деформація, електроопір, активний елемент.

ВСТУП

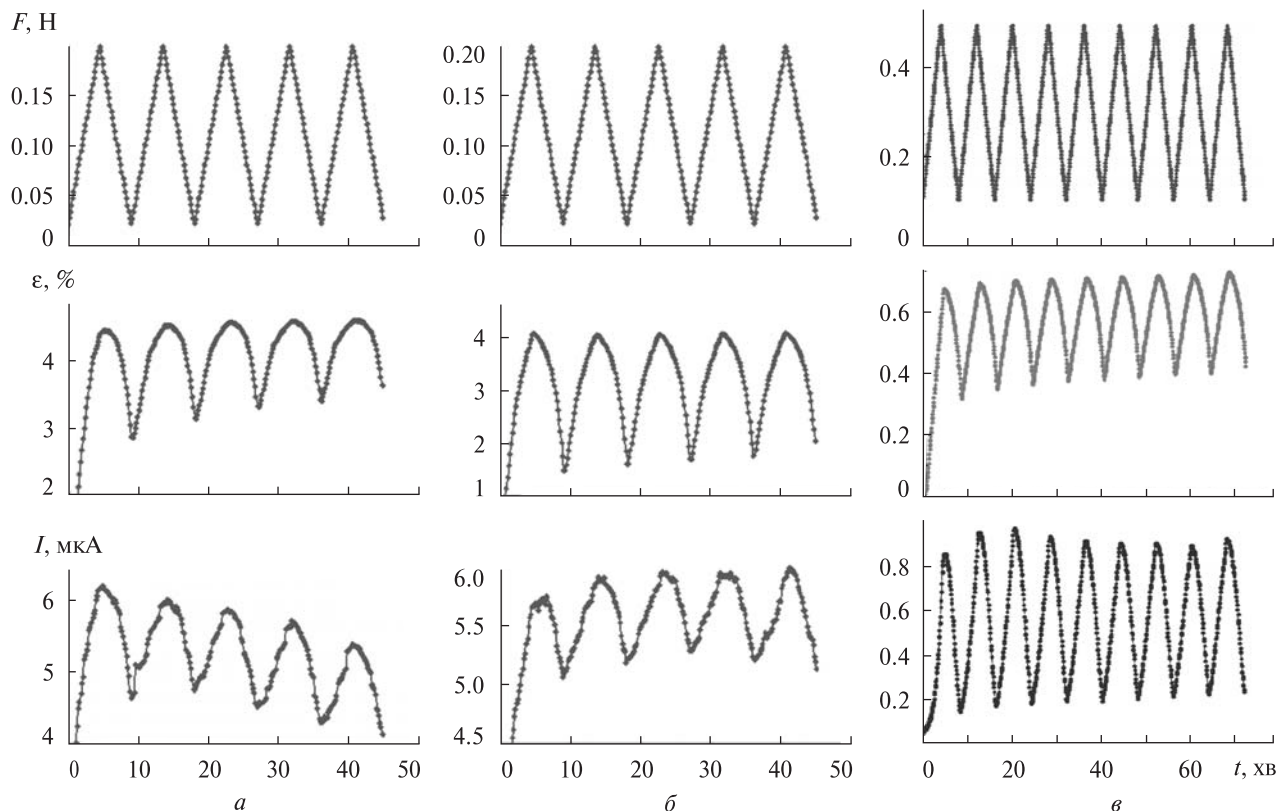
На думку фахівців, найближчим часом близько 20 % космічних завдань будуть вирішуватися за допомогою надлегких мікросупутників та їхніх угруповань. Сучасні технології по суті обмежують можливості виробництва малогабаритних, відмовостійких та високонадійних мікросупутникових вузлів, елементів та систем. Необхідно шукати нові підходи, зокрема з використанням передових технологій приладобудування та матеріалознавства.

Літературні джерела [1–6] вказують на перспективність використання пружних електропровідних нанокompозитів у ролі активних елементів різноманітних електромеханічних сенсорів, зокрема систем космічного базування. Подібні

композити являють собою полімерний матеріал, який містить в собі електропровідні частинки різного походження – вуглецеві нанотрубки та волокна, графіт, сажу, нано- або мікрокластери металів тощо. При концентрації частинок, яка є дещо вищою, ніж порог перколяції матеріалу, в об'ємі ізолюючої полімерної матриці утворюється провідна фаза. Якщо полімерна матриця має високі пружні характеристики, то невеликі по величині зусилля призводять до деформації матеріалу і, разом з ним, до зміни числа контактів між дисперсними частинками. Це відображається в суттєвій зміні електропровідності композиту під дією зовнішніх зусиль, яка може досягати 5-7 порядків.

Подібні електромеханічні явища відкривають широкі можливості для створення надчутливих електромеханічних давачів. Зокрема, для акселерометрів, де зміна об'єму нанокompозитного матеріалу буде виникати за рахунок зовнішніх

© Ю. О. КЛИМЕНКО, Є. П. МАМУНЯ, В. В. ЛЕВЧЕНКО,
О. В. СЕМЕНІВ, Ю. В. ПРУЦКО, В. О. ЯЦЕНКО, 2015



Зміни деформації ϵ і струму I крізь зразок при циклічних навантаженнях F : a — для композиції Si-7%Ni+7%С, необробленої у магнітному полі, b — для тієї ж композиції після обробки в магнітному полі, v — для композиції Si-11%Ni(micro)+7% Ni(nano) після обробки у магнітному полі

інерційних сил, а ступінь такої деформації буде реєструватись прямим вимірюванням електричного струму, який проходить через нанокompозитний матеріал.

Нанокompозитний матеріал для електромеханічних сенсорів, з одного боку, повинен забезпечувати високі пружні властивості для реалізації високої чутливості матеріалу. З другого боку, повинна спостерігатись стійка відновлювальність пружних та електричних характеристик у багатьох циклах навантаження/розвантаження композиту. Тому полімерний матеріал повинен мати високу адгезію до наповнювача з тим, щоб провідна фаза відновлювалася при навантаженні/розвантаженні матеріалу та релаксувала разом з полімерною матрицею.

Незважаючи на те, що ідея створення сенсорів деформації на основі перколяційних переходів

у нанокompозитах є досить прозорою, подібні пристрої досі не створені. Це сталося через те, що такі матеріали не мають стабільного і надійного електричного відгуку в широкому діапазоні деформаційних навантажень завдяки поступовому руйнуванню структури електропровідних каналів поблизу точки перколяції [4]. А оскільки сам перколяційний перехід складним (і навіть непередбачуваним) чином залежить від типу полімерної матриці, форми, розмірів і концентрації частинок наповнювача, від зв'язків між ними та їхньою взаємодією з полімерною матрицею, то створення високочутливого і неруйнівного сенсорного матеріалу є досить важким технологічним завданням.

Ми розробили нові засоби синтезу пружної полімерної матриці, яка має високу адгезію щодо вуглецевих та металевих включень. Зна-

йдено склад електропровідного композиту на основі силікону і металевих наповнювачів, орієнтованих у магнітному полі. Одержаний матеріал характеризується великим електричним відкликом на дію зовнішніх механічних зусиль. У порівнянні з іншими відомими технологіями використання магнітного поля під час отвердження матеріалу дає змогу зформувати стійку 1D орієнтовану структуру провідної фази композиту. Завдяки цьому суттєво зменшується нестабільність електричного струму при збільшенні кількості циклів навантаження/розвантаження композитного матеріалу.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для проведення експерименту на базі Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України була зроблена модернізація установки термомеханічного аналізу TMA Q400EM виробництва «TA Instruments», США. Це надало можливість одночасної реєстрації механічних та електричних характеристик досліджуваних зразків.

За допомогою переобладнаної установки було проведено дослідження впливу механічних зусиль на деформаційні властивості та зміну електроопору нанокompозитів на основі натурального каучуку або силікону з наповнювачами типу вуглецевих нанотрубок, вуглецевих волокон, мікро- та нанокластерів металів тощо. Наповнювачі вводилися в рідку силіконову смолу, змішувалися, потім додавався твердник, і композиція затверджувалася.

В ході експериментів досліджувалась кореляція між механічним напруженням матеріалу та спричиненими ним деформацією та електричним струмом. Вимірювання проводилися в режимі стиснення зразка циклічним методом. У першій половині циклу навантаження лінійно збільшувалось зі швидкістю 0.1 Н/хв, у другій — лінійно зменшувалось з такою ж швидкістю. Надалі цикли повторювалися.

Найбільш цікаві залежності струму від механічних зусиль для різних нанокompозитів наведені на рисунку. Верхні графіки рисунків демонструють вигляд циклічного зовнішнього навантаження F на матеріал в залежності від часу.

Середній ряд графіків показує зміни відносної деформації ϵ матеріалу. Нижні рисунки демонструють залежність електричного струму I від часу.

Фрагмент *a* відповідає структурам з хаотичним розподілом вуглецевих наповнювачів (композит Si-7%Ni+7%C). Як видно, цикли струму є нестабільними, а з ростом числа циклів загальний струм, що протікає через зразок, повільно знижується. Така ж ситуація виявляється типовою для всіх неупорядкованих нанокompозитів.

Для впорядкування розподілу наповнювачів у полімерній матриці незатверджену композицію ми переносили у магнітне поле між двома полюсами магнітів. Тут відбувалося поступове твердження композиту і одночасне формування одновимірної анізотропної структури, яка фіксувалася в затвердженому полімері.

В ході експериментів зі впорядкованими матеріалами напрямок навантаження збігався з напрямком орієнтування одновимірної структури у зразку. Поведінка того ж композиту, що і на фрагменті *a*, після обробки в магнітному полі показана на фрагменті *б*. Видно, що цикли струму стають більш стабільними.

Фрагмент *в* ілюструє оптимальну комбінацію наповнювачів — композит Si-11%Ni(micro)+7% Ni(nano) (тут Si — силікон, C — вуглецевий наповнювач, Ni(micro) — нікель з розміром частинок 10 мкм, Ni(nano) — нікель з розміром частинок 50 нм), яка практично повністю нагадує поведінку кривих зовнішнього навантаження. Крім того, спостерігається майже лінійна залежність деформації та струму на кожному з півциклів. Експеримент тривав упродовж тижня та не виявив суттєвої різниці між струмовими кривими початкових і заключних циклів.

ВИСНОВКИ

Розроблено засоби формування структури полімерного композиту з металевими включеннями, який демонструє найбільш прийнятні характеристики електричного відгуку під час циклів навантаження/розвантаження цього нанокompозитного матеріалу. У порівнянні з іншими ві-

домими технологіями це дає змогу сформувати одновимірну орієнтовану структуру провідної фази композиту, що практично повністю ліквідує проблему нестабільності електричного сигналу зі збільшенням числа циклів навантаження/розвантаження матеріалу.

Розроблений композитний матеріал демонструє практично лінійну залежність електричного струму від зовнішньої сили. Реєструвати силу можна прямим вимірюванням електричного струму крізь електропровідний матеріал. Результати дослідження показують, що даний матеріал є перспективним для його використання у ролі чутливого елемента деформаційно-чутливих сенсорів космічного призначення — акселерометрів, гравіметрів, давачів диференційного тиску тощо. Концепцію побудови пристроїв з використанням електропровідних нанокompозитів буде обґрунтовано на наступних етапах виконання проекту.

1. Alamusi N. Hu, Fukunaga H., Atobe S., et al. Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites // *Sensors*. — 2011. — **11**. — P. 10691—10723.
2. Flandin L., Brechet Y., Cavaille J.-Y. Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors // *Compos. Sci. Technol.* — 2001. — **61**. — P. 895—901.
3. Grillard F., Jaillet C., Zakri C., et al. Conductivity and percolation of nanotube based polymer composites in extensional deformations // *Polymer*. — 2012. — **53**. — P. 183—187.
4. Jeong K.-U., Lim J. Y., Lee J.-Y., et al. Polymer nanocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes for semiconducting layers of high-voltage power cables // *Polym. Int.* — 2010. — **59**. — P. 100—106.
5. Park J.-M., Kim S.-J., Yoon D.-J., et al. Self-sensing and interfacial evaluation of Ni nanowire/polymer composites using electro-micromechanical technique // *Compos. Sci. Technol.* — 2007. — **67**. — P. 2121—2134.
6. Robert C., Feller J.-F., Castro M. Sensing skin for strain monitoring made of PC-CNT conductive polymer nanocomposite sprayed layer by layer // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. — 2012. — **4**. — P. 3508—3516.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

Ю. А. Клименко¹, Е. П. Мамуня², В. В. Левченко²,
О. В. Семенів¹, Ю. В. Пруцко¹, В. А. Яценко¹

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Государственного космического агентства Украины, Київ

² Інститут хімії високомолекулярних сполучень Національної академії наук України, Київ

НОВЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Проведена серия лабораторных исследований влияния внешних механических усилий на деформацию и электросопротивление упругих электропроводящих нанокompозитов, содержащих различные углеродные и металлические примеси. Разработан и создан упругий нанокompозитный материал, который характеризуется устойчивым электрическим и деформационным откликом на действие внешних механических усилий. Деформационные и токовые характеристики материала демонстрируют практически линейную зависимость от внешней силы. Рассмотрены перспективы использования полученных нанокompозитов в качестве активных элементов перспективных космических сенсоров.

Ключевые слова: нанокompозит, деформация, электросопротивление, активный элемент.

Yu. A. Klymenko¹, Ye. P. Mamunya², V. V. Levchenko²,
O. V. Semeniv¹, Yu. V. Prutsko¹, V. A. Yatsenko¹

¹ Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv

² The Institute of Macromolecular Chemistry of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

NEW NANOCOMPOSITE MATERIALS FOR ELECTROMECHANICAL SPACE SENSORS

A series of laboratory experiments on the influence of external mechanical efforts to elastic deformation and electrical conductive in nanocomposites containing different carbon and metallic impurities has been made. The nanocomposite elastic material, which is characterized by stable electric and deformation responses on external mechanical efforts has been designed and created. Deformation and current characteristics of the material exhibit an almost linear dependence on external forces. The prospects of using the obtained nanocomposites as active elements prospective space sensors have been considered.

Key words: nanocomposite, deformation, electric resistance, active element.