

PACS numbers: 61.48.De, 62.20.Qr, 62.23.Pq, 81.05.ub, 81.40.Jj, 81.40.Pq, 82.35.Nr

## **Структура та триботехнічні характеристики нанокомпозиційного матеріалу флюоропласт–вуглецеві нанорурки**

С. Л. Рево, М. М. Дашевський, К. О. Іваненко, Дун Занмін\*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
вул. Володимирська, 64,  
01601 Київ, Україна  
\*Tsinghua University,  
100084 Beijing, P. R. China*

Розглянуто структурні особливості та перколяційні характеристики нової полімер-карбонної композиції, компонентами якої є флюоропласт марки Ф4 та багатостінні вуглецеві нанорурки. Проаналізовано триботехнічні характеристики розробленого матеріалу та показано, що в порівнянні з флюоропластом його зносостійкість є у 100 разів вищою.

Features of the structure and characteristics of the percolation of a new polymer-carbon composition, which consists of F4-grade fluoroplastic (polytetrafluorethylene) and multiwall carbon nanotubes, are studied. The tribotechnical characteristics of the developed material are analysed. As shown, the wear resistance of the developed material is 100 times higher than that of the initial fluoroplastic.

Рассмотрены структурные особенности и перколяционные характеристики новой полимер-углеродной композиции, компонентами которой являются фторопласт марки Ф4 и многостенные углеродные нанотрубки. Проанализированы триботехнические характеристики разработанного материала и показано, что в сравнении с фторопластом его износостойкость в 100 раз выше.

**Ключові слова:** структура, флюоропласт, вуглецеві нанорурки, триботехнічні характеристики.

*(Отримано 30 вересня 2011 р.)*

### **1. ВСТУП**

Однією з суттєвих перешкод на шляху інтенсифікації різноманіт-

них виробничих процесів є відносно невисока стійкість вузлів машин та обладнання і, насамперед, вузлів тертя, що працюють в агресивних середовищах. Такі обставини викликають прості обладнання, втрати матеріальних та енергетичних ресурсів.

Одним з ефективних шляхів вирішення вказаної проблеми є використання для вузлів тертя стійких в агресивних середовищах наноконпозиційних матеріалів (НКМ). Поряд з вказаною стійкістю ці матеріали повинні мати низький коефіцієнт тертя ( $K_{тр}$ ) та високу зносостійкість. Універсальних шляхів вирішення зазначеної проблеми, звичайно, немає, але розширення границь використання такого, наприклад, стійкого в агресивних середовищах матеріалу як флюоропласт, цілком реальне.

У цій роботі наведено результати досліджень структури та триботехнічних характеристик нового НКМ: флюоропласт (ФП) марки Ф4–багатостінні вуглецеві нанорурки (БВНР).

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

БВНР були одержані CVD-методом в реакторі, що обертається [1, 2]. Як каталізатор використовували оксиди типу  $Al_2O_3$ – $MoO_3$ – $Fe_2O_3$ . Джерелом вуглецю слугував пропілен, який був одержаний дегідратацією ізопропілового спирту. Водну суспензію Ф4 змішували з деагльомерованими та просушеними БВНР. Після висушування суміш пресували при температурі  $T = 350^\circ C$  і тиску  $P = 500$  МПа. Очищення БВНР здійснювали традиційним способом — в розчині флюорводневої кислоти та їх промиванням до  $pH = 6$ – $7$ . Деагльомерацію вуглецевих нанорурок, змішаних з водою, здійснювали в кавітаційному пристрої.

Як відомо [3], для підвищення експлуатаційних характеристик флюоропласту, залежно від конкретних умов експлуатації виробів, виготовлених з композицій на його основі, до ФП додають різноманітні наповнювачі. Це дозволяє підвищити такі характеристики матеріалу як зносостійкість, твердість, механічна міцність, модуль пружності тощо. Зазвичай, використовують наповнювачі з графіту, молотого коксу, скловолокна, дисульфиду молібдену, аеросилу, різноманітних керамік, нітридів, боридів тощо. Нажаль, на сьогодні не існує науково обґрунтованих критеріїв підбору матеріалу для використання в якості наповнювача, здатного придати композиції наперед задані структуру та характеристики. Одержання таких даних можливе лише після нагромадження повноцінних експериментальних даних та з'ясування закономірностей формування практично важливих характеристик при використанні наповнювачів з різною здатністю до утворення просторових структур у композиціях. Виходячи з цього, в роботі було використано в якості наповнювача БВНР, які здатні, як показали дослідження, забезпечити при створенні

НКМ з полімерами поріг перколяції на рівні  $C_c \approx 0,4$  мас. %.

Структуру зрізу зразків вивчали на оптичному типу «Neofot» та растровому електронному мікроскопах, а для визначення триботехнічних характеристик зразків використовували модифікований лабораторний пристрій типу УМТ-1. Схема випробувань передбачала контактування обраної площини поверхні зразків з поверхнею контртіла (криці ХВГ), що обертається без змащування. Швидкість тертя ковзання обирали в межах від 1,25 до 10 м/с при навантаженнях на зразки від 0,4 до 1,1 МПа. Ступінь зношування визначали ваговою методою на шляху тертя 1000 м. Відносна похибка при визначенні коефіцієнту тертя не перевищувала 4%, а при визначенні зношування 7,5%.

### 3. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як показали дослідження структури зразків (рис. 1), БВНР у вільному стані консолідується, утворюючи, так звані, клубкоподібні конгломерати, розміром у поперечнику 4–10 мкм, які, в свою чергу, можуть об'єднуватися в ще більші клубки (рис. 1, а). Виконані випробування показали, що, якщо до змішування з флюоропластовою компонентою такі клубки не диспергувати, то не буде забезпечено рівномірності розподілу БВНР у матриці (рис. 1, б) і нереально буде одержати максимально високі характеристики НКМ. Структуру зрізу зразків НКМ з деагльомерованими БВНР надано на рис. 1, в. Як можна бачити з рисунка, при виготовленні таких зразків відбувається більш менш рівномірний розподіл наповнювача в матриці. Це забезпечує і низький поріг перколяції для одержаних зразків НКМ, і відносно високі їх фізико-механічні характеристики.

За даними вимірювання електроопору поріг перколяції для зразків НКМ, структуру яких показано на рис. 1, в, складає  $C_c = 4,1 \pm 0,1$  об. %. Концентраційна залежність питомого електроопору одержаної композиції в межах теорії перколяції відповідає моделю тривимірної електропровідної сітки з блокованими вузлами. Вона має пороговий

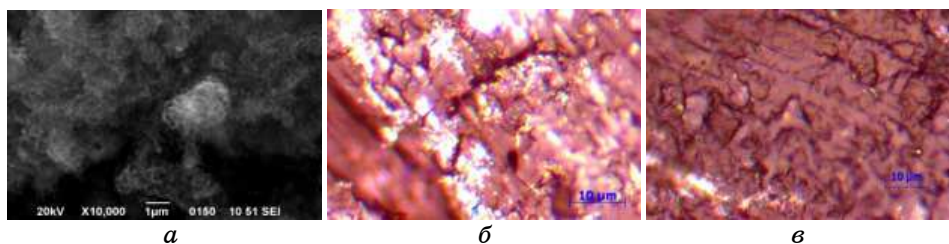


Рис. 1. Мікроструктура БВНР (а), НКМ ФП-неагльомеровані БВНР (б) та НКМ ФП-деагльомеровані БВНР (в).

вигляд і при  $C > C_c$  аналітично може бути виражена рівнянням

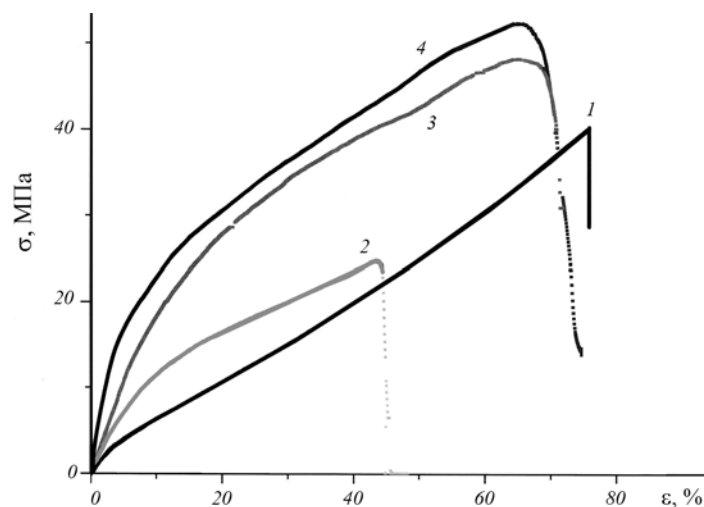
$$\rho_k(C) = \rho_t(C - C_c)^{-t},$$

де  $\rho_k$  — питомий опір НКМ;  $\rho_t$  — питомий опір БВНР, компактованих при умовах, що відповідають умовам одержання НКМ;  $C$  — об'ємна частка БВНР;  $t$  — критичний індекс. Для нашого випадку  $t = 1,7$ .

Густина одержаних зразків НКМ при кімнатній температурі практично не відрізняється від густини флюоропласту Ф4 і складає 2,1–2,22 г/см<sup>3</sup>. Незначні її зміни відбуваються зі зміною ступеню кристалічності матриці, і при збільшенні ступеню її кристалічності з 40 до 66,5% густина може збільшуватись на  $\approx 0,12$  г/см<sup>3</sup>.

Як видно з рис. 2, границя міцності при стисканні, модуль пружності і, що особливо важливо, границя плинності для НКМ суттєво вищі за відповідні параметри для матриці, виготовленої за розробленою технологією.

Коефіцієнт тертя при швидкості ковзання 5 м/с, який для промислового флюоропласту зі збільшенням навантаження з 1 до 20 кГ/см<sup>2</sup> зменшується з 0,4 до 0,05, для розробленого НКМ знижується в усьому використаному в роботі діапазоні навантажень на 25–30%. Зі змащуванням він знижується практично вдвічі. Теплопровідність у кліматичному діапазоні температур також дещо підвищу-



**Рис. 2.** Залежність напруження при стисканні від відносної деформації: зразків промислового флюоропласту Ф4 (1); зразків, виготовлених способом, використаним в роботі, флюоропласту (2) та НКМ ФП-25 мас.% БВНР (3, 4), виготовлених розробленим способом. Ступінь кристалічності ФП для залежностей 2 та 4 —  $\approx 60\%$ , для залежності 3 —  $\approx 40\%$ .

ється до 0,3 Вт/м·К.

Значною перевагою розробленого матеріалу порівняно з аналогами є те, що його зносостійкість у порівнянні з ФП Ф4 вища в 100 разів, а комплекс зазначених вище характеристик забезпечує конкурентоздатність виготовлених з нього виробів на ринку полімерних триботехнічних матеріалів.

#### 4. ВИСНОВКИ

В цілому, довговічність експлуатації вузлів машин і механізмів здебільшого визначаються їх конструкцією, матеріалами, що застосовуються, умовами роботи вузлів тертя. Наприклад, радіальні та аксіальні вальниці герметичних електропомп змащуються і охолоджуються тією самою рідиною, яку пересмокуває помпа, а це можуть бути кислоти, луги, інші агресивні середовища. Температура рідини, що пересмокувається, може знаходитись у межах  $-70$ – $+250^{\circ}\text{C}$ . Під час роботи електропомпи можливі короточасні режими роботи без подачі рідини в зону тертя вальниць, різкі зміни температури в зоні тертя, а також інші ненормативні режими роботи. Розроблений матеріал саме і вирішує вказані проблеми.

Роботу виконано в межах фінансової підтримки Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України (договір № М/354-2011).

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. И. Семенцов, А. В. Мележик, Г. П. Приходько и др., *Физико-химия наноматериалов и супрамолекулярных структур* (Ред. А. П. Шпак, П. П. Горбик) (Киев: Наукова думка: 2007), т. 2, с. 116.
2. S. L. Revo, Yu. I. Sementsov, F. V. Lozovii et al., *Heat Treatment and Surface Engineering*, VIII, No. 2: 3 (2008).
3. ГОСТ 10007-80 *Флюоропласт-4. Технические условия.*