

УДК 621.002.3-419; 678.029.46:544.733

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-346-354

**Є. О. Пащенко**, д-р техн. наук; **Д. О. Савченко**, **С. А. Кухаренко**, кандидати технічних наук; **О. М. Кайдаш**, д-р техн. наук; **Р. М. Курганов**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 2, вул. Автозаводська, 04074, м. Київ, Україна, e-mail: lab6\_1@ukr.net*

## **РОЗРОБКА ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ З ЕФЕКТОМ САМОЗМАЩУВАННЯ НА ОСНОВІ ПОЛІМІДІВ З НАНОЧАСТИНКАМИ ОКСИДУ КРЕМНІЮ**

*Вивчено вплив наночастинок  $SiO_2$  на покращення термічної стабільності і термічної стійкості та підвищення механічних властивостей композитів. Показано, що додавання нано- $SiO_2$  в композитах ефективно для обмеження адгезійного зносу та сприяння зниженню коефіцієнту тертя. Висока термічна стійкість та підвищені механічні властивості роблять виготовлені композити потенційним матеріалом для застосування в самозмащувальних підшипниках, до яких висуваються вимоги низького коефіцієнта тертя за дискретного режиму роботи.*

**Ключові слова:** композити з наповнювачем нано- $SiO_2$ , твердість за Шором, границя міцності під час стискання, адгезійний знос, коефіцієнт тертя

### **Вступ**

Самозмащувальні полімерні композиційні покриття з регульованими трибологічними та механічними властивостями широко застосовуються на механічних деталях для зменшення тертя та зносу, що покращує загальні характеристики для таких застосувань, як деталі аерокосмічних супутників, вали, шестерні та втулки. Додавання функціональних наповнювачів може продовжити термін служби покриттів, забезпечуючи поєднання низького тертя, високої зносостійкості, витримування високих навантажень, високої термостійкості та високої адгезії.

Полімерні покриття з низькою міцністю на зсув мають хорошу здатність до самозмащення і зносостійкості, а також можуть забезпечувати надзвичайно низькі коефіцієнти тертя і зносу. Самозмащувальні полімерні покриття поєднують властивості, які не притаманні іншим твердим мастильним покриттям, і мають особливі переваги в областях, де важливими факторами є вартість, вага, корозійна стійкість або біосумісність [1]. Однак полімерні самозмащувальні покриття мають багато обмежень: слабку зносостійкість, підвищений знос і знижений термін служби. Низька теплопровідність та погана термостійкість дозволяють покриттям легко розм'якшуватися та руйнуватися за високої температури. Їх трибологічні характеристики суттєво залежать від навколишнього середовища. Комбінування матеріалів з різними властивостями – це ефективний метод покращення властивостей матеріалу за рахунок повного використання переваг двох або більше компонентів, при цьому властивості матеріалів можуть бути адаптовані та оптимізовані. Функціональні наповнювачі використовуються для поліпшення характеристик полімерних покриттів, включаючи забезпечення стабільного та низького коефіцієнта тертя, високої теплопровідності та термостійкості, покращених механічних властивостей для більш високих навантажень та оптимальної адгезії між покриттям та підкладкою.

Для дослідження у якості матриці змащувального покриття було обрано полімерний матеріал поліімід (PI). Однак, використання одного полімеру як змащувального покриття завжди має певні обмеження. З метою усунення таких обмежень, наприклад, для покращення трибологічних та механічних властивостей використовують наповнювачі – це матеріали на основі вуглецю, сульфідні перехідних металів, керамічні наночастинки та ін. В якості наповнювача було вибрано наночастинки оксиду кремнію.

Мета роботи – вивчити вплив наповнювача (нано-SiO<sub>2</sub>) на покращення термічної стабільності, термічної стійкості і підвищення механічних властивостей композитів та обмеження адгезійного зносу і зниження коефіцієнту тертя.

#### Матеріали та методи дослідження

Виготовлення композиційних матеріалів на основі поліімідів(ПІ) та наночастинок оксиду кремнію (нано-SiO<sub>2</sub>) проводили золь-гель методом. Для цього амінофенілсульфон (0,372 г) додавали в круглодонну колбу і розчиняли в N-метил-2-піролідоні (6 г). Додавали туди бензофенонтетракарбоний ангідрид (0,3 г). Суміш безперервно перемішували протягом 24 год, і суміш тетраетоксисилану і дистильованої води (5/1 у розрахунку на молярні кількості тетраетоксисилану) додавали в цю ж колбу. Далі додавали соляну кислоту (HCl) для підтримки рН 4, потім суміш перемішували за кімнатної температури протягом 24 год з отриманням прозорого розчину. Золь-гель процес проводився шляхом гідролізу алкоксидів з утворенням гідроксильних груп та з утворенням тривимірної сітки на їх основі. Отриманий матеріал був нанесений на металеву підкладку та підданий термічній обробці в печі. Плівку сушили в печі за 80 °С протягом 5 год, а потім нагрівали за різних температур та тривалості (125 °С протягом 2 год; 150 °С протягом 2 год; 180 °С протягом 1 год; 200 °С протягом 1 год; 250 °С протягом 1 год і 300 °С протягом 0,5 год) для перетворення кислоти в однорідну поліімідну плівку завтовшки від 80–210 мкм.

#### Результати та їх обговорення

Криві залежності коефіцієнта тертя  $\mu$  композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> з різним вмістом нано-SiO<sub>2</sub> за навантаження 10 Н від часу та швидкості ковзання 0,08 м/с та їх середні значення показані на рис. 1.

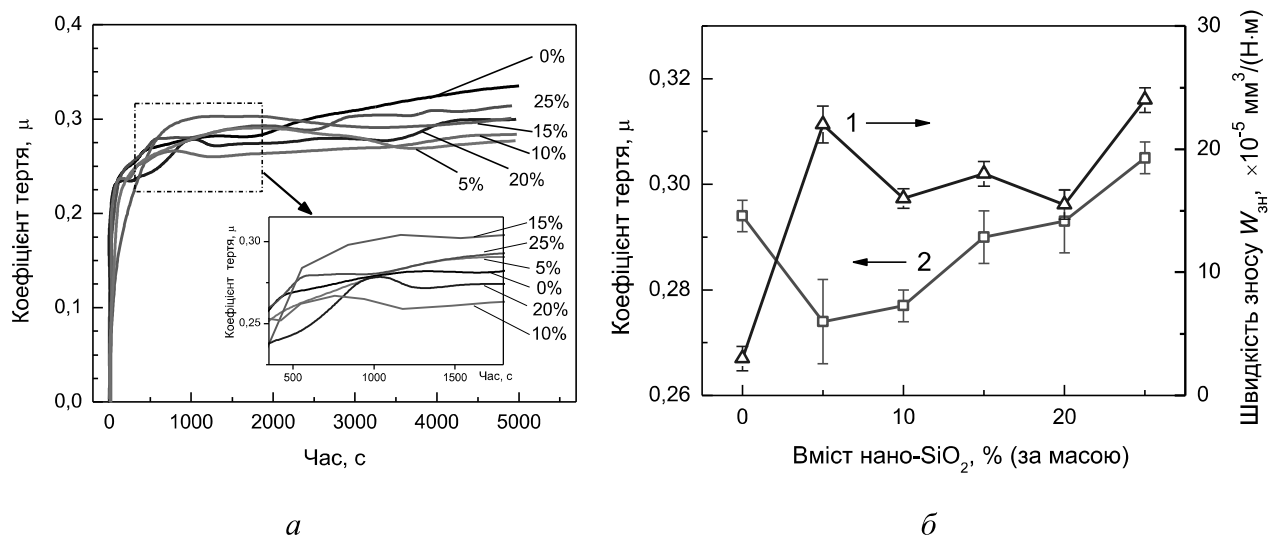


Рис. 1. Залежність коефіцієнта тертя  $\mu$  від часу випробування та вмісту нано-SiO<sub>2</sub> у композиті ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> при навантаженні 10 Н і швидкості ковзання 0,08 м/с (а) та зміна швидкості зносу  $W_{зн}$  (1) і коефіцієнта тертя  $\mu$  (2) композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> зі зростанням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> (б)

З рис. 1, б можна зробити висновок, що додавання нано-SiO<sub>2</sub> у кількості нижчій за 10 % корисне для зниження коефіцієнта тертя. При вмісті 5 % нано-SiO<sub>2</sub>,  $\mu$  знаходиться на мінімальному рівні 0,274, на відміну від 0,294 для чистого ПІ. Такий ефект може забезпечуватися завдяки однорідній дисперсії частинок нано-SiO<sub>2</sub> та сильній міжфазній

взаємодії між матрицями ПІ та нано-SiO<sub>2</sub> [2]. Тим часом частинки зношування діють як ролики в зоні контакту, які змінюють тертя ковзання на тертя кочення [2]. Отже, μ композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> зменшується, коли вміст частинок нано-SiO<sub>2</sub> нижчий за 10–15 %. Однак зі збільшенням кількості наночастинок вони сприяють відшаровуванню полімерних матриць і виробляють більше частинок зносу, що посилює абразивний знос [3]. Таким чином, коефіцієнт тертя композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> збільшується, коли вміст частинок нано-SiO<sub>2</sub> знаходиться в діапазоні від 5 до 25 %. Як показано на рис. 1, б, швидкість зносу композитів ПІ вища, ніж у чистого ПІ, та на 2 порядки вища, ніж наведена у [4]. Слід зазначити, що композити ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> у поточному дослідженні структурно відрізняються від згаданих у літературі, що є прямим результатом застосованої стратегії синтезу *in-situ*. Частинок нано-SiO<sub>2</sub> були дисперговані в N-метил-2-піролідоні для безпосередньої участі в синтезі композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub>, що істотно відрізняється від механічного змішування продуктів ПІ та добавок, використаних у [4]. Одним із прямих результатів стратегії синтезу *in-situ* є різна молекулярна маса композитів ПІ/SiO<sub>2</sub> [5], яка тісно пов'язана з трибологічними властивостями композитів на основі ПІ [6] та є реакцією зшивання у процесі формування – це ще один аспект, що впливає на трибологічні властивості композитів на основі ПІ [7]. Крім того, погіршена міцність зв'язку між плівкою та поверхнею контртіла може бути додатковим фактором, який відповідає за зниження зносостійкості композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> [8]. Це викликає локальне розшарування плівок, що призводить до різкого збільшення швидкості зношування композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> [8].

Як показали дослідження, зношена поверхня композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> з вмістом нано-SiO<sub>2</sub> 5 % є гладкою і характеризується невеликими потертостями в результаті абразивного зносу. Крім того, на зношених поверхнях залишається дрібне сміття. Перенесена плівка композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> із вмістом нано-SiO<sub>2</sub> 5 % є відносно товстою та однорідною, що дозволяє припустити, що адгезійний та абразивний знос відіграють важливу роль у механізмі зносу [9]. Переважно адгезійний знос, зношені поверхні чистого ПІ – грубі та сильні задири; перехідна перенесена плівка товста, горбиста і нерівна [9]. Додавання нано-SiO<sub>2</sub> викликає величезні зміни на зношених поверхнях та перенесеній плівці, які відповідають найнижчому коефіцієнту тертя композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> із вмістом нано-SiO<sub>2</sub> 5 %. Однак ударна в'язкість композитів на основі ПІ знижується при додаванні наночастинок SiO<sub>2</sub> [10], бо вони сприяють відшаровуванню матриць ПІ та створюють більше уламків між парами тертя [4]. Тим часом розшарування плівок вказує на міцність зв'язку між плівками та контртілом, що нижча за умов експерименту, описаного в статті [8]. Отже, прямий контакт між зразками та контртілом збільшує швидкість зносу композитів ПІ. Іншими словами, зносостійкість композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> з 5 % нано-SiO<sub>2</sub> нижча (див. рис. 1, б).

Коли вміст нано-SiO<sub>2</sub> досягає 10 %, на зношених поверхнях можна виявити явні здуття без подряпин. Це означає, що зі збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> спостерігається перехід переважного механізму зносу від адгезійного до абразивного зносу. Більш товсте і широке перенесення сприяє зниженню швидкості зносу зі збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> з 5 до 10 %, хоча локальні перенесені плівки явно відшаровуються (див. рис. 1).

Коли вміст нано-SiO<sub>2</sub> збільшується до 15 %, спостерігається погіршення морфології зношеної поверхні, а також з'являються деякі глибокі борозни та мікропори на зношених поверхнях. Поява подряпин означає наявність в парі тертя серйозних абразивних характеристик, що погіршують тертя. Цей висновок також підтверджується безліччю уламків зношування та агрегатів нано-SiO<sub>2</sub> на поверхні перенесеної плівки.

В результаті агрегація частинок нано-SiO<sub>2</sub> на поверхні перенесеної плівки може подрятати поверхню зразків, що збільшує швидкість зносу композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub>. Типові подряпини, мікроямки та мікротріщини спостерігаються на морфології зношеної поверхні зі

збільшенням вмісту  $\text{nano-SiO}_2$  до 20 %. Це свідчить про те, що абразивний знос і втомна витривалість є основними формами зносу. Порівняно із вмістом  $\text{nano-SiO}_2$  15 %, на поверхні широких і тонких перенесених плівок видно слабку агломерацію частинок  $\text{nano-SiO}_2$ , що викликає невелике збільшення зносостійкості П/нано- $\text{SiO}_2$  (рис. 1, б). У підсумку слід зазначити, що основним механізмом зношування композитів П/нано- $\text{SiO}_2$  є абразивне зношування, яке викликає зниження  $\mu$ , оскільки частинки зношування діють як ролики при нижчому вмісті  $\text{SiO}_2$  [2].

Тим часом широка, гладка та однорідна перенесена плівка сприяє покращенню трибологічних властивостей композитів П/нано- $\text{SiO}_2$ . Однак міцність зв'язку між перенесеною плівкою та контртілом нижча в умовах експерименту, описаного в цій статті, що призводить до локального відшаровування перенесених плівок при нижчому вмісті  $\text{SiO}_2$  і шорсткості країв перенесених плівок при більш високому вмісті. Отже, прямий контакт між композитами та контртілом є одним із факторів поганої зносостійкості композитів П/нано- $\text{SiO}_2$  [8]. Крім того, агрегація  $\text{nano-SiO}_2$  на поверхні плівок при вищому вмісті  $\text{SiO}_2$  збільшує твердість плівок і дряпає поверхню композитів П, що також є причиною високої швидкості зношування плівки композита П/нано- $\text{SiO}_2$ .

Крім того,  $\mu$  і швидкість зносу композитів П/нано- $\text{SiO}_2$  при різних навантаженнях були вивчені при швидкості ковзання 0,08 м/с з відповідними результатами, наведеними на рис. 2.

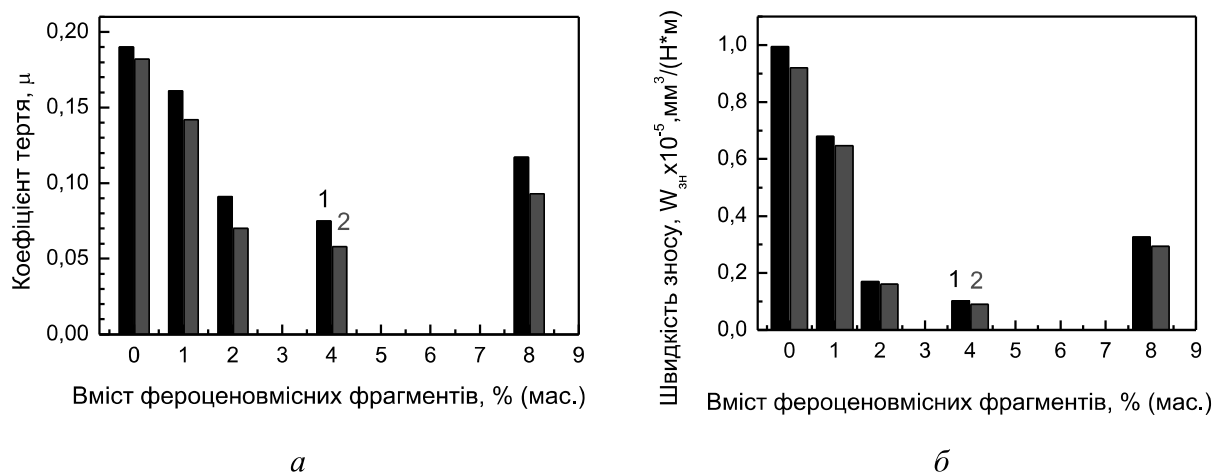


Рис. 2. Коефіцієнт тертя  $\mu$  (а) і питома швидкість зносу  $W_{zn}$  (б) для матеріалів, з наповнювачем  $\text{nano-SiO}_2$ : 1 – з використанням алілового естеру довголанцюгової дикарбонової кислоти на основі піромелітового ангідриду; 2 – з використанням алілового естеру довголанцюгової дикарбонової кислоти на основі бензофенонтетракарбонового ангідриду

Можна бачити, що  $\mu$  має аналогічну залежність від вмісту похідних фероцену і при легких, і при важких навантаженнях (рис. 2, а). До того ж,  $\mu$  для 5 % фероцену є найнижчим для обох навантажень 5 і 10 Н. Крім того, основна тенденція полягає в тому, що при великому навантаженні спостерігається відносно невеликий коефіцієнт тертя, що вказує на те, що композити мало підходять для умов навантаження. Теоретично це можна пояснити рівнянням:

$$\mu = k \cdot N^{n-1},$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя,  $N$  – навантаження,  $k$  та  $n$  – константи, причому  $n$  знаходиться в діапазоні від 2/3 до 1) [9].

Як показано на рис. 2, б, швидкість зносу композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> набагато вища, ніж у чистого ПІ. Швидкість зносу спочатку значно зростає зі збільшенням вмісту похідного фероцену від 0 до 5 %, а потім стає майже однаковою в діапазоні 5–20 %. Подальше помірне збільшення швидкості зносу стає очевидним, коли вміст добавки досягає 25 %. Оскільки абразивний знос зазвичай є основною характеристикою зношування композитів з високим вмістом наповнювача, посилення абразивного зносу відбувається зі збільшенням навантаження [11]. Тим часом швидкість зносу при легкому навантаженні відносно мала в порівнянні зі зносом при великому навантаженні, показуючи, що композити з більш високим вмістом добавки мають тенденцію бути більш зносостійкими при легкому навантаженні.

На рис. 3 показано вплив вмісту нано-SiO<sub>2</sub> на коефіцієнт тертя та швидкість зносу композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> при двох різних швидкостях ковзання 0,04 та 0,08 м/с з навантаженням 10 Н.

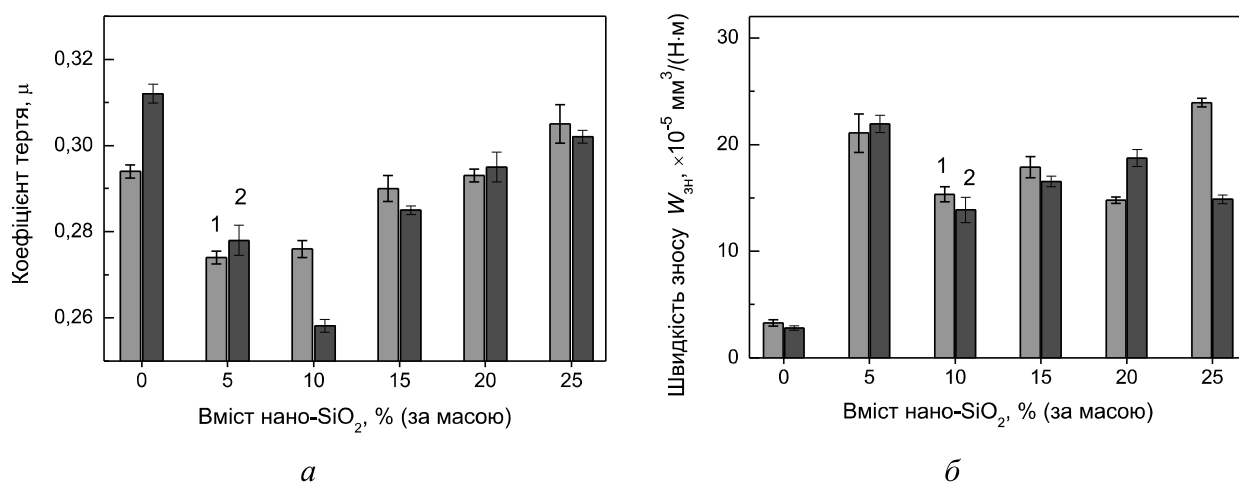


Рис. 3. Залежність коефіцієнту тертя  $\mu$  (а) та швидкості зносу  $W_{zn}$  (б) композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> від різного вмісту нано-SiO<sub>2</sub> та швидкості ковзання 0,04 м/с (1) або 0,08 м/с (2) з навантаженням 10 Н

З рис. 3, а видно, що коефіцієнт тертя композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> при швидкості ковзання 0,04 м/с вищий, ніж при 0,08 м/с, для того випадку, коли вміст нано-SiO<sub>2</sub> є меншим 5 %. Однак при вмісті нано-SiO<sub>2</sub> 10 % (за винятком 20 %)  $\mu$  композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> при 0,04 м/с виявляється нижчим, ніж при 0,08 м/с. Високий вміст нано-SiO<sub>2</sub> викликає появу більшої кількості сміття в зоні контакту при високій швидкості, що, у свою чергу, призводить до збільшення  $\mu$ , що збігається з основною тенденцією зміни швидкості зносу при різних швидкостях ковзання.

Було вивчено морфологію зношених поверхонь і перенесених плівок композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub>, що ковзають по сталевій кульці ШХ15СГ при 0,08 м/с і 10 Н. Сила тертя може бути розкладена на міжфазну адгезію та задир [12], що призводить до адгезивного та абразивного зносу на ковзаючих поверхнях композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub>. З іншого боку, на силу тертя зазвичай впливають механічні властивості та теплота тертя зразків [13]. Додавання частинок нано-SiO<sub>2</sub> впливає на механічні властивості композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub>, як показано на рис. 4. Отже, механізм зносу змінюється із збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub>.

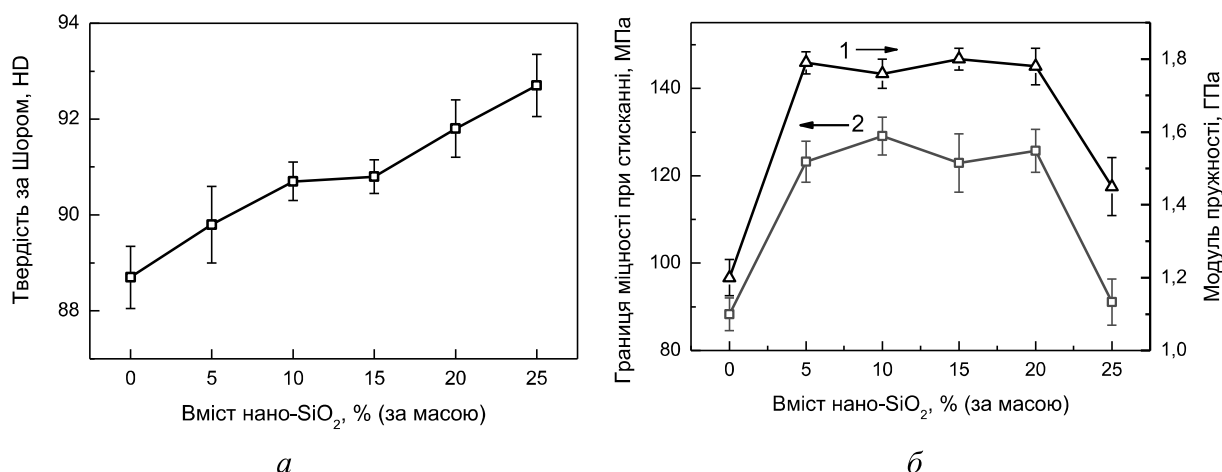


Рис. 4. Механічні властивості композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> з різним вмістом нано-SiO<sub>2</sub>: (а) твердість за Шором і (б) модуль пружності (1) та границя міцності під час стискання (2)

На додаток, результати проведеного у ПЕМ елементного аналізу ЕДС (енергодисперсійної спектроскопії) для перенесеної плівки були співставлені з результатами дослідження механізму стирання. Наразі результати аналізу перенесених плівок зведені в таблиці. Основні компоненти перенесених плівок містять С, О, Si, Fe і Cr. Наявність С, О і Si означає, що уламки композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> прилипають до поверхні сталльної кульки.

#### Зведені результати ЕДС аналізу перенесених плівок

Склад зразку, % (за масою)	Елемент у перенесеній плівці, % (за масою)			
	C	Cr	Fe	Si
ПІ/5 % SiO <sub>2</sub>	68,7	3,79	13,75	2,51
ПІ/10 % SiO <sub>2</sub>	72,3	1,82	6,10	2,14
ПІ/15 % SiO <sub>2</sub>	58,9	4,10	15,52	7,02
ПІ/20 % SiO <sub>2</sub>	51,2	5,26	20,81	5,73

Враховуючи невелику товщину перенесених плівок, їх компоненти дозволяють припустити, що піки Fe і Cr переважно пов'язані зі сталлю кулькою. Зі збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> маса елементів у перенесених плівках істотно змінюється, що дозволяє припустити, що товщина перенесених плівок змінюється зі збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub>. Товщина перенесених плівок для різного вмісту нано-SiO<sub>2</sub> може бути розміщена в наступній послідовності: 10 % > 5 % > 15 % > 20 %.

Таким чином можна зробити висновок, що при вмісті нано-SiO<sub>2</sub> від 5 до 20 % границя міцності під час стискання композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> збільшилася приблизно на 43 %, а модуль стиску на 45 % вищий, ніж у чистого ПІ (рис. 4, б). Також було показано, що збільшення твердості лінійно зростає зі збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> від 0 до 25 % (рис. 4, а). Внаслідок цього коефіцієнт тертя композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> спочатку зменшувався на 6,8 % зі збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> з 0 до 5 %, а потім збільшувався на 11 % зі зростанням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> з 5 до 25 % (рис. 3, а). Найнижчий  $\mu$  спостерігався при вмісті нано-SiO<sub>2</sub> у діапазоні 5–10 %, тоді як швидкість зношування композитів ПІ/нано-SiO<sub>2</sub> при такому вмісті нано-SiO<sub>2</sub> стала вищою, ніж у чистого ПІ (рис. 3, б). Таким чином було доведено, що додавання нано-SiO<sub>2</sub> в діапазоні 5–10 % доцільно використовувати в композитах для ефективного обмеження

адгезійного зносу та сприяння зниженню коефіцієнту тертя. Оскільки плівка легко відшаровується, а нано-SiO<sub>2</sub> має тенденцію накопичуватися на поверхні плівок, зносостійкість композитів П/нано-SiO<sub>2</sub> буде погіршуватися.

### Висновки

Вивчено вплив частинок наповнювача (нано-SiO<sub>2</sub>) на покращення термічної стабільності і термічної стійкості та підвищення механічних властивостей композитів. Показано, що твердість за Шором збільшується на 4,5 % зі зростанням вмісту диоксиду кремнію до 25 % (за масою), за вмісту (5–20) % (за масою) границя міцності під час стискання композитів підвищується на 43 %, а модуль пружності – на 45 %. Висока термічна стійкість та підвищені механічні властивості роблять виготовлені композити потенційним матеріалом для застосування в самозмащувальних підшипниках, до яких висуваються вимоги низького коефіцієнта тертя за дискретного режиму роботи.

Додавання нано-SiO<sub>2</sub> в діапазоні 5–10 % в композитах ефективно для обмеження адгезійного зносу та сприяння зниженню коефіцієнту тертя. Коефіцієнт тертя композитів П/нано-SiO<sub>2</sub> зменшується на 6,8 % зі збільшенням вмісту нано-SiO<sub>2</sub> з 0 до 5 %. Подальше зростання вмісту нано-SiO<sub>2</sub> до 25 % збільшує μ на 11 %.

**E. O. Pashchenko, D. O. Savchenko, S. A. Kukharenko, O. M. Kaidash, R. M. Kurganov**

*V.N. Bakul Institut for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

### DEVELOPMENT OF POLYMER COATINGS WITH THE EFFECT OF SELF-LUBRICATION BASED ON POLYIMIDS WITH NANOPARTICLES OF SILICON OXIDE

*The influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the improvement of thermal stability and increase of mechanical properties of composites has been studied. It has been shown that the addition of nano-SiO<sub>2</sub> in composites is effective in limiting adhesion wear and helping to reduce the coefficient of friction. High thermal stability and high mechanical properties make the manufactured composites a potential material for use in self-lubricating bearings, which are subject to the requirements of low coefficient of friction in discrete mode.*

**Key words:** *composites with nano-SiO<sub>2</sub> filler, Shore hardness, compressive strength, adhesion wear, coefficient of friction*

### Література

1. Wang C., Brown G.O., Burriss D.L., Korley L.S., Epps T.H. Coating architects: Manipulating multiscale structures to optimize interfacial properties for coating applications // *ACS Appl. Polym. Mater.* – 2019. – Vol. 1, N 9. – P. 2249–2266.
2. Shi Y., Mu L., Feng X. The tribological behavior of nanometer and micrometer TiO<sub>2</sub> particlefilled polytetrafluoroethylene/polyimide // *Mater Des* – 2011. – Vol. 32, N 2. – P. 964–970.
3. Jiang W., Jin X., Zhang H. Poly(ether ether ketone)/wrapped graphite nanosheets with poly(ether sulfone) composites: Preparation, mechanical properties, and tribological behavior // *J Appl Polym Sci.* – 2015. – Vol. 132, N 14. – Art. № 41728.
4. Tewari U.S., Bijwe J. Comparative studies on sliding wear of polyimide composites // *Compos.* – 1991. – Vol. 22, N 3. – P. 204–210.
5. Min C-K., Wu T-B., Yang W-T. Functionalized mesoporous silica/polyimide nanocomposite thin films with improved mechanical properties and low dielectric constant // *Compos Sci and Technol.* – 2008. – Vol. 68, N 6. – P. 1570–1578.
6. Wang Y., Wang T., Wang Q. Effect of molecular weight on tribological properties of

- thermosetting polyimide under high temperature // *Tribol Int.* – 2014. – Vol. 78, N 4. – P. 47–59.
7. Liu H., Wang T.M., Wang Q.H. In situ synthesis and properties of PMR PI/SiO<sub>2</sub> nanocomposites // *J Appl Polym Sci.* – 2012. – Vol. 125, N 1. –P. 488–493.
  8. Bahadur S., Sunkara C. Effect of transfer film structure, composition and bonding on the tribological behavior of polyphenylene sulfide filled with nano particles of TiO<sub>2</sub>, ZnO, CuO and SiC // *Wear.* – 2005. – Vol. 258, N 9. – P. 1411–1421.
  9. Menezes P.L., Kishore, Kailas S.V., Lovell M.R. Friction and transfer layer formation in polymer-steel tribo-system: role of surface texture and roughness parameters // *Wear.* – 2011. – Vol. 271, N 9. – P. 2213–2221.
  10. Lva M., Zheng.F., Wang.Q.H., Wang.T.M, Liang.Y.M. Effect of proton irradiation on the friction and wear properties of polyimide // *Wear.* – 2014. – Vol. 316, N 1–2. – P. 30–36.
  11. Zhang X.R., Pei X.Q., Wang Q.H. Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO<sub>2</sub> // *Mater Des.* – 2009. – Vol. 30, N 10. – P. 4414–4420.
  12. Zhang G., Schlarb A.K., Tria S., Elkedim O. Tensile and tribological behaviors of PEEK/nano-SiO<sub>2</sub> composites compounded using a ball milling technique // *Compos Sci Technol.* – 2008. – Vol. 68, N 15–16. – P. 3073–3080.
  13. Friedrich K., Flock J., Varadi K., Neder Z. Experimental and numerical evaluation of the mechanical properties of compacted wear debris layers formed between composite and steel surfaces in sliding contact // *Wear.* – 2001. – Vol. 251, N 1–12. – P. 1202–1212.

Надійшла 24.05.22

### References

1. Wang, C., Brown, G.O., Burris, D.L., et al. (2019). Coating architects: Manipulating multiscale structures to optimize interfacial properties for coating applications. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 1, 9, 2249–2266.
2. Shi, Y., Mu, L., & Feng, X. (2011). The tribological behavior of nanometer and micrometer TiO<sub>2</sub> particlefilled polytetrafluoroethylene/polyimide. *Mater Des.* 32, 2, 964–970.
3. Jiang, W., Jin, X., & Zhang, H. (2015). Poly(ether ether ketone)/wrapped graphite nanosheets with poly(ether sulfone) composites: Preparation, mechanical properties, and tribological behavior. *J Appl Polym Sci.* 132, 14. Art. № 41728.
4. Tewari, U.S., & Bijwe, J. (1991). Comparative studies on sliding wear of polyimide composites. *Compos.* 22, 3, 204–210.
5. Min, C-K., Wu, T-B., & Yang, W-T. (2008). Functionalized mesoporous silica/polyimide nanocomposite thin films with improved mechanical properties and low dielectric constant. *Compos Sci and Technol.* 68, 6, 1570–1578.
6. Wang, Y., Wang, T., & Wang, Q. (2014). Effect of molecular weight on tribological properties of thermosetting polyimide under high temperature. *Tribol Int.* 78, 4, 47–59.
7. Liu, H., Wang, T.M., & Wang, Q.H. (2012). In situ synthesis and properties of PMR PI/SiO<sub>2</sub> nanocomposites. *J Appl Polym Sci.*, 125, 1, P. 488–493.
8. Bahadur, S., & Sunkara, C. (2005). Effect of transfer film structure, composition and bonding on the tribological behavior of polyphenylene sulfide filled with nano particles of TiO<sub>2</sub>, ZnO, CuO and SiC. *Wear*, 258, 9, 1411–1421.
9. Menezes, P.L., Kishore, Kailas, S.V., & Lovell, M.R. (2011). Friction and transfer layer formation in polymer-steel tribo-system: role of surface texture and roughness parameters.

- Wear*, 271, 9, 2213–2221.
10. Lva, M., Zheng., F., Wang., Q.H., et al. (2014). Effect of proton irradiation on the friction and wear properties of polyimide. *Wear*, 316, 1–2, 30–36.
  11. Zhang, X.R., Pei, X.Q., & Wang, Q.H. (2009). Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO<sub>2</sub>. *Mater Des.* 30, 10, 4414–4420.
  12. Zhang, G., Schlarb, A.K., Tria, S., & Elkedim, O. (2008). Tensile and tribological behaviors of PEEK/nano-SiO<sub>2</sub> composites compounded using a ball milling technique. *Compos Sci Technol.* 68, 15–16, 3073–3080.
  13. Friedrich, K., Flock, J., Varadi, K., & Neder, Z. (2001). Experimental and numerical evaluation of the mechanical properties of compacted wear debris layers formed between composite and steel surfaces in sliding contact. *Wear*, 251, 1–12, 1202–1212.