

УДК 678.06; 53.043

# ДИЗАЙН ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ, ЗМОДЕЛЬОВАНОГО СФЕРАМИ ТА ЕЛІПСОЇДАМИ ЗА КРИТЕРІЄМ УЗГОДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ

**А. Ф. Будник**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра прикладного матеріалознавства та ТКМ  
Сумський державний університет  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007  
E-mail: mr.budnik@mail.ru

**В. А. Свідерський**

Доктор технічних наук, професор\*

**А. О. Томас**

Аспірантка\*\*

E-mail: alisa-ua2007@yandex.ru

**П. В. Руденко**

Аспірант\*\*

E-mail: rudenkof-4@yandex.ua

**Х. В. Берладір**

Аспірантка\*

E-mail: berladirkristina@yandex.ua

\*Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

\*\*Кафедра переробки пластмас та фото-,  
нано- і поліграфічних матеріалів

Державний вищий навчальний заклад «Український державний  
хіміко-технологічний університет»

пр. Гагаріна, 8, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005

Створено модель композитного матеріалу на основі полімерів, який включає сферичні та еліпсоїдні частинки. Подано опис стратегії створення композиційного матеріалу на основі порошків політетрафторетилену, вуглецевого волокна і титан карбїду. Для розрахунків були використані еліпсоїдні частинки моделі вуглецевого волокна і сферичні частинки моделі титан карбїду

**Ключові слова:** полімерний композит, зношування, політетрафторетилен, вуглецеві волокна, карбїд титану, критерій оптимізації

Создана модель композитного материала на основе полимеров, который включает сферические и эллипсоидные частицы. Представлено описание стратегии создания композиционного материала на основе порошков политетрафторэтилена, углеродного волокна и титан карбида. Для расчетов были использованы эллипсоидные частицы модели углеродного волокна и сферические частицы модели титан карбида

**Ключевые слова:** полимерный композит, износ, политетрафторэтилен, углеродные волокна, карбид титана, критерий оптимизации

## 1. Вступ

Інтенсивність зношування полімерних композитів суттєво залежить від механічних властивостей, природи, структури і розмірів частинок полімеру-матриці та наповнювачів, структури матеріалу композиту, його твердості, міцності, пружності, рівня зовнішньосилової дії на контакт композит-контртіло [1, 2].

Ефект зміцнення полімеру наповнювачами при зношуванні [3, 4] спостерігається тільки для деяких полімерів і наповнювачів.

Дійсна структура антифрикційного композитного матеріалу є складною, має випадковий характер. Пряме обчислення властивостей композиту є складним математичним завданням, тому що невідома геометрія і фізичні властивості поверхні розділу матриці з частинками наповнювачів.

Процес виготовлення зносостійкого полікомпонентного матеріалу забезпечений незначною керованою інформацією. Тільки показників властивостей наповнювачів і матриці, їх концентрації і геометричної форми недостатньо для точного та надійного передбачення властивостей проєктованого полімерного композиту. Така мала інформативність при проєктуванні композиту з наперед заданими властивостями вимагає надійних методів теоретичних та експериментальних досліджень композитних матеріалів. До таких методів відноситься варіаційний, який веде до границь ефективних властивостей [5, 6].

Завдання проєктування зносостійкого композиту полягає в тому, щоб досягти:

- такого оптимального стану, при якому він добре узгоджується з будовою композиту;
- умов, які повинні задовольняти цей композит.

Зношування композиту залежить від того, наскільки ефективно мікроструктура композитного матеріалу може чинити опір різним процесам відділення матеріалу. Головний внесок у величину зносу вносять послідовність пластичних деформацій і розрив у тонкому шарі поверхні, і наступне мікрорізання пластично деформованих зон. Розподіл поглинаючої активним шаром енергії зумовлює кінетику накопичення пошкоджень і руйнувань та зміну фрикційних характеристик.

Полімерний матеріал повинен мати високу стійкість до в'язкопружної та пластичної деформацій, що має місце, якщо матеріал має високу твердість та границю текучості  $i$ , в той же час, деформуватися пластично з високою роботою на розрив.

Таким чином, виникає завдання розрахунків механічних характеристик трикомпонентних полімерних композитів з бінарним наповнювачем за властивостями вихідних інгредієнтів.

У багатьох роботах [7-9] основними критеріями зносостійкості при зношуванні приймаються механічні характеристики матеріалу, які визначаються експериментально.

Аналіз цих робіт свідчить, що зносостійкість полімерних композитів обумовлена його фізико-механічними, реологічними та деформаційно-міцнісними характеристиками властивостей. Тому, розробка критерію оптимізації наповненого полімеру за цими характеристиками, які би визначалися теоретично за властивостями вихідних інгредієнтів на технологічній стадії виготовлення композиту, має практичне значення, так як дозволяє скоротити високовартісні експериментальні роботи. Закономірності зношування матеріалів приведені в роботах [10, 11].

Завдання оптимального проектування трикомпонентного зносостійкого композиту - необхідно підібрати склад композиту на основі полімеру та двокомпонентного наповнювача, змодельованого сферичними та еліпсоїдними частинками, який забезпечує максимум зносостійкості при заданих механічних властивостях полімерної матриці і наповнювачів.

## 2. Вибір моделі і методів розрахунків

Нехай структура композиційного матеріалу утворена полімерною матрицею і частинками наповнювача, в'язко-пружні, пластичні та міцнісні властивості яких відомі; компоненти композиту однорідні і міцно зв'язані з матрицею на межі розділу фаз, а матриця, крім пружних властивостей – модуля пружності  $E_0$  – має в'язкість  $\eta_0$  і межу пластичності  $\tau_0$ , які підпорядковані умовам текучості Мізеса та рівнянню в'язкопружності Максвелла [12]. Індекси у символах величин відносяться до сферичних (s) та еліпсоїдних (f) частинок, матриці (o) та наповнювача (1) відповідно.

Відповідно, гранично напружений стан композиту, який виникає при зношуванні, підлягає енергетичній умові пластичності Мізеса. Припустимо, що пружні деформації малі у порівнянні з пластичними. Поля швидкостей деформацій  $\epsilon_{ij}$  і напружень  $\sigma_{ij}$  є статистично однорідними і задовольняють умовам ергодичності.

Наповнювач уявляє собою включення у вигляді сферичних (порошкових) частинок, які задані розмірами від  $R$  до  $r$ , та дискретних частинок у вигляді витягнутих еліпсоїдів обертання з напівосями  $a$  і  $b$ , і співвідношенням напівосей  $a/b$  або відношення середньої довжини  $\bar{l}$  до середнього діаметру  $\bar{d}$ :

$$z = \frac{\bar{l}}{\bar{d}} \quad (1)$$

Мікрооб'єм композиту  $V_k$  складають об'єм частинок  $V_1$ , а об'єм полімерної матриці –  $V_0$ . Розподіл частинок наповнювача у показному макрооб'ємі носить статистичний однорідний характер.

Задамо геометричну хаотичну структуру композиту статистично однорідною ізотропною індикаторною функцією  $\phi$  [13], яка приймає значення одиниці на відповідних частинках наповнювача і нуля у ділянці полімерної матриці [0;1]. Математичний опис властивостей індикаторної функції  $\phi$  та її середнього значення  $\langle \phi \rangle$  приведені в [14-18]. Середнє значення індикаторної функції  $\langle \phi \rangle$  дорівнює відношенню об'ємної концентрації частинок наповнювача  $V_1$  в об'ємі композиту  $V_k$  [13]:

$$\langle \phi \rangle = \frac{V_1}{V_k} = v_n, \quad (2)$$

де  $n = f, s$  – тип частинок.

Із умови ергодичності витікає, що середні значення за об'ємом швидкостей деформацій  $\langle \epsilon_{ij} \rangle$  та напружень  $\langle \sigma_{ij} \rangle$  можна обчислювати за [12], використовуючи інтегрування за  $V$ .

Пластичні властивості композиційного матеріалу визначає густина пружної енергії деформування – дисипативна функція  $D^*(\langle \epsilon_{ij} \rangle)$  – мінімальне значення швидкості дисипації енергії, віднесеної до одиниці об'єму для довільно фіксованих середніх значень  $\langle \epsilon_{ij} \rangle$  [19, 20].

Варіаційне завдання визначення властивостей композиту можна сформулювати як умови екстремальності дисипативної функції  $D^*(\epsilon)$  на множині статистично однорідних полів [12, 13, 19, 20].

З умов пластичності Мізеса витікає:

- для матриці

$$D(\epsilon) = \tau_0 \sqrt{\epsilon_{ij} \epsilon_{ij}}, \quad (3)$$

- для частинок наповнювача

$$D(\epsilon) = \tau_1 \sqrt{\epsilon_{ij} \epsilon_{ij}}, \quad (4)$$

де  $\tau_0, \tau_1$  – межа пластичності під час зсуву матриці та наповнювача відповідно.

Дисипативну функцію у будь-якій точці об'єму можна представити у вигляді:

$$D = \sqrt{e_{ij} e_{ij}}, \quad (5)$$

де

$$e_{ij} = [\tau_0(1-\phi) + \tau_1\phi] \epsilon_{ij} \quad (6)$$

Використовуючи методику [12], можна знайти точне мінімальне значення дисипативної функції  $D^*$ :

$$D^* \langle \epsilon_{ij} \rangle = \tau_0 \left[ \langle \epsilon_{ij} \rangle \langle \epsilon_{ij} \rangle + \frac{\tau_1^2 - \tau_0^2}{\tau_0^2} V_n \langle \epsilon_{ij} \rangle \langle \epsilon_{ij} \rangle \right] \rightarrow \min. \quad (7)$$

При такому підході, використовуючи варіаційний метод [21], за [12, 19] знаходять різницю пластичності при зсуві композиційного матеріалу в залежності від концентрації наповнювача з абсолютно жорсткими сферичними [12] та пластинчастими [22] частинками. Застосовуючи розроблений математичний апарат [12, 13, 19-23], знайдемо інші характеристики композиту з бінарним наповнювачем у вигляді сферичних і еліпсоїдних частинок, які необхідні для розрахунків зносостійкості і вибору складу композиту.

### 3. Характеристики властивостей полімерного композиту

Розглянемо трикомпонентний композиційний матеріал як складну ієрархічну структуру [5], яка розділена на рівні:

- *перший рівень* – матричний конгломерат, який складається із полімерної матриці та статистично однорідно розподілених у ній еліпсоїдних частинок;
- *другий рівень* – структура композиту, яка складається з матричного конгломерату (першого рівня), в якому статистично однорідно розподілені сферичні частинки.

Для спрощення аналітичних залежностей приймаємо, що сферичні частинки абсолютно жорсткі (це припущення фізично коректно, тому що, наприклад, для сферичних частинок порошку карбіду титану і полімер-матриці політетрафторетилен відношення твердостей  $H_s/H_0 = 700$ ). Можна знехтувати впливом коефіцієнта Пуассона на макровластивості композиту із сферичними частинками, прийнявши його значення 0,5.

Тоді, використовуючи [22], отримуємо для другого рівня структури композиту співвідношення показників пружних ( $E_k$ ) і пластичних ( $\tau_k$ ) властивостей композиту:

$$E_k = E_1 \left( 1 + \frac{5/2 V_s}{1 - V_s} \right), \quad (8)$$

$$\tau_k = \tau_1 \left( 1 + \frac{3}{2} V_s \right), \quad (9)$$

де  $V_s; V_f$  – об’ємна частка сферичних (s) та еліпсоїдних (f) частинок відповідно, співвідношення між якими задається виразом:

$$V_s + V_f + V_0 = 1,$$

де  $V_0$  – об’ємна частка полімерної матриці.

Використовуючи принцип в’язкопружної аналогії Вольтерра [12], отримуємо співвідношення для в’язкості ( $\eta_k$ ) композиту другого рівня структури:

$$\eta_k = \eta_1 \left( 1 + \frac{5/2 V_s}{1 - V_s} \right). \quad (10)$$

У виразах (8) – (9)  $E_1, \tau_1, \eta_1$  – модуль пружності, межа пластичності при зсуві і в’язкість матричного конгломерату першого рівня відповідно.

Розглянемо двокомпонентну структуру першого рівня. Використовуючи [12], знайдемо:

$$\tau_1 = \tau_0 \sqrt{1 + (Q_1 - 1) V_f}, \quad (11)$$

$$E_1 = \frac{E_0}{1 + \left( \frac{1 - V_f}{Q V_f} + \frac{E_0}{E_1 - E_0} \right)}. \quad (12)$$

Внаслідок в’язкопружної аналогії Вольтерра [12] вираз для в’язкості композиту отримуємо заміною в (12) значень модулів пружності коефіцієнтами в’язкості (з урахуванням умови  $\eta_1 \rightarrow \infty$ , тобто приймаємо, що частинки наповнювача не повзуть):

$$\eta_1 = \eta_0 \left( 1 + \frac{Q V_f}{1 - V_f} \right), \quad (13)$$

де  $E_0, \tau_0, \eta_0$  – модуль пружності, межа пластичності при зсуві і в’язкість полімерної матриці відповідно.

Теоретичні залежності відносного модуля пружності  $E_k/E_0$  трикомпонентного композиту від об’ємної частки еліпсоїдних ( $V_f$ ) і сферичних ( $V_s$ ) частинок, приведені на рис. 1а, відносної в’язкості  $\eta_k/\eta_0$  трикомпонентного композиту, приведена на рис.1б, а відносної твердості  $H_k/H_0$  трикомпонентного композиту, приведена на рис. 2.

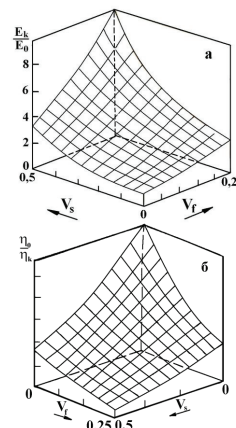


Рис. 1. Залежність відносного модуля пружності  $E_k/E_0$  (а) та відносної в’язкості  $\eta_k/\eta_0$  (б) трикомпонентного композиту від об’ємного вмісту сферичних ( $V_s$ ) та еліпсоїдних ( $V_f$ ) частинок наповнювача

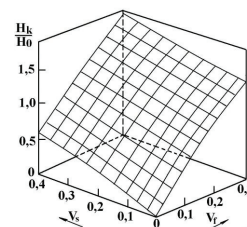


Рис. 2. Залежність відносної твердості  $H_k/H_0$  трикомпонентного композиту від об’ємної частки сферичних ( $V_s$ ) та еліпсоїдних ( $V_f$ ) частинок наповнювача

#### 4. Вибір критерію оптимізації

Для вибору критерію оптимізації, який надійно може дати оцінку зносостійкості наповнених полімерів, необхідно брати характеристики композиту, які надійно визначаються за характеристиками вихідних компонентів. Критерії гранично допустимого зносу композиту повинні характеризувати початкові прояви процесу катастрофічного зношування (наприклад, текучості, граничної деформації), які передують повному руйнуванню композиту [7, 8]. Таким чином, у зв'язку з таким широким тлумаченням критерію граничного стану і зношування, практично неможливо охарактеризувати його з достатнім ступенем визначення.

Дослідження [8, 24] показують на особливі межі пластичності композитів у залежності від концентрації наповнювачів: лінійний характер залежності (для випадку пластичного стану частинок наповнювачів) або закону квадратного кореня (для випадку жорсткого стану частинок). У загальному випадку [24] необхідно визначити чотири ділянки на кривих деформування композиту:

- матриця і частинки наповнювачів деформуються пружно;
- матриця деформується пластично, частинки - пружно;
- матриця і частинки деформуються пластично;
- один з компонентів починає руйнуватися.

Від концентрації наповнювачів залежить поступ руйнації композиту, який є наслідком руйнації одного із компонентів. Для випадку, коли еліпсоїдні частинки руйнуються, використовуємо метод, який (за аналогією з теорією пружних композитів) приводить до виразу:

$$H_k = H_0 \sqrt{1 + \frac{1}{\frac{1 - V_f}{V_s Q_H} + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2}}}. \quad (14)$$

Прийmemo, що деформація та в'язкість полімерної матриці і композиту в цілому пов'язані співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} \delta_0 &= \frac{1}{\eta_0}; \\ \delta_k &= \frac{1}{\eta_k}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Теоретичні залежності відносного модуля пружності  $\frac{E_k}{E_0}$  і відносної деформації  $\frac{\delta_k}{\delta_0} = \frac{\eta_0}{\eta_k}$  трикомпонентного композиту від об'ємного вмісту еліпсоїдних  $V_f$  і сферичних  $V_s$  частинок наповнювача наведені на рис. 3.

Аналіз результатів теоретичного дослідження (рис. 3) вказує на те, що із зростанням об'ємного вмісту еліпсоїдних частинок в полімерній матриці трикомпонентного композиту зносостійкість повинна спочатку збільшуватися, при цьому характер зношування відповідає руйнації волокон, які приймають на себе основне навантаження, «спрацьовуючи» енергію руйнації. Потім, після досягнення критичних концентрацій, процес зношування буде відповідати висмикуванню незруйнованих волокон з матриці, що може приводити до зменшення зносостійкості. Аналогічні ефекти будуть пов'язані не лише з концентраціями наповнювачів, а

й з природою полімерної матриці, природою та текстильною формою наповнювачів, напрямків шарів тканини або шарів волокон, самих волокон цих текстильних форм відносно поверхні тертя, вектора швидкості ковзання та напрямків пресування зразка і напрямку нормального навантаження на зразок, схеми фрикційного контакту, форми зразків, умов випробувань – величин питомих і нормальних навантажень, швидкості ковзання, температури поверхні тертя, шляху (часу) випробувань тощо. Поверхні зразків тертя, металевих спряжених поверхонь і вуглецевих волокон досліджували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-200 із здатністю до розв'язання об'єкту 30–50 нм та збільшенням від 20 до 26000.

На рис. 4 приведено фото поверхні карбокомпозиту (x2750) (по сталевій поверхні) на основі політетрафторетилену + 20 % УТМ-8 [схема контакту: втулка на площині;  $P = 1,3$  МПа ( $N_i = 300$  Н),  $V = 0,9$  м/с;  $T = 600$  К;  $S = 42$  км].

Зниження рівня зароджування та інтенсивності розвитку тріщини можна досягнути або за рахунок збільшення напруження формування її критичного зародку, або за рахунок гальмування розвитку закритичної тріщини, або обох процесів одночасно.

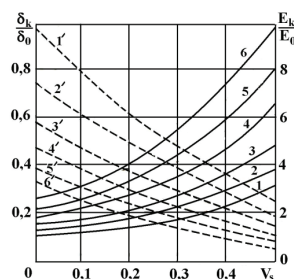


Рис. 3. Залежність відносного модуля пружності  $E_k/E_0$  (1–6) та відносної деформації  $\delta_k/\delta_0$  (1'–6') трикомпонентного композиту від об'ємної частки сферичних  $V_s$  частинок при об'ємній частці еліпсоїдних частинок  $V_f$ : 1, 1' – 0; 2, 2' – 0,05; 3, 3' – 0,10; 4, 4' – 0,15; 5, 5' – 0,20; 6, 6' – 0,25



Рис.4. Електронна світлина поверхні тертя карбопластику

Перший ефект досягається за рахунок введення високодисперсних частинок (модель – сферичні частинки) порошоків твердих речовин вузької фракції, а другий – за рахунок введення коротких волокон (модель – еліпсоїдні частинки) з широким об'ємним (масовим) розподілом за законом Вейбулла або гамма-

розподілом за довжинами і значною часткою волокон малої довжини [25].

Узгодження пружних і пластичних властивостей і, відповідно, максимальної зносостійкості композиту досягається при певному оптимальному вмісту наповнювача. Згідно рис.3, відносний модуль пружності збільшується, а відносна деформація зменшується при зростанні  $V_f$  і  $V_S$ . Серед розрахункових параметрів зносостійкості вибираємо в'язкість матеріалу  $\eta$  і модуль пружності під час розтягу  $E$ , використовуючи методи теорії розмірностей, в умовах, коли змінюється тільки  $\eta$  і  $E$ . Оскільки зовнішні силові параметри сталі, то виключення їх розмірностей досягається відношенням  $\eta/E$ , яка має розмірність часу ( $[Па \cdot с]/[Па]=[с]$ ). Відношення динамічної в'язкості до модуля пружності назвемо критерієм узгодження пластичних та пружних властивостей (критерієм еквівалентності пружного стану = критерію зносостійкості):

$$T = \frac{\eta}{E}, \tag{16}$$

що має фізичний зміст часу релаксації напружень.

Для виключення розмірностей з критерію узгодження та зносостійкості використаємо поняття відносних характеристик:

$$\tau = \frac{T_0}{T_k} = - \frac{\eta_0}{E_0} \frac{\eta_k}{E_k} = \left( \frac{\eta_0}{\eta_k} \right) \cdot \left( \frac{E_k}{E_0} \right); \tag{17}$$

$$j = \frac{J_k}{J_0} = \frac{I}{I_k} \frac{I_0}{I_k}, \tag{18}$$

де  $\tau$  – відносний критерій узгодження пружних та пластичних властивостей композиту;

$T_0, T_k$  – критерії узгодження пружних та пластичних властивостей полімерної матриці і композиту відповідно;

$J_0, J_k$  – зносостійкість полімерної матриці і композиту відповідно;

$I_0, I_k$  – інтенсивність (або питома інтенсивність) зношування полімерної матриці і композиту відповідно;

$j$  – відносна зносостійкість композиту.

### 5. Експериментальна частина

Так як зношування є складним багатофакторним процесом, то при проектуванні зносостійкого карбопластика (під час технологічних операцій) в композит вводили три компоненти, які мали до краю різні властивості.

У відносно в'язку і м'яку полімерну матрицю політетрафторетилену вводили низькомодульні середньої твердості вуглецеві волокна УТМ-8 та високотверді високомодульні кулясті частинки титан карбід або алюміній оксиду.

Вуглецеві волокна мали об'ємний (масовий) розподіл за гамма-законом за довжинами з параметрами  $\lambda = 0,005 - 0,045 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $\theta = 1,0 - 2,55$ , отриманих із вихідних вуглецевих волокон, розподілених за довжинами за тим же законом з параметрами розподілу  $\lambda = 0,002 - 0,04 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $\theta = 0,5 - 2,5$ , щільність ймовірностей розподілу в обох випадках  $P_2(l) = (0,2 - 6, 0) \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$

при наборі довжин  $l = 0 - 3500 \text{ мкм}$  з основною фракцією  $l = 20 - 200 \text{ мкм}$ .

Вихідні порошки мали такі розміри частинок: 0–1000 мкм титан карбід, – 0–1200 мкм алюміній оксиду. За технологією [25], використовуючи ситовий класифікатор, отримували вихідні порошки для мікроаналізатора вузьких фракцій 50-63 та 40-50 мкм. Мікропорошки більш вузької фракції отримували із ситових порошків.

Дослідження зношування зразків карбопластиків проводили на машині тертя 2070 СМТ-1 по схемі «вал-часткова вкладка» при навантаженні 1,5 МПа, швидкості ковзання 0,5 м/с протягом 3 годин. Контртіло – ролик, виготовлений зі сталі 45 (HRC 40-45), шорсткість поверхні  $R_a = 0,67-0,70 \text{ мкм}$ . В процесі випробувань фіксували температуру в кінці тертя і ваговий знос полімерних зразків. Вимірювалася вага зразка з точністю 0,0002 г на аналітичних терезах АДВ-200А, і через густину, яка була визначена гідростатичним методом, розраховувалася об'ємна питома інтенсивність зношування  $[мм^3/Н \cdot м]$  матриці  $I_0$  і композиту  $I_k$  і, відповідно, об'ємна питома зносостійкість  $I_0/I_k$ .

Міцність  $\sigma_p$  та відносне подовження  $\delta$  під час розтягу визначали згідно ГОСТ 11262-80, міцність під час стиску  $\sigma_c$  – ГОСТ 4651-82, густину  $\rho$  визначали згідно ГОСТ 15139-80. Міцність під час розтягування оцінювали на зразках у вигляді кілець діаметром  $d_3=50 \text{ мм}$ ,  $d_b = 40 \text{ мм}$  і висотою  $h = 10 \text{ мм}$ . Механічні випробування проводили на машині «Інстрон» із швидкістю руху повзуна 0,25 см/хв. Перед випробуванням зразки кондиціонували 24 год. за температури  $296 \pm 1 \text{ К}$  і відносній вологості  $65 \pm 2\%$ . Дослідження проводили за температури  $296 \pm 1 \text{ К}$  і відносній вологості  $65 \pm 2\%$ .

### 6. Результати та обговорення

Результати теоретичного дослідження відношення критеріїв узгодження полімерної матриці і композиту в залежності від вмісту волокнистого і сферичного наповнювача показані на рис. 5. Із рис. 5 видно, що для співвідношення  $T_0/T_k$  існують екстремуми – критичні концентрації наповнювача, перевищення яких повинно викликати погіршення протизносних характеристик композиту і, відповідно, зниження зносостійкості. Для відносної зносостійкості композиту також існують екстремальні концентрації (рис. 5).

Наявність екстремуму у співвідношеннях в'язкопружних показників властивостей композиту, в залежності від вмісту наповнювачів, дозволяє оцінити ділянку граничної стійкості композиту (рис. 6): всі екстремальні значення зносостійкості знаходяться нижче і лівіше значень критерію узгодження.

Пропонується наступна стратегія розробки композиційного матеріалу [26], здатного працювати у вузлах тертя. З умов експлуатаційної надійності створеного матеріалу в конструкціях вузлів тертя вибирається концентрація наповнювача, який забезпечує необхідне значення показників фізико-механічних властивостей. За співвідношенням  $\eta/E$  визначають: зростає чи спадає функція  $T_0/T_k \sim f(V_f, V_S)$  в залежності від вмісту наповнювачів. Значення концентрації наповнювачів, що не досягла критичних точок, характеризують зростання зносостійкості наповнених полімерів внаслідок виконання умов [8].

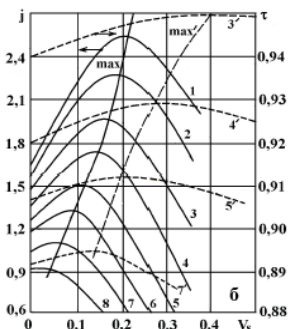


Рис.5. Залежність відносної зносостійкості  $I_0/I_k$  (1-8) при нормальному навантаженні  $N = 50$  Н на зразок та відносного критерію узгодження пластичних та пружних властивостей  $T_0/T_k$  ( $3' - 5', 7'$ ) трикомпонентного композиту на основі ПТФЕ від об'ємної частки порошку карбід титану ( $V_s$ ) при об'ємній частці вуглецевого волокна УТМ-8 ( $V_f$ ): 1 – 0; 2 – 0,05; 3,3' – 0,10; 4,4' – 0,15; 5,5' – 0,20; 6 – 0,25; 7,7' – 0,30; 8 – 0,35

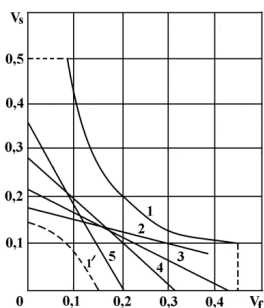


Рис. 6. Граничне співвідношення вмісту сферичних ( $V_s$ ) і еліпсоїдних ( $V_f$ ) частинок у полімерному композиті за критерієм узгодження (1,1') та за відносною зносостійкістю (2-5) при нормальному навантаженні на зразок (Н): 2 – 20; 3 – 50; 4 – 105; 5 – 160

Використовуючи розроблений метод і критерій  $T_0/T_k$ , оптимізована зносостійка композиція на основі ПТФЕ [25].

При розробці зносостійкого матеріалу, якщо за умовами експлуатації вимагається більший вміст наповнювачів, який забезпечує більш високі показники фізико-механічних властивостей, але тягне за собою зниження зносної стійкості композиту, необхідно або змінити природу наповнювачів, або використовувати матрицю іншої природи. З цією метою у матеріал полімерної матриці вводили волокнистий наповнювач у формі волокна, нитки, пасми ниток і трубочок (порожніх волокон) з утовщеннями, які виконані у формі вузлів, петель та вусиків [27].

## 7. Висновки

1. Використовуючи варіаційний метод, задання геометричної структури композиту індикаторною функцією і визначаючи його властивості пошуком екстремуму дисипативної функції – густини пружної енергії деформування, отримані математичні вирази для розрахунку модуля пружності, межі пластичності та в'язкості композиту за відповідними властивостями наповнювачів, змодельованими еліпсоїдними та сферичними частинками.
2. У математичну процедуру оптимізації складу композиту введений новий базовий критерій зносної стійкості – параметр узгодження пластичних і пружних властивостей – відношення динамічної в'язкості до модуля пружності.
3. Запропонована модель і стратегія пошуку оптимального складу трикомпонентного полімерного композиту.

## Література

1. Будник, А.Ф. Разработка абразивостойкого трехкомпонентного композитного материала на основе политетрафторэтилена [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А.Ф. Будник. - Киев, 1993. - 132 с.
2. Будник, А.Ф. Пути повышения абразивной стойкости наполненных полимеров [Текст] / А.Ф. Будник // Тез. докл. III Все-союз. науч.- техн. конф. «Композиционные полимерные материалы – свойства, производство и применение». - М., 1987. - С. 79-83.
3. Сиренко, Г.А. Антифрикционные карбопластики [Текст] / Г.А. Сиренко. - Киев : Техника, 1985. - 195 с.
4. Сиренко, Г.О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / Г.О. Сиренко. - Київ, 1997. - 431 с.
5. Дудукаленко, В.В. Выбор структуры трехфазного карбопластика для износостойких уплотнений [Текст] / В.В. Дудукаленко, С.П. Шаповалов, А.Ф. Будник // Сб. науч. трудов «Химическое машиностроение: расчет, конструирование, технология». - Киев, 1992. - С. 94-100.
6. Шаповалов, С.П. Разработка новых структур износостойких композитов, применяемых в узлах трения [Текст] / С.П. Шаповалов, А.Ф. Будник // Тез. докл. респуб. науч.- техн. конф. «Материалы и упрочняющие технологии - 92». - Курск, 1992. - С. 117-124.
7. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] : учеб. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. - М. : Машиностроение, 1977. - 526 с.
8. Кузьмин, А.А. О выборе критериев оценки герметизирующей способности полимерных материалов [Текст] / А.А. Кузьмин, А.С. Тимошук // Рук. деп. в НИИТЭХИМ №465. - ХП-Д-81. - С. 3-10.
9. Fridrich, K. Wear of reinforced polymers by different abrasive counterparts [Текст] / K. Fridrich // Friction and wear polymer composites. - Amsterdam e.a., 1986. - pp. 233-287.

10. Трение, изнашивание и смазка [Текст] : справочник / В.В. Алисин, А.Я. Алябьев, А.М. Архаров и др. ; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – Т. 1. – М. : Машиностроение, 1978. – 400 с.
11. Трение, изнашивание и смазка [Текст] : справочник / В.В. Алисин, А.Я. Алябьев, А.М. Архаров и др. ; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – Т. 1. – М. : Машиностроение, 1979. – 358 с.
12. Дудукаленко, В.В. О пластических свойствах материала, содержащего пластинчатые включения [Текст] / В.В. Дудукаленко, Н.Н. Лысач // Изв. АН СССР. - Сер. МТТ. - №1. – 1980. - С. 103–109.
13. Дудукаленко, В.В., Шаповалов, С.П. [Текст] // Применение композиционных материалов на полимерной и металлической матрицах. - Пермь, 1985. - С. 23-24.
14. Волков, С.Д. Статистическая механика композитных материалов [Текст] : учеб. / С.Д. Волков, В.П. Ставров. – Мн. : Изд-во БГУ, 1978. – 207 с.
15. Дудукаленко, В.В. Оптимальное использование собственной прочности волокон в композитах с пластической матрицей [Текст] / В.В. Дудукаленко. – Сумы : СФ ХПИ, 1990. - С. 1–10.
16. Соколкин, Ю.В. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел [Текст] : учеб, пособие / Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. – М. : Изд-во «Наука», 1984. - 115 с.
17. Hashin, Z. Analysis of composite materials a survey [Текст] // Trans. ASME: J. Appl. Mech. - Vol. 50. 1983. - №3. - pp. 481-505.
18. Kerner, E.N. The electrical conductivity of composite materials [Текст] // Proc. Phys. Soc. - № 69B. – 1956. - pp. 802-807.
19. Дудукаленко, В.В., В.А. Минаев [Текст] // Изв. АН СССР. - Сер. ПММ. - Т.34. - Вып. 5. – 1970. - С. 942–944.
20. Ивлев, Д.Д. Механика пластических сред [Текст]. Т. 1. Теория идеальной пластичности : учеб, пособие / Д.Д. Ивлев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 448 с. – ISBN 5-9221-0140-4.
21. Болотин, В.В. Некоторые вопросы механики композитных полимерных материалов [Текст] / В.В. Болотин // Механика полимеров, №1. - 1975. - №1. - С. 126 - 133.
22. Дудукаленко, В.В. О пластичности композиционного материала, содержащего сферические включения [Текст] / В.В. Дудукаленко, В.В. Мешков // Изв. АН СССР. - Сер. МТТ. - №5. – 1983. - С. 109–112.
23. Левин, В.М. [Текст] // Изв. АН СССР. - Сер. МТТ. - №6. – 1976. - С. 137–145.
24. Коттрел, А. Прочность материалов [Текст] / А. Коттрел // Механические свойства новых материалов. – М. : Мир, 1996. - С. 7–20.
25. А.с. 1635523 СССР, МКИ С08J5/16 ; С08L27/18 ; С08K13/00. Антифрикционный материал [Текст] / Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник, Г.М. Сорокин, Л.М. Кириченко, В.И. Ящук. (Украина). - № 4607772 ; заявл. 26.09.88; зареестр. в Госреестре изобр. 15.11.90.
26. Сиренко, Г.А. Стратегия создания абразивостойкого композиционного материала, смоделированного сферическими и эллипсоидными частицами [Текст] / Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник. // Сб. науч. трудов «Управление триботехническими и прочностными свойствами механических систем. - Киев, 1990. - С. 20–26.
27. А.с. 1467893 СССР, МКИ В32В3/12 ; D04C5/00 ; F16C33/12. Антифрикционный материал [Текст] / Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, А.Ф. Будник, А.М. Сиренко (Украина). - № 4050632 ; заявл. 07.04.86 ; зареестр. в Госреестре изобр. 01.02.88. – Бюл. № 20.

**Запропоновано комбінований метод фінішної обробки деталей з використанням енергії ультразвукових коливань та лазерного випромінювання як з опаленням та і без опалення поверхні. Визначено зміни рельєфу та мікротвердості поверхневого шару деталі із бронзи, в залежності від імпульсних лазерно-ультразвукових джерел енергії**

**Ключові слова:** поверхневий шар, лазерна обробка без опалення поверхні, лазерна обробка з опаленням поверхні

**Предложен комбинированный метод финишной обработки деталей с использованием энергии ультразвуковых колебаний и лазерного излучения как с опалением так и без опаления поверхности. Определены изменения рельефа и микротвердости поверхностного слоя детали из бронзы, в зависимости от импульсных лазерно-ультразвуковых источников энергии**

**Ключевые слова:** поверхностный слой, лазерная обработка без опаления поверхности, лазерная обработка с опалением поверхности

УДК 621.373.826

## ВПЛИВ ІМПУЛЬСНИХ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ

**В. В. Джемелінський**

Кандидат технічних наук, професор\*

E-mail: vitaly.dzhemelinsky@gmail.com

**Д. А. Лесик**

Аспірант\*

E-mail: lesyk\_d@ukr.net

\*Кафедра лазерної техніки та

фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056