

Геннадій Сіренко, Анатолій Будник, Олександр Шийчук

МОДЕЛЬ АБРАЗИВОСТІЙКОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ, НАПОВНЕНОЇ СФЕРИЧНИМИ ТА ЕЛІПСОЇДНИМИ ЧАСТИНКАМИ

Вступ

1. Інтенсивність абразивного зношування полімерних композитів суттєво залежить від механічних властивостей, природи, структури і розмірів частинок наповнювачів, структури матеріалу композиту, його твердості, міцності, пружності, а також геометрії і розмірів абразивних частинок, співвідношення твердостей абразива і композиту, рівня зовнішньосилової дії на контакт [5, с.132; 7, с.6; 8, с.79, 26, с.43; 27, с.125]. На складність процесів зміцнення полімерів наповнювачами при абразивному зношуванні вказують такі дані.

2. Попередні експериментальні дослідження [24, 246 с; 28, 290 с] показали, що відношення зносу неповненого полімеру, до наповненого до 20-30% короткими високомодульними графітованими волокнами ВМН-4 типу НМ [24, 24с], знаходиться в межах 2-4200 при терті по рівних поверхнях і одному сліду та 0,4-0,6 для термопластів і 1,3-4,2 для реактопластів при терті по абразивній стрічці і новому сліду. Навіть для високонаповнених порошками металів композитів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) відносна абразивостійкість знаходиться в межах 0,9-1,2 при абразивному зношуванні по одному і новому сліду.

Таким чином, ефект зміцнення полімеру наповнювачами при абразивному зношуванні спостерігається тільки для деяких полімерів і наповнювачів. Причина цього явища пов'язана із специфічною зміною показників фізико-механічних властивостей полімерів при введенні наповнювачів, утворенні проміжної плівки і зміною топографії грубих поверхонь при терті по одному сліду і відсутністю цієї можливості при терті по новому сліду.

Так, абразивний знос карбонпластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 при терті по одному сліду залежить від складу матеріалу і при введенні низькомодульного графітованого волокна ТГН-2м типу ЛТ [24, 246с] знос на початку тертя в 2,5 рази нижчий, ніж при введенні низькомо-

дульного вуглецевого волокна УТМ-8 типу LT[24, 246с.]; надалі ця закономірність змінюється на протилежну, а додаткове введення порошку твердого мастила (графіт, MoS_2 , BN) збільшує знос у 4 рази.

Абразивне зношування ароматичного поліаміду фенілон С-2 по одному і новому слідах зростає при збільшенні вмісту порошку графіту РСМ І, в той час як введення порошку TiC ($d = 7-9$ мкм) приводить до екстремальної залежності зношування поліаміду від вмісту наповнювача.

Роль зміни шорсткої грубої поверхні при терті полімеру карбонпластика по одному сліду виявлена в таких дослідженнях. При терті литих кульок ($d = 16,75$ мм) з ненаповненого ароматичного поліаміду карбонпластика на його основі (короткі графітовані волокна LM перпендикулярні поверхні тертя) по поверхні скла ($Ra_0 = 1,41 \pm 0,43$ мкм) знос по новому сліду менший, ніж по одному сліду, оскільки в останньому випадку шорсткість поверхні зношування скла збільшилася до $Ra_0 = 4,14 \pm 0,71$ мкм. Інтенсивне зношування поліаміду починається при нормальному навантаженні 70 Н при терті по одному сліду і 135 Н по новому сліду, а для карбонпластика на його основі ці показники дорівнюють 105 і 17 Н відповідно. При терті пресованих кульок з ароматичного поліаміду карбонпластика (короткі графітовані волокна LM перпендикулярні поверхні скла) шорсткість поверхні скла змінилася від $1,47 \pm 0,17$ мкм до $0,44 \pm 0,11$ мкм при терті ароматичного поліаміду і від $1,86 \pm 0,55$ мкм до $1,17 \pm 0,36$ мкм при терті карбонпластика. Для всіх випробувань зношування карбонпластику менше, ніж полімерної матриці.

3 Дійсна структура антифрикційного композитного матеріалу 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 абразивостійкого полікомпонентного матеріалу забезпечений незначною керованою інформацією. Тільки показники властивостей наповнювачів і матриці, їх концентрації і геометричної форми недостатньо для точного передбачення властивостей проєктованого полімерного композиту. Така мала інформативність при проєктуванні композиту з наперед заданими властивостями вимагає надійних методів теоретичного дослідження композитних матеріалів. До таких методів відноситься варіаційний, який веде до границь ефективних властивостей [1, с.94; 32, с.117].

Ефективні властивості композиту знаходяться між варіаційними границями, а у випадку композиту з жорсткими частинками наповнювача (вуглецеві волокна, тверді мастила, карбід титану, оксид алюмінію тощо) і м'якою матрицею (політетрафторетилен, поліетилен, поліпропілен тощо) ефективні властивості знаходяться поблизу нижньої границі. Якщо поміняти місцями матрицю і наповнювачі, то ефективні властивості будуть знаходитись поблизу верхньої границі. Досягнення цих границь для композитів з двокомпонентними наповнювачами, змодельованими сферичними або еліпсоїдними частинками, необхідно довести експериментально [11, с.103; 12, с.109].

Завдання проектування абразивостійкого композиту полягає в тому, щоб досягти: 1) такого оптимального стану, при якому він добре угоджується з будовою композиту, 2) умов, які повинен задовольняти цей матеріал. Абразивне зношування композиту залежить від того, наскільки ефективно мікроструктура матеріалу може чинити опір різним процесам виділення матеріалу. Головний внесок у величину зносу вносять послідовність пластичних деформацій і розрив у тонкому шарі поверхні, виорювання у великому об'ємі матеріалу і наступне мікрорізання пластично деформованих зон. Розподіл поглинаючої активним шаром енергії зумовлює кінетику накопичення пошкоджень і руйнувань і зміну фрикційних характеристик [9, с.5].

Полімерний матеріал повинен мати високу стійкість до в'язко-пружної та пластичної деформацій (що має місце, якщо матеріал має високу твердість і границю текучості) і, в той же час, деформуватися пластично з високою роботою на розрив

Тому, при проектуванні абразивостійкого композиту, який деформує і зношується, необхідно врахувати його пластичну і пружну поведінку, зміну фізико-механічних характеристик, вплив концентрації, форми і відносних розмірів частинок двокомпонентного наповнювача на твердість, модуль пружності і деформацію композиту, на співвідношення в'язких і пружних властивостей, абразивну стійкість і теплофізичні властивості.

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

4. У багатьох роботах [20, с.5, 21, с.3; 22, с.3; 35, с. 233] основними критеріями зносостійкості при абразивному зношуванні приймаються механічні характеристики матеріалу, які визначаються експериментально.

Аналіз робіт свідчить, що абразивна зносостійкість полімерних композитів обумовлена його фізико-механічними, реологічними та деформаційно-міцнісними характеристиками. Тому, розробка критеріїв оптимізації наповненого полімеру за цими характеристиками які би визначалися теоретично за властивостями вихідних інгредієнтів на стадії проектування композиту, має практичне значення, так як дозволяє скоротити високовартісні експериментальні роботи [6, с.78].

5. Завдання оптимального проектування трикомпонентного абразивостійкого композиту поставимо таким чином: необхідно підібрати склад полімерного композиту, який забезпечує максимум абразивостійкості при заданих механічних властивостях полімерної матриці і наповнювачів

Вибір моделі і методів розрахунків

Нехай структура композиційного матеріалу утворена полімерною матрицею і частинками наповнювача, в'язко-пружні, пластичні і міцнісні властивості компонентів композиту відомі, компоненти композиту однорідні і міцно зв'язані з матрицею на границі розділу фаз, матриця, крім пружних властивостей E_0 , має в'язкість η_0 і границю пластичності K_0 , які підпорядковані умовам текучості Мізеса та рівнянню в'язкопружності Максвелла [11, с 103]. Індeksi s, f, o, l відносяться до сферичних і еліпсоїдних частинок, матриці і наповнювача відповідно

Відповідно, гранично напружений стан композиту, який виникає при абразивному зношуванні, підлягає енергетичній умові пластичності Мізеса. Припустимо, що пружні деформації малі в порівнянні з пластичними. Події швидкостей деформацій ϵ_{ij} і напружень σ_{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 дискретні частинки у вигляді витягнутих еліпсоїдів обертання з напівосями a і b , співвідношенням напівосей або відношення середньої довжини l до середнього діаметру d : $z = l/d$.

Мікрооб'єм композиту V_k складає об'єм частинок V_1 і об'єм полімерної матриці V_0 . Розподіл частинок наповнювача у показаному мікрооб'ємі носить статистичний однорідний характер.

Задамо геометричну хаотичну структуру композиту статистично однорідною ізотропною (індикаторною) функцією α [16, с.23, 33, с.34], яка приймає значення одиниці на відповідних частинках наповнювача і нуля в області полімерної матриці [0, 1]. Математичний опис властивостей функцій α і $\langle \alpha \rangle$ приведені в [10, 206с.; 14, с.1; 30, 146с., 36, с.481, 37, с.1514, 38, с.802]. Середнє значення індикаторної функції дорівнює об'ємній концентрації частинок наповнювача [16, с.23; 33, с.34]:

$$\langle \alpha \rangle = V_1/V_k = V_n, \quad (1)$$

де $n = f, s$ - тип частинок.

Із умов ергодичності витікає, що середні значення по об'єму $\langle \varepsilon_{ij} \rangle, \langle \sigma_{ij} \rangle$ можна обчислювати [11, с.103], використовуючи інтегрування по V .

Пластичні властивості композиційного матеріалу визначає густина пружної енергії деформування – дисипативна функція $D^*(\langle \varepsilon_{ij} \rangle)$ – мінімальне значення швидкості дисипації енергії, віднесеної до одиниці об'єму для довільно фіксованих середніх значень $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ [13, с.942; 17, с.5].

Варіаційне завдання визначення властивостей композиту можна сформулювати як умови екстремальності дисипативної функції $D^*(\varepsilon)$ на множині статистично однорідних розв'язів [11, с.103; 13, с.942, 16, с.23, 17, с.5]:

$$D^*(\langle \varepsilon_{ij} \rangle) = \min \frac{1}{V_k V_l} \int D(\varepsilon) dV; \quad (2)$$

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{\partial D^*(\langle \varepsilon_{ij} \rangle)}{\partial \langle \varepsilon_{ij} \rangle}. \quad (3)$$

З умов пластичності Мізеса витікає

$$\text{для матриці } D(\varepsilon) = K_0[\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}]^{1/2}; \quad (4)$$

$$\text{для частинок наповнювача } D(\varepsilon) = K_1[\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}]^{1/2}. \quad (5)$$

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

$$D = [e_{ij}e_{ij}]^{1/2} \quad (6)$$

де $e_{ij} = [K_0(1-\alpha) + K_1\alpha]\varepsilon_{ij}$.

Використовуючи методику [11, с.103], можна знайти точне мінімальне значення D^* :

$$D^* (\langle \varepsilon_{ij} \rangle) = K_0 [\langle \varepsilon_{ij} \rangle \langle \varepsilon_{ij} \rangle + \frac{K_1^2 - K_0^2}{K_0^2} V_n \langle \varepsilon_{ij} \rangle \langle \varepsilon_{ij} \rangle]. \quad (7)$$

При такому підході [11, с.103; 13, с.942], використовуючи варіаційний метод [4, с.126], знаходять границю пластичності при зсуві композиційного матеріалу в залежності від концентрації наповнювача з абсолютно жорсткими сферичними [11, с.103] та пластинчастими [12, с.109] частинками. Застосовуючи розроблений математичний апарат [4, с.126; 11, с.103; 13, с.109; 13, с.942, 16, с.23; 17, с.5; 18, с.5; 23, с.137; 33, с.34, 34, 172e], знайдемо інші характеристики композиту з бінарним наповнювачем у вигляді сферичних і еліпсоїдних частинок, які необхідні для розрахунку абразивостійкості і вибору складу композиту.

Розрахунки характеристик композиту

Будемо розглядати трикомпонентний композиційний матеріал складної ієрархічної структури [15, с.94], яка розділена на рівні: перший рівень – матричний конгломерат, який складається із полімерної матриці статистично однорідно розподілених в ній еліпсоїдних частинок; другий рівень – структура композиту, яка складається з матричного конгломерату, якому статистично однорідно розподілені сферичні частинки.

Для спрощення аналітичних залежностей приймаємо, що сферичні частинки абсолютно жорсткі (це припущення фізично коректно, тому що наприклад, для частинок порошку карбіда титану і політетрафторетилену $H_s/H_0 = 700$). Згідно [31, с.171], можна знехтувати впливом коефіцієнта Пуассона на макровластивості композиту із сферичними частинками, прийнявши його значення 0,5.

Тоді використовуючи [12, с.109], отримаємо для другого рівня структури співвідношення для пружних і пластичних властивостей композиту:

$$E_k = E_l \left(1 + \frac{5}{2} \frac{V_s}{1 - V_s} \right); \quad (8)$$

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

де $V_s = V_s/V_k$; $V_f = V_f/V_k$ - об'ємна частка сферичних (s) та еліпсоїдних (f) частинок; $V_s + V_f + V_0 = 1$; $V_0 = V_0/V$ - об'ємна частка полімерної матриці. Використовуючи принцип в'язкопружної аналогії Вольтера [11, с.103, 18. с.5, 31, с171], отримуємо співвідношення для в'язкості композиту другого рівня структури

$$\eta_k = \eta_l \left(1 + \frac{5}{2} \frac{V_s}{1 - V_s} \right), \quad (10)$$

де E_l , K_l , η_l - модуль пружності, границя пластичності при зсуві і в'язкість матричного конгломерату першого рівня.

Розглянемо двохкомпонентну структуру першого рівня

Використовуючи [11, с 103], знайдемо:

$$K_1 = K_0 [1 + (Q_1 - 1)V_f]^{1/2}; \quad (11)$$

$$E_1 = E_0 \left[1 + \left(\frac{1 - V_f}{QV_f} + \frac{E_0}{E_1 - E_0} \right)^2 \right]; \quad (12)$$

Внаслідок в'язкопружної аналогії 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).

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

де E_0 , K_0 , η_0 – модуль пружності, границя пластичності при зсуві в'язкості полімерної матриці.

Залежність твердості композиту від вмісту і розмірів сферичних еліпсоїдних частинок наповнювача були знайдені в припущенні, що частинки наповнювача в композиційному матеріалі не руйнуються і пластично деформуються. Використовуючи [11, с.103; 34, 172с]. після відповідних перетворення і спрощення, отримуємо формулу для твердості композиту вигляді:

$$H_k = H_0(1 - V_f - V_s + QV_f + \frac{5}{2}V_s)^{1/2}, \quad (14)$$

де Q – функція геометричних параметрів еліпсоїдних частинок. Тут функції Q_1 і Q визначаються таким чином:

$$Q_1 = \frac{1 - \frac{2}{5} \frac{1 - 8R_1 - 7R_2}{(1 - 4R_1 - 5R_2)} + \frac{2(R_1 - R_2)}{15R_2}}{2(2R_1 + R_2)}; \quad (15)$$

$$Q = 2 \left(1 + \frac{0,1}{6R_2 + E_0 / E_1 - E_0} \right); \quad (16)$$

$$R_1 = \frac{1 - \alpha^2}{4\alpha^5} \left[(3 - \alpha^2) \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} - 3 \right]; \quad (17)$$

$$R_2 = \frac{1}{8} (1 - 4R_1 - R_3); \quad (18)$$

$$R_3 = \frac{1 - \alpha^5}{\alpha^5} (1 - \alpha^5) \alpha + \frac{\alpha}{2} - \frac{3}{2} (1 - \alpha^2) \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha};$$

$$\alpha=(1-z^2)^{1/2}; z=l/d \quad (19)$$

еліпсоїдної частинки волокна

При розрахунках η_1 значення функції Q набуває вигляду:

$$Q = 2 \left(1 + \frac{0,1}{6 R_2} \right). \quad (20)$$

Співвідношення (11), (12), (13) підставимо в (8), (9), (10), тоді дістанемо формулу для відносного модуля пружності трикомпонентного композиту з наповнювачами у вигляді еліпсоїдних і сферичних частинок

$$E_x = E_0 \left(1 + \frac{Q V_f + Q_2 V_s}{1 - V_f - V_s + \frac{Q V_f E_0}{(E_f - E_0)} + \frac{Q_2 V_s E_0}{(E_s - E_0)}} \right), \quad (21)$$

З [11, с.103], враховуючи [18, с.5] та пропорційність $E \propto \sigma$, витікає:

$$Q = 2 \left(1 + \frac{0,1}{6 R_2 + E_0 / (E_f - E_0)} \right), \quad (22)$$

$$Q_2 = \left(\frac{E_0}{E_s - E_0} + \frac{2}{5} \right)^2, \quad (23)$$

де Q - функція геометричних параметрів і характеристик пружних еліпсоїдних частинок;

Q_2 - функція параметрів пружних сферичних частинок

Застосовуючи метод в'язкопружної аналогії [11, с.103; 18, с.5, 31, с.171], вираз для в'язкості композиту отримуємо заміною у формулі, яка характеризує залежність напруження від деформацій, значення модуля пружності значеннями коефіцієнта в'язкості, враховуючи, що в процесі руйнації частинки наповнювача розповзуть $l/\eta \rightarrow 0$, дістанемо:

$$\eta_k = \eta_0 \left(1 + \frac{QV_f + \frac{5}{2}V_s}{1 - V_f - V_s} \right) \quad (24)$$

Тут функція розподілу Q визначається співвідношенням:

$$Q = 2 \left(1 + \frac{0,1}{6R_2} \right) \quad (25)$$

Границя пластичності при зсуві для трьохкомпонентного композиту

$$K_k = K_0 \left\{ \left[1 + (Q_1 - 1)V_f \right] \left(1 + \frac{3}{2}V_s \right) \right\} \quad (26)$$

Значення функцій Q, Q₁ для всіх практично Z, які зустрічаються на практиці, приведені на рис.1. Залежність розрахункових (14) експериментальних даних відносної твердості композиту від вмісту сферичних частинок та відносного модуля пружності (21) співвідношення довжини до діаметру еліпсоїдних частинок (експериментальних даних – ПТФЕ + порошок карбіда титану або вуглець волокна із тканини УТМ-8) приведені на рис.2.

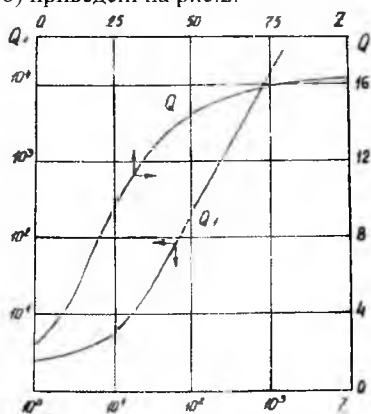


Рис.1. Значення функцій Q₁ і Q для співвідношень довжини до діаметра Z еліпсоїдних частинок композиційного матеріалу

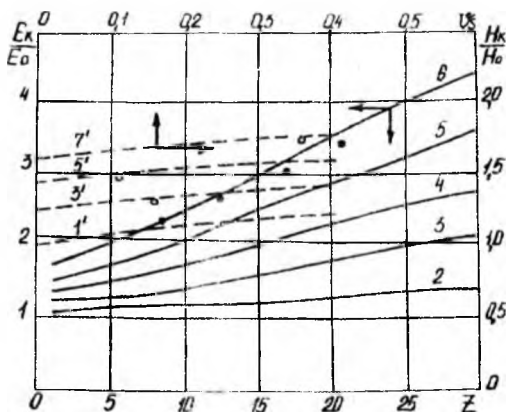


Рис.2. Залежність відносної твердості композиту H_k/H_0 від об'ємної частки сферичних частинок (V_s) та залежність відносного модуля пружності композиту E_k/E_0 від співвідношення довжини до діаметра еліпсоїдних частинок Z для об'ємної частки еліпсоїдних частинок (V_1): 1' - 0; 2 - 0,05; 3,3' - 0,1; 4 - 0,15; 5,5' - 0,3; 6 - 0,25; 7' - 0,3. Експериментальні дані для модуля пружності /суцільні точки/ і твердості /порожні точки/

Теоретична залежність відносного модуля пружності E_k/E_0 трикомпонентного композиту від об'ємної частки еліпсоїдних (V_1) і (V_s) сферичних частинок, що розрахована за (21), приведені на рис 3.

Вибір критерію оптимізації

Для вибору критерію, який спроможний дати оцінку абразивостійкості 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 перешкоджають повному руйнуванню композиту [20, с.5; 21, с.3; 22, с.3]. Таким чином, у зв'язку з таким широким тлумаченням

критерію граничного стану і зносу, практично неможливо охарактеризувати його з високим ступенем визначення

Граничним станом полімеру часто називають такий напружений стан при якому подальше підвищення напруження супроводжується процесом вимушеної деформації. При сумісництві в одному аналітичному виразі умов крихкого руйнування і вимушеної високоеластичної течії можна знайти узагальнені критерії гранично напруженого стану. Необхідність в таких узагальнених критеріях виникає у зв'язку з тим, що при зростанні напруження проходить і зміна умов граничних переходів [22, с.3].

При низькій швидкості зсуву наповнений полімер поводить себе як тверде тіло, тобто не виявляє течії до моменту досягнення критичного напруження зсуву – границі міцності зсуву або границі текучості [12, с.10]. Серед розорієнтованих волокон максимальне напруження виникає уздовж волокон, орієнтованих у напрямку максимального напруження розтягування.

Приймаємо відоме положення [18, с.5], згідно якого границя текучості матриці σ_0 і композиту σ_k пропорційні їх твердості H_0, H_k .

Границі текучості розглянемо як границі міцності, тому що процес руйнування полімера при абразивному зношуванні супроводжується великими пластичними деформаціями, а крихкий характер руйнування приносять волокна і сферичні частинки. Досягнення частинкою наповнювача напружень, при яких проходить їх руйнування, можна виразити умовами [11, с.103], коли міцність частинок наповнювача σ_1 дорівнює величині напруження, яка обчислена для незруйнованих жорстких частинок наповнювача

$$\sigma_1 \geq \sigma_0 Q_1 \frac{H_0}{H_k} \quad (27)$$

Умови жорстко-пластичності (14) при руйнації частинок наповнювача (27) не виконуються тому, що необхідно врахувати процес руйнування частинок. При руйнуванні частинок твердість і границя текучості композиту суттєво на збільшується із зростанням об'ємних концентрацій наповнювача збільшенням довжини волокна, порівняно з випадком, коли частинки руйнуються. Підставляючи (14) в (27) знаходимо критичні концентрації наповнювачів V_1^*, V_2^* , при яких частинки наповнювачів не руйнуються, лишаючись цілими. Критичному стану відповідає рівняння

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1} Q_1\right)^2 = 1 - V_f^* - V_s^* + QV_f^* + \frac{5}{2}V_s^*, \quad (28)$$

якщо частинки наповнювача руйнуються, то

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1} Q_1\right)^2 < 1 - V_f^* - V_s^* + QV_f^* + \frac{5}{2}V_s^*; \quad (29)$$

якщо частинки висмикуються з матриці, залишаючись цілими, то

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1} Q_1\right)^2 > 1 - V_f^* - V_s^* + QV_f^* + \frac{5}{2}V_s^*. \quad (30)$$

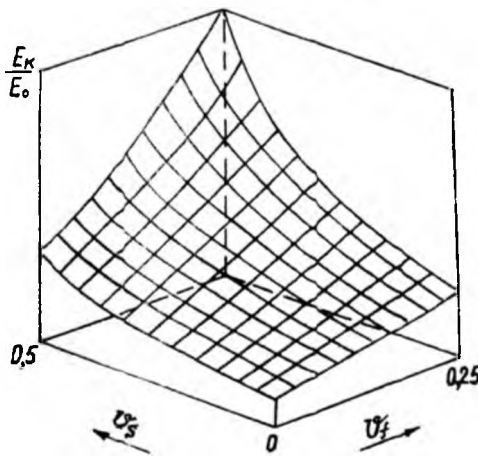


Рис.3. Залежність відносного модуля пружності E_k/E_0 трикомпонентного композиту від об'ємної частки сферичних V_s і еліпсоїдних V_f частинок наповнювача

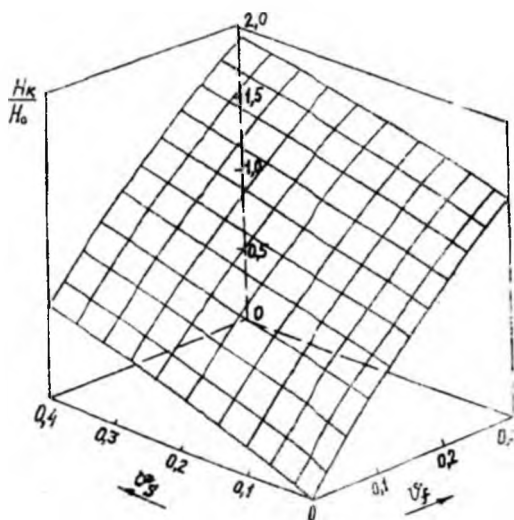


Рис 4. Залежність відносної твердості H_k/H_0 трикомпонентного композиту від об'ємної частки сферичних V_s і еліпсоїдних V_f частинок наповнювача

Цей висновок дає якісне пояснення екстремальній залежності абразивної зносостійкості композиту від вмісту наповнювачів [20, с.5; 21, с. 24, 246с]. Дослідження [19, с.7, 22, с.3] показують на особливі грани властивості композитів в залежності від концентрації наповнювача лінійний характер залежності (для випадку пластичного стану частинок наповнювачів) або закону квадратного кореня (для випадку жорсткого стану частинок). В загальному випадку [19, с.7] необхідно визначити чотири дільниці на кривих деформування композиту.

- 1) матриця і частинки наповнювачів деформуються пружно;
- 2) матриця деформується пластично, частинки пружно
- 3) матриця і частинки деформуються пластично,
- 4) один з компонентів починає руйнуватися

Від концентрації наповнювачів залежить поступ руйнації композиту, який є наслідком руйнації одного з компонентів. Це можна визначити за (28), (29), (30). У загальному випадку твердість композиту, армованого еліпсоїдними частинками, буде визначатися за (14)

Для випадку, коли еліпсоїдні частинки руйнуються, використаємо метод [11, с.103] який за аналогією з теорією пружних композитів приводить до виразу:

$$H_k = H_0 \left[1 + \left(\frac{1 - V_f}{V_s Q_{11}} + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

де функція Q_{11} визначається за формулою:

$$Q_{11} = \frac{1 + \frac{4(R_1 - R_2)}{5\sigma_0^2(\sigma_1^2 - \sigma_0^2)} - 1 + 6R_2}{\sigma_0^2(\sigma_1^2 - \sigma_0^2) + 2(R_1 - R_2)} \quad (32)$$

Теоретична залежність відносної твердості H_k/H_0 трикомпонентного композиту від об'ємної частки еліпсоїдних (V_f) і сферичних (V_s) частинок наповнювачів показана на рис.4

Прийmemo, що деформація і в'язкість полімерної матриці і композита пов'язані співвідношенням:

$$\delta_0 = \frac{1}{\eta_0}; \delta_k = \frac{1}{\eta_k} \quad (33)$$

Теоретичні залежності відносного модуль пружності E_k/E_0 і

відносної деформації $\delta_k/\delta_0 = \eta_0/\eta_k$ трикомпонентного композиту від

об'ємної частки еліпсоїдних V_f і сферичних V_s частинок наведені на рис 5

Аналіз результатів теоретичного дослідження (рис 5) вказує на те, що

із зростанням об'ємного вмісту еліпсоїдних частинок в полімерній матриці трикомпонентного композиту абразивна зносостійкість буде спочатку збільшуватися. При цьому характер зношування відповідає руйнації волокон, які приймають на себе основне навантаження, "спрацьовуючи" енергію руйнації. Потім, після досягнення критичних концентрацій, процес абразивного зношування буде відповідати висмикуванню незруйнованих волокон з матриці, що може приводити до зменшення абразивної зносостійкості. Цей висновок підтверджується елементними мікрофотографіями поверхні композиту на основі ПТФЕ, вуглецевих волокон та карбіда титану після абразивного зношування при різному вмісті наповнювачів [28, 290с].

Зниження рівня зароджування і розвитку тріщини можна досягнути або за рахунок збільшення напруження формування її критичного зародку або за рахунок гальмування розвитку закритичної тріщини, або обох процесів разом. Перший ефект досягається за рахунок введення м'яких порошків твердих речовин вузької фракції, а другий – за рахунок введення коротких і широким об'ємним (масовим) розподілом (за законом Вейбулла або гама розподілом) за довжинами і значною часткою волокон малої довжини.

Узгодження пружних і пластичних властивостей (і відповідно максимальна абразивостійкість) композиту досягається при певному вмісті наповнювача. Згідно рис.5 відносний модуль пружності збільшується, а відносна деформація зменшується при зростанні V_f , V_s . Серед розрахункових параметрів абразивостійкості вибираємо в'язкість матеріалу η і модуль пружності при розтягуванні E , використовуючи методи теорії розмірностей, в умовах, коли змінюється тільки η і E ; оскільки зовнішні силові параметри постійні, то виключення їх розмірностей досягається відношенням η/E , яке має розмірність часу ([Па·с]/[Па]). Відношення динамічної в'язкості до модуля пружності назвемо критерієм узгодження пластичних і пружних властивостей (критерієм еквівалентності пружного стану):

$$T = \frac{\eta}{E}, \quad (34)$$

що має фізичний зміст часу релаксації.

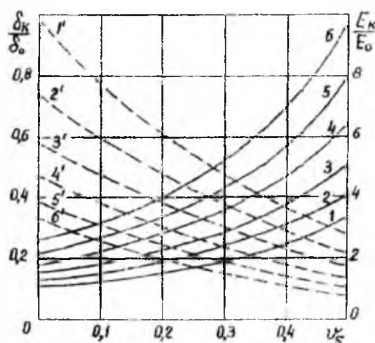


Рис.5. Залежність відносного модуля пружності E_k/E_0 (1-6) та відносної деформації δ_k/δ_0 (1' - 6') композиту від об'ємної частки сферичних частинок V_s , при об'ємній частці еліпсоїдних частинок V_e

1,1' - 0; 2,2' - 0,05; 3,3' - 0,10; 4,4' - 0,15; 5,5' - 0,20; 6,6' - 0,25

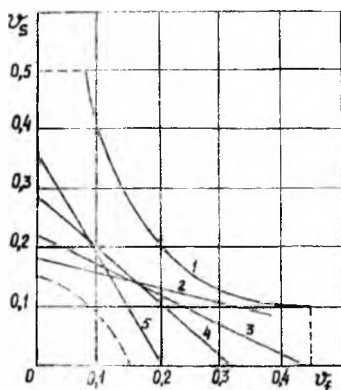


Рис.9. Граничне співвідношення сферичних V_s і еліпсоїдних V_e частинок у полімерному композиті за критерієм узгодження (1) і відносної абразивостійкості при нормальному навантаженні на зразок (H): 2- 20; 3- 50, 4 -105; 5- 160

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

$$\tau = \frac{T_0}{T_k} = \frac{\eta_0}{E_0 \frac{\eta_k}{E_k}}; \quad (35)$$

$$\xi = \frac{J_k}{J_0} = \frac{1}{I_k \frac{1}{I_0}} = \frac{I_0}{I_k}, \quad (36)$$

де T_0, T_k – критерії узгодження для полімерної матриці і композиту;

J_0, J_k – абразивна зносостійкість полімерної матриці і композиту;

I_0, I_k – швидкість зношування полімерної матриці і композиту.

Експериментальна частина

Так як абразивне зношування є складним багатофакторним процесом, то при проектуванні абразивостійкого карбонпластика в композит вводили три компоненти, які мали до краю різні властивості. У відносно в'язку і м'яку полімерну матрицю політетрафторетилену включали низькомодульну середньої твердості вуглецеві волокна УТМ-8 і високотверді високомодульну кулясті частинки карбіда титану.

У композит вводили короткі вуглецеві волокна, що отримані за ХМА-технологією [24, 246с; 28, 290с.], мали об'ємний (масовий) розподіл за довжинами за ймовірним гама-законом розподілу з параметрами $\lambda = 0,005-0,045 \text{ мкм}^{-1}$, $\theta = 1,0-2,55$, отриманих з 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 $P_2(l) = 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^6 \text{ мкм}^{-1}$ при наборі довжин $l = 20-3500 \text{ мкм}$, і карбід титану з розмірами частинок, вибраних з ряду 0-1; 1-2; 2-3; 3-5; 5-7; 7-10 мкм.

Вихідний порошок карбіда титану мав розмір частинок 0-1000 мкм. За технологією [2, 4с], використовуючи ситовий класифікатор, отримували вихідні порошки для мікроаналізатора вузьких фракцій 50-63 – 40-50 мкм. Мікропорошки більш вузької фракції отримали із ситових порожків.

Спочатку додавали до порошку желатини з содою, і надалі з водного розчину, шляхом осадження при перемішуванні 2 хв., отримували вузькі фракції 40-60 мкм з порошку 50-63 мкм або 28-40 мкм з 40-50 мкм. Потім, змінюючи концентрацію желатини (в'язкість і густину розчину), таким же шляхом послідовно отримали вузькі фракції 28-40, 20-28, 14-20, 10-14 мкм. Методом центрифугування, змінюючи концентрацію желатини і числа обертів центрифуги від 465 до 2500 на хв., послідовно отримували більш малі фракції 7-10, 5-7, 3-5, 2-3, 1-2, 1-0 мкм (а.с.№ 1635523)[2, 4с.].

Дослідження абразивного зношування зразків карбопластиків проводили на машині тертя ХТІ-87 [28, 290с] по абразивній стрічці МС 1000×50БШ60С16М1300 (ГОСТ 6456-68) і незамащеній поверхні за схемою «напіввкладиш-вал»>>. Вал був виконаний діаметром 90 мм із сталі 40Х. Зразок діаметром $d = 10 \pm 0,1$ мм і висотою $h = 15 \pm 0,1$ мм, затиснутий у зійомному патроні з алюмінію, припрацьовували до утворення поверхні тертя. Час випробувань 1 хв. (шлях тертя $S = 5,1$ м). Час (шлях тертя) випробувань вибирали таким чином, щоб результат вимірювань зносу був не менше 10-15 разів більший за похибку.

Швидкість ковзання $v = 0,17$ м/с, число обертів вала 36 за хв., подача 0,48мм/об., нормальне навантаження на зразок $N_1 = 20, 50, 105, 160$ Н. Вимірювалася вага зразка з патроном з точністю 0,0002 г на аналітичних терезах АДВ-200А, і через густину, яка була визначена гідростатичним методом, розраховувалася об'ємна питома інтенсивність зношування [мм³/Н·м] матриці I_0 і композиту I_k і, відповідно, об'ємна питома щосостійкість I_0/I_k .

Міцність при розтягуванні визначали згідно ГОСТ 11262-80, стисканні – ГОСТ 4651-82, густину визначали згідно ГОСТ 15139-80. Помилка експерименту коливалася в межах 5-16%. Міцність при розтягуванні оцінювали на зразках у вигляді кільця діаметром $d_3 = 50$ мм, $d_1 = 40$ мм і висотою $h = 10$ мм. Механічні випробування проводили на машині "Інстрон" із швидкістю руху повзуна 0,25 см/хв.

Перед випробуванням зразки кондиціонували згідно ГОСТ 10681-75 24 год. при 296 ± 1 К і відносній вологості $65 \pm 2\%$. Дослідження проводили при температурі 296 ± 1 К і відносній вологості $65 \pm 2\%$.

Був реалізований ротатабельний план другого порядку [3, 320с]. Ділянка факторного простору та інтервали варіювання становили (табл. 1).

Факторний простір та інтервали варіювання вхідних змінних

Інтервал та рівень варіювання	Вміст вуглецевих волокон $C_T (X_1)$, об. %	Вміст карбіда титану $C_1 (X_2)$, об. %
Інтервал варіювання	5,658	7,779
Рівень варіювання		
-1,414	4,0	1,0
-1,0	6,342	4,221
0	12,0	12,0
+1,0	17,658	19,779
+1,414	20,0	23,0

Математична модель мала вигляд:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (37)$$

Досліди були рандомізовані в часі за таблицею випадкових чисел

Реалізували чотири плани за абразивостійкістю (вихідні змінні Y_1 ,

Y_4) для нормальних навантажень на зразок $N_1 = 20, 50; 105$ і 160 Н та чотири плани за механічними властивостями: міцністю (Y_5), відносним подовженням (Y_6) і граничною енергією деформування при розтягуванні (Y_7) та граничним навантаженням при стисканні при 15% деформації (Y_8).

Отримані результати адекватно (табличний критерій Фішера $F_{11}\{f_1 = 4; f_2 = 4; \alpha = 0,05\} = 6,39$) описуються рівняннями:

$$N_1 = 20: \quad y_1 = 1,7560 - 0,2231x_1 + 0,1352x_2 - 0,0602x_1x_2 - 0,1698x_2^2 \\ (F_p = 0,09; S_v^2 = 0,0035); \quad (38)$$

$$N_1 = 50: \quad y_2 = 1,5578 - 0,2323x_1 - 0,1065x_2 - 0,887x_1x_2 - 0,1195x_2^2 \\ (F_p = 0,07; S_v^2 = 0,0055); \quad (39)$$

$$N_1 = 105: \quad y_3 = 1,2957 - 0,2184x_1 + 0,0996x_2 - 0,0911x_1x_2 - 0,0704x_2^2 \\ (F_p = 3,97; S_v^2 = 0,0018); \quad (40)$$

$$N_1 = 160: \quad y_4 = 1,4439 - 0,2642x_1 + 0,0314x_2 - 0,1138x_1x_2 - 0,044x_2^2 \\ (F_p = 3,22; S_v^2 = 0,0025); \quad (41)$$

$$y_5 = 18,663 - 0,76x_1 + 1,049x_2 - 0,32x_1x_2 - 0,594x_2^2 \\ (F_p = 2,21; S_y^2 = 0,125); \quad (42)$$

$$y_6 = 111,367 - 53,072x_1 + 60,299x_2 - 16,228x_1x_2 + 0,965x_1^2 \\ (F_p = 2,61; S_y^2 = 5,475); \quad (43)$$

$$y_7 = 20,79 - 10,684x_1 + 11,677x_2 - 3,614x_1x_2 + 1,467x_1^2 \\ (F_p = 2,29; S_y^2 = 5,475); \quad (44)$$

$$y_8 = 36,015 - 3,319x_1 + 2,612x_2 - 2,25x_1x_2 + 0,57x_1^2 + 0,68x_2^2 \\ (F_p = 6,25; S_y^2 = 4,5); \quad (45)$$

де F_p – розрахункове значення критерію Фішера,
 S_y^2 – дисперсія відтворення

Геометрична інтерпретація отриманих результатів приведена на рис 6, 7, 8. Значення коефіцієнтів кореляції між міцністю, відносним подовженням і граничною енергією деформування при розтягуванні, граничним навантаженням при стисканні при 15% деформації та об'ємною питомою абразивостійкістю при нормальних навантаженнях на зразок 20; 50; 105 і 160 Н наведені в табл.2. Порівнюючи r_{12} з $r_{кр}$, бачимо, що між заданими величинами немає тісного лінійного зв'язку: $|r_{12}| < r_{кр}$. Разом з тим спостерігається певна тенденція зближення $|r_{12}|$ до $r_{кр}$ при збільшенні нормального навантаження від 20 до 160 Н.

На виключається, що при ще більших N_1 , коли абразивне зношування буде уявляти собою виключно мікрорізання пластично деформованих зон і об'ємного різання матеріалу, тобто процесу повної руйнації композиту, такий зв'язок буде знайдено.

Це твердження ґрунтується на тому, що для окремих груп металів і полімерів, а також для деяких полімерних композитів з однокомпонентним наповнювачем, при підборі певних умов випробувань знайдений лінійний зв'язок між абразивною зносостійкістю і твердістю, модулем пружності, міцностями при зсуві, зрізі, стисненні і розтягуванні, границею текучості, енергією деформації і властивостями від втомі [24, 246с; 35, с.233].

Але для цілого комплексу явищ абразивного зношування та для багатокомпонентного полімерного композиту такого зв'язку не знайдено.

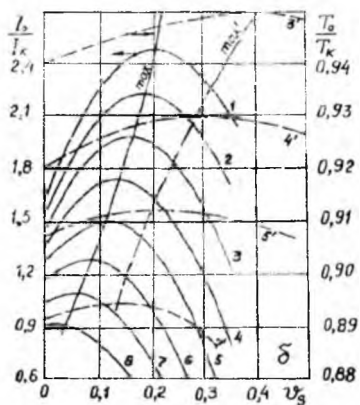
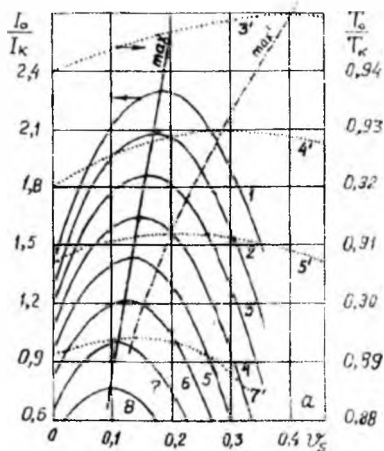


Рис 6. Залежність відносної абразивної зносостійкості I_0/I_K /1-8/ при нормальному навантаженні $N = 20$ Н (а) і 50 Н (б) на зразок та відносного критерію узгодження T_0/T_K трикомпонентного композиту на основі ПТФЕ від об'ємної частки порошку карбіда титану V_1 , при об'ємній частці вуглецевого волокна УТМ-8 V_2 :

1 - 0; 2 - 0,05; 3,3' - 0,1; 4,4' - 0,15; 5,5' - 0,2; 6 - 0,25; 7,7' - 0,3; 8 - 0,35

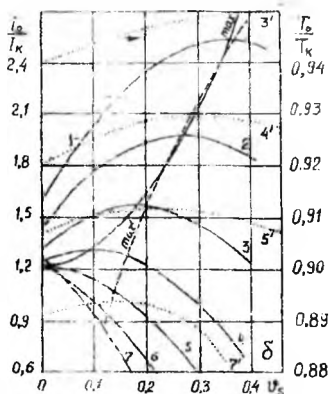
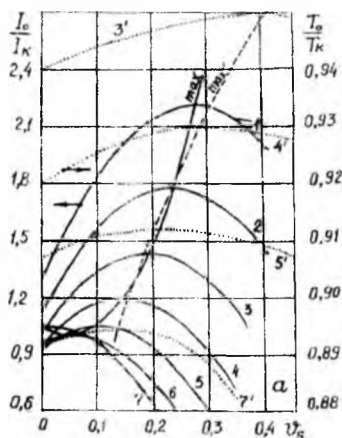


Рис 7. Залежність відносно абразивної зносостійкості I_0/I_K при нормальному навантаженні $N = 105$ Н (а) і 160 Н (б) на зразок га відносного критерію узгодження Γ_0/Γ_K трикомпонентного композиту на основі ПТФЕ від об'ємної частки порошку карбід титану V_{TiC} при об'ємній частці вуглецевого волокна УТМ-8 V_{UTM-8} .

1 - 0; 2 - 0,05; 3,3' - 0,1; 4,4' - 0,15; 5,5' - 0,2; 6 - 0,25; 7,7' - 0,3

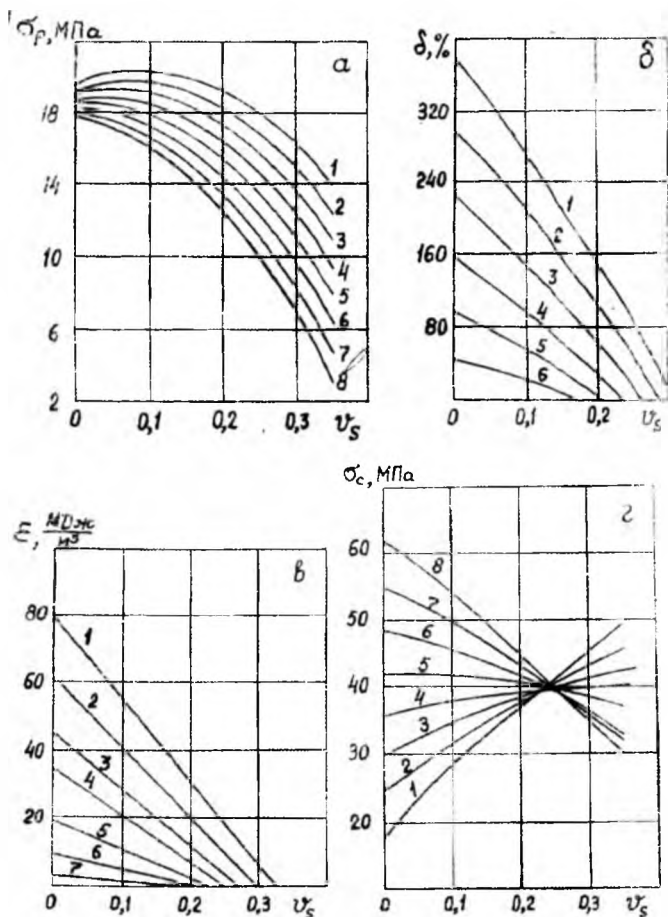


Рис 8. Залежність міцності (а) відносного подовження (б) та питомої енергії руйнування (в) при розтягуванні і міцності при стискуванні (г) композиту на основі ПТФЕ від об'ємної частки порошку карбона титану при об'ємній частці вуглецевого волокна УТМ-8 V_f :

1 - 0; 2 - 0,05; 3 - 0,1; 4 - 0,15; 5 - 0,2; 6 - 0,25; 7 - 0,3; 8 - 0,5

Результати теоретичного дослідження відношення критеріїв узгодження полімерної матриці і композиту в залежності від вмісту волокнистого і сферичного наповнювача: показані на рис.6 і 7. Із рис 6 і 7 видно, що для співвідношення T_0/T_k існують екстремуми – критичні концентрації наповнювача, перевищення яких повинно викликати погіршення штигизносних характеристик композиту і, відповідно, зниження абразивної стійкості. Для відносної абразивостійкості композиту також існують екстремальні концентрації. Між I_0/I_k і T_0/T_k існує тісний лінійний зв'язок (табл.2), причому коефіцієнт кореляції знижується із зростанням навантаження ($|r_{1,2}| > |r_{kp}|$).

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів кореляції між показниками фізико-механічних властивостей і об'ємною питомою зносостійкістю при різних питомих навантаженнях ($r_{kp} = 0,553$
[$n = 13, f = n - 2; \alpha = 0,05$]).

X	Y I_0/I_k			
	Ni = 20 Н	Ni = 40 Н	Ni = 105 Н	Ni = 160 Н
σ_p	0,270	0,313	0,375	0,539
δ	0,145	0,226	0,238	0,477
ϵ	0,165	0,241	0,252	0,491
σ_k	-0,238	-0,284	-0,298	-0,495
T_0/T_k	0,867	0,821	0,786	0,684

Наявність екстремуму у відношенні в'язкопружних характеристик композиту, залежно від вмісту наповнювача, дозволяє оцінити ділянку граничної абразивної стійкості композиту (рис 9): всі екстремальні значення абразивостійкості знаходяться нижче і ліворуч значень критерію узгодження

Пропонується наступна стратегія розробки композиційного матеріалу [25, с.20; 29, с.88], здатного працювати в середовищі з абразивом. З умов експлуатаційної надійності створеного матеріалу в конструкції вузла вибирається концентрація наповнювача, який забезпечує необхідне значення механічних властивостей з отриманими формулами згідно (14), (21), (24), (26). За відношенням η/E визначається зростає чи спадає функція $T_0/T_k \sim f(V_f; V_s)$ в залежності від вмісту наповнювача. Значення концентрації наповню-

вачів, що не досягла критичних точок, характеризують зростання абразивної стійкості наповнених полімерів внаслідок виконання умов [22, 3с.].

Використовуючи розроблений метод і критерій T_0/L_k , оптимізована абразивостійка композиція на основі ПТФЕ (а.с. №1635523) [2, с.4].

При розробці абразивостійкого матеріалу, якщо за умовами експлуатації вимагається більший вміст наповнювачів, який забезпечує більш високі механічні властивості, але тягне за собою зниження абразивної стійкості композиту, необхідно або змінити природу наповнювачів, або використовувати матрицю іншої природи. З цією метою в матеріал полімерної матриці вводили волокнистий наповнювач у формі волокон, нитки, пасми нитки і трубочок (порожніх волокон) з утвореннями, які виконані у формі вузлів, петель та вусиків (а.с. № 1467893) [1, 5с.].

Висновки

1. Використовуючи варіаційний метод, задання геометричної структури композиту індексаторною функцією і визначаючи його властивості пошуком екстремуму дисипативної функції густини пружної енергії деформування, отримані математичні вирази для розрахунку модуля пружності – в'язкості композиту за відповідними властивостями наповнювачів, змодельованими еліпсоїдними та еферичними частинками.

2. У математичну процедуру оптимізації складу композиту введений новий базовий критерій абразивної 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.

1. Антифрикционный материал: А. с. 1467893 СССР, МКИ В32В3/12, D04C5/00, F16C33/12/ Г.А. Сиренко, Г. М. Сорокин, А. Ф. Будник, А. М. Сиренко - №4261265. Заяв. 15. 06.87; Зареєстр. 15. 11. 88 - 5с.
2. Антифрикционный материал: А. с. 1635523 СССР, МКИ С08J 5/16, С08L 27/18, С08K13/00/ Г. А. Сиренко, А. Ф. Будник, Г. М. Сорокин, Л. М. Кириченко, В. И. Яшук. - № 4607772 заяв. 26. 09. 88; зареєстр. 15. 11. 90 - 4с.

3. Ахназарова С.Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии.- М.: Высш. Шк., 1978 - 320 с.
4. Болотин В.В. // Механика полимеров, 1975 - № 1.-С.126-133.
5. Будник А. Ф. Разработка абразивостойкого трехкомпонентного композитного материала на основе политетрафторэтилена: Дис. ... канд. техн. наук: 05. 16. 06; 05. 02. 04 - К.: Ин-т проблем материаловедения им. И. Н.Францевича НАНУ, 1993.- 132 с.
6. Будник А. Ф., Бондаренко Е. И. Критерий выбора наполненных полимеров для узлов трения с абразивом / Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. «Обеспечение надежности узлов трения машин». - Ворошиловоград, 1988 - С 78
7. Будник А. Ф. Проблемы повышения абразивостойкости полимерных материалов / Тез. докл. науч.-тех. конф. «Применения композиционных материалов в узлах трения технологического оборудования» - Хмельницкий, 1986 - С 6 - 7.
8. Будник А. Ф. Пути повышения абразивной стойкости наполненных полимеров / Тез. докл. III Всесоюзн. Науч.-Тех. Конф. «Композиционные полимерные материалы, свойства, производство и применения» - М., 1987.-С.79.
9. Власов В. М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей - М., 1987 - С.5.
10. Волков С. Д., Ставров В. И. Статистическая механика композитных материалов - Минск: Белорус. Госун-т, 1978.-206 с
11. Дудукаленко В. В., Лысач Н. Н. О пластичных свойствах материала, содержащего пластинчатые включения // Изв. АН СССР -Сер.МТТ - 1980.- № 1.-С.103-109.
12. Дудукаленко В. В., Мешков С. И. О пластичности композиционного материала, содержащего сферические включения// Изв. АН СССР - Сер. МТТ - 1983 -№ 5 - С. 109-111.
13. Дудукаленко В. В., Минаев В. А.//Изв. АН СССР.- Сер. ПММ.-1970 - Т.34.-Вып. 5.-С.942-944.
14. Дудукаленко В. В. Оптимальное использование собственной прочности волокон в композитах с пластической матрицей - Сумы: СФ ХПИ, 1990 - С. 1-10.
15. Дудукаленко В. В., Шарандов С. Н., Будник А. Ф. Выбор структуры трехфазного карбопластика для износостойких уплотнений // Сб. Науч.

- Труды "Химическое машиностроение расчет, конструирование, технология." - К., 1992.- С. 94-100.
16. Дудуканенко В. В., Шаповалов С. П. // Применение композиционных материалов на полимерной и металлической матрицах.- Пермь, 1985 - С. 23-24.
 17. Излев Д. Д. Теория идеальной пластичности. М.: Наука -1966.-С.5.
 18. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука.-1969.-С.3.
 19. Коттрел А. Прочность материалов // Механические свойства новых материалов.-М.: Мир, 1996 - С. 7-20.
 20. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ - М.: Машиностроение, 1977.-С.5.
 21. Крыжановский В. К. Износостойкие реактопласты - М.: Химия, 1984.- С.3.
 22. Кузьмин А. А., Тимошук А. С. О выборе критериев оценки герметизирующей способности полимерных материалов - Черкассы, 1981/ Рук. Дев. в НИИТЭХИМ № 465 ХП-Д-81 - С.3.
 23. Левин В. М. // Изв. АН СССР - Сер - МТТ. - 1976 - № 6. - С. 131-145
 24. Сиренко Г. А. Антифрикционные карбопластики. К.: Техніка, 1985 - 246 с.
 25. Сиренко Г. А., Будник А. Ф. Стратегия создания абразивостойкого композиционного материала, смоделированного сферическими и эллипсоидными частицами // Сб. науч. Трудов « Управление триботехническими и прочностными свойствами механических систем. - К., 1990 - С.20-26.
 26. Сиренко Г. А., Сорокин Г. М., Будник А. Ф. Абразивное изнашивание наполненных полимеров в уплотнительных узлах нефтегазового и нефтехимического оборудования / Тез. докл. 5 Всесоюзн. Науч.- Техн. совещания по уплотнительной технике - Сумы, 1988.- С. 43.
 27. Сиренко Г. А., Сорокин Г. М., Будник А. Ф. Антифрикционные карбопластики для износостойких уплотнений сред с абразивом/ Тез. докл. Всесоюзн. Науч.- Техн. конф. «Современные проблемы триботехнологии». - Николаев. 1988. - С.125-127
 28. Сиренко Г.О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон. Дис ... д-ра. техн. наук: 05.16.06, - К.: Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ, 1997 - 290с.

29. Сиренко Г. А., Шаповалов С.П., Будник А. Ф. Управление физико-химическими характеристиками композитных материалов с целью повышения износостойкости/ Тез докл. науч.-техн. конф. «Качество и надежность узлов трения» - Хмельницький, 1992 - С.88.
30. Соколкин Д.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. - М., 1984. - 146с.
31. Фляйшер Г. Управление износом и надежностью - главная задача триботехники// Теория трения, износа и проблемы стандартизации - Брянск, 1978. - С.171-180.
32. Шаповалов С.П., Будник А. Ф. Разработка новых структур износостойких композитов, применяемых в узлах трения/ Тез докл. респуб. науч.-техн. конф. «Материалы и упрочняющие технологии - 92». Курск, 1992 - С 117
33. Шаповалов С.П. // Динамика и прочность машин - Х., 1985. - Вып. 41. С.34-38.
34. Шаповалов С.П. Проектирование трехфазных композитов и исследования напряжений в элементах структуры: Дисс. ... канд. ф-м наук: Х., 1987. - 172 с.
35. Fridrich K. Wear of reinforced polymers by different abrasive counterparts// Friction and wear polymer composites. Amsterdam e. a., 1986. P.233-287
36. Hashin Z. Analysis of composite materials a survey// Trans. ASME: J. Appl Mech - 1983. - Vol.50, N3. - P.481-505.
37. Hashin Z. Strikman S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials// J. Appl. Phys. - 1962. - N33. - P.1514-1517.
38. Kerner E.H. The electrical conductivity of composite materials// Proc. Phys Soc. 1956. N69B. - P.802-807.

Sirenko H., Budnik A., Shychuk A. The model of antiabrasive composite material on the basis polymers fill with spherical and ellipsoidal particles. The description of the strategical creation of antiabrasive composite materials on the basis of powders of polytetrafluorethylen, carbon fibers and titanium carbide have been found. The ellipsoidal model partikles of carbon fibers and the spherical model partikles of titanium carbide has been used for the calculations. The new criterion of optimization: parameter of something viscous and elastic properties of a composite which were calculated on the basis of initial ingredients were introduced. Fig.9, Tabl 2, Litr.38.