

МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОТРИВКОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ ЗА ЗМІНОЮ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Д. П. СТУХЛЯК¹; І. Г. ДОБРОТВОР², О. З. СКОРОХОД³, В. І. МАРУХА⁴,
М. М. МИТНИК¹, О. С. ГОЛОТЕНКО¹

¹ Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

² Тернопільський національний економічний університет;

³ Гомельська філія університету цивільного захисту МНС Білорусі;

⁴ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Композитні матеріали на основі термореактивних полімерів завдяки комплексу фізико-механічних та експлуатаційних характеристик широко використовують в усіх галузях промисловості України для захисту обладнання від корозії та зношування, у тому числі як антифрикційні матеріали. Розроблено модель для композитів на основі епоксидного олігомера та оксиду алюмінію, яка дасть змогу оцінити інтенсивність зношування матеріалу без машини тертя. Для цього використано теорію подібності, згідно з якою, коли всі відповідні безрозмірні характеристики для двох процесів однакові, то вони подібні. На основі експериментальних результатів, отриманих під час дослідження коефіцієнта тертя, модуля пружності та твердості епоксикомпозитів, запропоновано модель для прогнозування зношування матеріалів залежно від вмісту оксиду алюмінію. Використання такої моделі забезпечує кореляцію результатів моделювання з експериментальними даними.

Ключові слова: епоксикомпозит, модель, тертя, інтенсивність зношування.

Вступ. Розроблення нових моделей прогнозування триботехнічних характеристик, заснованих на сучасних теоріях [1], які дають змогу з високою точністю визначати властивості новостворюваних матеріалів і виробів з них, є актуальною задачею сучасного матеріалознавства, розв'язок якої скоротить термін випробувань на зносотривкість. Однією із поширених методик прогнозування властивостей епоксикомпозитних матеріалів є теорія подібності, згідно з якою, якщо всі відповідні безрозмірні характеристики для двох процесів однакові, то вони подібні. У цьому випадку необхідне натурне явище замінюють на фізично подібне, яке доцільніше визначати на основі фізико-механічних характеристик [2]. Тривалість досліджень таких характеристик (модуля пружності, твердості, коефіцієнта тертя) є менша на два і більше порядки.

Наведемо деякий аналіз досліджень та публікацій з цього питання. Однією із проблем, яка сповільнює вирішення основних завдань трибології, є відсутність достовірних критеріїв вибору зносотривких матеріалів та їх сумісності для різних видів зношування, що визначається природою матеріалів у парі тертя [3]. Першопричиною цього є те, що до сьогодні не вдалося вирішити найважливіше завдання трибології – розкрити в повному об'ємі механізм зношування. Встановлено [3, 4], що для забезпечення найкращих показників зносотривкості в умовах сухого тертя для металополімерної пари необхідно в оптимальному співвідношенні поєднати основні характеристики матеріалу: статичну міцність, твердість, коефіцієнт тертя і пружність.

Оскільки за зміни структури полімерів у певній закономірності змінюються всі фізико-механічні властивості, то для дослідження механізму зношування не завжди доцільно контролювати трибологічний процес – його можна моделювати сукупністю інших параметрів. Встановлено [5–9], що наповнення епоксикомпозитів мінеральними дисперсними частками суттєво впливає на такі характеристики, як модуль пружності за згину, твердість (мікротвердість) та коефіцієнт тертя.

Відомо, що якщо всі відповідні безрозмірні характеристики (безрозмірні комбінації з розмірних величин) для двох процесів однакові, то процеси подібні [10]. На основі розгляду фізично подібних явищ можна з достатньою достовірністю прогнозувати мінімальне значення інтенсивності зношування зі зміною концентрації наповнювача, не вдаючись до довготривалих випробувань на зносотривкість, яка є оберненою величиною до інтенсивності зношування [11].

Мета роботи – змодельовати зносотривкість наповнених епоксикомпозитних матеріалів за відомими механічними характеристиками (модуль пружності за згину, твердість (мікротвердість) та коефіцієнт тертя).

Дослідження. Об'єктом дослідження вибрали епоксидний олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для його зшивання використали затвердзувач поліетиленполіамін (ТУ 6-05-241-202-78). Як наповнювач обрали оксид алюмінію дисперсністю 43 μm . Зразки формували методом гідродинамічного суміщення компонентів. Затверджували зразки за температури $T = 293 \pm 2$ К упродовж 24 h, після чого їх додатково термообробляли впродовж 2 h при 393 ± 2 К з подальшою механічною обробкою для надання їм необхідної форми та розмірів. Триботехнічні характеристики матеріалів досліджували за обертового руху у парі зі сталевим (*HRC* 40...45) циліндричним контртілом (\varnothing 40 mm) за швидкості ковзання $v = 0,5$ m/s і питомого навантаження $P = 0,5$ МПа згідно з методикою, наведеною у праці [12]. Товщина покриву 1 mm, ширина доріжки тертя 10 mm (рис. 1). Інтенсивність зношування визначали за формулою

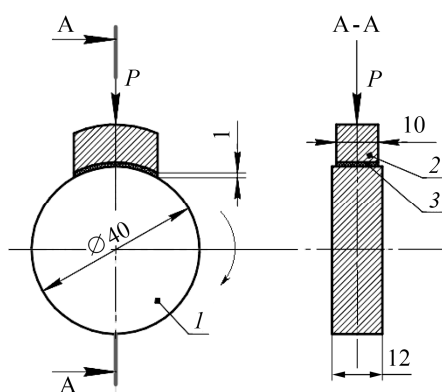
$$I = \Delta m / (L\rho S) \cdot 10^{-16},$$

де m – масове зношування, kg; L – шлях тертя, m; ρ – густина матеріалу, kg/m^3 ; S – площа тертя, m^2 .

Модуль пружності за згину визначали згідно з ГОСТ 9550-81. Концентрацію наповнювача у композиті задавали у масових частках (m.p.) на 100 m.p. зв'язувача.

Рис. 1. Схема для випробування триботехнічних властивостей матеріалу: 1 – контртіло; 2 – зразок; 3 – покрив з випробовуваного матеріалу.

Fig. 1. Scheme for testing of tribotechnical properties of material: 1 – a counterbody; 2 – specimens; 3 – tested material coating.



Триботехнічні випробування здійснювали в кілька етапів. Спочатку – припрацювання зразка. Поверхню припрацьовували на 30%, що визначали за допомогою мікроскопа з масштабною сіткою. Далі випробовували зразки не менше 10 h. На кожну концентраційну точку виготовляли не менше трьох зразків. Якщо похибка експерименту більша ніж 15%, кількість зразків збільшували до п'яти.

Інтенсивність зношування визначали за втратою маси з точністю до 0,5 mg на аналітичних вагах. Статистичну обробку виконували, використовуючи методику [13].

Коефіцієнт варіацій результатів вимірювань становив $\pm 10\%$ за коефіцієнта Стьюдента 0,9. Обробляли статистичні результати, використовуючи програмне забезпечення MatCAD (версія MatCAD 14).

Результати та їх обговорення. На першому етапі дослідили фізико-механічні та триботехнічні характеристики епоксикомпозитів залежно від вмісту наповнювача, а саме: модуль пружності (E), твердості (H), коефіцієнт тертя (f) та інтенсивність зношування (I). Отримані результати наведені у таблиці.

Залежність фізико-механічних та триботехнічних характеристик епоксикомпозитів від вмісту оксиду алюмінію на 100 т.р. зв'язувача

Вміст оксиду алюмінію, т.р.	5	30	40	60	70	100
$I \cdot 10^9$	37	32	36	40	24	13
f_{fr}	0,58	0,35	0,45	0,48	0,44	0,36
$E \cdot 10^{-2}$, МПа	35	40	50	62	69	80
H , МПа	330	220	210	235	260	335
$E \cdot I$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$2,98 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{-4}$
$f_{fr} \cdot E/H$	$6,15 \cdot 10^{-7}$	$6,36 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$8,60 \cdot 10^{-7}$

Далі побудували модель, яка описує залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитів від концентрації наповнювача q . Інтенсивність зношування є безрозмірною величиною, яка залежить від об'єму зношеного матеріалу, площі тертя, швидкості ковзання, довжини доріжки тертя, питомої маси композита. Два фізичних явища подібні, якщо за числовими значеннями характеристик одного явища можна отримати числові значення характеристик іншого за допомогою простого перерахунку, котрий аналогічний переходу від однієї системи одиниць вимірювання до іншої. Для перерахунків необхідно знати перехідні масштаби. Такими є безрозмірні коефіцієнти

$$\begin{aligned}
 5 \cdot x_1 + 0,58 \cdot x_2 + 3500 \cdot x_3 + 330 \cdot x_4 &= 37 \cdot 10^{-9}, \\
 30 \cdot x_1 + 0,35 \cdot x_2 + 4000 \cdot x_3 + 220 \cdot x_4 &= 32 \cdot 10^{-9}, \\
 60 \cdot x_1 + 0,48 \cdot x_2 + 6200 \cdot x_3 + 235 \cdot x_4 &= 40 \cdot 10^{-9}, \\
 100 \cdot x_1 + 0,36 \cdot x_2 + 8000 \cdot x_3 + 335 \cdot x_4 &= 13 \cdot 10^{-9},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де x_1-x_4 – вектор стовпця невідомих.

Відповідно до П-теореми, рівняння системи (1) містять безрозмірні коефіцієнти, розмірні величини, котрі якісно описують зношування. Іншими словами лінійна комбінація безрозмірних числових характеристик лівої частини кожного з рівнянь є перехідним масштабом для визначення безрозмірних величин в правій частині кожного з рівнянь.

Систему (1) можна записати у вигляді

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B},
 \tag{2}$$

де $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 5 & 0,58 & 3500 & 330 \\ 30 & 0,35 & 4000 & 220 \\ 60 & 0,48 & 6200 & 235 \\ 100 & 0,36 & 8000 & 335 \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 37 \\ 32 \\ 40 \\ 13 \end{pmatrix} \cdot 10^{-9}$, $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$.

Оскільки матриця $A_{i,j}$ не вироджена ($\det(A_{i,j}) \neq 0$), то система має розв'язок. Розв'язок (2) шукатимемо матричним методом: $x_i = A_{i,j}^{-1} \cdot B_j$, де x_i – компоненти вектор-стовпця невідомих. Обчисливши, отримаємо значення невідомих:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} -0,022 \\ -0,006 \\ 3,809 \\ -0,153 \end{pmatrix} \cdot 10^{-11}.$$

Перетворимо рівняння (1) до виду

$$\begin{aligned} 0,58 \cdot x_2 + 3500 \cdot x_3 + 330 \cdot x_4 &= 37 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot x_1, \\ 0,35 \cdot x_2 + 4000 \cdot x_3 + 220 \cdot x_4 &= 32 \cdot 10^{-9} - 30 \cdot x_1, \\ 0,48 \cdot x_2 + 6200 \cdot x_3 + 235 \cdot x_4 &= 40 \cdot 10^{-9} - 60 \cdot x_1, \\ 0,36 \cdot x_2 + 8000 \cdot x_3 + 335 \cdot x_4 &= 13 \cdot 10^{-9} - 100 \cdot x_1, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\mathbf{A}^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0,58 & 3500 & 330 \\ 0 & 0,35 & 4000 & 220 \\ 0 & 0,48 & 6200 & 235 \\ 0 & 0,36 & 8000 & 335 \end{pmatrix}$ – матриця коефіцієнтів лівих частин рівнянь (3).

Перетворене рівняння (3) можна записати в матричному вигляді $\mathbf{A}^0 \cdot x_s = \mathbf{B} - \mathbf{A}^1 \cdot x_s$, де

$$x_s = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,006 \\ 3,809 \\ -0,153 \end{pmatrix} \cdot 10^{-11}.$$

Необхідно зауважити, що ліву частину рівняння (3) визначають тільки механічні характеристики, які параметрично залежать від концентрації наповнювача. Крім того, рівняння (3) допускає не тільки рівність лівих і правих частин, але і їх подібність. Запишемо матрицю коефіцієнтів, зумовлених як $\mathbf{A}^0 \cdot x_5 = \mathbf{D}$,

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 3,50 & 13,30 & 5,04 \\ 0 & 2,11 & 15,20 & 3,36 \\ 0 & 2,90 & 23,60 & 3,59 \\ 0 & 2,17 & 30,50 & 5,11 \end{pmatrix} \cdot 10^{-8}. \quad (4)$$

Позначимо характеристики матеріалу (коефіцієнт тертя, модуль пружності та твердість) у вигляді скалярних операторів, використовуючи вираз (4), відповідно

$$f_{fr} = D^1, \quad E = D^2, \quad H = D^3.$$

Теорія подібності показує, що будь-яку функціональну залежність між фізичними параметрами досліджуваного об'єкта можна подати у вигляді залежності між критеріями подібності, які складені з фізичних параметрів. При цьому ці критерії є безрозмірними параметрами, які характеризують фізичну подібність процесів у досліджуваному об'єкті, і є константами для всіх подібних процесів. Тому визначимо безрозмірний коефіцієнт механічних характеристик $L_i = f_i \cdot E_i / H_i$, де підсумовування за i не відбувається ($i = 1 \dots 4$).

Обчисливши, отримаємо стовпець коефіцієнтів:

$$L_i = \begin{pmatrix} 9,273 \\ 9,593 \\ 19,09 \\ 12,96 \end{pmatrix} \cdot 10^{-8}. \quad (5)$$

Формула (5) якісно описує поведінку кривої зношування полімерного матеріалу як функцію концентрації наповнювача. Причому опис механічних характеристик подано без врахування масштабного фактора. Методом регресійного аналізу визначимо аналітичний вигляд функції, яка описує залежність інтенсивності зношування полімерного матеріалу від концентрації наповнювача. Запишемо вихідні дані, отримані експериментальним шляхом: $\mathbf{X} = \mathbf{A}^1$, $\mathbf{Y} = \mathbf{B}$. Методом поліноміальної регресії визначимо аналітичний вигляд функції $f(x)$, яка описує поведінку експериментальних точок. Ступінь апроксимувального полінома – 3. З використанням оператора *regress* програми MathCAD, яка створює єдиний поліном, коефіцієнти якого розраховують на основі сукупності заданих точок, знаходимо коефіцієнти:

$$\text{coeffs} = \begin{pmatrix} 4135 \\ -101,7 \\ 3,042 \\ -0,023 \end{pmatrix} \cdot 10^{-11}. \quad (6)$$

Середньоквадратичне відхилення “хмари” точок дорівнює 1. Запишемо рівняння регресії:

$$f(x) = -2,309 \cdot 10^{-13} x^3 + 3,042 \cdot 10^{-11} x^2 - 1,017 \cdot 10^{-9} x + 4,135 \cdot 10^{-8}. \quad (7)$$

На рис. 2 наведені криві, побудовані за експериментальними точками та рівнянням регресії (7).

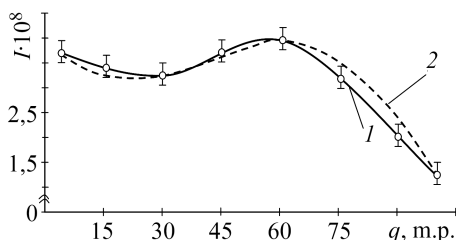


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитів від концентрації Al_2O_3 :

1 – експериментальна залежність;
2 – згідно з рівнянням регресії (7).

Fig. 2. Dependence of wear intensity of composites on Al_2O_3 concentration:

1 – experimental dependence;
2 – according to regression equation (7).

Як бачимо, теоретична та експериментальна криві збігаються у межах похибки експерименту. За більшого наповнення понад 100 м.р. на 100 м.р. зв'язувача не експериментували у зв'язку з неповним змочуванням наповнювача зв'язувачем.

ВИСНОВКИ

Використавши основні положення теорії подібності, якісно оцінили інтенсивність зношування полімерних матеріалів на основі їх характеристик, у тому числі коефіцієнта тертя. Така методика дає можливість не виконувати тривалі експерименти, пов'язані з дослідженнями інтенсивності зношування, а також оптимізувати концентрацію наповнювача, зважаючи на фізико-механічні характеристики композита.

РЕЗЮМЕ. Композитные материалы на основе термореактивных полимеров, благодаря комплексу физико-механических и эксплуатационных характеристик, широко используют во всех отраслях промышленности Украины для защиты оборудования от коррозии и износа, в том числе в качестве антифрикционных материалов. Разработана модель для композитов на основе эпоксидного олигомера и оксида алюминия, позволяющая оценить интенсивность износа материала без использования машины трения. Для решения этой задачи использовали теорию подобия, согласно которой, когда все соответствующие безразмерные характеристики для двух процессов одинаковы, тогда они похожи. На основе экспериментальных результатов, полученных при исследовании коэффициента трения, модуля упругости и твердости эпоксикомпозитов, предложена модель для прогнозирования износа материалов в зависимости от содержания оксида алюминия. Использование такой модели обеспечивает корреляцию результатов моделирования с экспериментальными данными.

SUMMARY. Composite materials based on thermosetting polymers due to the complex physicomachanical and operational characteristics, are widely used in all industries to protect equipment from corrosion and wear, and also as antifriction materials. A model that would allow us to estimate the linear wear of the material without the use of friction machine for composites based on epoxy oligomer and aluminum oxide is developed. To solve this problem the theory of similarity is used, wherein the similarity and equality of the relevant dimensionless characteristics for the two processes indicates the similarity of these processes. On the basis of experimental data obtained in the study of friction coefficient, modulus of elasticity and hardness of epoxy composites, the authors developed a model to predict the linear wear of materials depending on the content of aluminum oxide. The proposed model provides a high degree of simulation results correlation with the results obtained experimentally.

1. Алтоиз Б. А., Поповский Ю. М. Физика приповерхностных слоев. – Одесса: Астропринт, 1995. – 154 с.
2. Дослідження адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів, наповнених нанотрубками / О. О. Сапронов, О. С. Рожков, О. В. Лещенко, О. С. Голотенко // Наук. вісник ХДМА. – 2014. – № 2. – С. 197–202.
3. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие / Н. Е. Денисова, В. А. Шорин, И. Н. Гонтарь, Н. И. Волчихина, Н. С. Шорина / Под общ. ред. Н. Е. Денисовой. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 250 с.
4. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю. К. Машков, К. Н. Полещенко, С. Н. Поворознюк, П. В. Орлов. – М.: Наука, 2000. – 278 с.
5. Gel fractions and chain reactions in irradiated polyethylenes / R. A. Jones, D. J. Groves, I. M. Ward, D. J. R. Taylor, R. F. T. Stepto // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1999. – Vol. B 151. – P. 213–217.
6. Магомедов Г. М., Магомедов М. Р., Козлов Г. В. Структурный анализ процесса стеклования дисперсно-наполненных нанокомпозитов на основе эпоксидного полимера // Материаловедение. – 2011. – № 3. – С. 52–55.
7. Стухляк П. Д., Близнец М. М. О влиянии оксидов металлов на износостойкость модифицированных эпоксидных смол // Трение и знос. – 1989. – **10**, № 3. – С. 473–478.
8. Основы теории межфазного слоя / И. Ф. Образцов, С. А. Лурье, П. А. Белов, Д. Б. Волков-Богородский, Ю. Г. Яновский, Е. И. Кочемасова, А. А. Дудченко, Е. М. Потупчик, Н. П. Шумова // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – **10**, № 4. – С. 128–135.
9. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Кальба Є. М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
10. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2-х т. – М.: Наука, 1984. – Т. 2. – 560 с.
11. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2-х т. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – 492 с.
12. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки триботехнических свойств материалов на основе полимеров: МР 74-82. – М.: ВНИИНМАШ, 1982. – 14 с.
13. Зожигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Статистика, 1973. – 390 с.

Одержано 27.03.2017