

Олександр Володимирович Фандєєв¹, Олексій Юрійович Полоз²

¹магістрант кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів
Український державний університет науки і технологій.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: sanyuyfandeev1991@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0002-2930-3112>

²кандидат технічних наук, докторант кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів
Український державний університет науки і технологій.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: ua.apolo@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5577-3869>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6505811695>

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСОВИХ РЕЖИМІВ
ПОСТ-ОТВЕРДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙ**

Із застосуванням методу математичного планування експерименту Бокса-Уїлсона встановлено оптимальний режим пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій, що може застосовуватись при виготовленні деталей різних габаритів та товщини, покриттів. Порівняльною оцінкою серійного та розробленого оптимізованого режимів пост-отвердження товстостінних високонаповнених мультидисперсним силіцій карбідом зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів) доведено можливість скорочення загального циклу процесу за оптимізованим режимом з покращенням зносостійкості і фізико-механічних властивостей.

Ключові слова: епоксидні зносостійкі композиції; оптимізація режиму; пост-отвердження; газоабразивне зношування; рельєф зношеного поверхневого шару; піскові насадки гідроциклона.

Табл.: 6. Рис.: 1. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. Забезпечення зносостійкості деталей різноманітного обладнання є обов'язковою умовою його надійної роботи, оскільки внаслідок зношування відбувається втрата роботоздатності багатьох деталей [1; 2]. Зношування деталей і вузлів обладнання для переробки абразивних сумішей у гірничозбагачувальній, хімічній та інших галузях промисловості веде до значних економічних втрат, що складаються із втрат від зниження продуктивності, беззворотного убутку матеріалів, простойв обладнання при ремонті. Для виготовлення та ремонту деталей обладнання, що зазнає дії твердих абразивних частинок у потоці газу або рідини, захисних покриттів внутрішніх та зовнішніх поверхонь насосів, транспортних систем, гідроспоруд у світовій практиці широко використовуються полімерні композиційні матеріали на основі епоксидних смол, поліуретанів, полісечовин, гум [3-6]. З-поміж цих матеріалів значне поширення мають епоксидні завдяки доступності сировини, високій зносо-, агресивостійкості, міцності, високій адгезії до багатьох матеріалів різної природи, можливості отвердження за енергозберігаючою технологією – за звичайної (20 °С) температури [7-8].

Для покращення експлуатаційних властивостей епоксидних композиційних матеріалів у більшості випадків проводиться їх пост-отвердження при температурах 60-120°С, оптимізація режимів якого є актуальною задачею сьогодення.

Постановка проблеми. У виробничих умовах і особливо при виконанні ремонтних робіт можливі відхилення від встановлених режимів пост-отвердження деталей, покриттів із епоксидних зносостійких композицій внаслідок їх різних габаритів та товщини (коліна пневмотранспорту, гідроциклони, робочі колеса ґрунтових насосів, піскові насадки та ін.), що впливає на розподіл температур по товщині виробів, ступінь отвердження і, відповідно, їх експлуатаційні властивості. У цих умовах необхідним є розроблення режиму пост-отвердження таких виробів з поступовим підйомом температури в доступних межах, що дозволить зменшити негативні наслідки температурних перепадів на роботоздатність деталей та покриттів із захисних епоксидних композицій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення зносостійкості захисних епоксидних композицій знаходяться в центрі уваги багатьох провідних наукових центрів та установ. Інтенсивні дослідження в цьому напрямку проводяться в США,

Китаї, Індії, країнах Європейського Союзу, де працює значна кількість вартісного обладнання, гідроспоруд, що потребують захисту від зношування при дії потоку передаваних матеріалів різної твердості та розмірів. Найбільша увага в цих дослідженнях приділяється застосуванню ефективних полімерних матриць в захисних композиціях [3], насамперед епоксидних смол різної будови [4; 9], дисперсних наповнювачів [10-17], у тому числі нанорозмірних [18; 19]. Перспективними для покращення властивостей епоксидних композицій є їх модифікація енергетичними полями – магнітним, електростатичним, ультрафіолетовим опромінюванням [20]. Проте до теперішнього часу найбільш доступним і застосованим способом покращення експлуатаційних характеристик полімерних композиційних матеріалів, у тому числі і епоксидних, залишається традиційний – прогнозована зміна температури й часу їх пост-отвердження [21-25] для забезпечення оптимальних технологічних режимів їх зшивання. Звичайно пост-отвердження деталей із епоксидних композицій, попередньо отверджених за енергозберігаючою технологією при звичайній (20 °C) температурі, проводять при температурах нижче температури їх склування (60-120 °C) або вище (наприклад, 150 °C [25]). Застосування більш високих температур пост-отвердження, особливо коли епоксидні композиції використовуються при ремонті та відновленні композитних деталей обладнання, призводить до погіршення їх властивостей внаслідок перебігу процесів деструкції композитної матриці та ремонтного епоксидного матеріалу. У більшості досліджень вплив температури пост-отвердження на зміну властивостей епоксидних композицій з'ясовується при застосуванні певного постійного терміну проведення цього процесу [21-25], що не дозволяє його коригувати при відхиленні температури від заданої за режимом. Таким чином, дослідження впливу одночасної зміни температури і терміну проведення пост-отвердження епоксидних композицій надасть об'єктивну інформацію для забезпечення їхніх оптимальних експлуатаційних властивостей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх опублікованих досліджень показав, що питанням підвищення зносостійкості епоксидних композиційних матеріалів приділяється значна увага, оскільки зносостійкість багатьох деталей різноманітного обладнання сприяє зменшенню його простоїв і є дієвим фактором резервів виробництва. Одним із напрямків покращення характеристик захисних епоксидних матеріалів і, відповідно, експлуатаційної витривалості виробів із них є їх пост-отвердження (доотвердження), режими якого, як правило, повністю не наводяться, становлять «ноу-хау» виробників. В цьому зв'язку проведення досліджень з встановлення оптимальних режимів пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій з можливістю прогнозування впливу їх зміни на зносостійкість і основні фізико-механічні властивості захисних матеріалів є доцільним та необхідним.

Метою статті є визначення оптимального режиму постадійного пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій з можливим прогнозуванням зміни їхніх властивостей при температурних відхиленнях від цього режиму.

Виклад основного матеріалу. Для визначення оптимального температурно-часового режиму пост-отвердження епоксидних зносостійких композицій було проведено математичне планування експерименту за методом Бокса-Уілсона [26], який дозволяє отримати відповідні рівняння взаємозв'язку досліджених режимів із властивостями отверджених композитів (фізико-механічними, зношуванням при дії абразиву під різними кутами атаки). При виборі температурно-часових режимів пост-отвердження епоксидних композицій враховували результати попередньо проведених досліджень з впливу температури (60-140°C) та часу (1-3 год.) пост-отвердження на їх в'язкопружні [27] і термомеханічні властивості [21].

При проведенні досліджень як основу зносостійких епоксидних композицій використовували епоксидну діанову смолу CHS-Ероху 525 виробництва фірми Spolchemie, Чехія (епоксидний еквівалент 179-189 г/екв, динамічна в'язкість при 25 °С 10-12 Па·с), у яку для зменшення початкової в'язкості композицій та покращення розподілення в ній поліаміного отверджувача Poly7 (15 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли) виробництва фірми Tosoh Corporation, Японія (суміш поліетиленполіаміну – 60-80 мас.%, пентаетиленгексаміну – 10-30 мас.%, тетраетиленпентаміну – 9 мас.%, амінне число 1200-1280 мг КОН/г) додатково вводили епоксидовмісний розбавник CHS-Ероху RR690 виробництва фірми Spolchemie, Чехія (тригліцидиловий ефір триметилпропану, епоксидний еквівалент 145 г/екв, динамічна в'язкість при 25°С 150 мПа·с). Вибір епоксидної діанової смоли CHS-Ероху 525 обумовлений високими фізико-механічними властивостями композиційних матеріалів на основі діанових епоксидних смол, можливістю їх отвердження за звичайної температури (20 °С) без застосування енергоносіїв. Застосування поліаміну Poly7 дозволяє проводити основний процес отвердження при 20°С (20°С×24 год.), для більш повного перебігу якого застосовували додаткове пост-отвердження при 60-120°С впродовж 1-3 год. Завершення процесу отвердження характеризували вмістом золь-фракції за відомою методикою [21] в ненаповнених композиціях, використання яких дозволяє в більш повній мірі виявити їх структурні зміни при пост-отвердженні. Температура пост-отвердження 140 °С була виключена при дослідженні, оскільки її застосування не тільки збільшує енерговитрати, а й призводить до погіршення експлуатаційних властивостей композицій внаслідок перебігу в значній мірі процесів деструкції [21], збільшенню вмісту золь-фракції в них до 4,0 мас.%. Епоксидні композиції виготовляли шляхом введення епоксидної смоли CHS-Ероху 525, епоксидовмісного розбавника CHS-Ероху RR690 в реактор періодичної дії при температурі 60 °С, компоненти перемішували впродовж 10 хв. Поліамін Poly7 додавали до необхідної кількості епоксидних композицій перед їх застосуванням при 20-25 °С, перемішували впродовж 5 хв. Готові композиції з поліаміном Poly7 заливали у відповідні форми, отверджували за режимом 20°С×24 год та пост-отверджували в термостаті при 60-120 °С впродовж 1-3 год.

Фізико-механічні характеристики пост-отверджених зразків визначали відповідно до діючих стандартів, зносостійкість характеризували їх зношуванням відповідно до ГОСТ 23.201-78. Випробування на зносостійкість проводили в найбільш жорстких умовах – при швидкості дії потоку частинок річкового піску розмірами 0,5-0,9 мм 76 м/с, створеного відцентровим прискорювачем ЦУК-3. Зразки розмірами 15×20×4 мм встановлювали на установці в положенні відповідно до кута атаки абразиву 15, 30, 45, 60, 90°. Морфологію поверхні епоксидних композицій після газоабразивного зношування досліджували із застосуванням цифрового оптичного USB-мікроскопу Microsafe Shiny Vision MM-2288-5X-BN (Китай).

При визначенні оптимального режиму пост-отвердження епоксидних композицій за методом Бокса-Уілсона для зменшення експериментальних витрат використовували план першого порядку – дробний факторний експеримент 2^{4-1} , матриця якого наведена в табл. 1, з варіюванням чотирьох змінних – температур пост-отвердження 60, 80, 100, 120 °С. За основний рівень пост-отвердження композицій був прийнятий час у 2 год., оскільки за цей час переважно досягався стабільний рівень властивостей, інтервал змінних – 1 год. У табл. 2 представлено властивості пост-отверджених епоксидних композицій згідно до матриці планованого експерименту. На підставі експериментальних даних, наведених у табл. 2, були розраховані коефіцієнти рівнянь регресії поліному

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \quad (1)$$

залежності властивостей композицій від температурно-часових режимів їх пост-отвердження. Коефіцієнти рівнянь регресії b_j розраховували за формулою [26]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_{ji}}{n}, \tag{2}$$

де b_j – коефіцієнт рівняння регресії при j -факторі; y_i – значення параметру оптимізації; x_{ij} – кодоване значення j -го фактора в i -му досліді; n – число дослідів.

Таблиця 1 – Матриця планування дробного факторного експерименту 2^{4-1} та температурно-часові режими пост-отвердження епоксидних композицій згідно з цією матрицею

Номер досліду	Змінні					Термін пост-отвердження (год) для змінних			
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1 (60°C)	x_2 (80°C)	x_3 (100°C)	x_4 (120°C)
1	+	+	+	+	+	3	3	3	3
2	+	+	+	-	-	3	3	1	1
3	+	+	-	+	-	3	1	3	1
4	+	+	-	-	+	3	1	1	3
5	+	-	+	+	-	1	3	3	1
6	+	-	+	-	+	1	3	1	3
7	+	-	-	+	+	1	1	3	3
8	+	-	-	-	-	1	1	1	1

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Вплив температурно-часових режимів пост-отвердження епоксидних композицій згідно з матрицею планованого експерименту на їхні фізико-механічні властивості та зношування

Номер досліду	Фізико-механічні властивості				Зношування ($\Delta V \cdot 10^3$, см ³) при кутах атаки абразиву, градуси				
	міцність при розтягуванні, МПа	міцність при статичному згині, МПа	міцність при стисненні, МПа	ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м ²	15	30	45	60	90
1	25,44	93,11	128,94	18,42	3,5	11,4	13,3	8,6	4,2
2	31,19	98,87	124,26	22,02	3,8	13,2	15,8	8,9	6,1
3	30,97	97,70	120,30	16,31	4,7	14,9	16,2	11,2	5,6
4	30,62	91,54	126,08	17,04	5,7	13,9	16,1	10,6	5,8
5	36,63	121,00	125,34	24,86	5,5	8,0	13,0	8,8	5,2
6	28,93	119,61	122,34	24,00	6,2	8,6	13,5	9,1	4,8
7	28,47	120,59	123,95	25,91	5,6	11,4	15,3	8,7	4,7
8	23,19	83,55	109,30	15,89	7,3	16,5	17,8	12,9	6,7

Джерело: розроблено авторами

Отримані рівняння регресії властивостей епоксидних композицій мали такий вид:

- зношування ($\Delta V \cdot 10^3$, см³) при різних кутах атаки абразиву y_1

$$y_{1, 15^\circ} = 5,2875 - 0,8625 x_1 - 0,5375 x_2 - 0,4625 x_3 - 0,0375 x_4; \tag{3}$$

$$y_{1, 30^\circ} = 12,2375 + 1,1125 x_1 - 1,9375 x_2 - 0,8125 x_3 - 1,1750 x_4; \tag{4}$$

$$y_{1, 45^\circ} = 15,1250 + 0,2250 x_1 - 1,2250 x_2 - 0,6750 x_3 - 0,5750 x_4; \tag{5}$$

$$y_{1, 60^\circ} = 9,8500 - 0,0250 x_1 - 1,0000 x_2 - 0,5250 x_3 - 0,6000 x_4; \tag{6}$$

$$y_{1, 90^\circ} = 5,3875 + 0,0375 x_1 - 0,3125 x_2 - 0,4625 x_3 - 0,5125 x_4; \tag{7}$$

- ударна в'язкість за Шарпі (кДж/м²) y_2

$$y_2 = 20,56 - 2,11 x_1 + 1,77 x_2 + 0,82 x_3 + 0,78 x_4; \tag{8}$$

- міцність при стисненні (МПа) y_3

$$y_3 = 122,56 + 2,33 x_1 + 2,66 x_2 + 1,94 x_3 + 2,76 x_4; \tag{9}$$

- міцність при статичному згині (МПа) y_4

$$y_4 = 103,12 - 7,94 x_1 + 4,90 x_2 + 4,85 x_3 - 0,78 x_4; \tag{10}$$

- міцність при розтягуванні (МПа) y_5

$$y_5 = 29,43 + 0,34 x_1 + 1,12 x_2 - 0,95 x_3 - 0,82 x_4. \quad (11)$$

Основний технічний результат, який необхідно було досягти при оптимізації температурно-часових режимів пост-отвердження епоксидних композицій, - зменшення їх зношування. Найбільше зношування (табл. 2) епоксидних композицій відбувається при куті атаки абразиву 45° . Виконані розрахунки за рівнянням (5) довели добру їх відповідність експериментальним даним (відхилення розрахункових значень зношування від експериментальних становлять не більше $\pm 5\%$).

Аналіз рівняння регресії (5) показав, що найбільший вплив на зношування епоксидних композицій вносять змінні x_2 (температура 80°C), x_3 (температура 100°C), x_4 (температура 120°C), коефіцієнти b_2 , b_3 , b_4 , при яких найбільші. Змінна x_1 (температура пост-отвердження 60°C) негативно впливає на зношування епоксидних композицій (сприяє збільшенню зношування композицій у порівнянні з основним рівнем). Абсолютна величина коефіцієнтів в рівнянні регресії (5) та їх знак надають можливість кількісно оцінити вплив кожної температури пост-отвердження на зношування та інші властивості композицій: відповідно до знаку «-» при коефіцієнтах b_2 , b_3 , b_4 для зменшення зношування епоксидних композицій необхідно застосовувати їх пост-отвердження при температурах $80\text{-}120^\circ\text{C}$. Однак слід враховувати, що при збільшенні температури пост-отвердження зростає вірогідність нерівномірного розподілу температур в виробках (особливо в товстостінних), що призводить до погіршення їх якості.

Для досягнення більш рівномірного розподілу температур у різних зонах виробів з урахуванням значень коефіцієнтів при змінних x_2 , x_3 , x_4 доцільно проводити процес пост-отвердження епоксидних композицій при температурах 80 , 100°C . Зі збільшенням тривалості пост-отвердження епоксидних композицій у відповідності із знаком «-» при коефіцієнтах b_2 і b_3 їх зношування буде зменшуватись, що і відповідає поставленій меті дослідження. Тому при розрахунках величини кроків варіювання змінних x_2 та x_3 знак при коефіцієнтах b_2 і b_3 був змінений з «-» на «+». При русі до області оптимуму зношування епоксидних композицій при 45° (рівняння $y_{1,45^\circ}$) було прийнято в якості основного їх показника (найбільш негативний ефект зношування композицій, який потрібно зменшити), інші рівняння регресії залежності властивостей епоксидних композицій від температурно-часових режимів пост-отвердження використовували в якості накладання обмежень. Величини кроків варіювання змінних x_2 , x_3 при русі до області оптимуму розраховували за формулою [26]:

$$\Delta_j = \frac{\varepsilon_j \cdot b_j}{c}, \quad (12)$$

де Δ_j – крок варіювання j фактору;

ε_j – інтервал варіювання j фактору;

b_j – коефіцієнт рівняння регресії при j факторі;

c – постійна величина, що обирається довільно.

Розрахунок величин кроків варіювання змінних факторів наведено в табл. 3. Додаванням кроків варіювання до величини основного рівня знаходили режими пост-отвердження епоксидних композицій для просування до області оптимуму (табл. 4); відповідні їм властивості композицій представлено в табл. 5, а на рисунку наведено морфологію зношених поверхневих шарів цих композицій. Аналіз даних табл.5 та рис. показав, що оптимальним за комплексом властивостей є наступний режим пост-отвердження епоксидних композицій: $80^\circ\text{C} \times 2,4 \text{ год} + 100^\circ\text{C} \times 2,2 \text{ год}$ (композиція 10, що відповідає цьому режиму), при застосуванні якого спостерігається найбільш рівномірне абразивне зношування композицій. Область компромісного оптимуму досліджувати було недоцільно, оскільки при цьому терміни пост-отвердження епоксидних композицій потрібно ще більше звузити (відповідно до основного оптимального режиму до 3-6 хв), що немає сенсу про проведенні процесу пост-отвердження в промислових умовах.

Таблиця 3 – Величини кроків варіювання факторів оптимізації при русі до області оптимуму

Фактори	Змінні	
	x_2 (80°C)	x_3 (100°C)
ϵ_j	1,0	1,0
b_j	+1,2250	+0,6750
c	6	6
Δ_j	~ 0,20	~ 0,10

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 4 – Режими пост-отвердження епоксидних композицій при русі до області оптимуму

Номер досліду	Терміни пост-отвердження (год) при температурах	
	80°C	100°C
0	2,00	2,00
9	2,20	2,10
10	2,40	2,20
11	2,60	2,30
12	2,80	2,40

Джерело: розроблено авторами.

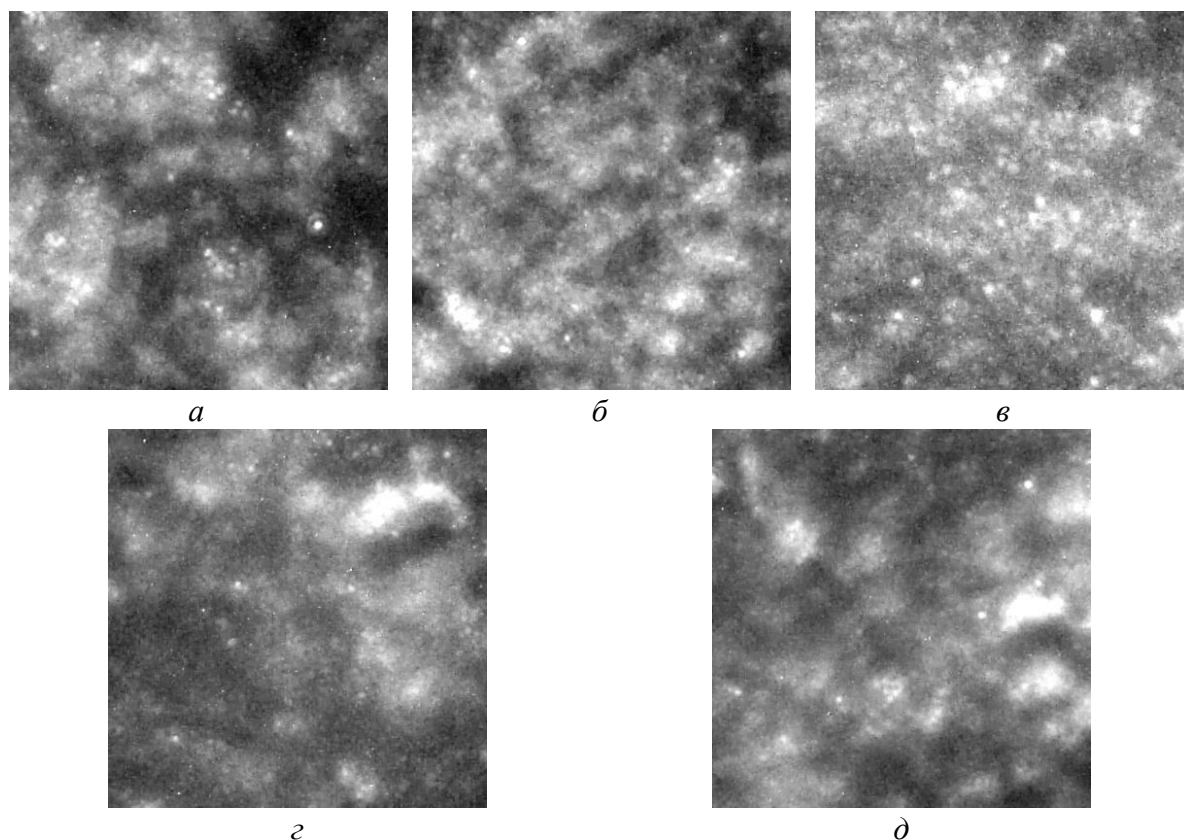


Рис. Морфологія зношених поверхневих шарів епоксидних композицій ($\times 100$) при просуванні до області оптимуму (кут атаки абразиву 45°):
 а – дослід 0; б – дослід 9; в – дослід 10; г – дослід 11; д – дослід 12

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 5 – Властивості епоксидних композицій після пост-отвердження при русі до області оптимуму

Властивості композицій	Номер дослідю				
	0	9	10	11	12
Зношування ($\Delta V \cdot 10^3$, см ³) при кутах атаки абразиву, градуси					
15	2,6	1,9	1,5	1,7	1,8
30	4,1	4,0	3,9	4,4	4,7
45	5,7	5,2	5,0	5,6	6,0
60	3,5	3,4	3,2	3,8	4,3
90	2,6	2,3	2,0	2,3	2,4
Міцність при стисненні, МПа	123,4	124,6	126,5	124,4	123,3
Міцність при статичному згині, МПа	119,0	121,1	122,3	119,4	115,9
Міцність при розтягуванні, МПа	30,8	34,2	36,6	31,6	30,0
Ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м ²	22,7	24,3	26,6	24,1	22,8

Джерело: розроблено авторами.

Порівняльною оцінкою серійного (ТОВ «Нові технології, м. Дніпро) та розробленого режимів пост-отвердження товстостінних високонаповнених мультидисперсним силіцій карбідом зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів) доведено більшу ефективність оптимізованого режиму (табл. 6), при застосуванні якого скорочується загальний цикл пост-отвердження виробів і забезпечується досягнення їх більш високих показників зносостійкості та фізико-механічних властивостей.

Таблиця 6 – Вплив режимів пост-отвердження на властивості товстостінних зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів ГЦК-710), наповнених мультидисперсним силіцій карбідом

Властивості	Режими пост-отвердження	
	серійний (60-110°C)×8 год.	розроблений оптимізований (80-100°C)×4,6 год.
Максимальне зношування, $\Delta V \cdot 10^3$, см ³	56,1	29,8
Міцність при стисненні, МПа	120,0	144,3
Міцність при статичному згині, МПа	60,2	65,0
Міцність при розтягуванні, МПа	20,3	24,8
Ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м ²	3,4	3,5

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Із застосуванням методу математичного планування експерименту Бока-Уілсона встановлено оптимальний режим пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій (80°C × 2,4 год. + 100°C × 2,2 год.), що може застосовуватись при виготовленні та ремонті деталей різних габаритів та товщини, покриттів.

Проведено аналіз рівнянь регресії залежності основних властивостей епоксидних композицій від температурно-часових режимів їх пост-отвердження і показано напрямки можливого їх покращення при коригуванні температур пост-отвердження.

Встановлено вплив кута атаки абразиву при газоабразивному зношуванні епоксидних композицій на їх зносостійкість і виявлено, що максимальне зношування ненаповнених композицій відбувається при куті атаки абразиву 45°, що необхідно враховувати при експлуатації виробів.

Методом оптичної мікроскопії з'ясовано зміну рельєфу зношеного поверхневого шару композицій при куті атаки абразиву 45° від температурно-часових режимів пост-отвердження і встановлено більш однорідне їх зношування при застосуванні розробленого оптимального режиму пост-отвердження.

Порівняльною оцінкою серійного (ТОВ «Нові технології», м. Дніпро) та розробленого оптимізованого режимів пост-отвердження товстостінних високонаповнених мультидисперсним силіцій карбідом зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів) доведено можливість скорочення загального циклу процесу за оптимізованим режимом при покращенні зносостійкості і фізико-механічних властивостей.

Список використаних джерел

1. Полоз, А. Ю. Выбор параметров для сравнительной оценки износостойкости эпоксидных композиционных материалов / А. Ю. Полоз, С. Г. Липицкий, С. Н. Куценко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №5/3 (31). – С. 26-31. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81253>.
2. Горяева, Ю. Є. Порівняльні дослідження працездатності матеріалів при зношуванні в потоці абразивних часток / Ю. Є. Горяева, О. А. Семенець, В. М. Анісімов // Питання хімії і хімічної технології. – 2003. – № 6. – С. 128-131.
3. Xu Liqun. Hydraulic Abrasion-Resistant Elastic Epoxy Resin Materials / Liqun Xu, Kai Zhang, Yanhui Liu // Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol.2019. – Article ID 9358139. – P.1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/9358139>.
4. Shu-fang M. Study and application of “Sea Island structure” epoxy resin “alloy” materials resistant to erosion and abrasion / M. Shu-fang, F. Wenshi, L. I. Jingwei // Construction Technology. – 2005. – Vol. 34. – No. 4. – P.36–39.
5. Cryogenic mechanical properties of epoxy resin toughened by hydroxyl-terminated polyurethane / Tong Wu, Yu Liu, Na Li et al. // Polymer Testing. – 2019. – Vol. 74. – P.45–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.048>.
6. Composite Materials Engineering (Modeling and Technology) / ed. by Alexander V. Vakhrushev, A. K. Haghi. – Apple Academic Press, 2019. – 236 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429242762>.
7. Lee H. L. Handbook of epoxy resins / H. L. Lee, K. Neville. – McGraw-Hill Book Co., 1967. – 960 p.
8. Epoxy polymers: new materials and innovations / Edited by J. R. Pascault and J. J. Williams. – WileyYCH, 2010. – 367 p.
9. Стухляк, П. Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий / П. Д. Стухляк. – Тернополь : Збруч, 1994. – 177 с.
10. Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus / Amal Nassar, Mostafa Salem, Ismail El-Batanony, Eman Nassar // Polymers and Polymer Composites. – 2021. – Vol. 29 (95). – Pp. 389-399. DOI: <https://doi.org/10.1177/09673911211002731>.
11. Xia Hongyan. Superior wear resistance of epoxy composite with highly dispersed graphene spheres / Hongyan Xia, Jiajia Li, Kai Wang // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2022. – No. 5. – Pp. 173-183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00259-4>.
12. Improved Wear-Resistant Performance of Epoxy Resin Composites Using Ceramic Particles / Amal Nassar, Mona Younis, Mohamed Ismail, Eman Nassar // Polymers. – 2022. – Vol. 14 (2). – Pp. 2-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14020333>.
13. Zhang Zhicai. Reinforced Superhydrophobic Anti-Corrosion Epoxy Resin Coating by Fluorine-Silicon-Carbide Composites / Zhicai Zhang, Nie Zhao, Fugang Qi // Coatings. – 2020. – Vol. 10 (12). – Pp. 2-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10121244>.
14. Полоз, О. Ю. Поведінка зносостійких епоксидних композицій в умовах контактної-динамічного навантаження / О. Ю. Полоз, Ю. Р. Ебич // Проблеми тертя та зношування. – 2021. – № 2(91). – С. 46-52. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528).
15. Optimum abrasive wear resistance for epoxy composites reinforced with polyethylene (PET) waste using Taguchi design and neural network / Salwa A. Abed, Ahmad A. Khalaf, Muzher Taha Mohamed, Muammal M. Hanon // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 1. – No. 12(121). – Pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272534>.
16. Ray Subhrajit. Parametric Optimization and Prediction of Abrasion Wear Behavior of Marble-Particle-Filled Glass-Epoxy Composites Using Taguchi Design Integrated with Neural Network / Subhrajit Ray // The Minerals, Metals & Materials Society. – 2021. – Vol. 73. – No. 7. – Pp. 2050-2059. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04698-8>.

17. Huang Zhiping. Tribological and anti-corrosion performance of epoxy resin composite coatings reinforced with differently sized cubic boron nitride (CBN) particles / Zhiping Huang, Wenjie Zhao, Wenchao Zhao // *Friction*. – 2021. – Vol. 9. – Issue 1. – Pp. 104-118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0329-8>.
18. Alhazmia, W. H. Tribological and Mechanical Properties of Epoxy Reinforced by Hybrid Nanoparticles / W.H. Alhazmia, Y. Jazaab, S. Mousa // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2021. – Vol. 18. – No. 3. – Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78256384>.
19. Shahabaz, S. M. Effect of Al₂O₃ and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites / S. M. Shahabaz, Prakhar Mehrotra, Hridayneel Kalita // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7. – Issue 4, 133. – P. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs7040133>.
20. Стухляк, П. Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов, І. Г. Добротвор. – Тернопіль : Збруч, 2008. – 208 с.
21. Полоз, А. Ю. Термомеханические свойства износостойких эпоксидных композиций / А. Ю. Полоз, Ю. Р. Эбич, С.В. Жильцова // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2015. – Т. 1(99). – С. 58-72.
22. Burchak Mostefa. Effect of preheating and post-curing time on the mechanical properties of epoxy resin / Mostefa Burchak, Adnan Khan, Khalid A. Juhany // *Advanced Composites Letters*. – 2013. – Vol. 22. – Issue 5. – Pp. 95-99.
23. Influence of curing, post-curing and testing temperatures on mechanical properties of a structural adhesive / Younes Jahani, Marta Baena, Cristina Barris, Ricardo Perera, Lluís Torres // *Construction and Building Materials*. – 2022. – No. 324. – Article ID 126698. – Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126698>.
24. Optimization of the Curing and Post-Curing Conditions for the Manufacturing of Partially Bio-Based Epoxy Resins with Improved Toughness / Diego Lascano, Luis Quiles-Carrillo, Sergio Torres-Giner, Teodomiro Boronat, Nestor Montanes // *Polymers*. – 2019. – Vol. 11. – Issue 8. – Article ID 1354. – Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11081354>.
25. Sambayi P. M. K. Effects of multiple post cure cycles on properties of composite carbon fibre and epoxy materials / P. M. K Sambayi, P. S. Heyns // *Journal of Composite Materials*. – 2023. – Vol. 57. – Issue 15. – Pp. 2467-2481. DOI: <https://doi.org/10.1177/00219983231169333>.
26. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
27. Вязкоупругие свойства износостойких эпоксидных композитов / А. Ю. Полоз, Ю. Р. Эбич, Р. М. Долинская, В. В. Мозгалев // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2013. – № 5. – С. 72-77.

References

1. Poloz, A. Yu., Lipitsky, S. G., & Kushchenko, S. N. (2016). *Vybor parametrov dlya sravnitel'noy otsenki iznosostoykosti epoksidnykh kompozitsionnykh materialov* [Selection of parameters for comparative assessment of wear resistance of epoxy composite materials]. *Tekhnologicheskiiy audit i rezervy proizvodstva – Technology Audit and Production Reserves*, (5/3 (31)), 26-31. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81253>.
2. Goryaeva, Yu. E., Semenets, O. A., & Anisimov, V. M. (2003). *Porivnyal'ni doslidzhennya pratszedatnosti materialiv pry znoshuvanni v pototsi abrazivnykh chastok* [Comparative studies of the workability of materials during wear in the flow of abrasive particles]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (6), 128-131.
3. Liqun, Xu, Kai, Zhang, & Yanhui, Liu. (2019). Hydraulic Abrasion-Resistant Elastic Epoxy Resin Materials. *Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering*, (2019, 9358139), 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/9358139>.
4. Shu-fang, M., Wenshi, F., & Jingwei, L.I. (2005). Study and application of “Sea Island structure” epoxy resin “alloy” materials resistant to erosion and abrasion. *Construction Technology*, (34 (4)), 36–39.
5. Wu, Tong, Liu, Yu, Li, Na, Huang, Gui-Wen, Qu, Cheng-Bing & Xiao, Hong-Mei (2019). Cryogenic mechanical properties of epoxy resin toughened by hydroxyl-terminated polyurethane. *Polymer Testing*, (74), 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.048>.

6. Vakhrushev, Alexander V., & Haghi, A.K. (Ed.) (2019). *Composite Materials Engineering (Modeling and Technology)*. Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9780429242762>.
7. Lee, H. L., Neville, K. (1967). *Handbook of epoxy resins*. McGraw-Hill Book Co.
8. Pascault, J. R., & Williams, J. J. (Ed.) (2010). *Epoxy polymers: new materials and innovations*. WileyYCH.
9. Stukhlyak, P.D. (1994). *Epoksidnyye kompozity dlya zashchitnykh pokrytiy [Epoxy composites for protective coatings]*.
10. Nassar, Amal, Salem, Mostafa, El-Batanony, Ismail, & Nassar, Eman. (2021). Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus. *Polymers and Polymer Composites*, (29 (95)), 389-399. <https://doi.org/10.1177/09673911211002731>.
11. Xia, Hongyan, Li, Jiajia, & Wang, Kai. (2022). Superior wear resistance of epoxy composite with highly dispersed graphene spheres. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, (5), 173-183. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00259-4>.
12. Nassar, Amal, Younis, Mona, Ismail, Mohamed, & Nassar, Eman. (2022). Improved Wear-Resistant Performance of Epoxy Resin Composites Using Ceramic Particles. *Polymers*, (14 (2)), 2-17. <https://doi.org/10.3390/polym14020333>.
13. Zhang, Zhicai, Zhao, Nie, & Qi, Fugang. (2020). Reinforced Superhydrophobic Anti-Corrosion Epoxy Resin Coating by Fluorine–Silicon–Carbide Composites. *Coatings*, (10(12)), 2-16. <https://doi.org/10.3390/coatings10121244>
14. Poloz, O.Yu., & Ebich, Yu.R. (2021). Povedinka znosostiykykh epoksydnykh kompozitsiy v umovakh kontaktno-dynamichnoho navantazhennya [Behavior of wear-resistant epoxy compositions in conditions of contact-dynamic loading]. *Problemy tertya ta znoshuvannya – Problems of friction and wear*, (2(91)), 46-52. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528).
15. Abed A., Salwa, Khalaf, A. Ahmad, Mohamed, Taha Muzher, & Hanon, M. Muammel, (2023). Optimum abrasive wear resistance for epoxy composites reinforced with polyethylene (PET) waste using Taguchi design and neural network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, I(12(121)), 34-40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272534>.
16. Subhrajit, Ray. (2021). Parametric Optimization and Prediction of Abrasion Wear Behavior of Marble-Particle-Filled Glass–Epoxy Composites Using Taguchi Design Integrated with Neural Network. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 73(7), 2050-2059. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04698-8>.
17. Zhiping, Huang, Wenjie, Zhao, & Wenchao, Zhao. (2021). Tribological and anti-corrosion performance of epoxy resin composite coatings reinforced with differently sized cubic boron nitride (CBN) particles. *Friction*, 9(1), 104-118. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0329-8>.
18. Alhazmia, W. H., Jazaab, Y., & Mousa, S. (2021). Tribological and Mechanical Properties of Epoxy Reinforced by Hybrid Nanoparticles. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18(3), 1-14. <https://doi.org/10.1590/1679-78256384>.
19. Shahabaz, S.M., Mehrotra, Prakhar, & Kalita, Hridayneel (2023). Effect of Al₂O₃ and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Journal of Composites Science*, 7, (4)133), 1-15. <https://doi.org/10.3390/jcs7040133>.
20. Stuhlyak, P.D., Buketov, A.V., & Dobrotvor, I.G. (2008). *Epoksykompozytni materialy, modyfikovani enerhetychnymy polyamy [Epoxycomposite materials modified by energy fields]*.
21. Poloz, A. Yu., Ebych, Yu. R., & Zhiltsova, S.V. (2015). Termomekhanicheskiye svoystva iznosostoykikh epoksidnykh kompozitsiy [Thermo-mechanical properties of wear-resistant epoxy compositions]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, I(99), 58-72.
22. Bourchak, Mostefa, Khan, Adnan, & Juhany A. Khalid. (2013). Effect of preheating and post-curing time on the mechanical properties of epoxy resin. *Advanced Composites Letters*, 22(5), 95-99.
23. Jahani, Younes, Baena, Marta, Barris, Cristina, Perera, Ricardo, & Torres Lluís (2022). Influence of curing, post-curing and testing temperatures on mechanical properties of a structural adhesive. *Construction and Building Materials*, (324, 126698), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126698>.

24. Lascano, Diego, Quiles-Carrillo, Luis, Torres-Giner, Sergio, Boronat Teodomiro, & Montanes, Nestor (2019). Optimization of the Curing and Post-Curing Conditions for the Manufacturing of Partially Bio-Based Epoxy Resins with Improved Toughness. *Polymers*, 11((8)1354), 1-15. <https://doi.org/10.3390/polym11081354>.

25. Sambayi, P. M. K., & Heyns, P. S. (2023). Effects of multiple post cure cycles on properties of composite carbon fibre and epoxy materials. *Journal of Composite Materials*, 57(15), 2467-2481. <https://doi.org/10.1177/00219983231169333>.

26. Adler, Yu.P., Markova, E.V., & Granovsky, Yu.V. (1976). *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy [Planning an experiment when searching for optimal conditions]*. Nauka.

27. Poloz, A.Yu., Ebich, Yu.R., Dolinskaya, R.M., Mozgalev V.V. (2013). *Vyazkoupругiye svoystva iznosostoykikh epoksidnykh kompozitov [Viscoelastic properties of wear-resistant epoxy composites]*. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (5), 72-77.

Отримано 06.06.2024

UDC 620.178:678.686

Oleksandr Fandeev¹, Oleksii Poloz²

¹master of the Department of Fuel, Polymer and Polygraphic Materials Technologies
Ukrainian State University of Science and Technologies.

Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: sanyvyfandeev1991@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0002-2930-3112>

²PhD in Technical Sciences, Doctoral Candidate of the Department of Fuel, Polymer and Polygraphic Materials Technologies
Ukrainian State University of Science and Technologies.

Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: ua.apolo@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-5577-3869>

SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6505811695>

OPTIMIZATION OF TEMPERATURE-TIME CONDITIONS OF POST-CURING OF WEAR-RESISTANT EPOXY COMPOSITIONS

In the manufacture and repair of equipment parts for processing abrasive mixtures in mining, chemical and other industries, protective coatings for internal and external surfaces of pumps, transport systems, and hydraulic structures, epoxy composite materials are widely used in world practice.

To improve the performance properties of wear-resistant epoxy materials, in most cases, they are post-cured, optimization of which modes makes it possible to reduce the negative effects of temperature changes in products of different dimensions and thickness on their performance.

An analysis of studies and publications on improving the performance properties of protective wear-resistant epoxy materials has shown that insufficient attention is paid to the issues of the predicted influence of changes in temperature and time on the performance of epoxy products when developing technological regimes for their post-curing.

The purpose of the article is determining the optimal post-curing regime for wear-resistant epoxy compositions with possible prediction of changes in their properties with temperature deviations from this regime.

Using the method of mathematical planning of the Box-Wilson experiment, the optimal post-curing regime for wear-resistant epoxy compositions was established ($80^{\circ}\text{C} \times 2.4 \text{ hours} + 100^{\circ}\text{C} \times 2.2 \text{ hours}$), which can be used in the manufacture and repair of parts of various sizes and thicknesses, coatings.

The influence of the abrasive attack angle during gas-abrasive wear of epoxy compositions on their wear resistance was clarified and it was revealed that the maximum wear of unfilled compositions occurs at an abrasive attack angle of 45° , which must be taken into account when using the products.

A comparative assessment of serial (New Technologies LLC, Dnepr) and developed optimized post-curing modes of thick-walled wear-resistant epoxy products highly filled with multidisperse silicon carbide (sand-nozzles of hydrocyclone) has proven the possibility of reducing the overall process cycle using the optimized mode while improving wear resistance and physical and mechanical properties.

Keywords: epoxy wear-resistant compositions; mode optimization; post-curing; gas-abrasive wear; relief of the worn surface layer; sand-nozzles of hydrocyclone.

Table: 6. Fig: 1. References: 27.