

УДК: 620.179.16

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ПОЛІНАПОВНЕНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

Савчук П. П., д.т.н., професор, ректор Луцького національного технічного університету, ORCID: 0000-0002-6152-5447;

Кашицький В. П., к.т.н., доцент, професор Луцького національного технічного університету, ORCID: 0000-0003-2346-912X;

Люшук О. М., аспірант Луцького національного технічного університету, ORCID: 0000-0002-3018-1039;

Матрунчик Д. М., аспірант Луцького національного технічного університету, ORCID: 0000-0002-8173-2582;

Удовицька Ю. А., аспірант Луцького національного технічного університету, ORCID: 0000-0003-2409-1448

Отримано апріорні дані залежності інтенсивності вагового зношування епоксикомпозитного матеріалу фрикційного призначення від вмісту функціональних наповнювачів згідно умов варіювання в процесі побудови матриці планування експерименту. Визначено коефіцієнти регресії лінійної та парної взаємодії, а також їх значимість. Отримано математичну модель залежності інтенсивності вагового зношування епоксикомпозитного матеріалу від вмісту функціональних наповнювачів методом багатофакторного планування експерименту. Перевірено однорідність дисперсій та адекватність математичної моделі за критеріями Кохрена та Фішера. Оптимізовано склад епоксикомпозитного матеріалу методом крутого сходження за градієнтом по поверхні відгуку. Підвищено зносостійкість епоксикомпозитів в умовах експлуатації за середніх навантажувально-швидкісних режимах за рахунок оптимізації вмісту термостійких різнофункціональних добавок. Досліджено структуру поверхні трибоконтакту та визначено функціональний вплив термостійких наповнювачів на інтенсивність вагового зношування та формування поверхні трибоконтакту.

Ключові слова: матриця планування, математична модель, рівні факторів, інтенсивність зношування, поверхня трибоконтакту.

Вступ. В умовах експлуатації за низьких навантажувально-швидкісних режимів добре зарекомендували себе композити на полімерній основі, зокрема епоксикомпозити, які широко використовуються в сучасній техніці. За рахунок високої технологічності та сумісності з модифікуючими добавками епоксидні смоли дозволяють формувати матеріали з комплексом керованих властивостей. Це досягається завдяки використанню наповнювачів різної природи (мінеральні, металеві, полімерні) та морфологічного складу (волокнисті, волокнисто-дискретні, дисперсні) [1]. Застосування мононаповнених систем в техніці є малоефективним, оскільки матеріал характеризується обмеженим комплексом властивостей. Це пов'язано з тим, що введення одного наповнювача в процесі створення епоксикомпозитних матеріалів не забезпечує одночасного підвищення широкого спектру фізико-механічних, теплофізичних та експлуатаційних характеристик. Аналіз результатів досліджень мононаповнених систем дозволяє встановити домінуючі характеристики полімеркомпозитів та оцінити ефективність введення добавок, що надає матеріалу свої переваги і недоліки. Так, зокрема, введення дискретних базальтових волокон, забезпечує підвищення зносостійкості та термостійкості композитів [1], однак ударна міцність при цьому залишається низькою. Арамідне волокно забезпечує підвищення динамічних характеристик та термостійкості [2], однак надлишковий вміст різко підвищує в'язкість композиції, що знижує технологічність та ускладнює процес формування. З метою підвищення теплопровідності використовують дрібнодисперсний порошок алюмінію [3, 4], однак даний наповнювач схильний до агломерації, що ускладнює змочування частинок та знижує здатність полімерної матриці утворювати оптимальну кількість фізико-хімічних зв'язків з активними центрами на поверхні частинок. Кремнійорганічні лаки мають термостійкий ланцюг та бічні групи які за умови взаємодії з активними групами реакційноздатного олігомеру утворюють додаткові хімічні зв'язки в результаті покращення

релаксаційної здатності забезпечує збільшення ударної в'язкості та термостійкості полімерної матриці [4]. Недоліком даного модифікатора є наявність в ньому толуолу, який забезпечує технологічну в'язкість олігомера однак під час структурування полімеркомпозиту видаляється з утворенням порожнин. Використання даних наповнювачів не дозволяє одночасно визначити вплив кожного на характер структурування системи та прослідкувати поведінку параметра оптимізації [5–7]. Для дослідження комплексного впливу добавок на зносостійкість епоксикомпозитів використано метод багатofакторного планування експерименту, який полягав у побудові однорідної математичної моделі, що адекватно описує вплив вибраних факторів на зносостійкість розробленого епоксикомпозитного матеріалу [7–10].

Мета роботи. Оптимізувати склад епоксикомпозитного матеріалу методом крутого сходження за градієнтом по поверхні відгуку з використанням математичної моделі залежності інтенсивності вагового зношування від вмісту наповнювачів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити інтенсивність вагового зношування епоксикомпозитних матеріалів з визначеним вмістом функціональних наповнювачів згідно умов варіювання матриці планування експерименту;
- побудувати математичну модель залежності інтенсивності зношування від вмісту функціональних наповнювачів;
- оптимізувати склад полінаповненої епоксикомпозитної системи;
- дослідити структуру поверхні трибоконтакту епоксикомпозитного матеріалу оптимального складу та матеріалу з надлишковим вмістом функціональних наповнювачів.

Об'єкт дослідження. Математична модель залежності інтенсивності зношування епоксикомпозитного матеріалу від вмісту функціональних наповнювачів.

Предмет дослідження. Комплексний вплив функціональних наповнювачів на інтенсивність вагового зношування епоксикомпозитного матеріалу.

Матеріали та методика досліджень. Для розробки фрикційного епоксикомпозитного матеріалу використано наступні різнофункціональні добавки: порошок оксиду алюмінію Al_2O_3 (ГОСТ 5494-95), кремнійорганічний лак марки КО-915, скловолокно (ГОСТ 4640-93), арамідне (ГОСТ 33842-16) та базальтове волокно (ГОСТ 21880-94).

В якості полімерної матриці використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), структурування якої здійснено твердником холодної дії поліетиленполіаміном (ПЕПА ТУ6-05-241-202-78). З метою забезпечення технологічної в'язкості композиції використано дискретні волокна довжиною 2-3 мм. Формування дослідних зразків здійснювали методом пресування композиції із зусиллям 100 МПа. Підготовка стадія полягала у механічному вимішуванні попередньо просушених наповнювачів за температури 100 °С з смолою за температури 20-25 °С. Попереднє структурування епоксикомпозитів тривало 24 год за кімнатної температури. Термічну обробку проведено за ступінчастим режимом для уникнення високих залишкових напружень: 50 °С та 100 °С з витримкою 1 год та 120 °С з витримкою 4 год.

Визначення інтенсивності зношування проведено на лабораторній установці за схемою «вал-сегмент втулки» в умовах тертя без мастильного середовища. Зразок встановлено перпендикулярно осі обертання контртіла, виготовленого зі сталі 40. Масу зразків визначено на аналітичних лабораторних вагах типу ВЛА-200 з точністю 0,001 г.

За параметр оптимізації (y) вибрано інтенсивність вагового зношування (I_g , 10^{-3} г/км), оскільки даний параметр є домінуючим в процесі розробки триботехнічного матеріалу.

Дослідження проводили за швидкості ковзання 1,2 м/с та питомого навантаження 1,0 МПа, що дозволило визначити інтенсивність зношування епоксикомпозитних матеріалів з різним ступенем наповнення, оскільки за режиму низьких значень навантажувально-швидкісних параметрів не можливо було зафіксувати зміну

досліджуваної характеристики, а в умовах високих значень даних параметрів відбувалось катастрофічне руйнування матеріалу.

З метою отримання надійних статистичних даних для кожного із показників здійснювали не менше 2-ти паралельних випробувань. Зразки виготовляли із трьох партій виробів. Статистична обробка результатів експериментів дозволяє визначити з достатнім ступенем надійності досліджувані характеристики матеріалу за допомогою випробувань кінцевого числа зразків. Основними статистичними характеристиками, які використовували для первинної обробки даних, є середнє арифметичне значення, середнє квадратичне відхилення.

Якщо отримана лінійна модель адекватна, переходять до методу крутого сходження по поверхні відгуку. Найкоротший шлях досягнення оптимуму – рух по градієнту. Крок руху по градієнту вибирають таким, щоб його мінімальна величина була більша помилки з якою фіксують фактор.

Основні результати. Мінімальне число варіантів експериментальних досліджень, що є необхідним і достатнім для побудови математичної моделі у вигляді лінійного рівняння регресії визначено згідно формули:

$$N=2^k =2^4=16, \quad (1)$$

де k – кількість факторів.

Факторами, які визначають зносостійкість високонаповнених композитних систем вибрано вміст різнофункціональних добавок (дискретних волокон, модифікатора, високодисперсного порошку) (табл. 1).

На основі аналізу результатів експериментальних досліджень з визначення твердості, адгезійної міцності та зносостійкості мононаповнених епоксикомпозитів було вибрано основний рівень та інтервал варіювання, а також визначено верхній та нижній рівень факторів.

Таблиця 1 – Рівні факторів і інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів			Інтервал варіювання
	Нижній рівень	Основний рівень	Верхній рівень	
X_1 – вміст дискретних базальтових волокон, мас. ч.	8	9	10	1
X_2 – вміст дискретних арамідних волокон, мас. ч.	1,5	2	2,5	0,5
X_3 – вміст кремнійорганічного лаку, мас. ч.	25	30	35	5
X_4 – вміст порошку алюмінієвої пудри, мас. ч.	9	10	11	1

Матрицю планування експерименту побудовано згідно методологічного підходу, коли сукупність умов проведення кожного дослідження визначено згідно правил варіювання і забезпечує поєднання усіх можливих комбінацій факторів (табл. 2).

Перевірку однорідності значень паралельних дослідів параметра оптимізації (табл. 3) проведено за допомогою критерію Кохрена, згідно формули:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_{\gamma}^2} = \frac{0,1}{0,452} = 0,22, \quad (2)$$

де S_{\max}^2 – максимальна дисперсія; $\sum S_{\gamma}^2$ – сума всіх міжрядних дисперсій.

Таблиця 2 – Матриця планування і результати експерименту

№	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		Y ₁	Y ₂	ȳ
	Кодове значення	Натуральне значення, мас. ч.	Кодове значення	Натуральне значення, мас. ч.	Кодове значення	Натуральне значення, мас. ч.	Кодове значення	Натуральне значення, мас. ч.			
1	+1	10	+1	2,5	+1	35	+1	11	360	220	290
2	-1	8	+1	2,5	+1	35	+1	11	190	130	160
3	+1	10	-1	1,5	+1	35	+1	11	140	260	200
4	-1	8	-1	1,5	+1	35	+1	11	560	370	460
5	+1	10	+1	2,5	-1	25	+1	11	300	210	205
6	-1	8	+1	2,5	-1	25	+1	11	200	430	315
7	+1	10	-1	1,5	-1	25	+1	11	980	1150	1065
8	-1	8	-1	1,5	-1	25	+1	11	460	490	475
9	+1	10	+1	2,5	+1	35	-1	9	660	590	625
10	-1	8	+1	2,5	+1	35	-1	9	870	1070	970
11	+1	10	-1	1,5	+1	35	-1	9	630	930	780
12	-1	8	-1	1,5	+1	35	-1	9	190	220	205
13	+1	10	+1	2,5	-1	25	-1	9	310	200	255
14	-1	8	+1	2,5	-1	25	-1	9	550	400	475
15	+1	10	-1	1,5	-1	25	-1	9	550	760	655
16	-1	8	-1	1,5	-1	25	-1	9	340	280	310

Таблиця 3 – Результати розрахунку міжрядної дисперсії

	y ₁	y ₂	ȳ	Δy	(Δy) ²	S ² _i
1	3,2	1,4	2,3	0,9	0,81	1,62
2	2,4	3,8	3,1	-0,7	0,49	0,98
3	1,8	4,2	3	-1,2	1,44	2,88
4	3,4	1,2	2,3	1,1	1,21	2,42
5	4,6	3,2	3,9	0,7	0,49	0,98
6	11,8	14,2	13	-1,2	1,44	2,88
7	5,6	3,6	4,6	1	1	2
8	6,4	9,8	8,1	-1,7	2,89	5,78
9	7,2	9,8	8,5	-1,3	1,69	3,38
10	8,2	11	9,6	-1,4	1,96	3,92
11	2,4	4,6	3,5	-1,1	1,21	2,42
12	4	6,2	5,1	-1,1	1,21	2,42
13	16,4	19	17,7	-1,3	1,69	3,38
14	15,4	19,8	17,6	-2,2	4,84	9,68
15	13,2	14,6	13,9	-0,7	0,49	0,98
16	21,2	19,6	20,4	0,8	0,64	1,28

Оскільки розрахункове значення даного критерію (G_p = 0,21) не перевищує табличне значення (G_т = 0,47), тому гіпотеза однорідності дисперсій підтвердилась, що дозволило проводити подальші розрахунки коефіцієнтів регресії:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_i y_u}{N}; \quad (3)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{\gamma=1}^N x_{i\gamma} y_{\gamma}, \quad (4)$$

$$b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{\gamma=1}^N x_{i\gamma} x_{l\gamma} y_{\gamma}, \quad (5)$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії проведено згідно формули (3-5): $b_0 = 324$; $b_1 = 43,7$; $b_2 = 53,7$; $b_3 = -3,7$; $b_4 = -68$; $b_{12} = -0,111$; $b_{13} = -91$; $b_{14} = -0,6$; $b_{23} = 103$; $b_{24} = -100$; $b_{34} = -114$.

В результаті введення розрахункових значень коефіцієнтів регресії у стандартне рівняння отримаємо:

$$y = 324 + 43,7 x_1 - 53,7 x_2 - 3,7 x_3 - 68 x_4 - 0,111 x_1 x_2 - 91 x_1 x_3 - 0,6 x_1 x_4 + 103 x_2 x_3 - 100 x_2 x_4 - 114 x_3 x_4. \quad (6)$$

Перевірку значимості коефіцієнтів регресії здійснено за допомогою критерію Стьюдента (t_p), розрахункові значення якого виконано за формулою (4), де t_p вказано у табл. 4.

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_b}. \quad (7)$$

Таблиця 4 – Розрахункові значення критерію Стьюдента для коефіцієнтів регресії

b_i	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{23}	b_{24}	b_{34}
t_p	1,5	1,9	0,13	2,6	-0,004	3,2	0,02	3,6	3,5	4,03
t_r	2,14									

Згідно умови $t_p > t_r$ значимими є коефіцієнти:

$$b_1 = 43,7; b_2 = -53,7; b_3 = -3,7; b_4 = -68; b_{13} = -91; b_{23} = 103; b_{24} = -100; b_{34} = -114.$$

Після видалення не значимих коефіцієнтів регресії отримано наступну математичну модель:

$$y = 324 - 68 x_4 - 91 x_1 x_3 - 103 x_2 x_3 - 100 x_2 x_4 - 114 x_3 x_4. \quad (8)$$

Гіпотезу адекватності отриманої математичної моделі (8) перевірено за критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{1,06}{0,452} = 2,36. \quad (9)$$

Результати розрахунку дисперсії адекватності математичної моделі представлені у табл. 5.

Таблиця 5 – Розрахунок дисперсії адекватності

№	\bar{y}_γ	\hat{y}_γ	$\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma$	$(\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma)^2$
1	290	220	70	4900
2	160	134	26	676
3	200	141	59	3481
4	460	390	70	4900
5	205	251	-46	2116
6	315	298	17	289
7	1065	995	70	4900
8	475	495	-20	400
9	625	604	21	441
10	970	898	72	5184
11	780	705	75	5625
12	205	200	5	25
13	255	259	-4	16
14	475	490	-15	225
15	655	673	-18	324
16	310	303	7	49
$\sum_{\gamma=1}^N (\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma)^2 = 33,551$				

Оскільки розрахункове значення критерію Фішера, $F_p = 2,36$ і не перевищує табличне ($F_T=2,4$), тому можна вважати, що рівняння (8) є адекватним і його можливо використовувати для знаходження мінімального значення параметра оптимізації.

Використовуючи метод крутого сходження за градієнтом (табл. 6) встановлено, що мінімальне значення параметра оптимізації отримано в умовному досліді № 20. Оскільки подальший спуск призводить до підвищення значень інтенсивності зношування, тому отриманий результат в досліді № 20 вважали таким, що відповідає умові в поставленій задачі.

Таблиця 6 – Результати крутого сходження за градієнтом по поверхні відгуку

	<i>Натуральні значення факторів</i>				<i>Значення параметра, I_g</i>
	(X_1)	(X_2)	(X_3)	(X_4)	
Основний рівень	9,0	2,0	30	10	
b_γ	43,7	-53,7	-3,7	-68	
I_γ	1	0,5	5	1	
$b_\gamma \times I_\gamma$	43,7	-26,85	-18,5	-68	
Δ_γ	0,5	-0,3072	-0,2116	-0,777	
Округлення	0,5	-0,31	-0,21	-0,78	
Умовний дослід № 17	9,15	1,69	29,79	9,22	384
– // – №18	10	1,38	29,58	8,44	350
– // – №19	10,5	1,07	29,37	7,66	221
– // – №20	11	0,76	29,16	6,88	2,6
– // – №21	11,5	0,45	20,95	6,1	321
– // – №22	12	0,14	28,74	5,32	736

Поверхня трибоконтакту епоксикомпозиту з оптимальним вмістом добавок (рис. 1, а) має низьку шорсткість без видимих слідів руйнування трибоповерхні, що підтверджує високу зносостійкість епоксикомпозиту. Це пояснюється компактним

розташуванням дискретних волокон та високодисперсних частинок у їх оптимальному співвідношенні, що забезпечує формування високої фактичної площі трибоконтакту твердофазних добавок, зносостійкість яких вища зносостійкості матриці.

На поверхні трибоконтакту епоксикомпозита, який має максимальну інтенсивність зношування ($I_g = 736$ мг/км) (рис. 1, б), на трибоповерхні виявлено кратери невеликої глибини, що виникли за рахунок протікання процесів утворення магістральних тріщин та викришування локальних ділянок. На краю трибоконтакту зафіксовано ділянку сколювання, що вказує на високу крихкість епоксикомпозитного матеріалу.

Трибоповерхня епоксикомпозиту (рис. 1, в) з мінімальним вмістом дискретних волокон є рівною, що пояснюється однорідністю композиції, однак матеріал є крихким, що підтверджено крихким руйнуванням кромки.

Поверхня трибоконтакту (рис. 1, г) з максимальним вмістом дискретних волокон характеризується наявністю пор, заповнених повітрям, яке потрапило до композиту на стадії перемішування композиції і через високу в'язкість залишилося в матеріалі. Дані пори мають розміри 3–5 мкм і знижують міцнісні характеристики епоксикомпозита.

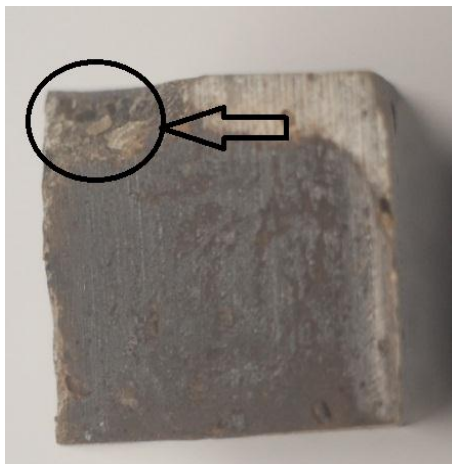
За умови недостатнього вмісту в епоксикомпозитах включень порошку алюмінію, відбувається локалізація теплоти в поверхневому шарі, що спричиняє його пластичну деформацію. В подальшому відбувається деструкція епоксиполімерної матриці в зоні трибоконтакту та інтенсивне її руйнування.



а



б



в



г

Рисунок 1 – Поверхня трибоконтакту епоксикомпозитів:

а – оптимальний вміст добавок; б – надлишковий вміст добавок; в – мінімальний вміст дискретних волокон; г – максимальний вміст дискретних волокон

Базальтові волокна в епоксикомпозиті забезпечують термостійкість, однак надлишок даного наповнювача призводить до втрати впорядкованості дискретних волокон в об'ємі матриці та зумовлює появу напруженого стану.

Макромолекули кремнійорганічного лаку, мають високу термодинамічну сумісність з епоксидною матрицею, що дозволяє формувати оптимальну структурну сітку модифікованої епоксиолімерної матриці, що сприяє сповільненню процесів термодеструкції модифікованого полімеру в зоні трибоконтакту.

Арамідне волокно виконує армуючу функцію, оскільки тонкі дискретні волокна забезпечують утворення додаткових хімічних зв'язків за рахунок взаємодії між макромолекулами матриці та активними центрами на поверхні волокна. Збільшення вмісту армувальної фази, що характеризується високою питомою енергією зумовлює підвищення фізико-механічних властивостей даних епоксикомпозитів.

Висновок. Побудована математична модель є адекватною згідно критерію Фішера, що дозволило провести оптимізацію складу епоксикомпозитного матеріалу фрикційного призначення. Введення до складу епоксиолімерної матриці оптимального вмісту функціональних наповнювачів (порошок алюмінію – 6,8 мас.ч.; базальтове волокно – 11 мас. ч.; арамідне волокно – 0,7 мас. ч.; кремнійорганічний лак – 29,2 мас. ч.) забезпечує мінімальну інтенсивність зношування епоксикомпозитів ($I_g = 2,6$ мг/км) за середнього навантажувально-швидкісного режиму трибовзаємодії (швидкість ковзання 1,2 м/с, питоме навантаження 1,0 МПа).

Висока зносостійкість розробленого фрикційного матеріалу визначається формуванням термо- і зносостійкої структури за оптимального вмісту різнофункціональних добавок в епоксиолімерній матриці, в якій частинки наповнювачів рівномірно розподілені з утворенням міцних адгезійних зв'язків та формуванням низького напруженого стану.

Перспективність досліджень полягає у проведенні експериментальних досліджень із визначення інтенсивності зношування за різних навантажувально-швидкісних режимах експлуатації розробленого епоксикомпозитного матеріалу, а також дослідженні структури поверхневого трибошару та структурних перетворень в процесі фрикційної взаємодії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Богданович П. Н., Прушак В. Я. Трение и износ в машинах : учеб. для вузов. Москва : Выш. шк., 1999. 374 с.
2. Трибология / Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Пашечко М. І., Корбут Є. В. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. 392 с.
3. Барбарина Т. М., Сухов М. П., Шелудяков Н. А. Стекловолокнистые строительные материалы. Москва : Издательство литературы по строительству, 1968. 316 с.
4. Гоголева О. В., Петрова П. Н., Попов С. Н., Охлопкова А. А. Износостойкие композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и базальтовых волокон. *Трение и износ*. 2015. Том 36, № 4. С. 301–305..
5. Гутников С. И., Лазорьяк Б. И., Селезнев А. Н. Стекловолокна. Москва, 2010. 406 с.
6. Закалов О.В., Закалов І.О.. Основи тертя і зношування в машинах : навчальний посібник. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
7. Косторнов А. Г. Триботехническое материаловедение. Луганск: Видавництво «Ноулидж», 2012. 696 с.
8. Наполнители для полимерных композиционных материалов : справочное пособие; пер. с англ. / под ред. П.Г. Бабаевського. Москва : Химия, 1981. 736 с.
9. Красновский Н. Исследование пропитки волокнистых наполнителей в процессе пултрузии полимерных композиционных материалов. *Технология и оборудование машиностроительного производства*. 2011. Т. 2, № 25. С. 50–53.
10. Трофимов Н. Н., Канович М. З., Карташов Э. М. Физика композиционных материалов. В 2-х т. Москва : Мир, 2005. Т. 1. 456 с.; Т. 2. 344 с.

REFERENCES

1. Bogdanovich, P. N. & Prushak, V. Ya. (1999). *Trenie i iznos v mashinakh : ucheb. dlya vuzov*. Moskva : Vishha shkola.
2. Kindrachuk M. V., Labunecj V. F., Pashechko M. I., Korbut E. V. (2009). *Tribologiya*. Kiev : Vid-vo Nac. aviac. un-tu «NAU-druk».
3. Barbarina, T. M., Sukhov, M. P., Sheludyakov, N. A. (1968). *Steklovoloknistihe stroiteljnihe materialih*. Moskva : Izdatelstvo literaturih po stroitelstvu.
4. Gogoleva, O. V. & Petrova P. N., Popov S. N., Okhlopkova A. A. (2015). Iznosostoykie kompozicionnihe materialih na osnove sverkhvisokomolekulyarnogo poliehtilena i bazaljtovihkh volokon. *Trenie i iznos. Vol. 36, № 4*. 301–305.
5. Gutnikov, S. I., Lazoryak, B. I., Seleznev, A. N. (2010). *Steklyanihe volokna*. Moskva.
6. Zakalov, O. V., Zakalov, I. O. (2011). *Osnovi tertya i znoshuvannya v mashinakh : navchaljniy posibnik*. Ternopil : Vidavnictvo TNTU im. I. Pulyuya.
7. Kostornov, A. G. (2012). *Tribotekhnicheskoe materialovedenie*. Lugansk : Vidavnictvo «Noulidzh».
8. Babaevskiy, P. G. (Ed.). (1981). *Napolniteli dlya polimernihkh kompozicionnihkh materialov : spravochnoe posobie*. Moskva : Khimiya.
9. Krasnovskiy, N. (2011). Issledovanie propitki voloknistihkh napolniteleyj v processe pultruzii polimernihkh kompozicionnihkh materialov. *Tekhnologiya i oborudovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva. T. 2, № 25*. 50–53.
10. Trofimov, N. N., Kanovich, M. Z. & Kartashov, Eh. M. (2005). *Fizika kompozicionnihkh materialov. V 2-kh t*. Moskva : Mir. T. 1. 456 s.; T. 2. 344 s.

Савчук П. П., Кашицкий В. П., Люшук А. М., Матрунчик Д. М., Удовницкая Ю. А.
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПОЛИНАПОЛНЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ

Получены априорные данные зависимости интенсивности весового износа эпоксикомпозитного материала для фрикционных изделий от содержания функциональных наполнителей согласно условиям варьирования в процессе построения матрицы планирования эксперимента. Определены коэффициенты регрессии линейной и парного взаимодействия, а также их значимость. Получена математическая модель зависимости интенсивности весового износа эпоксикомпозитного материала от содержания функциональных наполнителей методом многофакторного планирования эксперимента. Проверена однородность дисперсий и адекватность математической модели по критериям Кохрена и Фишера. Оптимизирован состав эпоксикомпозитного материала методом крутого восхождения по градиенту по поверхности отклика. Повышена износостойкость эпоксикомпозитов в условиях эксплуатации при средних погрузочно-скоростных режимах за счет оптимизации содержания термостойких разнофункциональных добавок. Исследована структура поверхности трибоконтакта и определено функциональное влияние термостойких наполнителей на интенсивность весового износа и формирования поверхности трибоконтакта.

Ключевые слова: матрица планирования, математическая модель, уровни факторов, интенсивность изнашивания, поверхность трибоконтакта.

Savchuk P. P., Kashytskyi V. P., Liushuk O. M., Matrunchyk D. M., Udovyt'ska Yu. A.
OPTIMIZATION OF POLY-FILLED SYSTEM BASED ON EPOXYCOMPOSITES

We have obtained a priori the data on the dependence of the intensity of weight wear on the epoxycomposite material of the frictional assignment on the content of the functional fillers in accordance with the variation conditions in the process of constructing the experiment experimentation matrix. The coefficients of the regression of linear and pair interaction, as well as their significance, are determined. The mathematical model of the dependence of the weight of wear on the epoxycomposite material on the content of functional fillers is obtained by the method of multifactorial planning of the experiment. The homogeneity of dispersions and the adequacy of the mathematical model according to the Cochran and Fisher criteria are checked. The composition of the epoxycomposite material is optimized by the method of steep climbing along the gradient along the response surface. The durability of epoxy composites has been increased in conditions of operation at medium load-speed modes due to optimization of the content of heat-resistant multi-functional additives. The structure of the tribocontact surface is investigated and the functional effect of thermostable fillers is determined on the intensity of weight wear and the formation of tribocontact surface.

Keywords: matrix of planning, mathematical model, factor levels, intensity of wear, surface of tribocontact.

© Савчук П. П., Кашицкий В. П., Люшук О. М., Матрунчик Д. М., Удовицька Ю. А.

Статтю прийнято до редакції 05.05.18