

УДК 667.64:678.026

DOI: 10.18372/0370-2197.4(93).16253

А. В. БУКЕТОВ¹, В. Г. КУЛІНІЧ¹, С. В. ЯКУЩЕНКО¹, А. М. БУРЕНКОВ²¹Херсонська державна морська академія²Одеська Національна Морська Академія

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ ПОКРИТТІВ З ОПТИМІЗОВАНИМИ ІНГРЕДІЄНТАМИ

Проведено аналіз впливу модифікаторів 3,3-дихлор-4,4-діамінодифенілметану, 4,4-діамінодифенілметану та наповнювача полістирол «Оазис» на руйнівні напруження при згинанні і теплостійкість розроблених полімерних композитних матеріалів. Для прогнозування властивостей і оптимізації вмісту модифікаторів і наповнювача в полімерних композитних матеріалах проведено статистичну обробку результатів за допомогою прикладного пакету STATGRAPHICS® Centurion XVI (модуль Multiple Response Optimization). Методом математичного планування експерименту отримано рівняння регресії та встановлено залежність вихідних параметрів від обраних змінних факторів. Встановлено вміст інгредієнтів для формування матеріалів із поліпшеними показниками модуля пружності при згинанні і теплостійкості. Властивості досліджуваних матеріалів проаналізовано за допомогою отриманої математичної моделі. Також проведено теоретичний аналіз результатів розрахунку функціональної залежності. Перевірку відтворюваності дослідів проведено за критерієм Кохрена. Перед перевіркою адекватності моделі проведено відкидання незначущих коефіцієнтів за критеріями Стьюдента. Адекватність отриманої моделі перевірено за критерієм Фішера. Встановлено оптимальний вміст модифікаторів і наповнювача для формування матеріалів із поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями. За рахунок поліпшених теплофізичних та фізико-механічних властивостей забезпечено підвищення надійності деталей засобів транспорту.

Ключові слова: епоксидна матриця, композит, 3,3-дихлор-4,4-діамінодифенілметан, 4,4-діамінодифенілметан, наповнювач полістирол «Оазис», метод математичного планування експерименту, рівняння регресії.

Постановка проблеми. Устаткування морського та річкового транспорту регулярно зазнає впливу механічних та температурних навантажень. Для підвищення надійності деталей засобів транспорту використовують захисні покриття із полімерних композитних матеріалів (ПКМ). Формування ПКМ із заданими властивостями є складним та довготривалим процесом. Введення модифікаторів та наповнювачів у епоксидну матрицю навіть за незначного вмісту забезпечує суттєву зміну необхідних показників матеріалів. Для встановлення оптимального вмісту інгредієнтів необхідною складовою є проведення ряду експериментів, що зазвичай супроводжується суттєвими матеріальними витратами, а також великого часового обсягу. Отже, пріоритетним завданням є отримання необхідних даних водночас із мінімальною кількістю проведених дослідів. Для оптимізації результатів дослідження використовують математичне планування експерименту, яке забезпечує необхідну точність результатів, а також дозволяє прогнозувати властивості матеріалів. Це надає можливість врахування всіх необхідних факторів, які впливають на функціонування гетерогенних систем і забезпечує створення матеріалів із необхідними показниками і підвищеною надійністю [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед існуючих захисних покриттів для деталей засобів транспорту особливе місце займають ПКМ на епоксидній основі. Для отримання матеріалів із необхідними властивостями у зв'язував

додають модифікатори, пластифікатори і наповнювачі [3, 4]. У попередніх дослідженнях [5-7] розглянуто можливість оптимізації складу і структури модифікованих епоксидних композитів із різними добавками. Попередніми дослідженнями [8-12] встановлено вплив модифікаторів 3,3-дихлор-4,4-діамінодифенілметану (ДХДАФМ), 4,4-діамінодифенілметану (ДАФМ) і наповнювача полістирол «Оазис» (ПО) на формування ПКМ із поліпшеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями (для кожного компонента окремо). Цільове призначення вибраних інгредієнтів – отримання ПКМ із поліпшеними захисними властивостями. Дослідження у даному напрямку не є достатнім, а саме не встановлено багатofакторну взаємодію модифікаторів і наповнювача із епоксидним олігомером ЕД-20 у комплексі. У цьому контексті математичне планування експерименту забезпечує виконання мінімальної кількості дослідів і значне скорочення термінів отримання результату.

Мета роботи – оптимізація вмісту інгредієнтів для формування матеріалів із поліпшеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями для підвищення надійності деталей засобів транспорту.

Результати дослідження та їх обговорення. Для оптимізації вмісту інгредієнтів при формуванні ПКМ досліджено руйнівні напруження при згинанні та теплостійкість, як одні з основних властивостей композитів з різними модифікаторами (ДХДАФМ і ДАФМ) та наповнювачем ПО. Для стандартизації, а також для спрощення розрахунків кожен компонент кодували умовними одиницями із врахуванням кроку варіювання (табл. 1).

Таблиця 1

Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, q , мас.ч.	Крок варіювання, Δq , мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
М1 (модифікатор ДХДАФМ)	x_1	0,25	0,05	0,20	0,25	0,30
Наповнювач ПО	x_2	0,07	0,01	0,06	0,07	0,08

Відповідно до схеми планування експерименту було проведено 9 дослідів ($N = 9$), кожний з яких повторювали тричі ($p = 3$) з метою виключення системних помилок (табл. 2, табл. 3). Для того, щоб матриця планування була ортогональною, вводили коректовані значення рівня x'_i , які обчислювали за формулою:

$$x'_i = (x_i)^2 - \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}{N}; \quad (1)$$

Математичну модель $y = f(x_1, x_2)$ формували у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (2)$$

Коефіцієнти регресії визначали за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_i y_i}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (3)$$

Таблиця 2

Схема планування експерименту

№ досліджу (u)	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1^2 - d$	$x_4 = x_2^2 - d$	$x_1 x_2$
1	1	-1	-1	0,33	0,33	+1
2	1	+1	-1	0,33	0,33	-1
3	1	-1	+1	0,33	0,33	-1
4	1	+1	+1	0,33	0,33	+1
5	1	0	0	-0,67	-0,67	0
6	1	+1	0	0,33	-0,67	0
7	1	-1	0	0,33	-0,67	0
8	1	0	+1	-0,67	0,33	0
9	1	0	-1	-0,67	0,33	0
$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2$	9	6	6	2	2	4

Таблиця 3

Результати дослідження руйнівних напружень при згинанні ПКМ

№ досліджу	Вміст компонентів, q, мас.ч.		Руйнівні напруження при згинанні, σ_z , МПа
	x_1	x_2	y
1	0,20	0,06	95,4
2	0,30	0,06	94,7
3	0,20	0,08	91,2
4	0,30	0,08	92,8
5	0,25	0,07	100,4
6	0,30	0,07	94,2
7	0,20	0,07	99,4
8	0,25	0,08	104,9
9	0,25	0,06	110,6

Отримані коефіцієнти рівняння регресії наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти рівняння регресії

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
105,12	-0,72	-1,97	-10,68	0,27	0,57

У результаті при аналізі руйнівних напружень при згинанні отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 105,12 - 0,72x_1 - 1,97x_2 - 10,68x_1^2 + 0,27x_2^2 + 0,57x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [13]:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} \leq G_{(0,05; f_1; f_2)} \quad (4)$$

де S_{ui}^2 – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів для $m = 3$; m – кількість паралельних дослідів; $S_{u \max}^2$ – найбільша з дисперсій у рядках плану;

Дисперсії адекватності визначали за формулою:

$$S_{ui}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}; \quad (5)$$

де y_{im} – значення, отримане з кожного паралельного дослідів; \bar{y}_i – середнє значення величини y , отримане при паралельних дослідів.

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

$$\sigma^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{N=9} \sigma^2\{y\}_i}{N(m-1)}; \quad (6)$$

$$\text{де } \sigma^2\{y\}_i = \sum_{i=1}^{m=3} (y_i - \bar{y}_i)^2;$$

$$\sigma^2\{y_{\text{сер}}\} = \frac{a^2\{y\}}{N}, \text{ або } S_{b_0}^2 = \frac{S_0^2}{N} \quad (7)$$

Значення дисперсій наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Значення дисперсій адекватності (S_{ui}^2) і дисперсій відтворення ($\sigma^2\{y\}_i$)

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	S_{u1}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_1$	0,14
2	S_{u2}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_2$	0,14
3	S_{u3}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_3$	0,02
4	S_{u4}^2	0,12	$\sigma^2\{y\}_4$	0,24
5	S_{u5}^2	0,09	$\sigma^2\{y\}_5$	0,18
6	S_{u6}^2	0,12	$\sigma^2\{y\}_6$	0,24
7	S_{u7}^2	0,13	$\sigma^2\{y\}_7$	0,26
8	S_{u8}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_8$	0,14
9	S_{u9}^2	0,13	$\sigma^2\{y\}_9$	0,26

$$\text{При цьому: } \sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,81 \quad \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,09.$$

Тоді розрахункове значення критерію Кохрена при 5 %-му рівні значущості:

$$G_{розр} = \frac{S_{u_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}; \quad (8)$$

$$G_{розр} = \frac{0,13}{0,81} = 0,160.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u_{\max}}^2 = 0,13$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,160$.

Табличне значення критерію Кохрена: $G_{табл} = 0,478$.

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{розр} = 0,160 \leq G_{табл} = 0,478.$$

Надалі проведено визначення значущості коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 6).

Таблиця 6

Результати дослідження руйнівних напружень при згинанні

№ дос- луду	Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{зг}$, МПа			Середнє значення, $\sigma_{зг}$, МПа
	1	2	3	
1	95,1	95,6	95,5	95,4
2	94,5	94,6	95,0	94,7
3	91,1	91,3	91,2	91,2
4	92,4	93,0	93,0	92,8
5	100,1	100,7	100,4	100,4
6	93,8	94,4	94,4	94,2
7	99,0	99,5	99,7	99,4
8	105,1	104,6	105,0	104,9
9	110,7	110,9	110,2	110,6

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 7) за формулою:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (9)$$

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента [13-15]. При цьому визначали табличний (t_m) і розрахунковий критерій (t_p) критерій Стьюдента (табл. 7).

Таблиця 7

Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стьюдента (t_p)

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,010	t_{0p}	1016,81
2	$S_{b_1}^2$	0,015	t_{1p}	5,85
3	$S_{b_2}^2$	0,015	t_{2p}	16,06

4	$S_{b_{11}}^2$	0,045	t_{11p}	50,36
5	$S_{b_{22}}^2$	0,045	t_{22p}	1,26
6	$S_{b_{12}}^2$	0,023	t_{12p}	3,80

Залежно від ступенів вільності: $f = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$ визначали табличне значення критерію Стюдента, яке становить $t_T = 2,1$.

Визначали розрахункові значення критерію Стюдента (t_p) і значущість коефіцієнтів: $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{22p}, t_{12p} > t_T$.

Причому:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}; \quad (10)$$

Розрахункові значення критерію Стюдента $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{12p}$, є більшими від t_T , тому вважали, що коефіцієнти рівняння регресії $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{12}$ є значущими. Розрахункове значення t_{12p} є меншим від t_T , тому коефіцієнт b_{22} не є значущим. В результаті відкидання незначущих коефіцієнтів отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 105,12 - 0,72x_1 - 1,97x_2 - 10,68x_1^2 + 0,57x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [15, 16]:

$$F_p = \frac{S_{u \max}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05; f_{a0}; f_y)} \quad (11)$$

де $S_{u \max}^2 = 0,13$ – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5.9);

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}{N}; \quad (12)$$

де $S_y^2 = 0,09$ – дисперсія відтворення.

Тоді: $F_p = 1,444$.

$F_{(0,05; f_{a0}; f_y)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості ($f_1 = N - (k + 1) = 9 - (5 + 1) = 3, f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$). Тоді: $F_{(0)} = 3,16$.

Розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (10). Можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

Процес інтерпретації отриманої математичної моделі, як правило, не зводиться тільки до визначення впливу факторів. Просте порівняння за абсолютною величиною лінійних коефіцієнтів не визначає відносну ступінь впливу факторів, оскільки при цьому присутні ще й квадратичні члени та парні взаємодії. При детальному аналізі отриманої адекватної моделі потрібно враховувати і те, що для квадратичної моделі ступінь впливу фактору на зміну вихідної величини не є постійним.

Залежності, що пов'язують нормалізовані і натуральні значень змінних факторів, мають наступний вигляд:

$$x_i = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i} \quad (13)$$

де q_i – значення i -го фактора експерименту, q_{i0} – значення нульового рівня, Δq_i – інтервал варіювання.

Підставивши дані значення згідно формули (13) у рівняння регресії і провівши його перетворення, отримали наступне рівняння регресії з натуральним значенням змінних параметрів:

$$\sigma_{32} = -124,3 + 2041,8q_1 - 484,1q_2 - 4273,3q_1^2 + 1150,0q_1q_2$$

Наведене рівняння в натуральних значеннях дозволяє лише передбачити значення вихідної величини для будь-якої точки в середині області варіювання факторів. Однак, з його допомогою можна побудувати графіки залежності вихідної величини (руйнівні напруження при згинанні) від будь-якого фактору (чи двох факторів). Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 1-3.

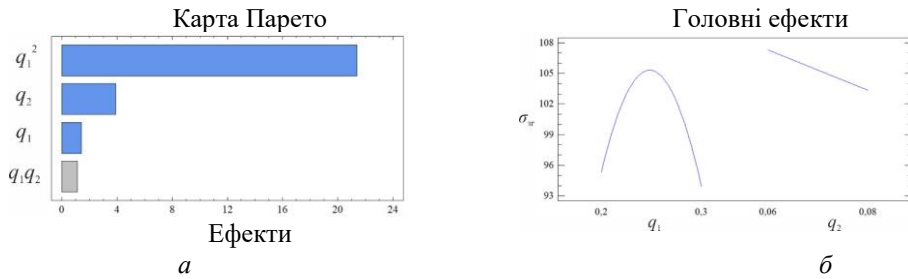


Рис. 1. Карта Парето (а) і головні ефекти у (б)

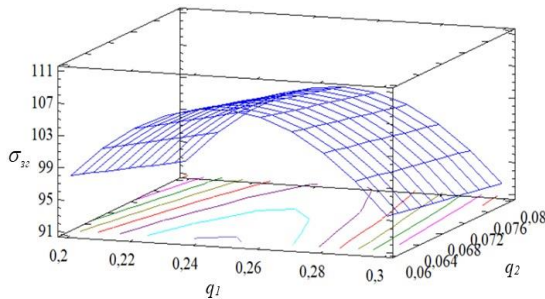


Рис. 2. Розрахункова поверхня відгуку $\sigma_{32} = f(q_1, q_2)$

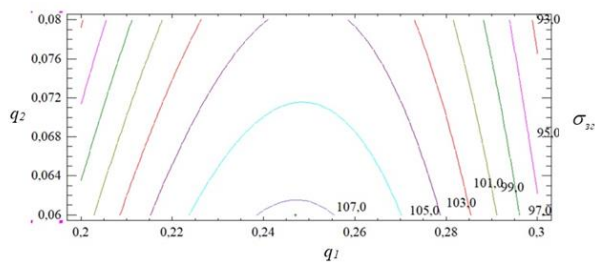


Рис. 3 Конттури розрахункової поверхні відгуку

На основі експериментальних досліджень встановлено, що квадратична залежність першого фактору має більший вплив на показники руйнівних напружень при згинанні ПКМ. Слід зазначити, що вплив вмісту наповнювача ПО на показники руйнівних напружень при згинанні є вищим, порівняно з модифікатором ДХДАФМ (згідно з картою Парето). Аналізуючи розраховані поверхні відгуку визначено, що оптимальні показники руйнівних напружень при згинанні має розроблений епоксидний композит з модифікатором і наповнювачем за наступного

вмісту: модифікатор ДХДАФМ – 0,25 мас.ч., наповнювач ПО – 0,06 мас.ч. ($\sigma_{зг} = 110,6$ МПа).

Аналогічно до вищенаведеної схеми розрахунків оптимізували склад ПКМ 2 за показниками теплостійкості. Кодування натуральних значень компонентів та схема планування експерименту вибрані згідно з табл. 8.

Таблиця 8

Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, q , мас.ч.	Крок варіювання, Δq , мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
М2 (модифікатор ДАФМ)	x_1	0,75	0,25	0,50	0,75	1,00
Наповнювач ПО	x_2	0,07	0,01	0,06	0,07	0,08

Матриця планування факторного експерименту та його результати наведено у табл. 9.

Таблиця 9

Результати дослідження теплостійкості (за Мартенсом)

№ дослідю	Вміст компонентів, q , мас.ч.		Теплостійкість, T , К
	x_1	x_2	
1	0,50	0,06	350
2	1,00	0,06	355
3	0,50	0,08	353
4	1,00	0,08	348
5	0,75	0,07	347
6	1,00	0,07	346
7	0,50	0,07	350
8	0,75	0,08	351
9	0,75	0,06	349

У процесі аналізу результатів дослідження теплостійкості композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 10).

Таблиця 10

Коефіцієнти рівняння регресії для теплостійкості

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
346,78	-0,67	-0,33	1,33	3,03	-2,50

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 346,78 - 0,67x_1 - 0,33x_2 + 1,33x_1^2 + 3,03x_2^2 - 2,50x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена.

Значення дисперсій, що визначали за (5-7), наведено у табл. 11.

Таблиця 11

Значення дисперсії адекватності (S_u^2) і дисперсії відтворення ($\sigma^2(y)$)

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	S_{u1}^2	1	$\sigma^2\{y\}_1$	2
2	S_{u2}^2	1	$\sigma^2\{y\}_2$	2
3	S_{u3}^2	3	$\sigma^2\{y\}_3$	6
4	S_{u4}^2	3	$\sigma^2\{y\}_4$	6
5	S_{u5}^2	3	$\sigma^2\{y\}_5$	6
6	S_{u6}^2	1	$\sigma^2\{y\}_6$	2
7	S_{u7}^2	1	$\sigma^2\{y\}_7$	2
8	S_{u8}^2	3	$\sigma^2\{y\}_8$	6
9	S_{u9}^2	1,000	$\sigma^2\{y\}_9$	2,000

При цьому: $\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 17,0$ $\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 1,889$

Тоді розрахункове значення критерію Кохрена при 5%-му рівні значущості визначали за формулою (8):

$$G_p = \frac{3}{17} = 0,176$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u_{\max}}^2 = 3$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,176$.

Табличне значення критерію Кохрена: $G_{табл} = 0,478$.

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,176 \leq G_{табл} = 0,478$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 12).

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії за формулами (9, 10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить $t_T = 2,1$ [13, 15, 16]. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 13.

Розрахункові значення критерію Стьюдента t_{0p} , t_{12p} , t_{22p} є більшими від t_T , тому вважали, що коефіцієнти b_0 , b_{12} , b_{22} рівняння регресії є значущими. Розрахункові значення t_{1p} , t_{2p} , t_{11p} є меншим від t_T , тому коефіцієнт b_1 , b_2 , b_{11} не є значущими. В результаті відкидання незначущих коефіцієнтів отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 346,78 + 3,03x_2^2 - 2,50x_1x_2$$

Таблиця 12

Експериментальні результати дослідження теплостійкості (за Мартенсом)

№ дос- ліду	Теплостійкість (за Мартенсом), T, К			Середнє значення, T, К
	1	2	3	
1	351	350	349	350
2	354	356	355	355
3	352	352	355	353
4	347	350	347	348
5	346	346	349	347
6	346	347	345	346
7	349	350	351	350
8	353	350	350	351
9	350	348	349	349

Таблиця 13

Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стьюдента (t_p)

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення кри- терію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позна- чення	Зна- чення
1	$S_{b_0}^2$	0,210	t_{0p}	753,75
2	$S_{b_1}^2$	0,315	t_{1p}	1,19
3	$S_{b_2}^2$	0,315	t_{2p}	0,59
4	$S_{b_{11}}^2$	0,944	t_{11p}	1,37
5	$S_{b_{22}}^2$	0,944	t_{22p}	3,43
6	$S_{b_{12}}^2$	0,472	t_{12p}	3,60

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [15, 16].

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u_{\max}}^2 = 3,0$ (табл. 11).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 1,889$.

Тоді: $F = 1,588$.

$F_{(0,05; f_w; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості ($F_{(1)} = 2,8$) [15, 16, 17].

Розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (11). Отже, рівняння адекватно описує склад композиції.

Провівши перетворення згідно формули (13), отримали наступне рівняння регресії з натуральним значенням змінних параметрів:

$$T = 458,5 + 70,0q_1 - 3916,67q_2 - 1000,0qq_2 + 33333,3q_2^2$$

Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 4-6.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що квадратична залежність другого фактору та взаємодія двох факторів є значущими. Слід зазначити, що вплив вмісту наповнювача ПО на показники теплостійкості (за Мартенсом) є вищими, порівняно з модифікатором ДАФМ (згідно з картою Парето).

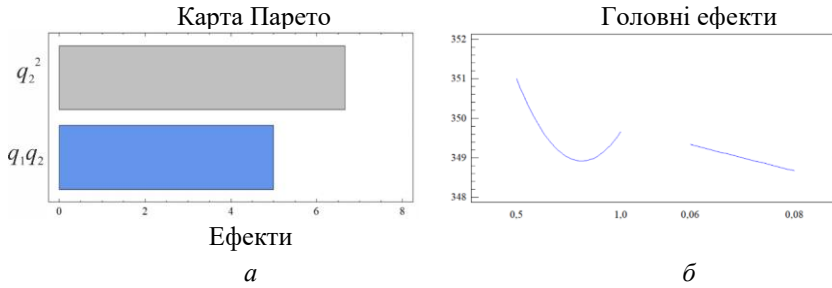


Рис. 4. Карта Парето (а) і головні ефекти у (б)

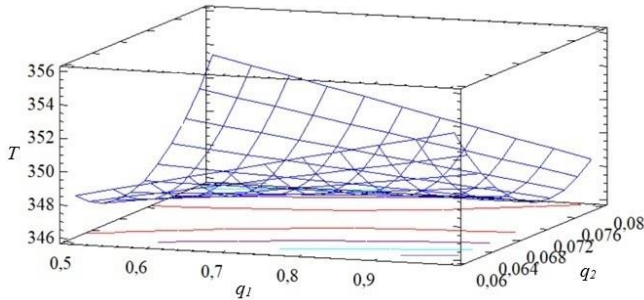
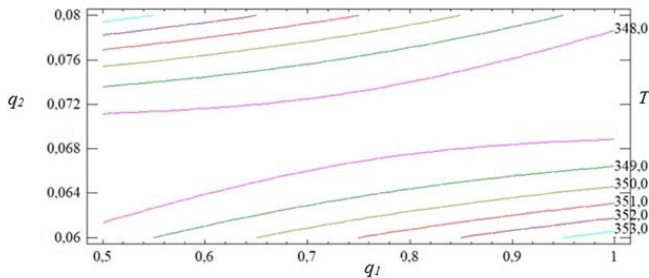
Рис. 5. Розрахункова поверхня відгуку $T = f(q_1, q_2)$ 

Рис. 6. Контури розрахункової поверхні відліку

Аналізуючи розраховані поверхні відгуку визначено, що оптимальні показники теплостійкості ($T = 354$ К) має розроблений епоксидний композит з модифікатором і наповнювачем за наступного вмісту: модифікатор ДАФМ – 1,00 мас.ч., наповнювач ПО – 0,06 мас.ч.

Висновки. В результаті серії дослідів внаслідок математичного планування експерименту показано, що в регресійних залежностях вплив лінійних ефектів є більш вагомим ніж ефекти взаємодії. Це чітко простежується під час дослідження руйнівних напружень при згинанні і теплостійкості полімерних композитних матеріалів. Достовірність отриманих результатів підтверджено картами Парето та розрахунковими поверхнями відгуку. Встановлено оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача для композитного матеріалу із підвищеними руйнівними напруженнями при згинанні – модифікатор ДХДАФМ – 0,25 мас.ч., наповнювач ПО – 0,06 мас.ч., що дозволяє підвищити показники $\sigma_{зг}$ до 110,6 МПа. Для формування композитного матеріалу із поліпшеними теплофізичними властивостями доцільно використовувати інгредієнти у співвідношенні: модифікатор ДАФМ – 1,00 мас.ч., наповнювач ПО – 0,06 мас.ч., що забезпечує формування матеріалу із поліпшеними показниками теплостійкості – $T = 354$ К. Отримані результати надають можливість створення матеріалів із поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних і теплофізичних властивостей, що, в свою чергу, забезпечує підвищення надійності деталей засобів транспорту при їх ремонті розробленими матеріалами.

Список літератури

1. Букетов А.В. Применение методов математической статистики для оптимизации состава защитных покрытий / А.В. Букетов, А.В. Акимов, В.Д. Нигалатий, Н.В. Браило, Аль-Джавахири Али Андан Мансур // Вестник Карагандинского государственного университета. – №1 (85). – 2017. – С. 17-27.
2. Xinyu Li, Liang Gao, Xinyu Shao, Chaoyong Zhang, Cuiyu Wang, Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling, In Computers & Operations Research, Volume 37, Issue 4, – 2010. – P. 656-667, ISSN 0305-0548, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.008>.
3. Manwar Hussain, Atsushi Nakahira, Koichi Niihara, Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al₂O₃ filler dispersion, In Materials Letters, Volume 26, Issue 3, 1996, P. 185-191, ISSN 0167-577X, [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(95\)00224-3](https://doi.org/10.1016/0167-577X(95)00224-3).
4. J Sandler, M.S.P Shaffer, T Prasse, W Bauhofer, K Schulte, A.H Windle, Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, In Polymer, Volume 40, Issue 21, – 1999. – P. 5967-5971, ISSN 0032-3861, [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00166-4).
5. Buketov, A.V., Sapronov, O.O. & Brailo, M.V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler. Strength Mater 46 – 2014. – P. 717-723. <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9605-z>.
6. Duleba Branislav, Greškovič František, Dulebová Eudmila, Jachowicz Tomasz. Possibility of Increasing the Mechanical Strength of CarbonEpoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes // Materials Science Forum: Surface Engineering and Materials in Mechanical Engineering. – Vol. 818. – 2015. – P. 299-302.
7. Сапронов О.О. Оптимізація складу захисного покриття методом математичного планування експерименту // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ. – № 43. – Ч. II. – 2013. – С. 260-267.
8. Кулініч В.Г. Адгезійні та фізико-механічні властивості наповнених полістиролом «Оазис» полімерних композитних матеріалів для транспортної техніки. Науковий вісник Херсонської державної морської академії - №2 (23) – 2020. – С. 80-91.
9. Букетов, А.В., Кулініч, В.Г., Сметанкін, С.О., Андрійчук, В.А., Алексенко, В.Л.: Влияние модификатора C₁₃H₁₂Cl₂N₂ на адгезионные свойства эпоксидной матрицы. Наукові нотатки. – 2017. – С. 69–74.
10. Кулініч, В.Г.: Адгезійні властивості модифікованої 4,4-діамінодифенілметаном епоксидної матриці. Наукові нотатки. – 2019. – С. 118–123.
11. Букетов, А.В., Кулініч, В.Г., Сметанкін, С.А., Букетова, Н.М., Яцюк, В.М. Вплив модифікаторів C₁₃H₁₂Cl₂N₂ та C₁₃H₁₄N₂ на механічні властивості епоксидної матриці. Наукові нотатки. – 2019. – С. 37–45.
12. Buketov, A.V., Kulnich, V.G., Smetankin, S.A., Yatsuk, V.M., Yakushchenko, S.V.: Processes of dynamic thermal destruction of composite epoxy materials as a function of 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane content. Compos. Mech. Comput. Appl. 11. – 2020. – С. 77-98.
13. Buketov, A. V, Brailo, M. V, Stukhlyak, D.P., Yakushchenko, S. V: Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles. Bulletin of the Karaganda University Mathematics, vol. 4, no. 92, - 2018 - P. 119–132.
14. Oughlis-Hammache, F., Hamaidi-Maouche, N., Aissani-Benissad, F., Bourouina-Bacha, S. Central composite design for the modeling of the phenol adsorption process in a fixed-bed reactor. J. Chem. Eng. Data. 55, – 2010. – P. 489–2494.
15. Ramsey, P.H.: Exact type 1 error rates for robustness of student's t test with unequal variances. J. Educ. Stat. 5. – 1980. – P. 337–349.
16. Brailo, M. V, Buketov, A. V, Yakushchenko, S. V, Sapronov, O.O., Dulebova, L.: Optimization of contents of two-component polydispersed filler by applying the mathematical design of experiment in forming composites for transport repairing. Mechanics 1 (89) – 2018 - P. 93-104.
17. Математические методы планирования эксперимента / под ред. В.В. Пененко. Новосибирск: Наука, 1981. 250 с.

A. V. BUKETOV, V. G. KULINICH, S. V. YAKUSHCHENKO, A. M. BURENKOV

IMPROVING OF THE VEHICLE PARTS' RELIABILITY BY APPLICATION OF COATINGS WITH OPTIMIZED INGREDIENTS

The effect of modifiers 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane, 4,4-diaminodiphenylmethane and filler polystyrene "Oasis" on the ultimate tensile stress during bending and heat resistance (by Marthens) of the developed polymer composite materials was analyzed. For the required properties' prediction and modifier's and fillers' content' optimizing in polymer composite materials, statistical processing was performed with usage of the application package STATGRAPHICS® Centurion XVI (Multiple Response Optimization module). The regression equation was obtained by the method of experiment's mathematical planning. As result, the dependence of the initial parameters on the selected variables was established. The ingredients' content for the formation of materials with improved ultimate tensile stress during bending and heat resistance (by Marthens) were established. The description of the researched materials' behavior was performed by usage of the developed mathematical model. In addition, the theoretical analysis of the functional dependence's calculation's result was performed. The reproducibility of the experiments was checked by the Cochran's criteria test. Before verifying the adequacy of the model, insignificant coefficients were discarded by Student's criteria. The adequacy of the obtained model was checked by Fisher's test. The optimal content of modifiers and filler for the formation of materials with improved physical mechanical and thermal physical properties was established. The optimal content of two-component filler for composite material with high destructive bending stresses was determined - 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane modifier – 0,25 wt.%, polystyrene "Oasis" – 0,06 wt.%, which allows to increase ultimate tensile stresses during bending to 110,6 MPa. For the formation of a composite material with improved thermophysical properties, it is advisable to use ingredients in the ratio 4,4-diaminodiphenylmethane modifier – 1,00 wt.%, polystyrene "Oasis" – 0,06 wt.%, which provides the formation of a material with improved heat resistance - $T = 354$ K. Basing on the improved thermal physical and physical-mechanical properties of protective coatings with optimized ingredients' content, the reliability of vehicle parts was increased.

Key words: epoxy matrix, composite, 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane, 4,4-diaminodiphenylmethane, filler polystyrene "Oasis", method of experiments' mathematical planning, regression equation.

Referenses

1. Buketov A.V. Primenenie metodov matematicheskoy statistiki dlja optimizacii sostava zashhitnyh pokrytij / A.V. Buketov, A.V. Akimov, V.D. Nigalatiy, N.V. Brailo, Al'-Dzhavaheri Ali Andan Mansur // Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo univer-siteta. –№1 (85). – 2017. – S. 17-27.
2. Xinyu Li, Liang Gao, Xinyu Shao, Chaoyong Zhang, Cuiyu Wang, Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling, In Computers & Operations Research, Volume 37, Issue 4, – 2010. – P. 656-667, ISSN 0305-0548, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.06.008>.
3. Manwar Hussain, Atsushi Nakahira, Koichi Niihara, Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al₂O₃ filler dispersion, In Materials Letters, Volume 26, Issue 3, 1996, P. 185-191, ISSN 0167-577X, [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(95\)00224-3](https://doi.org/10.1016/0167-577X(95)00224-3).
4. J Sandler, M.S.P Shaffer, T Prasse, W Bauhofer, K Schulte, A.H Windle, Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, In Polymer, Volume 40, Issue 21, – 1999. – P. 5967-5971, ISSN 0032-3861, [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00166-4).
5. Buketov, A.V., Sapronov, O.O. & Brailo, M.V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler. Strength Mater 46 – 2014. – P. 717-723. <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9605-z>.

6. Duleba Branislav, Greškovič František, Dulebová Ludmila, Jachowicz Tomasz. Possibility of Increasing the Mechanical Strength of CarbonEpoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes // Materials Science Forum: Surface Engineering and Materials in Mechanical Engineering. – Vol. 818. – 2015. – P. 299-302.

7. Saponov O.O. Optymizatsiia skladu zakhysnoho pokryttia metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu // Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. – Kirovohrad: KNTU. – № 43. – Ch. II. – 2013. – S. 260-267.

8. Kulinich V.H. Adheziini ta fizyko-mekhanichni vlastyvoli napovnenykh polistyrolom «Oazys» polimernykh kompozytnykh materialiv dlia transportnoi tekhniki. Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii - №2 (23) – 2020. – S. 80-91.

9. Buketov, A.V., Kulinich, V.H., Smetankin, S.O., Andriichuk, V.A., Aleksenko, V.L.: Vlyianye modyfykatora C13H12Cl2N2 na adhezyonnye svoystva epoksydnoi matrytsy. Naukovi notatky. – 2017. – S. 69–74.

10. Kulinich, V.H.: Adheziini vlastyvoli modyfikovanoi 4,4-dyaminodyfenilmetanom epoksydnoi matrytsi. Naukovi notatky. – 2019. – S. 118–123.

11. Buketov, A.V., Kulinich, V.H., Smetankin, S.A., Buketova, N.M., Yatsiuk, V.M. Vplyv modyfikatoriv C13H12Cl2N2 ta C13H14N2 na mekhanichni vlastyvoli epoksydnoi mat-rytsi. Naukovi notatky. – 2019. – S. 37–45.

12. Buketov, A.V., Kulinich, V.G., Smetankin, S.A., Yatsuk, V.M., Yakushchenko, S.V.: Processes of dynamic thermal destruction of composite epoxy materials as a function of 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane content. Compos. Mech. Comput. Appl. 11. – 2020. – С. 77-98.

13. Buketov, A. V, Brailo, M. V, Stukhlyak, D.P., Yakushchenko, S. V: Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles. Bulletin of the Karaganda University Mathematics, vol. 4, no. 92, - 2018 - P. 119–132.

14. Oughlis-Hammache, F., Hamaidi-Maouche, N., Aissani-Benissad, F., Bourouina-Bacha, S. Central composite design for the modeling of the phenol adsorption process in a fixed-bed reactor. J. Chem. Eng. Data. 55, – 2010. – P. 489–2494.

15. Ramsey, P.H.: Exact type 1 error rates for robustness of student's t test with unequal variances. J. Educ. Stat. 5. – 1980. – P. 337–349.

16. Brailo, M. V, Buketov, A. V, Yakushchenko, S. V, Saponov, O.O., Dulebova, L.: Optimization of contents of two-component polydispersed filler by applying the mathematical design of experiment in forming composites for transport repairing. Mechanics 1 (89) – 2018 - P. 93-104.

17. Matematicheskie metody planirovaniya jeksperimenta / pod red. V.V. Penenko. Novosibirsk: Nauka, 1981. 250 s.

Букетов Андрій Вікторович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, тел.050-74-99-314, e-mail: buketov@tntu.edu.ua.

Кулініч В'ячеслав Геннадійович – викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, тел.096-28-21-835, e-mail: kulinich2000@yahoo.com.

Якущенко Сергій Вікторович – PhD, доцент кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, тел.050-76-49-158, e-mail: yakushchenko.sv@ukr.net.

Буренков Олександр Миколайович – старший викладач кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки, Одеська Національна Морська Академія, Одеса, Україна, тел.067-48-60-658, e-mail: altata585@gmail.com.