

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ З ДВОКОМПОНЕНТНОЮ ДОБАВКОЮ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ

Ходаковський О. В., к.т.н., доцент кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: dzgeron@rambler.ru;

Амелін М. Ю., аспірант кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua;

Гусєв В. М., к.т.н., начальник Морського коледжу Херсонської державної морської академії;

Якущенко С. В., асистент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua;

Браїло М. В., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: m.v.brailo@ukr.net

Обґрунтовано, що для підвищення експлуатаційних характеристик деталей транспортних засобів, у тому числі і їх антикорозійних властивостей та зносостійкості, доцільно використовувати захисні полімерні композитні покриття. Показано, що для підвищення показників фізико-механічних і теплофізичних властивостей у епоксидний зв'язувач необхідно вводити добавки: модифікатори, пластифікатори, дисперсні та волокнисті наповнювачі. Актуальним є введення у епоксидний зв'язувач дисперсних добавок, причому ефективно використовувати наповнювачі різної дисперсності у комплексі.

Проаналізовано вплив двокомпонентного полідисперсного наповнювача на модуль пружності при згинанні та ударну в'язкість розробленого епоксидного композиту. Методом математичного планування експерименту встановлено критичний вміст двокомпонентного полідисперсного наповнювача: залізна окалина ($d = 60...63$ мкм) – 60...70 мас.ч., Waltrop ($d = 8...10$ мкм) – 10...20 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Введення до епоксидного зв'язувача двокомпонентного полідисперсного наповнювача дозволяє значно підвищити покази модуля пружності при згинанні захисних покриттів до $E = 5,5...5,8$ ГПа і ударної в'язкості до $W = 8,5...8,7$ кДж/м². Отримані результати дозволяють створити матеріали з поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних властивостей.

Ключові слова: композит, епоксидна матриця, двокомпонентний полідисперсний наповнювач, метод математичного планування експерименту, рівняння регресії.

Постановка проблеми. Відомо [1, 2], що для підвищення експлуатаційних характеристик деталей транспортних засобів, у тому числі і їх антикорозійних властивостей та зносостійкості, широко використовують захисні полімерні композитні покриття. Зокрема, ефективно використовують епоксидні композити, які відзначаються не лише поліпшеними адгезійними, але й фізико-механічними та теплофізичними властивостями. При цьому для підвищення показників зазначених вище характеристик у епоксидний зв'язувач необхідно вводити добавки: модифікатори, пластифікатори, дисперсні та волокнисті наповнювачі. Це забезпечує зміну перебігу процесів структуроутворення матеріалів, що зумовлює підвищення їх когезійної міцності. Останнє приводить до збільшення ресурсу експлуатації захисних покриттів деталей транспортної техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами праць [3–6] показано, що для поліпшення властивостей покриттів у комплексі, які експлуатують в умовах впливу агресивних середовищ і знакозмінних температур, доцільно вводити дисперсні частки наповнювача за критичного вмісту. При цьому необхідно вводити у полімер активні до міжфазової взаємодії дисперсні частки різної зернистості. Це дозволяє максимально перевести полімер у стан зовнішніх поверхневих шарів, забезпечує синергетичний ефект у підвищенні показників властивостей композитних матеріалів (КМ) і захисних покриттів на їх основі.

У даному контексті з метою зменшення кількості експериментальних досліджень пропонують проводити математичне планування експерименту. На попередньому етапі авторами роботи досліджено вплив кількості дисперсних наповнювачів на основні

властивості епоксидних КМ. Встановлено критичний вміст у полімерній матриці як основного наповнювача – залізної окалини ($d = 60 \dots 63$ мкм) та додаткового наповнювача – часток Waltrop ($d = 8 \dots 10$ мкм). Однак цікавим з практичної точки зору є формування композитів з двокомпонентним наповнювачем, що, на наш погляд, дозволить у комплексі поліпшити властивості досліджуваних КМ. У цьому контексті доцільним і необхідним є використання методу математичного планування експерименту, що дозволить скоротити кількість проведених досліджень і оптимізувати вміст інгредієнтів для отримання КМ з максимальними показниками вибраних характеристик.

Мета роботи – методом математичного планування експерименту оптимізувати вміст двокомпонентного полідисперсного наповнювача для захисних покриттів транспортної техніки.

Результати дослідження та їх обговорення. Досліджено модуль пружності при згинанні та ударну в'язкість композитів з різним вмістом основного та додаткового наповнювачів (частки залізної окалини і Waltrop відповідно). Дисперсність часток згідно з гранулометричним аналізом: залізна окалина – 60...63 мкм, Waltrop – 8...10 мкм. Для стандартизації, а також для спрощення розрахунків кожен компонент (наповнювач) 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
Основний наповнювач – залізна окалина	x_1	70	10	60	70	80
Додатковий наповнювач – Waltrop	x_2	20	10	10	20	30

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). Для того, щоб матриця планування була ортогональною [7], вводили коректовані значення рівня x' , які обчислювали за формулою:

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

Розширена матриця планування повного факторного експерименту (ПФЕ) та його результати наведено у табл. 3.

Таблиця 2 – Схема планування експерименту

№ Дослід (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 модуля пружності при згинанні та ударної в'язкості ПКМ

№ дослідю	Вміст компонентів, q, мас.ч.		Модуль пружності при згинанні, E, ГПа	Ударна в'язкість, W, кДж/м ²
	x ₁	x ₂	y ₁	y ₂
1	60	10	5,8	8,5
2	80	10	4,0	7,3
3	60	30	5,5	8,1
4	80	30	4,4	7,4
5	70	20	5,0	8,3
6	80	20	4,6	7,6
7	60	20	5,5	8,7
8	70	30	4,6	8,2
9	70	10	5,4	8,0

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

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

Коефіцієнти регресії визначали за формулою:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sum_{i=1}^N x_{iu}^2}. \quad (3)$$

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
5,06	-0,63	-0,12	-0,03	-0,08	0,18

У результаті при аналізі модуля пружності при згинанні отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 5,06 - 0,63x_1 - 0,12x_2 - 0,03x_1^2 - 0,08x_2^2 + 0,18x_1x_2.$$

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

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

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 дослідю; \bar{y}_i – середнє значення

величини y , отримане при паралельних дослідах.

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

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

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

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

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	0,01	$\sigma^2\{y\}_1$	0,02
2	S_{u2}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_2$	0,02
3	S_{u3}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_3$	0,02
4	S_{u4}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_4$	0,06
5	S_{u5}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_5$	0,02
6	S_{u6}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_6$	0,06
7	S_{u7}^2	0,04	$\sigma^2\{y\}_7$	0,06
8	S_{u8}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_8$	0,02
9	S_{u9}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_9$	0,02

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,15; \quad \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,017.$$

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

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

$$G_{\text{розр}} = \frac{0,03}{0,15} = 0,067.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [9] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u_{\text{max}}}^2 = 0,03$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{\text{розр}} = 0,067$.

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

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{розн} = 0,067 \leq G_{табл} = 0,478.$$

Надалі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 6).

Таблиця 6 – Експериментальні результати дослідження модуля пружності при згинанні матеріалів

№ дослідю	Модуль пружності при згинанні, Е, ГПа			Середнє значення, Е, ГПа
	1	2	3	
1	5,7	5,8	5,9	5,8
2	3,9	4,1	4,0	4,0
3	5,5	5,6	5,4	5,5
4	4,3	4,3	4,6	4,4
5	5,1	4,9	5,0	5,0
6	4,5	4,8	4,5	4,6
7	5,3	5,6	5,6	5,5
8	4,5	4,7	4,6	4,6
9	5,3	5,5	5,4	5,4

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

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}. \tag{9}$$

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стюдента [10, 11]. При цьому визначали табличний (t_m) і розрахунковий критерій (t_p) критерії Стюдента (табл. 7).

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:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}. \tag{10}$$

Таблиця 7 – Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стюдента (t_p)

№ n/n	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,002	t_{0p}	116,63
2	$S_{b_1}^2$	0,003	t_{1p}	12,02
3	$S_{b_2}^2$	0,003	t_{2p}	2,21
4	$S_{b_{11}}^2$	0,008	t_{11p}	0,37
5	$S_{b_{22}}^2$	0,008	t_{22p}	0,91
6	$S_{b_{12}}^2$	0,004	t_{12p}	2,7

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

$$y = 5,06 - 0,63x_1 - 0,12x_2 + 0,18x_1x_2.$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [11]:

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

де $S_{u \max}^2 = 0,03$ – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5).

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

де $S_y^2 = 0,017$ – дисперсія відтворення.

Тоді $F_p = 0,6$.

$F_{(0,05; f_{ao}; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості ($f_1 = N - (k + 1) = 9 - (4 + 1) = 4$, $f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$). Тоді: $F_{(f)} = 2,93$ [10, 11].

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 фактора 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 [11].

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

$$E = 12,23 - 0,099q_1 - 0,138q_2 + 0,0018q_1q_2.$$

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 (модуля пружності при згинанні композитів) від будь-якого фактору (чи двох факторів). Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 1–3.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що обидва фактори є значущими. Слід зазначити, що вплив вмісту основного наповнювача на показники модуля пружності при згинанні є вищим порівняно з додатковим (згідно з картою Парето). Аналізуючи розраховану поверхню відгуку визначено, що оптимальні показники модуля пружності при згинанні має розроблений епоксидний композит з двокомпонентним полідисперсним наповнювачем за наступного вмісту часток: залізна окалина – 60...70 мас.ч., Waltrop – 10...20 мас.ч. ($E = 5,5...5,8$ ГПа).

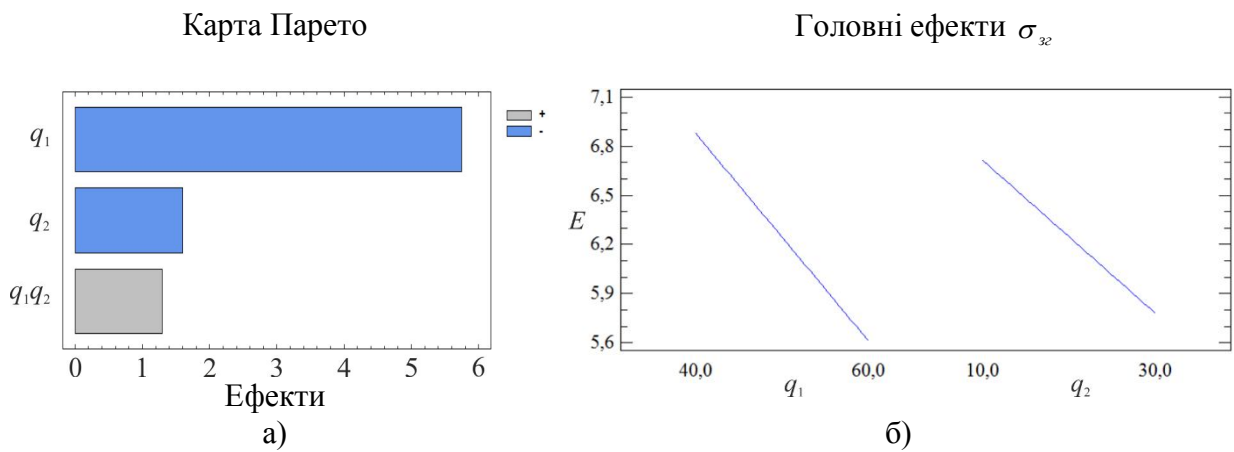


Рисунок 1 – Карта Парето (а) і головні ефекти у (б)

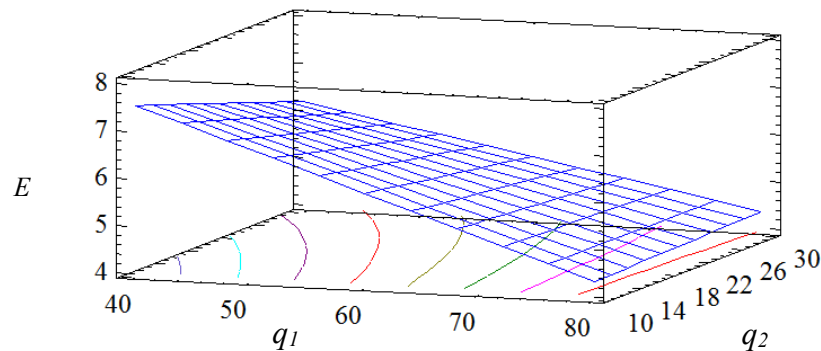


Рисунок 2 – Розрахункова поверхня відгуку $E = f(q_1, q_2)$

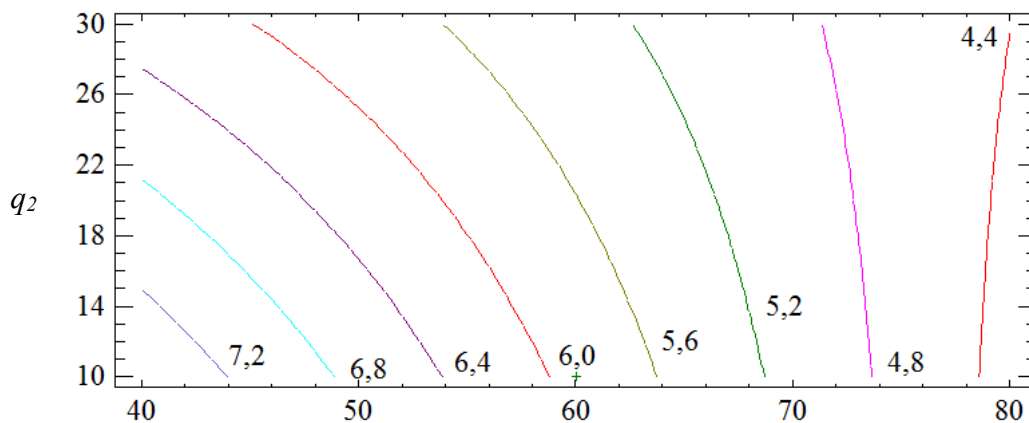


Рисунок 3 – Контури розрахункової поверхні відгуку

Аналогічно до вищенаведеної схеми розрахунків оптимізували склад КМ за показниками ударної в'язкості. Кодування натуральних значень компонентів та схема планування експерименту вибрані згідно з табл. 1 і табл. 2.

У процесі аналізу результатів дослідження ударної в'язкості композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 8).

Таблиця 8 – Коефіцієнти рівняння регресії для ударної в'язкості

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
8,36	-0,50	-0,02	-0,23	-0,28	0,13

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 8,36 - 0,50x_1 - 0,02x_2 - 0,23x_1^2 - 0,28x_2^2 + 0,13x_1x_2 .$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [9].

Значення дисперсій, які визначали за формулами (5–7), наведено у табл. 9.

Таблиця 9 – 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	0,01	$\sigma^2\{y\}_1$	0,02
2	S_{u2}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_2$	0,14
3	S_{u3}^2	0,04	$\sigma^2\{y\}_3$	0,08
4	S_{u4}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_4$	0,14
5	S_{u5}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_5$	0,06
6	S_{u6}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_6$	0,02
7	S_{u7}^2	0,04	$\sigma^2\{y\}_7$	0,08
8	S_{u8}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_8$	0,06
9	S_{u9}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_9$	0,02

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,31; \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,034.$$

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

$$G_p = \frac{0,07}{0,31} = 0,226.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [10, 11] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u\max}^2 = 0,07$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,226$.

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

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,226 \leq G_{табл} = 0,478.$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 10).

Таблиця 10 – Експериментальні результати дослідження ударної в'язкості КМ

№ досліду	Ударна в'язкість, W , кДж/м ²			Середнє значення, W , кДж/м ²
	1	2	3	
1	8,4	8,5	8,6	8,5
2	7	7,5	7,4	7,3
3	7,9	8,3	8,1	8,1
4	7,2	7,7	7,3	7,4
5	8,1	8,4	8,4	8,3
6	7,6	7,7	7,5	7,6
7	8,9	8,5	8,7	8,7
8	8	8,3	8,3	8,2
9	8	8,1	7,9	8

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії за формулами (9, 10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить $t_T = 2,1$ [10, 11]. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 11.

Таблиця 11 – Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стьюдента (t_p)

№ n/n	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,004	t_{0p}	132,44
2	$S_{b_1}^2$	0,006	t_{1p}	6,60
3	$S_{b_2}^2$	0,006	t_{2p}	0,22
4	$S_{b_{11}}^2$	0,017	t_{11p}	1,78
5	$S_{b_{22}}^2$	0,017	t_{22p}	2,16
6	$S_{b_{12}}^2$	0,009	t_{12p}	1,30

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

$$y = 8,36 - 0,50x_1 - 0,28x_2^2.$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [10, 11].

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u_{max}}^2 = 0,07$ (табл. 9). Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 0,034$.

Тоді: $F = 2,032$.

$F_{(0,05; f_w; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості ($F_{(0)} = 2,77$) [10,11].

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:

$$W' = 10,74 - 0,05q_1 + 0,112q_2 - 0,0028q_2^2$$

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

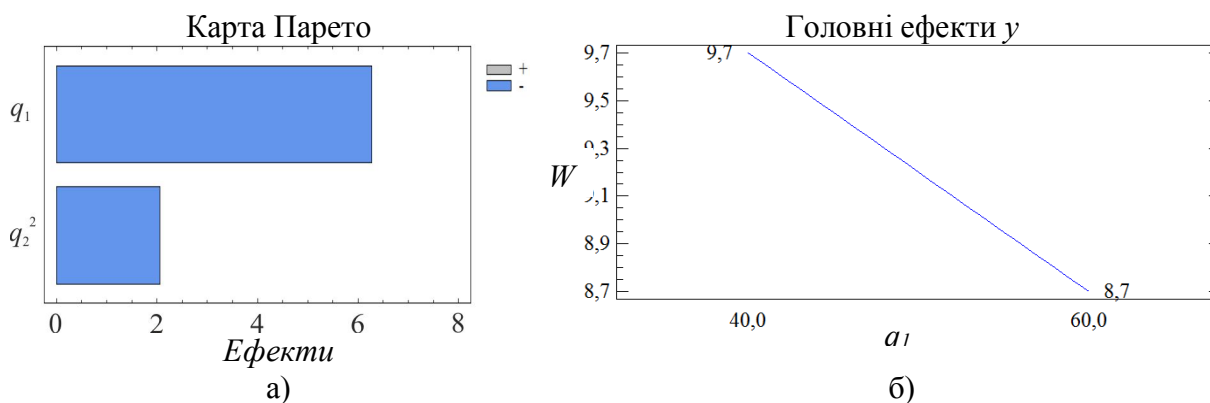


Рисунок 4 – Карта Парето (а) і головні ефекти у (б)

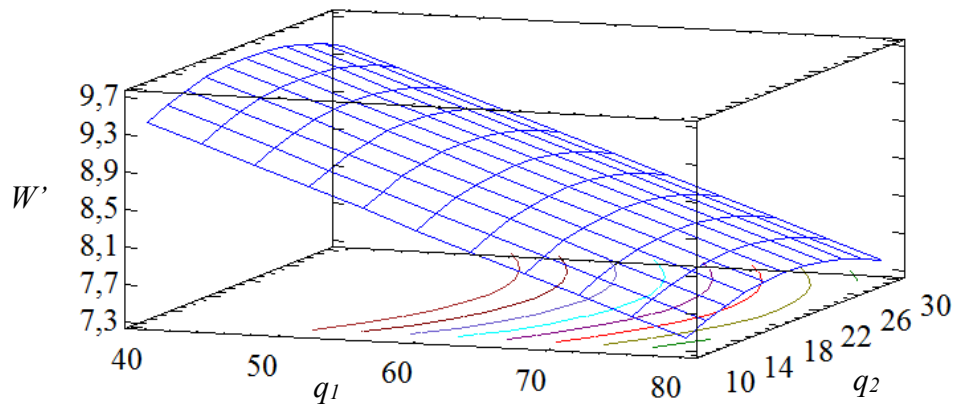
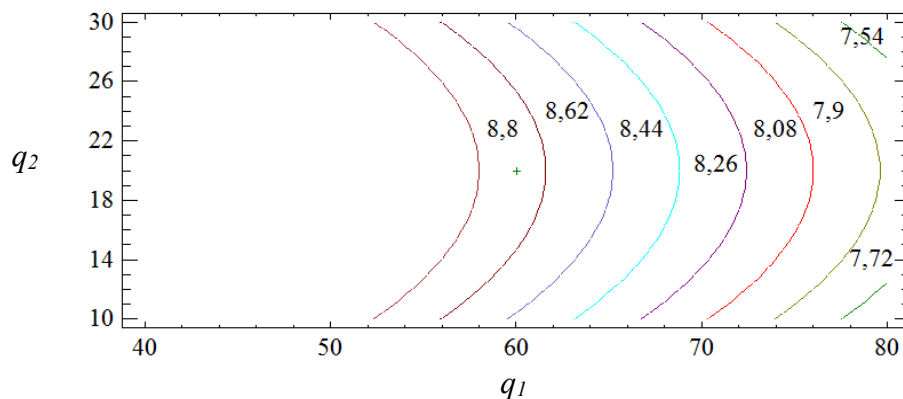

 Рисунок 5 – Розрахункова поверхня відгуку $W = f(q_1, q_2)$


Рисунок 6 – Контури розрахункової поверхні відліку

Отримані результати свідчать, що обидва фактори рівняння регресії є значущими. Слід зазначити, на вихідні параметри композиту впливають лінійна залежність першого фактору та квадратична залежність другого. У процесі аналізу встановлено, що показники ударної в'язкості приймають максимальних значень при вмісті наповнювачів: залізна окалина – 60...70 мас.ч., Waltrop – 10...20 мас.ч. ($W' = 8,5...8,7$ кДж/м²). При подальшому збільшенні вмісту часток спостерігали погіршення показників ударної в'язкості. На нашу думку, це є наслідком агрегації наповнювачів у полімерній матриці, що негативно впливає на фізико-механічні властивості матеріалу. Тому доцільно вводити двокомпонентний полідисперсний наповнювач за вищезазначеного вмісту у модифіковану епоксидну матрицю для підвищення експлуатаційних характеристик при ремонті елементів засобів транспорту.

Висновки. Методом математичного планування експерименту встановлено критичний вміст двокомпонентного полідисперсного наповнювача: залізна окалина ($d = 60...63$ мкм) – 60...70 мас.ч., Waltrop ($d = 8...10$ мкм) – 10...20 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Введення до епоксидного зв'язувача двокомпонентного полідисперсного наповнювача дозволяє значно підвищити покази модуля пружності при згинанні захисних покриттів до $E = 5,5...5,8$ ГПа і ударної в'язкості до $W = 8,5...8,7$ кДж/м². Отримані результати дозволяють створити матеріали з поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних властивостей. Отримані матеріали доцільно використовувати у вигляді захисних покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик і ремонту деталей транспортної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Xinyu Li. Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling / Li Xinyu, Gao Liang, Shao Xinyu, Zhang Chaoyong, Wang Cuiyu // Computers & Operations Research. - V 37, Issue 4. – 2010. – P. 656-667.

2. 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-Джавакхери Али Андан Мансур // Вестник Карагандинского государственного университета. – 2017. – №1 (85). – С. 17-27.

3. Sandler J. Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties / J. Sandler, M.S.P Shaffer, T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte, A.H. Windle // Polymer. – V. 40, Issue 21. – 1999. – P. 5967-5971.

4. Manwar Hussain. Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al₂O₃ filler dispersion / Hussain Manwar, Nakahira Atsushi, Niihara Koichi // Materials Letters. - V 26, Issue 3. – 1996. – P. 185-191.

5. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // Transport. – 2016. – Vol. 31(3). – P. 333-342.

6. Сапронов О.О. Оптимізація складу захисного покриття методом математичного планування експерименту / О.О. Сапронов // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ. – 2013. – № 43. – Ч. II. – С. 260-267.

7. Duleba B. Possibility of Increasing the Mechanical Strength of CarbonEpoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes / B. Duleba, F. Greškovič, L. Dulebová, T. Jachowicz // Materials Science Forum : Surface Engineering and Materials in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 818. – P. 299-302.

8. Buketov A. Investigation of thermophysical properties of epoxy nanocomposites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, M. Brailo, O. Leshchenko, L. Bencheikh & A. Menou // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2016. – Vol. – 628:1. – P. 167-179. (IF 0,493)

9. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента в химической технологии (основное положение, примеры и задачи): учебн.[для студ. высш.учеб.завед.] / А.Г.Бондарь, Г.А. Статюха. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.

10. Грушко И.М. Основы научных исследований: Учебник для технических вузов / И.М.Грушко, В.В. Попов и др.; под ред. В.И.Крутова, В.В. Попова. – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.

11. Математические методы планирования эксперимента / под ред. Пененко В.В. – Новосибирск: Наука, 1981. – 250 с.

REFERENCES

1. Xinyu Li. Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling / Li Xinyu, Gao Liang, Shao Xinyu, Zhang Chaoyong, Wang Cuiyu // Computers & Operations Research. - V 37, Issue 4. – 2010. – P. 656-667.

2. Buketov A.V. Primenenie metodov matematicheskoyj statistiki dlya optimizacii sostava zathitnihkh pokrihtijj / A.V. Buketov, A.V. Akimov, V.D. Nigalatiyj, N.V. Brailo, Alj-Dzhavakheri Ali Andan Mansur // Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2017. – №1 (85). – S. 17-27.

3. Sandler J. Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties / J. Sandler, M.S.P Shaffer, T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte, A.H. Windle // Polymer. – V. 40, Issue 21. – 1999. – P. 5967-5971.

4. Manwar Hussain. Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al₂O₃ filler dispersion / Hussain Manwar, Nakahira Atsushi, Niihara Koichi // Materials Letters. - V 26, Issue 3. – 1996. – P. 185-191.

5. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // Transport. – 2016. – Vol. 31(3). – P. 333-342.

6. Sapronov O.O. Optimizaciya skladu zakhisnogo pokrittya metodom matematichnogo planuvannya eksperimentu / O.O. Sapronov // Zagaljnoderzhavniyj mizhvidomchiyj naukovotekhnichniyj zbirnik. Konstruyuvannya, virobniectvo ta ekspluataciya siljsjkgospodarsjkikh mashin. – Kirovograd: KNTU. – 2013. – № 43. – Ch. II. – S. 260-267.

7. Duleba B. Possibility of Increasing the Mechanical Strength of CarbonEpoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes / B. Duleba, F. Greskovic, L. Dulebova, T. Jachowicz // Materials Science Forum : Surface Engineering and Materials in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 818. – P. 299-302.

8. Buketov A. Investigation of thermophysical properties of epoxy nanocomposites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Saprionov, M. Brailo, O. Leshchenko, L. Bencheikh & A. Menou // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2016. – Vol. – 628:1. – P. 167-179. (IF 0,493)

9. Bondarj A.G. Planirovanie ehksperimenta v khimicheskoyj tekhnologii (osnovne polozhenie, primerih i zadachi): uchebn.[dlya stud. vihssh.ucheb.zaved.] / A.G.Bondarj, G.A. Statyukha. – K.: Vitha shkola,1976. – 184 s.

10. Grushko I.M. Osnovih nauchnikhkh issledovaniyj: Uchebnik dlya tekhnicheskikh vuzov / I.M.Grushko, V.V. Popov i dr.; pod red. V.I.Krutova, V.V. Popova. – M.: Vihsshaya shkola, 1989. – 400 s.

11. Matematicheskie metodih planirovaniya ehksperimenta / pod red. Penenko V.V. – Novosibirsk: Nauka, 1981. – 250 s.

Ходаковский А. В., Амелин М. Ю., Гусев В. Н., Якущенко С. В., Браило Н. В. ПОКРЫТИЯ С ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ДОБАВКОЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

Обосновано, что для повышения эксплуатационных характеристик деталей транспортных средств, в том числе и их антикоррозионных свойств и износостойкости, целесообразно использовать защитные полимерные композитные покрытия. Показано, что для повышения показателей физико-механических и теплофизических свойств в эпоксидное связующее необходимо вводить добавки: модификаторы, пластификаторы, дисперсные и волокнистые наполнители. Актуальным является введение в эпоксидное связующее дисперсных добавок, причем эффективно использовать наполнители различной дисперсности в комплексе.

Проанализировано влияние двухкомпонентного полидисперсного наполнителя на модуль упругости при изгибе и ударную вязкость разработанного эпоксидного композита. Методом математического планирования эксперимента установлено критическое содержание двухкомпонентного полидисперсного наполнителя: железная окалина ($d = 60...63$ мкм) – 60...70 масс.ч., Waltrap ($d = 8...10$ мкм) – 10...20 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Введение в эпоксидное связующее двухкомпонентного полидисперсного наполнителя позволяет значительно повысить показатели модуля упругости при изгибе защитных покрытий до $E = 5,5 \dots 5,8$ ГПа и ударной вязкости до $W = 8,5...8,7$ кДж/м². Полученные результаты позволяют создать материалы с улучшенными в комплексе показателям физико-механических свойств.

Ключевые слова: композит, эпоксидная матрица, двухкомпонентный полидисперсный наполнитель, метод математического планирования эксперимента, уравнение регрессии.

Khodakovskii A. V., Amelin M. Yu., Gusev V. N., Yakushchenko S. V., Brailo N. V. COATINGS WITH A TWO-COMPONENT ADDITIVE FOR TRANSPORT EQUIPMENT

Annotation. It is reasonable to use protective polymeric composite coatings to improve the operational characteristics of vehicle parts, including their anti-corrosion properties and wear resistance. It is shown that in order to increase the parameters of physicomechanical and thermophysical properties in epoxy binder it is necessary to introduce additives: modifiers, plasticizers, disperse and fibrous fillers. Actual is the introduction of dispersed additives into the epoxy binder, and it is effective to use fillers of different dispersity in the complex.

The effect of a two-component polydisperse filler on the flexural modulus and toughness of a developed epoxy composite is analyzed. The critical content of a two-component polydisperse filler was established by the method of mathematical experiment planning: iron scale ($d = 60...63 \mu\text{m}$) - 60 ... 70 parts by weight, Waltrap ($d = 8...10 \mu\text{m}$) – 10...20 parts by weight by 100 parts by mass. epoxy oligomer ED-20. The introduction of a two-component polydisperse filler into the epoxy binder makes it possible to significantly increase the modulus of elasticity in the bending of protective coatings to $E = 5.5...5.8$ GPa and the toughness to $W = 8.5...8.7$ kJ/m². The results obtained make it possible to create materials with improved parameters of physicomechanical properties.

Keywords: composite, epoxy matrix, two-component polydisperse filler, method of mathematical experiment planning, regression equation.

© Хоодаковский О. В., Амелин М. Ю., Гусев В. М., Якущенко С. В., Браило М. В.

Статтю прийнято до редакції 28.11.17