

А.В. Букетов¹, М.В. Браїло¹, В.Л. Алексенко¹, В.М. Овдій²

¹Херсонська державна морська академія

²Херсонський державний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВМІСТУ ДВОКОМПОНЕНТНОГО НАПОВНЮВАЧА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Методом математичного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного дисперсного наповнювача у композитному матеріалі за властивостями руйнівних напружень та модуля пружності при згинанні і теплостійкості (за Мартенсом). Встановлено, що поєднання двох наповнювачів різної дисперсності покращує когезійні властивості матеріалів. Визначено, що для розробленої матриці на основі твердників ПЕПА (5 мас.ч.) і Telalit 410 (5 мас.ч.) у епоксидному олігомері CHS-Ероху 525 (100 мас.ч.) оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача становить: графіт АГ-1500 – 40...60 мас.ч. і перліт – 10...30 мас.ч.

Ключові слова: епоксидний композит, математичне планування експерименту, полімер, властивості.

Табл. 15. Форм. 12. Літ. 7.

Букетов А.В., Браило Н.В., В.Л. Алексенко, Овдей В.Н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ДВОКОМПОНЕНТНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методом математического планирования эксперимента определено оптимальное содержание двокомпонентного дисперсного наполнителя в композитном материале по свойствах разрушающих напряжений и модуля упругости при изгибе, а также теплостойкости (за Мартенсом). Установлено, что сочетание двух наполнителей различной дисперсности улучшает когезионные свойства материала. Определено, что для разработанной матрицы на основе отвердителей ПЕПА (5 мас.ч.) и Telalit 410 (5 мас.ч.) в эпоксидном олигомере CHS-Ероху 525 (100 мас.ч.), оптимальное содержание двокомпонентного наполнителя составляет: графит АГ-1500 – 40...60 мас.ч. и перлит – 10...20 мас.ч.

Ключевые слова: эпоксидный композит, математическое планирование эксперимента, полимер, свойства.

A.V. Buketov, M.V. Brailo, V.L. Aleksenko, V.M. Ovdey

DEFINITION OF THE OPTIMUM MAINTENANCE OF THE TWO DIFFERENT FILLER BY THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF EXPERIMENT

Mathematical planning method experiment determined optimal composition of the two different filler in the composite material for destructive stress properties, flexural modulus and heat resistance (Martens). The matrix of orthogonal central composite planning of experiment according to which 9 researches were conducted is made, each of which repeated three times for the purpose of an exception of system mistakes. The mathematical model $y = f(x_1, x_2)$ is formulated in the form of the regression equation. For statistical analysis of the experimental results an inspection of reproduction of researches on Kokhren's criterion is carried out. The significance of the regression coefficients determined by Student's test. The adequacy of the resulting model is checked by Fisher. Based on experimental studies demonstrated that both factors are significant. It is determined that the union of two different fillers dispersion improves the cohesive properties of the materials. For developed matrix based PEPA (5 parts) and Telalit 410(5 parts) hardeners in epoxy oligomer CHS-Epoxy 525 (100 parts) optimum content of the two different filler is graphite AG – 1500 – 60 parts and perlite – 10...30 parts. Such a material has a destroying the bending stress – $\sigma_b = 28,6...35,6$ MPa, elastic modulus – $E = 5,4...6,2$ GPa and heat resistance (Martens) – $T = 349...350$ K.

Keywords: epoxy composite, mathematical planning of the experiment, polymer, properties.

Вступ. Важливою проблемою на сьогодні є формування конструкційних матеріалів з поліпшеними властивостями [1]. Водночас властивості матеріалів, у тому числі і полімерних, залежать від багатьох керованих і некерованих факторів, які визначають апріорною інформацією у вигляді результатів дослідження теоретичними та експериментальними методами. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є отримання необхідних даних при мінімальній кількості дослідів. Одним із варіантів вирішення даної задачі є використання методу математичного планування експерименту. Застосування математичної моделі дозволяє не тільки зменшити кількість необхідних дослідів, але й підвищити економічність при проведенні експерименту за рахунок зменшення матеріальних затрат і часу на їх проведення [2, 3].

Відомо [4], що одним із методів поліпшення властивостей композитних матеріалів (КМ) на основі епоксидної матриці є введення у зв'язувач різних за природою та дисперсністю наповнювачів. Це забезпечує створення матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Водночас дисперсність наповнювачів різної природи впливає на швидкість

перебігу процесів структуроутворення матеріалів при їх зшиванні та виникнення хімічних та фізичних зв'язків на межі поділу фаз «наповнювач – полімер» [5]. При цьому метод математичного планування експерименту дозволяє оптимізувати вміст декількох наповнювачів різної природи та дисперсності в епоксидному композиті за мінімальної кількості проведених експериментів [6].

Мета роботи – методом математичного планування експерименту встановити оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача різної фізичної природи і дисперсності для формування КМ з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

Обговорення експериментальних результатів дослідження. Використовуючи активний експеримент досліджували когезійні властивості КМ з двокомпонентним наповнювачем, що містить різні за природою та дисперсністю частки. Вміст двокомпонентного наповнювача у вигляді основних та додаткових часток вибрано на основі попередніх результатів досліджень когезійних властивостей КМ. У табл. 1 наведено основні діапазони вмісту інгредієнтів, які вводили у епоксидний зв'язувач для поліпшення руйнівних напружень при згинанні КМ. Це, зокрема: графіт антифрикційний марки АГ-1500 (ТУ 48-20-4-87) і перліт (ГОСТ 25226-96).

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 – графіт антифрикційний марки АГ-1500	x_1	50	10	40	50	60
Додатковий наповнювач – перліт	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 значеннями 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

Параметри	№ Дослід (u)	x_0	x_1	x_2	$x'_1 = x_1^2 - 0,67$	$x'_2 = x_2^2 - 0,67$	$x_1 x_2$
План ПФЕ (2^2)	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
Нульова точка	5	1	0	0	-0,67	-0,67	0
Зіркові точки	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 та модуля пружності при згинанні і теплостійкості (за Мартенсом) КМ

№ досліджу	Вміст компонентів, q , мас.ч.		Руйнівні напруження при згинанні, σ_{32} , МПа	Модуль пружності при згинанні, E , ГПа	Теплостійкість (за Мартенсом), T , К
	x_1	x_2	y_1	y_2	y_3
1	40	10	25,2	3,9	338
2	60	10	35,6	5,4	349
3	40	30	28,7	4,9	346
4	60	30	28,6	5,6	349
5	50	20	37,5	5,0	349
6	60	20	29,0	6,2	350
7	40	20	27,5	4,8	350
8	50	30	30,5	4,3	350
9	50	10	18,0	4,1	351

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:

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

Таблиця 4. Коефіцієнти рівняння регресії

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
31,09	1,97	1,5	0,43	-3,57	-2,63

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 31,09 + 1,97x_1 + 1,5x_2 + 0,43x_1^2 - 3,57x_2^2 - 2,63x_1x_2.$$

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 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	0,16	$\sigma^2\{y\}_1$	0,32
2	S_{u2}^2	0,21	$\sigma^2\{y\}_2$	0,42
3	S_{u3}^2	0,13	$\sigma^2\{y\}_3$	0,26
4	S_{u4}^2	0,31	$\sigma^2\{y\}_4$	0,62
5	S_{u5}^2	0,28	$\sigma^2\{y\}_5$	0,56
6	S_{u6}^2	0,13	$\sigma^2\{y\}_6$	0,26
7	S_{u7}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_7$	0,14
8	S_{u8}^2	0,09	$\sigma^2\{y\}_8$	0,18
9	S_{u9}^2	0,49	$\sigma^2\{y\}_9$	0,98

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,37$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,21$$

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

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

$$G_{\text{розр}} = \frac{0,49}{1,87} = 0,262$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [3] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u_{\text{max}}}^2 = 0,49$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{\text{розр}} = 0,262$.

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

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{\text{розр}} = 0,262 \leq G_{\text{табл}} = 0,478.$$

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

Таблиця 6. Експериментальні результати дослідження руйнівних напружень при згинанні матеріалів

№ досліджу	Руйнівні напруження при згинанні, σ_{3z} , МПа			Середнє значення, σ_{3z} , МПа
	1	2	3	
1	25,6	24,8	25,2	25,2
2	35,2	35,5	36,1	35,6
3	28,6	29,1	28,4	28,7
4	28,0	28,7	29,1	28,6
5	37,1	37,3	38,1	37,5
6	28,7	28,9	29,4	29,0
7	27,3	27,8	27,4	27,5
8	30,2	30,5	30,8	30,5
9	17,7	17,5	18,8	18,0

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 Стюдента [3, 7]. 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 $t_T = 2,04$.

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:

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

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

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,023	t_{0p}	199,79
2	$S_{b_1}^2$	0,035	t_{1p}	10,37
3	$S_{b_2}^2$	0,035	t_{2p}	7,89
4	$S_{b_{11}}^2$	0,105	t_{11p}	1,34
5	$S_{b_{22}}^2$	0,105	t_{22p}	11,16
6	$S_{b_{12}}^2$	0,053	t_{12p}	11,43

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

$$y = 31,09 + 1,97x_1 + 1,5x_2 - 3,57x_2^2 - 2,63x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3, 7]:

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

де $S_{u \max}^2 = 0,49$ – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5);

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

$S_y^2 = 0,21$ – дисперсія відтворення;

Тоді: $F_p = 2,33$.

$F_{(0,05; f_{ab}; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-ному рівні значущості ($f_l = N - (k + 1) = 9 - (5 + 1) = 3, f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$). Тоді: $F_{(l)} = 2,8$ [2, 7].

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

Отже, на основі проведених розрахунків можна стверджувати, що обидва фактори є важливими, тому що значення коефіцієнтів x_1 і x_2 є великими за абсолютною величиною. Однак, на основі результатів експериментальних досліджень (табл. 3) доведено, що максимальними показниками руйнівних напружень при згинанні КМ відзначається епоксидний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (50...60 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (10...20 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Аналогічно схемі розрахунків математичного планування експерименту за властивістю руйнівних напружень при згинанні, визначали адекватність композиції за властивостями модуля пружності при згинанні та теплостійкості (за Мартенсом). Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах та схема планування експерименту вибрано згідно табл. 1 і табл. 2.

При аналізі результатів дослідження модуля пружності при згинанні композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 8).

Таблиця 8. Коефіцієнти рівняння регресії для модуля пружності при згинанні

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
4,87	0,6	0,23	0,67	-0,63	-0,2

В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 4,87 + 0,6x_1 + 0,23x_2 + 0,67x_1^2 - 0,63x_2^2 - 0,2x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [3].

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	0,04	$\sigma^2\{y\}_1$	0,32
2	S_{u2}^2	0,04	$\sigma^2\{y\}_2$	0,42
3	S_{u3}^2	0,04	$\sigma^2\{y\}_3$	0,26
4	S_{u4}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_4$	0,62
5	S_{u5}^2	0,04	$\sigma^2\{y\}_5$	0,56
6	S_{u6}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_6$	0,26
7	S_{u7}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_7$	0,14
8	S_{u8}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_8$	0,18
9	S_{u9}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_9$	0,98

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ii}^2 = 1,87$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,21$$

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

$$G_p = \frac{0,07}{0,37} = 0,189$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [7] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{i \max}^2 = 0,07$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,189$.

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

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,262 \leq G_{табл} = 0,478$$

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

Таблиця 10. Експериментальні результати дослідження модуля пружності при згинанні КМ

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

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 11) за формулами (9-10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить $t_T = 2,04$ [3, 7]. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 11.

Таблиця 11. 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	$S_{b_0}^2$	0,0046	t_{0p}	53,12
2	$S_{b_1}^2$	0,00068	t_{1p}	23,08
3	$S_{b_2}^2$	0,00068	t_{2p}	8,85
4	$S_{b_{11}}^2$	0,0021	t_{11p}	14,56
5	$S_{b_{22}}^2$	0,0021	t_{22p}	13,7
6	$S_{b_{12}}^2$	0,001	t_{12p}	6,25

Враховуючи те, що розрахункові значення критерію Стюдента $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{22p}, t_{12p}$ є більшими від t_T вважали, що коефіцієнти рівняння регресії є значущими. В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 4,87 + 0,6x_1 + 0,23x_2 + 0,67x_1^2 - 0,63x_2^2 - 0,2x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3, 7].

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

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 0,04$.

Тоді: $F = 1,75$.

$F_{(0,05; f_E; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ($F_{(0)} = 3,6$).

Слід зазначити, що оскільки розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (11), можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

На основі експериментальних досліджень доведено, що обидва фактори є значущими. При цьому встановлено (табл. 3), що максимальними показниками модуля пружності при згинанні має епоксидний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (60 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (20...30 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

При аналізі результатів дослідження теплостійкості (за Мартенсом) композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 12).

Таблиця 12. Коефіцієнти рівняння регресії для теплостійкості КМ

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
344,33	2,33	1,17	-3,0	-2,5	-2,0

В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 685,14 + 2,33x_1 + 1,17x_2 - 3,0x_1^2 - 2,5x_2^2 - 2,0x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [3].

Значення дисперсій, які визначали за формулами (5-7) наведено у табл. 13.

Таблиця 13. Значення дисперсії адекватності (S_u^2) і дисперсії відтворення ($\sigma^2(y)$)

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умове позначення	Значення	Умове 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	1	$\sigma^2\{y\}_4$	2
5	S_{u5}^2	3	$\sigma^2\{y\}_5$	6
6	S_{u6}^2	4	$\sigma^2\{y\}_6$	8
7	S_{u7}^2	1	$\sigma^2\{y\}_7$	2
8	S_{u8}^2	3	$\sigma^2\{y\}_8$	6
9	S_{u9}^2	3	$\sigma^2\{y\}_9$	6

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 20$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 2,22$$

Розрахункове значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значущості визначали за формулою (8):

$$G_{розр} = \frac{4}{20} = 0,2$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [7] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u\max}^2 = 4$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,2$. Табличне значення критерію Кохрена: $G_{табл} = 0,478$.

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,2 \leq G_{табл} = 0,478$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 14).

Таблиця 14. Експериментальні результати дослідження теплостійкості КМ

№ досліду	Теплостійкість КМ, T, К			Середнє значення, T, К
	1	2	3	
1	338	339	337	338
2	350	349	348	349
3	348	345	345	346
4	350	348	349	349
5	347	350	350	349
6	348	352	350	350
7	351	350	349	350
8	348	351	351	350
9	353	350	350	351

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 15) за формулами (9 - 10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стюдента, табличне значення якого становить $t_m = 2,04$ [3, 7]. Розрахункові значення критерію Стюдента наведено у табл. 15.

Таблиця 15. Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стюдента (t_p)

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,25	t_{0p}	692,48
2	$S_{b_1}^2$	0,37	t_{1p}	3,82
3	$S_{b_2}^2$	0,37	t_{2p}	1,92
4	$S_{b_{11}}^2$	1,11	t_{11p}	2,86
5	$S_{b_{22}}^2$	0,0023	t_{22p}	2,38
6	$S_{b_{12}}^2$	0,56	t_{12p}	2,67

Враховуючи значимі і не значимі коефіцієнти, рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = 685,14 + 2,33x_1 - 3,0x_1^2 - 2,5x_2^2 - 2,0x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3, 7].

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u\max}^2 = 4$ (табл. 13).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 4,44$..

Тоді: $F_p = 0,9$.

$F_{(0,05; f_T; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ($F_{(0)} = 3,6$).

Слід зазначити, що оскільки розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (11), можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що обидва фактори є значущими. Однак, на основі результатів експериментальних досліджень (табл. 3) доведено, що максимальними показниками теплостійкості (за Мартенсом) характеризується композит наступного складу: основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (50 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (10 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

Висновки. Методом ортогонального центрального композиційного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного дисперсного наповнювача у епоксидному композиті з поліпшеними когезійними властивостями. Композицію слід формувати наступного складу: твердник ПЕПА (5 мас.ч.), твердник Telalit 410 (5 мас.ч.), епоксидний олігомер CHS-Ероху 525 (100 мас.ч.), основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (60 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (10...30 мас.ч.). Такий матеріал має руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{зг} = 28,6...35,6$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 5,4...6,2$ ГПа і теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 349...350$ К.

В подальшому планується дослідити триботехнічні властивості розроблених матеріалів.

1. P.O. Maruschak, I.V. Konovalenko, V. Gliha, et al., "Physical regularities in cracking of nanocoating and the method for automated determination of crack network parameters" in: Book of Abstracts of the 19th Conf. on Materials and Technology (November 22-23, 2011, Slovenia, Portoroz) (2011), p. 52.
2. Крутов В.И. Основы научных исследований: Учебник для технических вузов / Крутов В.И., Грушко И.М., Попов В.В. и др.; Под ред. Крутова В.И., Попова В.В. – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.
3. Зазимко В. Г. Оптимизация свойств строительных материалов: Учебное пособие для вузов / Зазимко В. Г. – М.: Транспорт, 1981. – 103 с.
4. Тхір І.Г., Гуменецький Т.В. Фізико-хімія полімерів: Навч. посібник. – Львів: вид. нац. універ. «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
5. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Редько О.І. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості: монографія. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
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. Планирование эксперимента и применение вычислительной техники в процессе синтеза резины: сб. статей / под ред. В.Ф. Евстратова, А.Г. Шварца. – М.: Химия, 1970. – 352 с.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.