

УДК 667.64:678.026

М.В. Браїло¹, А.В. Букетов¹, С.В. Якущенко¹, Ludmila Dulebova²¹Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна²Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ З ПОЛІПШЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ У ЗАСОБАХ ТРАНСПОРТУ**

Досліджено вплив двокомпонентного дисперсного наповнювача на руйнівні напруження при згинанні та теплостійкість (за Мартенсом) модифікованої епоксидно-поліефірної матриці методом математичного планування експерименту. Проведено теоретичний аналіз результатів розрахунків функціональних залежностей та отримано модель, що адекватно описує поведінку досліджуваного матеріалу. За допомогою отриманих рівнянь регресії встановлено оптимальні концентрації основного та додаткового наповнювачів у композиті для кожної властивості. Експериментально доведено, що оптимальними показниками характеризується композиція зі вмістом: слюда – 20...30 мас.ч., оксид (II) міді – 60 мас.ч.

Ключові слова: композит, епоксидно-поліефірна матриця, бідисперсний наповнювач, метод математичного планування експерименту, рівняння регресії.

Рис. 6. Літ. 8

Н.В. Браило¹, А.В. Букетов¹, С.В. Якущенко¹, Ludmila Dulebova²¹Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина²Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СРЕДСТВАХ ТРАНСПОРТА**

Исследовано влияние двухкомпонентного дисперсного наполнителя на разрушительные напряжения при сгибании и теплостойкость (по Мартенсу) модифицированной эпоксидно-полиэфирной матрицы методом математического планирования эксперимента. Проведен теоретический анализ результатов расчетов функциональных зависимостей и получено модель, которая адекватно описывает поведение исследуемого материала. С помощью полученных уравнений регрессии установлены оптимальные концентрации основного и дополнительного наполнителей в композите для каждого свойства. Экспериментально доказано, что оптимальными показателями характеризуется композиция с содержанием: слюда - 20 ... 30 мас.ч., оксид (II) меди - 60 мас.ч.

Ключевые слова: композит, эпоксидно-полиэфирная матрица, бидисперсный наполнитель, метод математического планирования эксперимента, уравнение регрессии.

M. Brailo¹, A. Buketov¹, S. Yakushchenko¹, Ludmila Dulebova²¹Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine²Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic**THE APPLICATION OF THE METHOD OF EXPERIMENT PLANNING IN CREATING A POLYMERIC COMPOSITE WITH IMPROVED PERFORMANCE FOR ITS USE IN TRANSPORT**

The influence of the two-component disperse filler on the destructive tensions during the flexion and heat resistance (by Martens) of the modified epoxy-polyester matrix by the method of mathematical planning of the experiment was investigated. A theoretical analysis of the results of the calculations of functional dependences is carried out and a model that adequately describes the behavior of the investigated material is obtained. With the help of the obtained regression equations, optimal concentrations of the main and additional fillers in the composite for each property were determined. It has been experimentally proved that by the optimum parameters is characterized the composite with the content: mica - 20...30 mas.fr., Copper oxide (II) - 60 mas.fr.

Keywords: composite, epoxy-polyester matrix, bidisperse filler, method of mathematical planning of the experiment, regression equation.

Постановка проблеми. Створення конструкційних полімерних матеріалів, з наперед відомим комплексом властивостей, є важливим завданням при поліпшенні технічних та експлуатаційних характеристик засобів транспорту, у тому числі морського та річкового, які працюють в умовах впливу агресивного середовища і значних знакозмінних навантаженнях [1, 2]. При розробленні композитного матеріалу встановлення необхідних фізико-механічних, теплофізичних властивостей, які б задовольняли критерії до кінцевого продукту, супроводжується значними економічними та часовими затратами. Одним із способів зменшення вищезазначених параметрів є застосування математичної моделі, яка достовірно описує характеристики

досліджуваного матеріалу з різними змінними факторами. Для ефективного проведення експериментальних досліджень, мінімізації відхилень експериментальних даних і розрахункових значень доцільним є використання методу ортогонального центрального композиційного планування експерименту [3,4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальновідомо [5], що дієвим методом підвищення показників властивостей композитних матеріалів (КМ) на основі полімерної матриці є введення у зв'язувач різних за природою та дисперсністю наповнювачів. Актуальними є дослідження епоксидно-поліефірної матриці, наповненої частками різної природи і дисперсності. На попередньому етапі нами було досліджено вплив наповнювачів слюда та оксид (II) міді на когезійні властивості КМ. Встановлено оптимальний вміст дрібнодисперсних (8...10 мкм) та дисперсних (20...40 мкм) часток наповнювачів різної природи для виготовлення захисних покриттів різного функціонального призначення. Одночасне поєднання наповнювачів різної дисперсності забезпечує рівномірний розподіл часток в об'ємі зв'язувача і створення матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Застосування методу математичного планування дозволяє встановити сукупність впливу незалежно розподілених наповнювачів та визначити їх концентрації у розробленій модифікованій епоксидно-поліефірній матриці.

Мета роботи – використовуючи метод ортогонального центрального композиційного планування експерименту, встановити оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача різної фізичної природи і дисперсності для формування КМ з поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями.

Результати дослідження та їх обговорення. Використовували активний експеримент і досліджували руйнівні напруження при згинанні та теплостійкість за (Мартенсом) 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 епоксидно-поліефірний зв'язувач для отримання КМ з поліпшеними руйнівними напруженнями при згинанні та теплостійкістю. Це, зокрема: слюда марки МС-20-80 з дисперсністю 20...40 мкм – основний наповнювач. Мінеральний склад: слюда-мусковіт $KAl_2[(OH, F)_2AlSi_3O_{10}]$, хімічний склад згідно з ТУ 5725-005-40705684-2001: оксид кремнію (SiO_2) – 44...50 %, оксид алюмінію (Al_2O_3) – 27...35 %, оксид заліза (Fe_2O_3) – менше 5 %, оксид магнію (MgO) – менше 2 %, оксид калія (K_2O) – більше 8 %, водорозчинні солі – менше 0,2 %. Додатковий наповнювач – оксид міді (Cu (II) оксид). Це бінарна неорганічна сполука з хімічною формулою CuO , амфотерний оксид двовалентного Cu з дисперсністю 8...10 мкм.

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 – слюда	x_1	30	10	20	30	40
Додатковий наповнювач – оксид (II) міді	x_2	40	20	20	40	60

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 [6], вводили коректовані значеннями рівня x'_i , які обчислювали за формулою:

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

Розширену матрицю планування повного факторного експерименту (ПФЕ) та його результати наведено у табл. 3.

Таблиця 2

Схема планування експерименту

№ Дослідження (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 та теплостійкості КМ

№ дослідження	Вміст компонентів, q , мас.ч.		Руйнівні напруження при згинанні, σ_{32} , МПа	Теплостійкість (за Мартенсом), T , К
	x_1	x_2	y_1	y_2
1	20	20	38,9	341
2	40	20	41,2	344
3	20	60	45,5	354
4	40	60	43,6	347
5	30	40	44,2	348
6	40	40	40,4	343
7	20	40	43,1	346
8	30	60	48,3	357
9	30	20	44,4	349

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 4

Коефіцієнти рівняння регресії

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
44,91	-0,38	2,15	-3,52	1,08	-1,05

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

$$y = 44,91 - 0,38x_1 + 2,15x_2 - 3,52x_1^2 + 1,08x_2^2 - 1,05x_1x_2.$$

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:

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

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	0,84	$\sigma^2\{y\}_1$	1,68
2	S_{u2}^2	0,91	$\sigma^2\{y\}_2$	1,82
3	S_{u3}^2	2,11	$\sigma^2\{y\}_3$	4,22
4	S_{u4}^2	0,84	$\sigma^2\{y\}_4$	1,68
5	S_{u5}^2	0,31	$\sigma^2\{y\}_5$	0,62
6	S_{u6}^2	0,57	$\sigma^2\{y\}_6$	1,14
7	S_{u7}^2	0,04	$\sigma^2\{y\}_7$	0,08
8	S_{u8}^2	0,84	$\sigma^2\{y\}_8$	1,68
9	S_{u9}^2	0,49	$\sigma^2\{y\}_9$	0,98

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 6,95$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,77$$

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

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

$$G_{розр} = \frac{2,11}{6,95} = 0,304$$

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: $S_{u_{\max}}^2 = 2,11$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,304$.

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

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{розр} = 0,304 \leq G_{табл} = 0,478.$$

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

Таблиця 6

Експериментальні результати дослідження руйнівних напружень при згинанні матеріалів

№ досліду	Руйнівні напруження при згинанні, σ_{3z} , МПа			Середнє значення, σ_{3z} , МПа
	1	2	3	
1	37,9	39,7	39,1	38,9
2	41,8	40,1	41,7	41,2
3	44,1	45,4	47	45,5
4	42,6	43,8	44,4	43,6
5	43,7	44,8	44,1	44,2
6	39,6	40,5	41,1	40,4
7	43,3	42,9	43,1	43,1
8	49,3	48,1	47,5	48,3
9	44,1	45,2	43,9	44,4

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

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

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента [7,8]. При цьому визначали табличний (t_m) і розрахунковий критерій (t_p) критерію Стьюдента (табл. 7).

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

Визначали розрахункові значення критерію Стьюдента (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 Стьюдента (t_p)

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умвне позначення	Значення	Умвне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,086	t_{0p}	148,39
2	$S_{b_1}^2$	0,129	t_{1p}	1,07
3	$S_{b_2}^2$	0,129	t_{2p}	5,99

4	$S_{b_{11}}^2$	0,386	t_{11p}	5,66
5	$S_{b_{22}}^2$	0,386	t_{22p}	1,74
6	$S_{b_{12}}^2$	0,193	t_{12p}	2,4

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

$$y = 44,91 + 2,15x_2 - 3,52x_1^2 - 1,05x_1x_2$$

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 $S_{u \max}^2 = 2,11$ – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5);

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

$S_y^2 = 0,772$ – дисперсія відтворення;

Тоді: $F_p = 2,73$.

$F_{(0,05; f_{ao}; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості ($f_l = N - (k + 1) = 9 - (4 + 1) = 4, f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$). Тоді: $F_{(0)} = 2,93$ [7, 8].

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 [8].

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

$$\sigma_{3z} = 2,63 + 2,322q_1 + 0,265q_2 - 0,0352q_1^2 - 0,00525q_1q_2$$

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

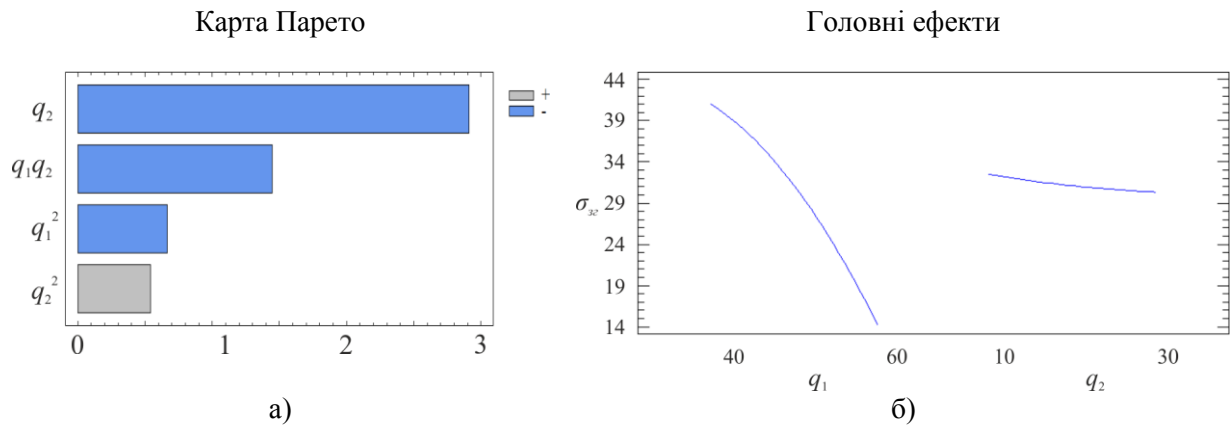


Рис. 1. Карта Парето (а) і головні ефекти σ_{3z} (б)

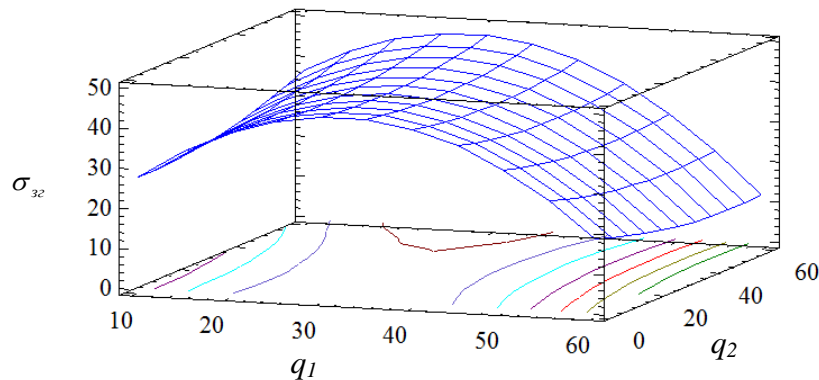


Рис. 2. Поверхня відгуку $\sigma_{3z} = f(q_1, q_2)$

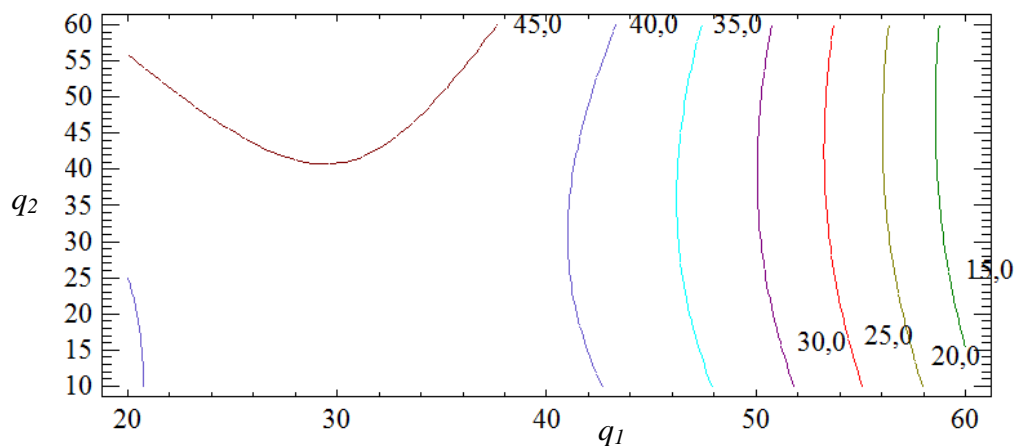


Рис. 3. Контурний графік

На основі експериментальних досліджень доведено, що обидва фактори є значущими. Встановлено, що максимальними показниками руйнівних напружень при згинанні відрізняється епоксидно-поліефірний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – слюда (20...30 мас.ч.), додатковий наповнювач – оксид (II) міді (60 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

Аналогічно до наведеної вище схеми розрахунків оптимізували склад композиції за показниками 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 теплостійкості 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}
349,33	-1,17	4,00	-5,50	3,00	-2,50

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 349,33 - 1,17x_1 + 4x_2 - 5,5x_1^2 + 3x_2^2 - 2,5x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [7].

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	1	$\sigma^2\{y\}_1$	2
2	S_{u2}^2	1	$\sigma^2\{y\}_2$	2
3	S_{u3}^2	1	$\sigma^2\{y\}_3$	2
4	S_{u4}^2	1	$\sigma^2\{y\}_4$	2
5	S_{u5}^2	1	$\sigma^2\{y\}_5$	2
6	S_{u6}^2	3	$\sigma^2\{y\}_6$	6
7	S_{u7}^2	3	$\sigma^2\{y\}_7$	6
8	S_{u8}^2	1	$\sigma^2\{y\}_8$	2
9	S_{u9}^2	1	$\sigma^2\{y\}_9$	2

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 13$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 1,444$$

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

$$G_p = \frac{3}{13} = 0,231$$

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: $S_{u \max}^2 = 3$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,231$.

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

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,231 \leq G_{табл} = 0,478$$

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

Таблиця 10

Експериментальні результати дослідження теплостійкості КМ

№ досліду	Теплостійкість (за Мартенсом) T , К			Середнє значення, E , ГПа
	1	2	3	
1	340	341	342	341
2	345	343	344	344
3	353	354	355	354
4	348	346	347	347
5	348	347	349	348
6	344	341	344	343
7	348	345	345	346
8	357	356	358	357
9	348	349	350	349

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 11) за формулами (9-10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить $t_T = 2,1$ [6, 8]. 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	$S_{b_0}^2$	0,160	t_{0p}	865,32
2	$S_{b_1}^2$	0,241	t_{1p}	2,38
3	$S_{b_2}^2$	0,241	t_{2p}	8,15
4	$S_{b_{11}}^2$	0,722	t_{11p}	6,47
5	$S_{b_{22}}^2$	0,722	t_{22p}	3,53
6	$S_{b_{12}}^2$	0,361	t_{12p}	4,20

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

$$y = 349,33 - 1,17x_1 + 4x_2 - 5,5x_1^2 + 3x_2^2 - 2,5x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [6, 8].

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u_{\max}}^2 = 3$ (табл. 9).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 1,444$.

Тоді: $F = 2,077$.

$F_{(0,05; f_T; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості ($F_{(0,05)} = 3,55$) [6, 8].

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:

$$T = 292,34 + 3,683q_1 - 0,025q_2 - 0,055q_1^2 + 0,0075q_2^2 - 0,0125q_1q_2$$

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

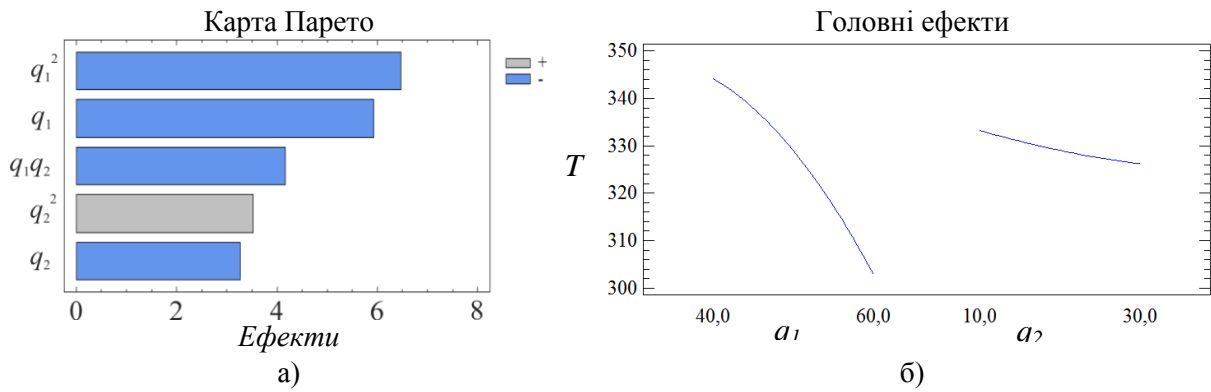


Рис. 4. Карта Парето (а) і головні ефекти T (б)

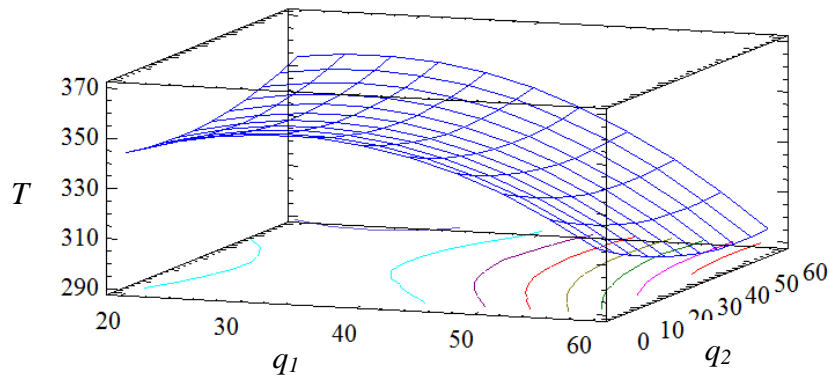


Рис. 5. Поверхня відгуку $T = f(q_1, q_2)$

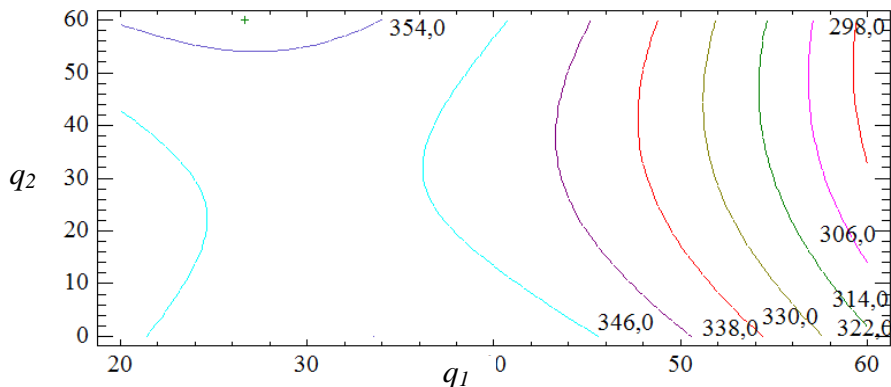


Рис. 6. Контурний графік

На основі експериментальних досліджень доведено, що обидва фактори є значущими. При цьому встановлено (табл. 3), що максимальними показниками теплостійкості за Мартенсом характеризується епоксидно-поліефірний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – слюда (20...30 мас.ч.), додатковий наповнювач – оксид (II) міді (60 мас.ч.). Збільшення вмісту часток оксид (II) міді понад 60 мас.ч. не є доцільним з технологічної точки зору формування композитних матеріалів. Такий склад композиції доцільно використовувати для формування матеріалу з поліпшеними теплофізичними властивостями.

Висновки. Методом ортогонального центрального композиційного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного дисперсного наповнювача у епоксидно-поліефірному композиті з поліпшеними когезійними властивостями. Композицію слід формувати наступного складу: епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.), поліефірна смола ENYDYNE H 68372 TAE (10 мас.ч.), твердник ПЕПА (10 мас.ч.), твердник Butanox-M50 (1,5 мас.ч.), модифікатор MDI (0,25 мас.ч.), основний наповнювач – слюда (20...30 мас.ч.), додатковий наповнювач – оксид (II) міді (60 мас.ч.). Такий матеріал відрізняється наступними

властивостями: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{zc} = 45,5 \dots 48,3$ МПа, показники теплостійкості – $T = 354 \dots 357$ К.

На наступному етапі заплановано дослідити триботехнічні властивості розроблених матеріалів.

Автори висловлюють щире подяку за можливість мобільності та за фінансову підтримку під час дослідницької роботи у Technical University of Košice (Slovak Republic) згідно Національної стипендіальної програми Словацької Республіки (National Scholarship Programme of the Slovak Republic – SAIA Programmes).

Список літератури

1. 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. – 2015. – Vol. 818. – P. 299-302.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: Учебное пособие / [Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др.]; под. общ. ред. А.А. Берлина. – М: Профессия, 2008. – 557 с.
3. 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. – 2017. – №1 (85). – С. 17-27.
4. Сапронов О.О. Оптимізація складу захисного покриття методом математичного планування експерименту // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ. – 2013. – № 43. – Ч. II. – С. 260-267.
5. Chawla, Krishan Kumar. Composite materials: science and engineering / Krishan K. Chawla. – 2nd ed. – Springer New York, 1998. – 483 p.
6. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения, примеры и задачи): учебн.[для студ. высш.учеб.завед.]. – К.:Вища школа,1976. – 184 с.
7. Грушко И.М., Попов В.В. и др.; Под ред. Крутова В.И., Попова В.В. Основы научных исследований: Учебник для технических вузов – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.
8. Математические методы планирования эксперимента / под ред. Пененко В.В. – Новосибирск: Наука, 1981. – 250 с.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2017