

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Букетов А. В.**, д.т.н., завідувач кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

**Гусєв В. М.**, к.т.н., Херсонської державної морської академії, e-mail: v.n.gusev73@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6801-7616;

**Кулініч А. Г.**, аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: kulinichandrey77@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6507-8229;

**Якущенко С. В.**, старший викладач кафедри природничо-наукової підготовки Херсонської державної морської академії, e-mail: yakushchenko.sv@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1724-8171;

**Житник Д. В.**, аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: danylyzhytnyk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6579-3599

*Обґрунтовано необхідність застосування полімерних композитів у виробництві і ремонті деталей та об'єктів у різних галузях промисловості, у тому числі й у водному транспорті. Це зумовлено значною інтенсивністю обсягів перевезення вантажів, збільшенням умов навантаження транспортних засобів, а також їх роботою в умовах впливу агресивних середовищ. При цьому на сьогодні висувають нові вимоги до покращення показників ресурсозбереження деталей транспортних засобів та скорочення термінів ремонтних робіт.*

*Доведено, що для покращення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів у зв'язувач необхідно вводити добавки різної фізичної та хімічної природи за оптимального вмісту. У роботі оптимізовано вміст дисперсних часток синтезованої порошкової титано-алюмінієвої суміші і дискретних вуглецевих волокон, які вводили у зв'язувач для підвищення показників механічних властивостей епоксидних матеріалів.*

*Мета роботи – методом математичного планування експерименту оптимізувати вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів для захисних покриттів водного транспорту. Методом математичного планування експерименту встановлено оптимальний вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів: порошкова титано-алюмінієва суміш – 0,3...0,5 мас.ч., дискретні вуглецеві волокна – 0,05 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Введення до епоксидного зв'язувача таких інгредієнтів дозволяє підвищити показники ударної в'язкості епоксидних композитів до  $W = 22,8...23,2$  кДж/м<sup>2</sup>. Проаналізовано, що при збільшенні вмісту порошкової титано-алюмінієвої суміші є можливим додатково підвищувати показники ударної в'язкості матеріалів. Отримані результати дозволяють створити матеріали з поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних властивостей. Розроблені матеріали доцільно використовувати у вигляді захисних покриттів для підвищення ресурсу роботи і ремонту деталей транспортної техніки.*

*Ключові слова:* оптимізація, композит, епоксидна матриця, математичне планування експерименту, рівняння регресії.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.059-068

**Постановка проблеми.** На сьогодні приділяють значну увагу напрямку створення нових технологій щодо розробки полімерних композитів, які можна широко застосовувати у виробництві і ремонті деталей та об'єктів у різних галузях промисловості, у тому числі й у водному транспорті. Інтенсивність обсягів перевезення вантажів, збільшення умов навантаження транспортних засобів, повсякчасна робота в умовах впливу агресивних середовищ висувають нові вимоги до покращення показників ресурсозбереження деталей транспортних засобів та скорочення термінів ремонтних робіт. У цьому контексті одними з перспективних, які б відповідали вимогам сучасної транспортної промисловості, є епоксидні композитні матеріали, які за своїми експлуатаційними характеристиками у більшості випадків є кращими порівняно з традиційними металами та сплавами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Авторами [1–5] доведено, що для

покращення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів у зв'язувач необхідно вводити добавки різної фізичної та хімічної природи. При цьому актуальним є застосування у вигляді наповнювачів дисперсних часток та дискретних волокон [6, 7]. Використання перших передбачає збільшення показників когезійної міцності матеріалів, при цьому важливе значення має активність поверхні до взаємодії з боковими групами та сегментами макромолекул епоксидного олігомеру. Виходячи з цього, на наш погляд, цікавим є введення у зв'язувач дисперсних часток синтезованої порошкової титано-алюмінієвої суміші наступного складу: Ti (70 %) + Al<sub>3</sub>Ti (15 %) + Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (15 %). Наявність наведених вище сполук у структурі добавки дозволить активувати процеси зшивання, що позначиться на властивостях матеріалів. Крім цього, наповнення композитів дискретними вуглецевими волокнами забезпечить додаткове підвищення показників міцності матеріалів, що дозволить досягнути синергетичного ефекту у збільшенні їх довговічності.

**Мета роботи** – методом математичного планування експерименту оптимізувати вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів для захисних покриттів водного транспорту.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для оптимізації вмісту інгредієнтів при формуванні захисного покриття досліджено ударну в'язкість як одну із основних властивостей композитів з різним вмістом мікродисперсного наповнювача і дискретних волокон. Зазначимо, що як мікродисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано синтезовану порошкову титано-алюмінієву суміш (ПТАС) наступного складу: Ti (70 %) + Al<sub>3</sub>Ti (15 %) + Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (15 %). У вигляді волокнистого наповнювача використано дискретні вуглецеві волокна (ДВВ). 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, $\Delta q$ , мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
ПТАС	$x_1$	0,30	0,2	0,10	0,30	0,50
ДВВ	$x_2$	0,05	0,02	0,03	0,05	0,07

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 [8], вводили коректовані значення рівня  $x'$ , які обчислювали за формулою:

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

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

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:

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

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 ударної в'язкості КМ

№ досліджу	Вміст компонентів, q, мас.ч.		Ударна в'язкість, W, кДж/м <sup>2</sup>
	$x_1$	$x_2$	y
1	0,10	0,03	19,4
2	0,50	0,03	20,5
3	0,10	0,07	20,4
4	0,50	0,07	19,9
5	0,30	0,05	22,8
6	0,50	0,05	23,2
7	0,10	0,05	21,9
8	0,30	0,07	20,3
9	0,30	0,03	21,0

Отримані коефіцієнти рівняння регресії наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Коефіцієнти рівняння регресії

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
22,96	0,32	-0,05	-0,48	-2,38	-0,40

У результаті при аналізі ударної в'язкості композитів отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 22,96 + 0,32x_1 - 0,05x_2 - 0,48x_1^2 - 2,38x_2^2 - 0,40x_1x_2.$$

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;  $S_{ui}^2$  max – 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

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

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

Значення дисперсій наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Значення дисперсій адекватності ( $S_{ui}^2$ ) і дисперсій відтворення ( $\sigma^2\{y\}_i$ )

№ n/n	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{u1}^2$	0,03	$\sigma^2\{y\}_1$	0,06
2	$S_{u2}^2$	0,03	$\sigma^2\{y\}_2$	0,06
3	$S_{u3}^2$	0,01	$\sigma^2\{y\}_3$	0,02
4	$S_{u4}^2$	0,01	$\sigma^2\{y\}_4$	0,02
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	$S_{u7}^2$	0,03	$\sigma^2\{y\}_7$	0,06
8	$S_{u8}^2$	0,03	$\sigma^2\{y\}_8$	0,06
9	$S_{u9}^2$	0,03	$\sigma^2\{y\}_9$	0,06

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,21;$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,42.$$

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

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

$$G_{розр} = \frac{0,03}{0,21} = 0,143.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [9, 10] для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $i$ -му поєднанні рівнів факторів:  $S_{u_{max}}^2 = 0,03$ . Розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,143$ .

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

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{розр} = 0,143 \leq G_{табл} = 0,478.$$

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

Таблиця 6 – Експериментальні результати дослідження ударної в'язкості матеріалів

№ досліду	Ударна в'язкість КМ, W, кДж/м <sup>2</sup>			Середнє значення, W, кДж/м <sup>2</sup>
	1	2	3	
1	19,2	19,5	19,5	19,4
2	20,4	20,4	20,7	20,5
3	20,4	20,3	20,5	20,4
4	19,9	19,8	20	19,9
5	22,7	22,7	23	22,8
6	23,1	23,2	23,3	23,2
7	21,8	21,8	22,1	21,9
8	20,2	20,2	20,5	20,3
9	20,9	20,9	21,2	21

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 [5, 6]. При цьому визначали табличний ( $t_m$ ) і розрахунковий критерій ( $t_p$ ) критерії 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 ( $t_p$ )

№ n/n	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,003	$t_{0p}$	433,14
2	$S_{b_1}^2$	0,004	$t_{1p}$	5,08
3	$S_{b_2}^2$	0,004	$t_{2p}$	0,80
4	$S_{b_{11}}^2$	0,012	$t_{11p}$	4,47
5	$S_{b_{22}}^2$	0,012	$t_{22p}$	22,07
6	$S_{b_{12}}^2$	0,006	$t_{12p}$	5,2

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

$$y = 22,96 + 0,32x_1 - 0,48x_1^2 - 2,38x_2^2 - 0,40x_1x_2.$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [10]:

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

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

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

де  $S_y^2 = 0,023$  – дисперсія відтворення;

Тоді:  $F_p = 1,286$ .

$F_{(0,05; f_{a0}; f_u)}$  – 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:  $F_{(t)} = 3,16$  [9, 10].

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:

$$x_i = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i}, \tag{13}$$

де  $q_i$  – значення  $i$ -го фактора експерименту,  $q_{i0}$  – значення нульового рівня,  $\Delta q_i$  – інтервал варіювання [6].

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

$$W = 4,99722 + 13,8333q_1 - 12,0833q_1^2 - 100,0q_1q_2 - 5958,33q_2^2.$$

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 (ударна в'язкість) 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 порошкової титано-алюмінієвої суміші на показники ударної в'язкості є не таким суттєвим порівняно з дискретними волокнами (згідно з картою Парето). Аналізуючи розраховану поверхню відгуку визначено, що оптимальні показники ударної в'язкості має розроблений епоксидний композит із частками порошкової титано-алюмінієвої суміші та дискретних вуглецевих волокон за наступного вмісту: ПТАС – 0,3...0,5 мас.ч., ДВВ – 0,05 мас.ч. ( $W = 22,8...23,2$  кДж/м<sup>2</sup>).

Карта Парето

Головні ефекти  $W$

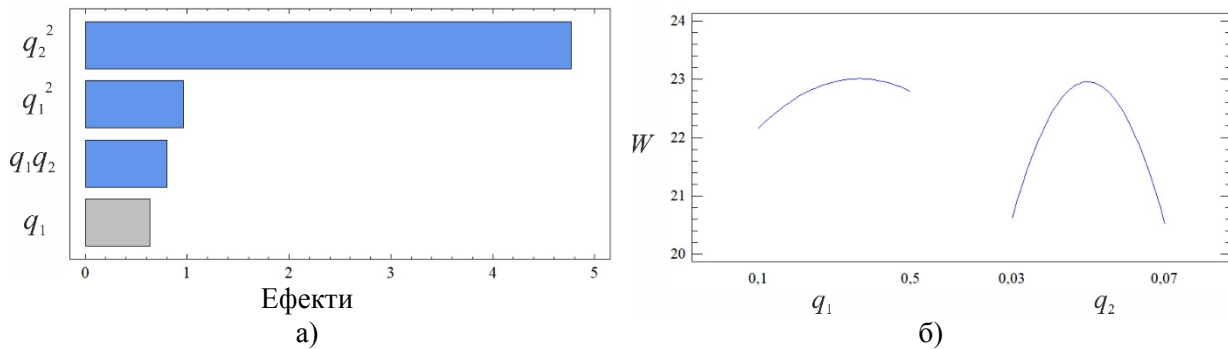


Рисунок 1 – Карта Паретто (а) і головні ефекти у (б)

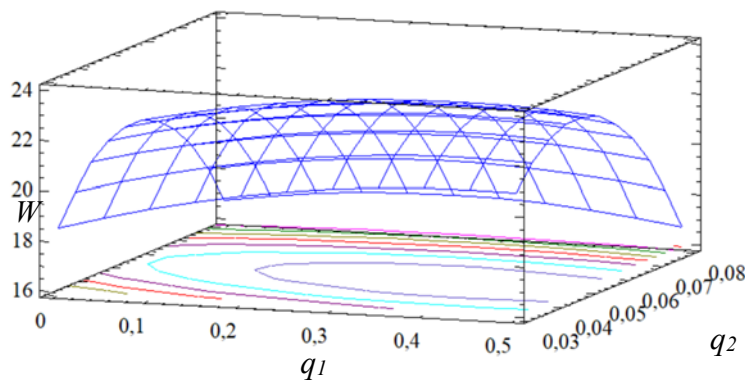


Рисунок 2 – Розрахункова поверхня відгуку  $W = f(q_1, q_2)$

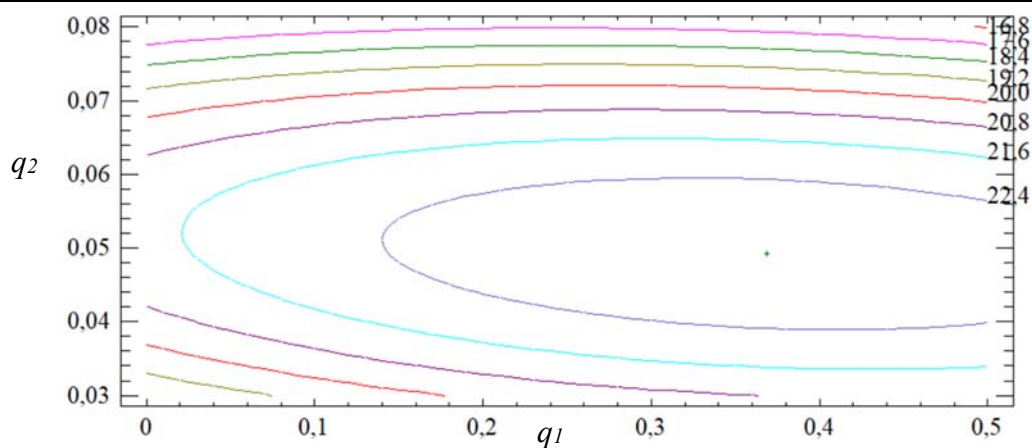


Рисунок 3 – Контури розрахункової поверхні відгуку

Отримані результати свідчать, що обидва фактори рівняння регресії є значущими. Слід зазначити, що на вихідні параметри композиту суттєво впливає квадратична залежність другого фактору (вміст дискретних вуглецевих волокон). У процесі аналізу встановлено, що показники ударної в'язкості набувають максимальних значень при оптимальному вмісті компонентів. Зокрема, з рис. 2 помітно, що додаткове підвищення показників ударної в'язкості є можливим при збільшенні вмісту наповнювача ПТАС.

**Висновки.** Методом математичного планування експерименту встановлено оптимальний вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів: порошкова титано-алюмінієва суміш – 0,3...0,5 мас.ч., дискретні вуглецеві волокна – 0,05 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Введення до епоксидного зв'язувача таких інгредієнтів дозволяє підвищити показники ударної в'язкості епоксидних композитів до  $W = 22,8...23,2$  кДж/м<sup>2</sup>. Проаналізовано, що при збільшенні вмісту порошкової титано-алюмінієвої суміші є можливим додатково підвищувати показники ударної в'язкості матеріалів. Отримані результати дозволяють створити матеріали з поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних властивостей. Розроблені матеріали доцільно використовувати у вигляді захисних покриттів для підвищення ресурсу роботи і ремонту деталей транспортної техніки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hussain Manwar, Nakahira Atsushi, Niihara Koichi. Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filler dispersion. *Materials Letters*. 1996. V. 26, Issue 3. P. 185–191.
2. Sandler J., Shaffer M.S.P., Prasse T., Bauhofer W., Schulte K., Windle A.H. Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties. *Polymer*. 1999. V. 40, Issue 21. P. 5967–5971.
3. Buketov A., Maruschak P., Sapronov O., Zinchenko D., Yatsyuk V., Panin S. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. 2016. Vol. 31(3). P. 333–342.
4. Лысенков Э. А., Леонова Н. Г., Жильцова С. В. Влияние кремнийсодержащей фазы на иерархичность структуры эпоксидно-полисилоксановых нанокомпозитов. *Теоретическая и экспериментальная химия*. 2019. Т. 55. № 4. С. 226–233.
5. Lysenkov E. A. Simulation of thermal conductivity of polymer nanocomposites, using models based on thermal-electrical analogy. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2019. Vol. 17, № 4. P. 761–772.
6. Zhylytsova, S.V., Leonova, N.G. & Lysenkov, E.A. Effect of Epoxy Oligomer on the Hierarchical Structure of Silica Nanoparticles Formed in a Polymer Matrix. *Theoretical and Experimental Chemistry*. 2020. V. 56. P. 275–282.



7. Buketov A., Yakushchenko S., Menou Abdellah, Bezbakh O., Vrublevskiy R., Kalba Y., Cherniavska T., Zhytnyk D., Danylyuk O. Optimization of ingredients upon development of the protective polymeric composite coatings for the river and sea transport. *Mechanical Engineering in Transport*. 2021. № 2. B89–B96.
8. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. *Планирование эксперимента в химической технологии (основное положение, примеры и задачи)* : учебн. [для студ. высш.учеб.завед.]. Киев : Вища школа, 1976. 184 с.
9. Грушко И. М., Попов В. В. и др. *Основы научных исследований*: учебник для технических вузов / под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. Москва : Высшая школа, 1989. 400 с.
10. *Математические методы планирования эксперимента* / под ред. В. В. Пененко Новосибирск : Наука, 1981. 250 с.

## REFERENCES

1. Hussain Manwar, Nakahira Atsushi, Niihara Koichi (1996). Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filler dispersion. *Materials Letters*. V. 26, Issue 3. P. 185–191.
2. Sandler J., Shaffer M.S.P., Prasse T., Bauhofer W., Schulte K., Windle A.H. (1999). Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties. *Polymer*. V. 40, Issue 21. P. 5967–5971.
3. Buketov A., Maruschak P., Saponov O., Zinchenko D., Yatsyuk V., Panin S. (2016). Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. Vol. 31 (3). P. 333–342.
4. Lihsenkov Eh. A., Leonova N. G., Zhiljцова S. V. (2019). Vliyanie kremnijsoderzhathej fazih na ierarkhichnostj strukturih ehpoksidno-polisiloksanovihkh nanokompozitov. *Teoreticheskaya i ehksperimental'naya khimiya*. Vol. 55. № 4. P. 226–233.
5. Lysenkov E. A. (2019). Simulation of thermal conductivity of polymer nanocomposites, using models based on thermal-electrical analogy. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. Vol. 17, № 4. P. 761–772.
6. Zhylytsova, S.V., Leonova, N.G. & Lysenkov, E.A. (2020). Effect of Epoxy Oligomer on the Hierarchical Structure of Silica Nanoparticles Formed in a Polymer Matrix. *Theoretical and Experimental Chemistry*. V. 56. P. 275–282.
7. Buketov A., Yakushchenko S., Menou Abdellah, Bezbakh O., Vrublevskiy R., Kalba Y., Cherniavska T., Zhytnyk D., Danylyuk O. (2021). Optimization of ingredients upon development of the protective polymeric composite coatings for the river and sea transport. *Mechanical Engineering in Transport*. № 2. B89–B96.
8. Bondarj A. G., Statyukha G. A. (1976). *Planirovanie ehksperimenta v khimicheskoyj tekhnologii (osnovne polozhenie, primerih i zadachi)* : uchebn. [dlya stud. vihssh.ucheb.zaved.]. Kiev : Vitha shkola.
9. Grushko I. M., Popov V. V. i dr. (1989). *Osnovih nauchnihkh issledovaniyj: uchebnik dlya tekhnicheskikh vuzov / pod red. V.I.Krutova, V.V. Popova*. Moskva : Vihsshaya shkola.
10. *Matematicheskie metodih planirovaniya ehksperimenta* (1981). / pod red. Penenko V.V. Novosibirsk : Nauka.

**Букетов А. В., Гусев В. Н., Кулинич А. Г., Якущенко С. В., Житник Д. В.** ОПТИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИНГРЕДИЕНТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Обоснована необхідність застосування полімерних композитів в виробництві і ремонті деталей і об'єктів в різних галузях промисловості, в тому числі і в водному транспорті. Це обумовлено значительною інтенсивністю об'ємів перевезення вантажів, збільшенням умов навантаження транспортних засобів, а також їх роботою в умовах впливу агресивних серед. При цьому висунуто нові вимоги до покращення показників ресурсозбереження деталей транспортних засобів і скорочення термінів ремонтних робіт.*

Доказано, что для улучшения эксплуатационных характеристик эпоксидных композитов в связующее необходимо вводить добавки различной физической и химической природы при оптимальном содержании. В работе оптимизировано содержание дисперсных частиц синтезированной порошковой титано-алюминиевой смеси и дискретных углеродных волокон, которые вводили в связующее для повышения показателей механических свойств эпоксидных материалов.

Цель работы – методом математического планирования эксперимента оптимизировать содержание дисперсного и волокнистого дискретного наполнителей для защитных покрытий водного транспорта.

Методом математического планирования эксперимента установлено оптимальное содержание дисперсного и волокнистого дискретного наполнителей: порошковая титано-алюминиевая смесь – 0,3...0,5 масс.ч., дискретные углеродные волокна – 0,05 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Введение в эпоксидное связующее таких ингредиентов позволяет повысить показатели ударной вязкости эпоксидных композитов до  $W = 22,8...23,2$  кДж/м<sup>2</sup>. Проанализировано, что при увеличении содержания порошковой титано-алюминиевой смеси возможно дополнительно повышать показатели ударной вязкости материалов. Полученные результаты позволяют создать материалы с улучшенными в комплексе показателям физико-механических свойств. Разработанные материалы целесообразно использовать в виде защитных покрытий для повышения ресурса работы и ремонта деталей транспортной техники.

**Ключевые слова:** оптимизация, композит, эпоксидная матрица, математическое планирование эксперимента, уравнение регрессии.

**Buketov A. V., Gusev V. N., Kulinich A. G., Yakushchenko S. V., Zhitnik D. V. OPTIMIZATION IN PLACE OF INGREDIENTS IN THE FORMULATION OF NEW APPLICATIONS FOR INCREASING THE RESOURCE OF ROBOTS AND TRANSPORT VEHICLES**

*The necessity of using polymer composites in the production and repair of parts and objects in various industries, including water transport, has been substantiated. This is due to the significant intensity of the volume of cargo transportation, an increase in the load conditions of vehicles, as well as their operation under the influence of aggressive media. At the same time, new requirements are being put forward for improving the indicators of resource saving of vehicle parts and reducing the time of repair work.*

*It has been proven that to improve the performance of epoxy composites, it is necessary to add additives of various physical and chemical nature to the binder at an optimal content. The work optimizes the content of dispersed particles of the synthesized powder titanium-aluminum mixture and discrete carbon fibers, which were introduced into the binder to improve the mechanical properties of epoxy materials.*

*The aim of the work is to optimize the content of dispersed and fibrous discrete fillers for protective coatings of water transport using the method of mathematical planning of the experiment.*

*Using the method of mathematical planning of the experiment, the optimal content of dispersed and fibrous discrete fillers has been established: powder titanium-aluminum mixture – 0.3...0.5 mass parts, discrete carbon fibers – 0.05 mass parts per 100 mass parts epoxy oligomer ED-20. The introduction of such ingredients into the epoxy binder makes it possible to increase the impact strength of epoxy composites up to  $W = 22.8...23.2$  kJ/m<sup>2</sup>. It is analyzed that with an increase in the content of the powder titanium-aluminum mixture, it is possible to further increase the impact strength of materials. The results obtained make it possible to create materials with improved physical and mechanical properties in the complex. It is advisable to use the developed materials in the form of protective coatings to increase the service life and repair parts of transport equipment.*

**Keywords:** optimization, composite, epoxy matrix, mathematical planning of the experiment, regression equation.

© Букетов А. В., Гусев В. М., Кулініч А. Г., Якущенко С. В., Житник Д. В.

Статтю прийнято  
до редакції 20.11.20