

ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Браїло М. В., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0001-8167-9999;

Кобельник О. С., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії;

Сапронов О. О., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії ORCID: 0000-0003-1115-6556;

Сапронова А. В., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії;

Василенко А. О., молодший науковий співробітник Херсонської державної морської академії

Гусев В. М., начальник морського коледжу Херсонської державної морської академії

У роботі методом математичного планування експерименту розроблено багатокомпонентне епокси-поліефірне покриття з полішеними когезійними властивостями. Встановлено оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача: активоване вугілля ($d = 5 \dots 10$ мкм) – $5 \dots 10$ мас.ч., вуглецеве волокно ($d = 6 \dots 8$ мкм, $l = 0,5 \dots 1,5$ мм) – $0,1$ мас.ч. на 100 мас.ч. епокси-поліефірної матриці. Введення до епоксидного зв'язувача двокомпонентного наповнювача дозволяє підвищити показники модуля пружності при згинанні захисних покриттів до $E = 4,7 \dots 5,0$ ГПа.

Доведено вплив двокомпонентного наповнювача на показники ударної в'язкості розробленого епокси-поліефірного композиту. Встановлено, що оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача: активоване вугілля – 5 мас.ч., вуглецеве волокно – $0,1$ мас.ч. на 100 мас.ч. епокси-поліефірного зв'язувача. Введення до епокси-поліефірного зв'язувача двокомпонентного наповнювача дозволяє підвищити покази ударної в'язкості до $W = 8,8$ кДж/м². Отримані результати дозволяють створити полімерне покриття з полішеними у комплексі показниками когезійних властивостей.

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

DOI: 10.33815/2313-4763.2018.2.19.118–130

Постановка проблеми. Відомо [1–3], що транспорт – одна з важливих галузей сучасної світової промисловості. Економічно вигідним та ефективним є використання морського та річкового транспорту. У той же час вимоги до таких засобів транспорту постійно підвищуються [1–2]. Важливим фактором є експлуатація водного транспорту в умовах агресивного середовища, вплив якого призводить до підвищеного зносу деталей, механізмів, вузлів та виходу їх з ладу. Тому, одними із важливих показників є їх надійність, терміни експлуатації та ремонтпридатність кожного елемента чи механізму транспортних засобів загалом [2, 3]. Підвищити надійність та термін експлуатації засобів транспорту можливо шляхом використання матеріалів високої якості. Широко розповсюджено застосування конструкційних матеріалів на основі сталі [1, 2]. Водночас такі матеріали мають ряд недоліків, зокрема їх вартість та низька стійкість до агресивного середовища. Матеріали на основі металів потребують додаткового захисту [2–4]. Актуальним у даному напрямку є використання полімерних антикорозійних матеріалів, як покриттів для захисту від корозії та гідроабразиву. Застосування полімерних покриттів дозволяє значно підвищити термін експлуатації транспорту, а також можливість відновлювати робочий стан за необхідністю [3–5]. Однак полімерні покриття повинні відрізнятися підвищеними експлуатаційними характеристиками. Тому, розробка і застосування нових полімерних покриттів з полішеними властивостями на сьогодні є задачею актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи роботи провідних дослідників [3–12] у напрямку розробки полімерних захисних покриттів, можна констатувати вплив на властивості композитного матеріалу вмісту в його складі модифікаторів, пластифікаторів та наповнювачів. Авторами [5–8] доведено, що зміна вмісту компонентів дозволяє керовано впливати на властивості вихідного матеріалу та

створювати композити з наперед заданими властивостями. У роботах авторів [7–11] встановлено, що перспективним на сьогодні є комбінування декількох наповнювачів у одному зв'язувачі, що дозволяє отримати композити у комплексі з поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями. Актуальним на етапі створення багатокомпонентних композитів із різними факторами впливу на його властивості є використання методу математичного планування експерименту [6, 8, 11, 12, 14–16]. Даний метод дозволяє ефективно оптимізувати склад за властивостями та отримати регресійні залежності властивостей матеріалів від вмісту різних компонентів.

Попередньо було встановлено оптимальний вміст наповнювачів у епоксиполіефірній матриці за максимальними показниками фізико-механічних властивостей. Однак, цікавим і актуальним є поєднання двох наповнювачів різної природи у одному зв'язувачі, що дозволить створити нові захисні покриття з поліпшеними у комплексі експлуатаційними характеристиками. Тому, для подальшого дослідження додавали до розробленої епоксиполіефірної матриці наступні наповнювачі: у вигляді основного – активоване вугілля і додаткового – вуглецеве волокно.

Активоване вугілля (дисперсність $d = 5 \dots 10$ мкм) – пориста вуглецева речовина з високими адсорбційними властивостями та гідрофобністю, яка отримана шляхом карбонізації органічних матеріалів і подальшим їх активуванням. Містить значну кількість пор і тому має дуже велику питому площу поверхні, унаслідок чого має високу адсорбцію.

Дискретне вуглецеве волокно (розміри $d = 6 \dots 8$ мкм, $l = 0,5 \dots 1,5$ мм) – штучне волокно, що складається з вуглецю; форма графіту, в якій атоми вуглецю вишикувані в тонкі довгі графітові волокна.

При цьому, для оптимізації вмісту інгредієнтів та скорочення кількості експериментів раціональним є використання методу математичного планування експерименту.

Мета роботи – використовуючи метод математичного планування експерименту розробити епоксиполіефірне покриття для відновлення засобів транспорту.

Результати дослідження та їх обговорення. На першому етапі для оптимізації вмісту інгредієнтів у епоксиполіефірній матриці досліджено модуль пружності при згинанні композитів з різним вмістом основного та додаткового наповнювачів (активоване вугілля і вуглецеве волокно відповідно). 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 для ПКМ 1

| 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 – активоване вугілля | x_1 | 10 | 5 | 5 | 10 | 15 |
| Додатковий наповнювач – вуглецеве волокно | x_2 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | 0,15 |

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, 11, 14, 15], вводили коректовані значення рівня x' , які обчислювали за формулою:

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

Розширена матриця планування повного факторного експерименту (ПФЕ) та його результати наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Схема планування експерименту

| № Дослідю (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 |

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:

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

Отримані коефіцієнти рівняння регресії наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти рівняння регресії

| b_0 | b_1 | b_2 | b_{11} | b_{22} | b_{12} |
|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| 4,67 | -0,28 | 0,10 | -0,05 | -0,60 | 0,18 |

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

$$y = 4,67 - 0,28x_1 + 0,10x_2 - 0,05x_1^2 - 0,60x_2^2 + 0,18x_1 x_2.$$

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 дослідях.

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

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

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

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

Значення дисперсій наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – 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 | 0,07 | $\sigma^2\{y\}_1$ | 0,14 |
| 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 | 0,04 | $\sigma^2\{y\}_4$ | 0,08 |
| 5 | S_{u5}^2 | 0,01 | $\sigma^2\{y\}_5$ | 0,02 |
| 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 | 0,01 | $\sigma^2\{y\}_8$ | 0,02 |
| 9 | S_{u9}^2 | 0,01 | $\sigma^2\{y\}_9$ | 0,02 |

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,17$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,019.$$

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

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

$$G_{\text{розра}} = \frac{0,04}{0,17} = 0,235.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [14] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u_{\text{max}}}^2 = 0,07$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{\text{розра}} = 0,235$.

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

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{розр} = 0,235 \leq G_{табл} = 0,478.$$

Надалі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 5).

Таблиця 5 – Результати дослідження модуля пружності при згинанні

| № дослідю | Вміст компонентів, q, мас.ч. | | Модуль пружності при згинанні, Е, ГПа | | | Середнє значення, Е, ГПа |
|-----------|------------------------------|-------|---------------------------------------|-----|-----|--------------------------|
| | x_1 | x_2 | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 5 | 0,05 | 4,3 | 4,3 | 4,6 | 4,4 |
| 2 | 15 | 0,05 | 3,6 | 3,7 | 3,5 | 3,6 |
| 3 | 5 | 0,15 | 4,1 | 4,2 | 4,0 | 4,1 |
| 4 | 15 | 0,15 | 4,2 | 4,0 | 3,8 | 4,0 |
| 5 | 10 | 0,1 | 4,8 | 4,6 | 4,7 | 4,7 |
| 6 | 15 | 0,1 | 4,1 | 4,3 | 4,2 | 4,2 |
| 7 | 5 | 0,1 | 5,2 | 5,0 | 4,8 | 5,0 |
| 8 | 10 | 0,15 | 4,2 | 4,4 | 4,3 | 4,3 |
| 9 | 10 | 0,05 | 3,8 | 3,7 | 3,9 | 3,8 |

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 [14, 16]. При цьому визначали табличний (t_m) і розрахунковий критерій (t_p) критерії Стьюдента (табл. 6).

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 6 – 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 | $S_{b_0}^2$ | 0,002 | t_{0p} | 97,41 |
| 2 | $S_{b_1}^2$ | 0,003 | t_{1p} | 5,05 |
| 3 | $S_{b_2}^2$ | 0,003 | t_{2p} | 1,78 |
| 4 | $S_{b_{11}}^2$ | 0,009 | t_{11p} | 0,51 |
| 5 | $S_{b_{22}}^2$ | 0,009 | t_{22p} | 6,17 |
| 6 | $S_{b_{12}}^2$ | 0,005 | t_{12p} | 2,5 |

Розрахункові значення критерію Стьюдента $t_{0p}, t_{1p}, t_{12p}, t_{22p}$ є більшими від t_T , тому вважали, що коефіцієнти рівняння регресії b_0, b_1, b_{12}, b_{22} є значущими, зокрема значення критерію Стьюдента t_{2p}, t_{11p} є меншими за t_T , тому коефіцієнти рівняння регресії b_2, b_{11} є не

значущим. В результаті отримуємо наступне рівняння регресії:

$$y = 4,67 - 0,28x_1 - 0,60x_2^2 + 0,18x_1x_2.$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [15]:

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

де $S_{u \max}^2 = 0,04$ – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5);

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}{N} = \frac{0,17}{9} = 0,019, \quad (12)$$

$S_y^2 = 0,019$ – дисперсія відтворення.

Тоді $F_p = 2,19$. $F_{(0,05; f_{ao}; f_y)}$ – 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: $F_{(4)} = 2,93$ [14, 16].

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

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

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

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

де q_i – значення i -го фактору експерименту, q_{i0} – значення нульового рівня, Δq_i – інтервал варіювання [14].

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

$$E = 3,55 - 0,128q_1 + 40,8q_2 - 240q_2^2 + 0,78q_1q_2.$$

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.

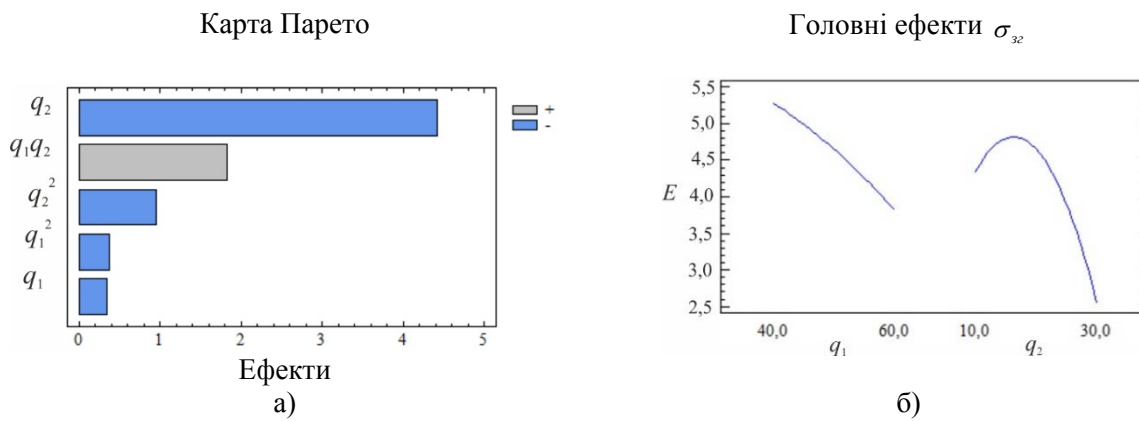


Рисунок 1 – Карта Паретто (а) і головні ефекти у (б)

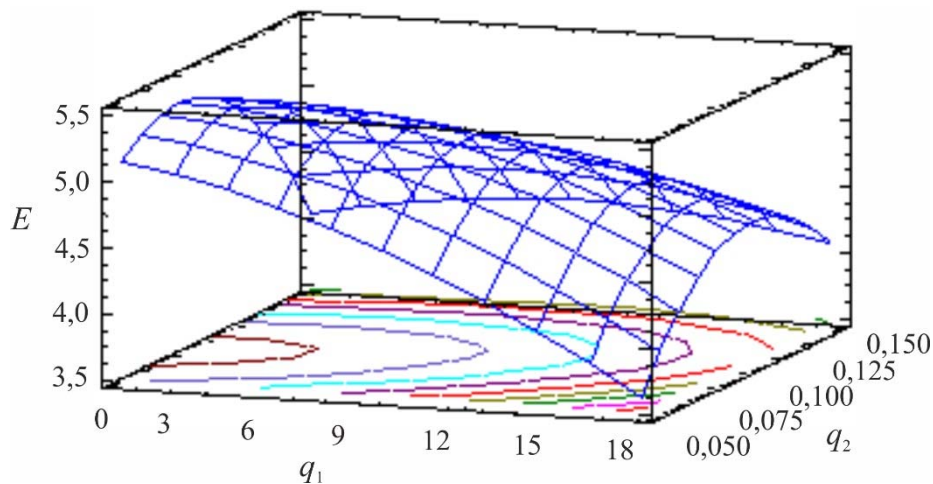


Рисунок 2 – Розрахункова поверхня відгуку $E = f(q_1, q_2)$

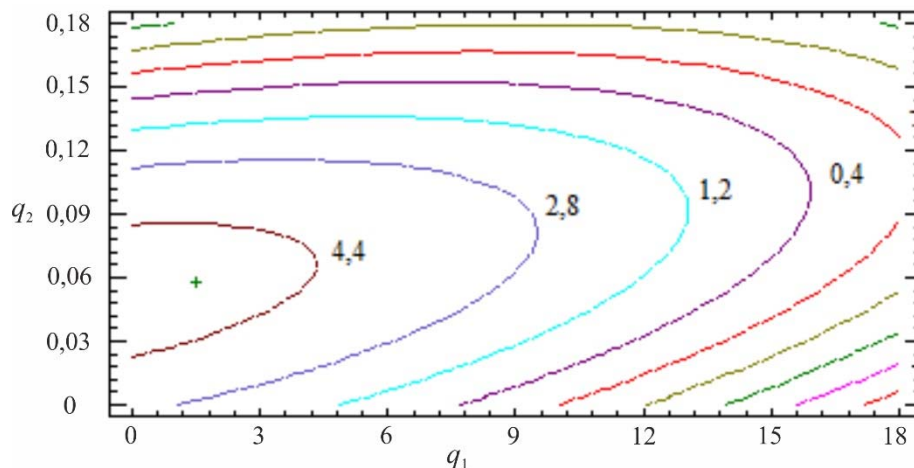


Рисунок 3 – Контури розрахункової поверхні відгуку

На основі експериментальних досліджень встановлено, що обидва фактори є значущими. Слід зазначити, що вплив вмісту додаткового наповнювача на показники модуля пружності при згинанні є вищим порівняно з основним (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: активоване вугілля – 5...10 мас.ч., вуглецеве волокно – 0,1 мас.ч. ($E = 4,7...5,0$ ГПа).

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. 7).

Таблиця 7 – Коефіцієнти рівняння регресії для ударної в'язкості

| | | | | | |
|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| b_0 | b_1 | b_2 | b_{11} | b_{22} | b_{12} |
| 8,43 | -0,48 | 0,12 | -0,35 | -0,85 | 0,13 |

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 8,43 - 0,48x_1 + 0,12x_2 - 0,35x_1^2 - 0,85x_2^2 + 0,13x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [14].

Значення дисперсій, які визначали за формулами (5–7), наведено у табл. 8.

Таблиця 8 – 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 | 0,010 | $\sigma^2\{y\}_1$ | 0,020 |
| 2 | S_{u2}^2 | 0,090 | $\sigma^2\{y\}_2$ | 0,180 |
| 3 | S_{u3}^2 | 0,040 | $\sigma^2\{y\}_3$ | 0,080 |
| 4 | S_{u4}^2 | 0,030 | $\sigma^2\{y\}_4$ | 0,060 |
| 5 | S_{u5}^2 | 0,040 | $\sigma^2\{y\}_5$ | 0,080 |
| 6 | S_{u6}^2 | 0,030 | $\sigma^2\{y\}_6$ | 0,060 |
| 7 | S_{u7}^2 | 0,030 | $\sigma^2\{y\}_7$ | 0,060 |
| 8 | S_{u8}^2 | 0,010 | $\sigma^2\{y\}_8$ | 0,020 |
| 9 | S_{u9}^2 | 0,040 | $\sigma^2\{y\}_9$ | 0,080 |

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,320;$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,036.$$

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

$$G_p = \frac{0,090}{0,320} = 0,281.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [9, 14, 16] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u \max}^2 = 0,090$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,281$.

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

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,281 \leq G_{табл} = 0,478.$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 9).

Таблиця 9 – Експериментальні результати дослідження ударної в'язкості

| № дослідю | Вміст компонентів, q, мас.ч. | | Ударна в'язкість, W, кДж/м ² | | | Середнє значення, W, кДж/м ² |
|-----------|------------------------------|----------------|---|-----|-----|---|
| | x ₁ | x ₂ | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 5 | 0,05 | 7,5 | 7,7 | 7,6 | 7,6 |
| 2 | 15 | 0,05 | 6,6 | 6,9 | 6,3 | 6,6 |
| 3 | 5 | 0,15 | 7,6 | 7,4 | 7,8 | 7,6 |
| 4 | 15 | 0,15 | 7,3 | 7,0 | 7,0 | 7,1 |
| 5 | 10 | 0,1 | 8,2 | 8,4 | 8,6 | 8,4 |
| 6 | 15 | 0,1 | 7,2 | 7,5 | 7,5 | 7,4 |
| 7 | 5 | 0,1 | 9,0 | 8,7 | 8,7 | 8,8 |
| 8 | 10 | 0,15 | 7,8 | 7,6 | 7,7 | 7,7 |
| 9 | 10 | 0,05 | 7,3 | 7,5 | 7,7 | 7,5 |

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

Таблиця 10 – 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} | 128,17 |
| 2 | $S_{b_1}^2$ | 0,006 | t_{1p} | 6,28 |
| 3 | $S_{b_2}^2$ | 0,006 | t_{2p} | 1,52 |
| 4 | $S_{b_{11}}^2$ | 0,018 | t_{11p} | 2,62 |
| 5 | $S_{b_{22}}^2$ | 0,018 | t_{22p} | 6,37 |
| 6 | $S_{b_{12}}^2$ | 0,009 | t_{12p} | 1,3 |

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

$$y = 8,43 - 0,48x_1 - 0,35x_1^2 - 0,85x_2^2.$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [15, 16]. Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u \max}^2 = 0,090$ (табл. 9).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 0,036$.

Тоді: $F = 2,53 \cdot F_{(0,05; f_w; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості ($F_{(0)} = 2,93$) [15, 16].

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:

$$W' = 4,59 + 0,184q_1 + 68q_2 - 0,14q_1^2 - 340q_2^2.$$

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

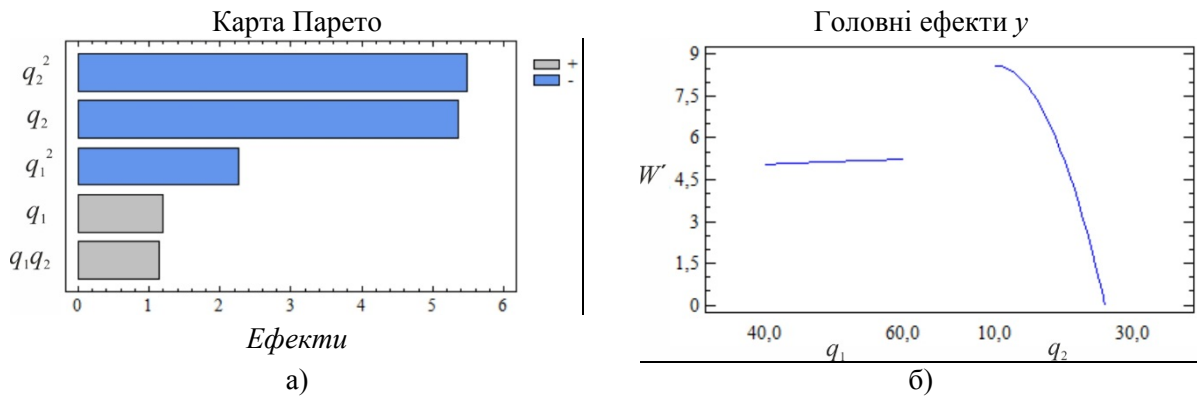


Рисунок 4 – Карта Парето (а) і головні ефекти у (б)

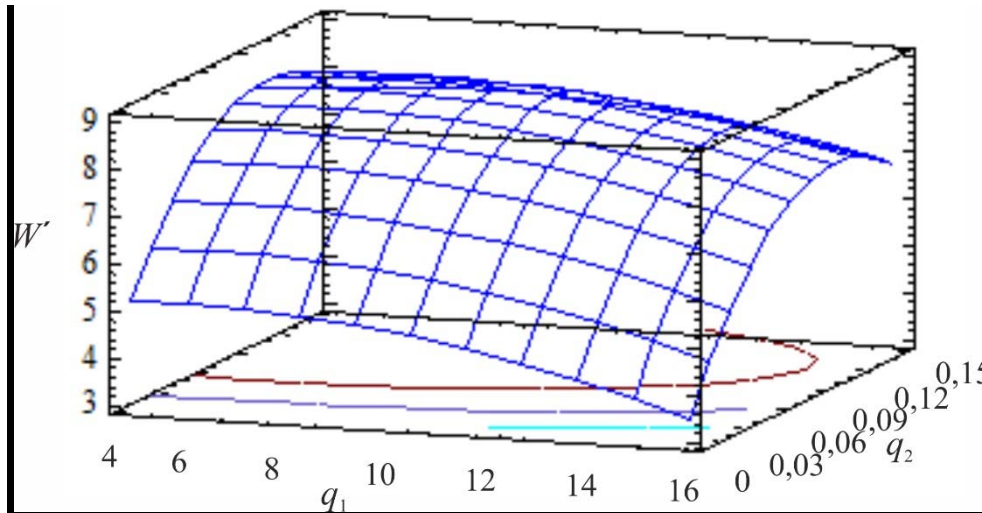


Рисунок 5 – Розрахункова поверхня відгуку $W = f(q_1, q_2)$

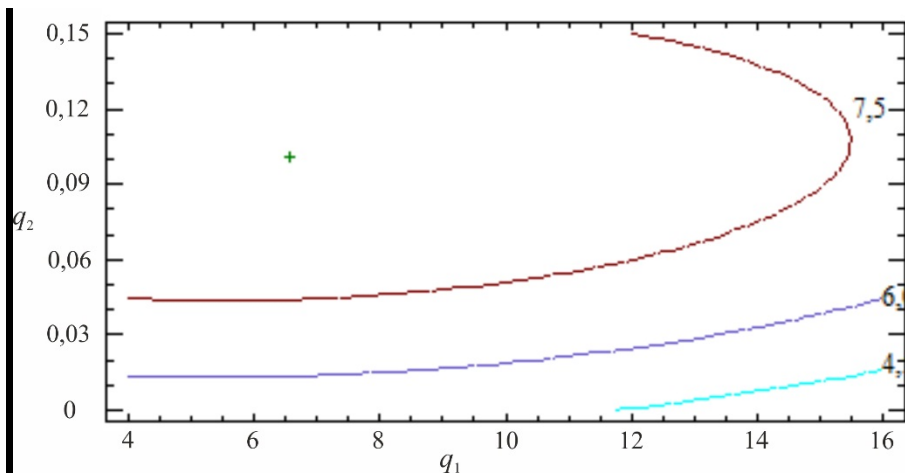


Рисунок 6 – Контури розрахункової поверхні відліку

Отримані результати свідчать, що обидва фактори рівняння регресії є значущими. У процесі аналізу встановлено, що показники ударної в'язкості приймають максимальних значень при вмісті наповнювачів: активоване вугілля – 5 мас.ч., вулцеве волокно – 0,1 мас.ч. ($W = 8,8 \text{ кДж/м}^2$). За результатами досліджень визначено, що збільшення вмісту наповнювачів відносно вказаного вмісту призводить до погіршення показників ударної в'язкості, тому доцільно вводити двокомпонентний наповнювач за вищезазначеного вмісту у епокси-поліефірну матрицю для отримання КМ з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

Висновки. Методом математичного планування експерименту встановлено оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача для створення композитних матеріалів з поліпшеними показниками когезійної міцності. Відповідно отриманим результатам вміст активованого вугілля ($d = 5 \dots 10$ мкм) становить – $5 \dots 10$ мас.ч., вуглецеве волокно ($l = 0,5 \dots 1,0$ мм, $d = 18 \dots 25$ мкм) – $0,1$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидно-поліефірного зв'язувача. При цьому значення модуля пружності при згинанні підвищуються з $E = 3,6$ ГПа (для епоксидної матриці) до $E = 4,7 \dots 5,0$ ГПа.

Доведено що для створення композитного матеріалу з поліпшеними показниками ударної в'язкості слід вводити: активоване вугілля ($d = 5 \dots 10$ мкм.) – 5 мас.ч., вуглецеве волокно ($l = 0,5 \dots 1,0$ мм, $d = 18 \dots 25$ мкм) – $0,1$ мас.ч. на 100 мас.ч. При цьому покази ударної в'язкості підвищуються з $W = 8,3$ кДж/м² (для епоксидної матриці) до $W = 8,8$ кДж/м². Отримані результати математичного планування експерименту, з використанням програмного забезпечення, дозволяють створити нові покриття функціонального призначення з поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних властивостей. Розроблені композитні матеріали доцільно використовувати у вигляді захисних покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик і відновлення деталей засобів транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chausov, M., Pylypenko, A., Berezin, V., Volyanska, K., Maruschak, P., Hutsaylyuk, V., Markashova, L., Nedoseka, S., & Menou, A. (2018). Influence of dynamic non-equilibrium processes on strength and plasticity of materials of transportation systems. *Transport*, 33(1), 231-241. <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1301549>
2. Ляшенко Б.А. Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры. Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием / Б. А. Ляшенко, Ю. В. Волков, Е. К. Соловых, Л. А. Лопата // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 2(67). – С. 110–126.
3. Потеха Ф.Ф. Применение полимерных материалов в судоремонте / Ф.Ф. Потеха. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2011. – Вып. 47. – С. 35–52.
4. . Mark, H.F. Encyclopedia of Polymer Science and Technology [Text] / ed. by H.F. Mark. – John Wiley&Sons, 2002. – 3005 p. doi:10.1002/0471440264
5. Pascault, J.R. Epoxy Polymers: New Materials and Innovations [Text] / ed. by J.R. Pascault, J.J. Williams. – John Wiley & Sons, 2010. – 367 p. doi:10.1002/9783527628704
6. 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.
7. 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.
8. 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-Джавахери Али Андан Мансур // Вестник Карагандинского государственного университета. – 2017. – №1 (85). – С. 17-27.
9. 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.
10. Frank R. Jones Unsaturated Polyester Resins / Frank R. Jones // Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition). – Chapter 26. – 2017, P. 743–772.
11. Brailo M.V. Optimization of contents of two-component polydispersed filler by applying the mathematical design of experiment in forming composites for transport repairing /

M.V. Brailo, A.V. Buketov, S.V. Yakushchenko, O.O. Sapronov, L. Dulebova // Bulletin of the Karaganda University. "Mathematics" series. – 2018. – №1 (89). – С. 93-104.

12. 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.

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

14. 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.

15. 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.

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

REFERENCES

1. Chausov, M., Pylypenko, A., Berezin, V., Volyanska, K., Maruschak, P., Hutsaylyuk, V., Markashova, L., Nedoseka, S., & Menou, A. (2018). Influence of dynamic non-equilibrium processes on strength and plasticity of materials of transportation systems. *Transport*, 33(1), 231-241. <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1301549>

2. Lyashenko B.A. Povihshenie iznosostoykosti detaleyj sudovikh mashin i mekhanizmov pokrihtiyami diskretnoyj strukturih. Tekhnologicheskoe obespechenie pokrihtiyj diskretnoyj strukturih ehlektrokontaktnihm pripekaniem / B. A. Lyashenko, Yu. V. Volkov, E. K. Solovihkh, L. A. Lopata // Problemi tertya ta znoshuvannya. – 2015. – № 2(67). – S. 110–126.

3. Potekha F.F. Primenenie polimernihkh materialov v sudoremonte / F.F. Potekha. – Vladivostok : Mor. gos. un-t, 2011. – Vihp. 47. – S. 35-52.. Mark, H.F. Encyclopedia of Polymer Science and Technology [Text] / ed. By H.F. Mark. – John Wiley&Sons, 2002. – 3005 p. doi:10.1002/0471440264

4. Pascault, J.R. Epoxy Polymers: New Materials and Innovations [Text] / ed. by J.R. Pascault, J.J. Williams. – John Wiley & Sons, 2010. – 367 p. doi:10.1002/9783527628704

5. 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.

6. 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.

7. Buketov A.V. Primenenie metodov matematicheskoyj statistiki dlya optimizacii sostava zathitnihkh pokrihtiyj / 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.

8. 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.

9. Frank R. Jones Unsaturated Polyester Resins / Frank R. Jones // Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition). – Chapter 26. – 2017, P. 743–772.

10. Brailo M.V. Optimization of contents of two-component polydispersed filler by applying the mathematical design of experiment in forming composites for transport repairing /

M.V. Brailo, A.V. Buketov, S.V. Yakushchenko, O.O. Saprionov, L. Dulebova // Bulletin of the Karaganda University. "Mathematics" series. – 2018. – №1 (89). – С. 93-104.

11. Saprionov O.O. Optimizaciya skladu zakhisnogo pokrittya metodom matematichnogo planuvannya eksperimentu / O.O. Saprionov // Zagaljnoderzhavniyj mizhvidomchiyj naukovotekhnichnij zbirnik. Konstruyuvannya, virobnictvo ta ekspluataciya sils'jkgospodars'jkikh mashin. – Kirovograd: KNTU. – 2013. – № 43. – Ch. II. – S. 260-267.

12. 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.

13. 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 // – К.: Vitha shkola, 1976. – 184 s.

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

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

Браїло Н. В., Кобельник О. С., Сапронов А. А., Сапронова А. В., Василенко А. А., Гусев В. Н. ЭПОКСИ-ПОЛИЭФИРНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

В работе методом математического планирования эксперимента разработано многокомпонентное эпоксиполиэфирное покрытие с улучшенными когезионными свойствами. Установлено оптимальное содержание двухкомпонентного наполнителя: активированный уголь ($d = 5 \dots 10$ мкм) – 5...10 масс.ч., углеродное волокно ($d = 6 \dots 8$ мкм, $l = 0,5 \dots 1,5$ мм) – 0,1 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксиполиэфирной матрицы. Введение в эпоксидного связующим двухкомпонентного наполнителя позволяет улучшить показатели модуля упругости при изгибе защитных покрытий до $E = 4,7 \dots 5,0$ ГПа.

Доказано влияние двухкомпонентного наполнителя на показатели ударной вязкости разработанного эпоксиполиэфирного композита. Установлено, что оптимальное содержание двухкомпонентного наполнителя: активированный уголь – 5 мас.ч., углеродное волокно – 0,1 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксиполиэфирного связующим. Введение в эпоксиполиэфирное связующее двухкомпонентного наполнителя позволяет улучшить показания ударной вязкости до $W = 8,8$ кДж/м². Полученные результаты позволяют создать полимерное покрытие с улучшенными в комплексе показателями когезионных свойств.

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

Brailo N. V., Kobelnyk O. S., Saprionov O. O., Saprionova A. V., Vasylenko A. O., Gusev V. N. EPOXY-POLYESTER COATING FOR RESTORATION OF TRANSPORT VEHICLES

In the work the multicomponent epoxy-polyester coating with improved cohesive properties was developed by the method of mathematical planning of the experiment. The optimum content of the two-component filler was found: activated carbon ($d = 5 \dots 10$ μm) – 5...10 pts.wt., carbon fiber ($d = 6 \dots 8$ μm, $l = 0.5 \dots 1.5$ mm) – 0.1 pts.wt. per 100 pts.wt. of epoxy-polyester matrix. Introduction the two-component filler to the epoxy binder allows to increase the indexes of the elasticity modulus during the flexion of the protective coatings to $E = 4.7 \dots 5.0$ GPa.

The influence of two-component filler on the impact strength of developed epoxy-polyester composite was proved. It was found that the optimal content of two-component filler: activated carbon – 5 pts.wt., carbon fiber – 0.1 pts.wt. per 100 pts.wt. of epoxy-polyester binder. Introduction the two-component filler to epoxy-polyester binder allows to increase of the impact strength up to $W = 8.8$ kJ/m². The obtained results allow to create a polymeric coating with improved complex properties of cohesive properties.

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

© Браїло М. В., Кобельник О. С., Сапронов О. О., Сапронова А. В., Василенко А. О., Гусев В. М.

Статтю прийнято до редакції 12.10.18