

10. Надежность в технике: Система сбора и обработки информации: Методы оценки показателей надежности: ГОСТ 27.503-81. М.: Госстандарт, 1982. – 55 с.
11. Скрипник, В.М. Оценка надежности технических систем по цензурированным выборкам / В.М. Скрипник, А.Е. Назин. – Минск: Наука и техника, 1981. – 144 с.
12. Савич, Л.К. Теория вероятностей и математическая статистика / Л. К. Савич, Н. А. Смольская; науч. ред. О. И. Лаврова. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2006. – 208 с.
13. ГОСТ Р 50779.27-2007, МЭК 61649–1997 Статистические методы. Критерий согласия и доверительные интервалы для распределения Вейбулла.
14. Equipment reliability testing – Part 4: Statistical procedures for exponential distribution – Point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals: International Standard IEC 60605-4. International Electrotechnical Commission.2001. – 65 p.

Leonid Boyko, Arcady Goman, Volha Baran

The State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, Belarus

Methodology for determining the practical reliability indexes of tractors as per operating data within the warranty period

You may wish to consider a methodology for predicting the reliability of agricultural tractors according to operational failures during the warranty period. In this case, so far known in the art methods of statistical information processing of tractors' failures are not applicable. Statistical data are processed by special methods of censored samples. Parametric and nonparametric methods of operational data processing are recommended. An example of practical use of the methodology is presented hereinafter.

The method allows the calculation of censored samples parameters of reliability not only for the registered primary failure, but additionally take into account the tractor, which is not denied in the reporting period of time.

Practice calculations shows that the most effective are exponential (one-parameter) and Weibull distribution (two-parameter) methods. Selecting a parametric method should be carried out by the form of the histogram distribution of failures. In the case of a close coincidence results in an exponential and Weibull distribution exponential method is recommended as the most simple method. When choosing a method for assessing the reliability between parametric and nonparametric methods without the need for extrapolation of the preference should be given to non-parametric methods, guarantees a certain lower limit of reliability indices.

single points of failure, censored sample, failure homogeneity, parametric and nonparametric methods, likelihood function, Pearson correlation criterion, Kaplan-Meier method, Weibull distribution

Одержано 03.09.14

УДК 667.64:678.026

А.В. Букетов, проф., д-р техн. наук, В.О. Скирденко, асист., О.О.Сапронов, асист.
Херсонська державна морська академія

Застосування методу математичного планування експерименту для встановлення оптимального вмісту двокомпонентного наповнювача у епоксикомпозитах

Досліджено залежність вмісту дисперсних наповнювачів на фізико-механічних і теплофізичних властивостей епоксидних композитів для формування захисних покриттів. Методом математичного планування експерименту визначено оптимальний вміст дисперсного вугільного шлаку (63...65 мкм) і дрібнодисперсного залізного сурику (10...20 мкм), який складає: (ВШ) – 30 мас.ч; (ЗС) – 20 мас.ч., ЕД-20 – 100 мас.ч., твердник ПЕПА – 10 мас.ч. для формування матеріалу з поліпшеними фізико-механічними властивостями. Визначено оптимальний вміст дисперсного вугільного шлаку – 10 мас.ч і дрібнодисперсного залізного сурику – 40 мас.ч. для формування матеріалу з поліпшеними теплофізичними властивостями. від

епоксикомпозит, фізико-механічні і теплофізичні властивості, математичне планування

А.В. Букетов, проф., д-р техн. наук, В.О. Скирденко, асист., А.А.Сапронов, асист.

Херсонская государственная морская академия

Применение метода математического планирования эксперимента для установления оптимального содержания двухкомпонентного наполнителя в эпоксикомпозитах

Исследована зависимость содержания дисперсных наполнителей от физико-механических и теплофизических свойств эпоксидных композитов для формирования защитных покрытий. Методом математического планирования эксперимента определено оптимальное содержание дисперсного угольного шлака (63...65 мкм) и мелкодисперсного железного сурика (10...20 мкм), которое составляет: (УШ) – 30 масс.ч; (ЖС) – 20 масс.ч., ЭД-20 – 100 масс.ч., отвердитель ПЭПА – 10 масс.ч. для формирования материалов с улучшенными физико-механическими свойствами. Определено оптимальное содержание дисперсного угольного шлака – 10 масс.ч и мелкодисперсного железного сурика – 40 масс.ч. для формирования материалов с улучшенными теплофизическими свойствами.

эпоксикомпозит, физико-механические и теплофизические свойства, математическое планирование

Вступ. Швидкий розвиток промисловості, як в Україні, так і в усьому світі, потребує виготовлення та застосування конструкційних матеріалів з поліпшеними властивостями [1-4]. Важливим завданням сучасного матеріалознавства на сьогодні є створення конструкційних, у тому числі полімерних композитних матеріалів (КМ) з наперед заданими властивостями. Відомо [2, 4], що поліпшення властивостей КМ відбувається за рахунок оптимізації технологічних умов та введення складових за визначеного вмісту при виготовленні необхідних конструкцій. Одним із методів поліпшення властивостей є введення у КМ наповнювачів різної дисперсності та природи. Встановлення оптимального вмісту добавок різної дисперсності у епоксидному зв'язувачі відбувається шляхом використання як теоретичних, так і експериментальних методів [3]. Проте, отримання експериментальних даних є трудомістким процесом, що, як наслідок, супроводжується економічними затратами. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є застосування методу математичного планування експерименту [3, 5]. Даний метод дає змогу не лише нівелювати значні економічні затрати за рахунок зменшення кількості дослідів для отримання достовірних даних, але й дозволить оптимізувати вміст декількох компонентів у матеріалах з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

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

Результати досліджень. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Твердник вводили у епоксидний олігомер при співвідношенні – 1:10. Як наповнювачі використовували дисперсні (63...65 мкм) та дрібнодисперсні (10...20 мкм) порошки. Це, відповідно: вугільний шлак (ВШ) і залізний сурик (ЗС) (складається із суміші мікроелементів і оксиду заліза (Fe_2O_3), ГОСТ 8135-74).

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.

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 – вугільний шлак	x_1	20	10	10	20	30
Додатковий наповнювач – залізний сурик	x_2	30	10	20	30	40

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

№ Дослідів (u)	x_0	x_1	x_2	$x'_1 = x_1^2 - 0,67$	$x'_2 = x_2^2 - 0,67$	$x_1 x_2$
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, модуля пружності при згинанні і теплостійкості (за Мартенсом) КМ

№ досліджу	Вміст компонентів, q , мас.ч.		Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{зз}$, МПа	Модуль пружності при згинанні, E , ГПа	Теплостійкість (за Мартенсом), T , К
	x_1	x_2			
1	10	20	71,7	5,0	346
2	30	20	82,2	5,9	350
3	10	40	79,2	5,6	352
4	30	40	73,1	4,8	344
5	20	30	77,5	5,4	347
6	30	30	74,4	5,2	342
7	10	30	69,5	4,9	345
8	20	40	68,8	4,6	340
9	20	20	70,2	5,0	343

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:

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

Результати абсолютних значень коефіцієнтів рівняння регресії наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Коефіцієнти рівняння регресії для руйнівних напружень при згинанні КМ

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
71,90	1,55	-0,50	2,85	0,40	-4,15

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 71,90 + 1,55x_1 - 0,50x_2 + 2,85x_1^2 + 0,40x_2^2 - 4,15x_1x_2.$$

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

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

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 досліджу;

\bar{y}_i – середнє значення величини y , отримане при паралельних досліджах.

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

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

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

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

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	0,21	$\sigma^2\{y\}_1$	0,42
2	S_{u2}^2	0,28	$\sigma^2\{y\}_2$	0,56
3	S_{u3}^2	0,28	$\sigma^2\{y\}_3$	0,56
4	S_{u4}^2	0,39	$\sigma^2\{y\}_4$	0,78
5	S_{u5}^2	0,49	$\sigma^2\{y\}_5$	0,98
6	S_{u6}^2	0,49	$\sigma^2\{y\}_6$	0,98
7	S_{u7}^2	0,09	$\sigma^2\{y\}_7$	0,18
8	S_{u8}^2	0,09	$\sigma^2\{y\}_8$	0,18
9	S_{u9}^2	0,07	$\sigma^2\{y\}_9$	0,14

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 2,39, \quad \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,27.$$

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

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

$$G_{розр} = \frac{0,49}{2,39} = 0,205.$$

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: $S_{i \max}^2 = 0,49$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,205$.

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

Тобто, виконується умова (4):

$$G_{розр} = 0,205 \leq G_{табл} = 0,478.$$

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

Таблиця 6 – Експериментальні результати дослідження руйнівних напружень при згинанні матеріалів

№ дослідів	Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{зз}$, МПа			Середнє значення, $\sigma_{зз}$, МПа
	1	2	3	
1	71,2	72,1	71,8	71,7
2	82,8	81,8	82	82,2
3	78,8	79	79,8	79,2
4	73,8	72,9	72,6	73,1
5	76,7	78	77,8	77,5
6	74,4	75,1	73,7	74,4
7	69,8	69,5	69,2	69,5
8	69,1	68,5	68,8	68,8
9	69,9	70,4	70,3	70,2

Дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 7) визначали 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 [3, 7]. При цьому визначали табличний (t_m) і розрахунковий (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 $t_T = 2,04$.

Надалі 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	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,030	t_{0p}	412,63
2	$S_{b_1}^2$	0,044	t_{1p}	7,37
3	$S_{b_2}^2$	0,044	t_{2p}	2,38
4	$S_{b_{11}}^2$	0,133	t_{11p}	7,82
5	$S_{b_{22}}^2$	0,133	t_{22p}	1,10
6	$S_{b_{12}}^2$	0,066	t_{12p}	16,1

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

$$y = 71,90 + 1,55x_1 - 0,50x_2 + 2,85x_1^2 - 4,15x_1x_2$$

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

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

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

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

$S_y^2 = 0,27$ – дисперсія відтворення;

Тоді $F_p = 1,85$.

$F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-ному рівні значущості ($f_1 = N - (k + 1) = 9 - (5 + 1) = 3, f_2 = N(n - 1) = 9 \cdot (3 - 1) = 18$). Тоді: $F_{(t)} = 3,2$ [2, 7].

Розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (11). 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 – вугільний шлак (30 мас.ч.), додатковий наповнювач – залізний сурік (20 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Аналогічно схемі розрахунків математичного планування експерименту за значеннями руйнівних напружень при згинанні, визначали адекватність композиції за значеннями 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 КМ

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
5,01	0,07	-0,15	0,23	-0,02	-0,43

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 5,01 + 0,07x_1 - 0,15x_2 + 0,23x_1^2 - 0,02x_2^2 - 0,43x_1x_2$$

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

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,27. \quad \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,03.$$

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

$$G_p = \frac{0,04}{0,27} = 0,148.$$

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: $S_{u\max}^2 = 0,04$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,148$.

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

Тобто, виконується умова:

$$G_{розр} = 0,148 \leq G_{табл} = 0,478.$$

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

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

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	$S_{b_0}^2$	0,003	t_{0p}	85,43
2	$S_{b_1}^2$	0,005	t_{1p}	0,94
3	$S_{b_2}^2$	0,005	t_{2p}	2,12
4	$S_{b_{11}}^2$	0,015	t_{11p}	1,91
5	$S_{b_{22}}^2$	0,015	t_{22p}	0,14
6	$S_{b_{12}}^2$	0,008	t_{12p}	4,9

Враховуючи значущість коефіцієнтів, рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = 5,01 - 0,15x_2 - 0,43x_1x_2$$

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

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u_{max}}^2 = 0,04$ (табл. 9).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 0,03$.

Тоді $F = 1,33$.

$F_{(0,05; f_E; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ($F_{(t)} = 2,8$).

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. Однак, важливим при формуванні композитів є вміст додаткового наповнювача x_2 та співвідношення вмісту обох добавок x_1x_2 . При цьому встановлено (табл. 3), що максимальними показниками модуля пружності при згинанні має епоксидний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – вугільний шлак (30 мас.ч.), додатковий наповнювач – залізний сурик (20 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}
342,56	-1,17	-0,50	3,17	1,17	-3,00

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 342,56 - 1,17x_1 - 0,50x_2 + 3,17x_1^2 + 1,17x_2^2 - 3,0x_1x_2$$

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	
	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	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	3	$\sigma^2\{y\}_6$	6
7	S_{u7}^2	1	$\sigma^2\{y\}_7$	2
8	S_{u8}^2	3	$\sigma^2\{y\}_8$	6
9	S_{u9}^2	1	$\sigma^2\{y\}_9$	2

При цьому:

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

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 1,89.$$

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

$$G_{розр} = \frac{3}{17} = 0,176.$$

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: $G_{розр} = 0,176$. Табличне значення критерію Кохрена: $G_{табл} = 0,478$.

Тобто, виконується умова:

$$G_{розр} = 0,176 \leq G_{табл} = 0,478.$$

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

Таблиця 14 – Експериментальні результати дослідження теплостійкості КМ

№ досліджу	Теплостійкість КМ, T, К			Середнє значення, T, К
	1	2	3	
1	347	346	345	346
2	350	349	351	350
3	350	353	353	352
4	343	345	344	344
5	345	348	348	347
6	340	343	343	342
7	345	344	346	345
8	341	341	338	340
9	344	343	342	343

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.

Враховуючи значущість коефіцієнтів, рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = 342,56 - 1,17x_1 + 3,17x_1^2 - 3,0x_1x_2.$$

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

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u\max}^2 = 3$ (табл. 13).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 1,89$.

Тоді $F_p = 1,59$.

$F_{(0,05; f_T; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ($F_{(t)} = 2,9$).

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	$S_{b_0}^2$	0,21	t_{0p}	744,76
2	$S_{b_1}^2$	0,315	t_{1p}	2,08
3	$S_{b_2}^2$	0,315	t_{2p}	0,89
4	$S_{b_{11}}^2$	0,944	t_{11p}	3,26
5	$S_{b_{22}}^2$	0,944	t_{22p}	1,20
6	$S_{b_{12}}^2$	0,472	t_{12p}	4,4

Слід зазначити, що 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 – вугільний шлак (10 мас.ч.), додатковий наповнювач – залізний сурик (40 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними теплофізичними властивостями.

Висновки. Методом ортогонального центрального композиційного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного дисперсного наповнювача у епоксидному композиті з поліпшеними когезійними властивостями. Встановлено, що для формування матеріалу з поліпшеними фізико-механічними властивостями необхідно формувати матеріал наступного складу: епоксидіановий олігомер ЕД-20 (100 мас. ч), твердник поліетиленполіамін (10 мас. ч.), основний наповнювач – вугільний шлак (30 мас.ч.), додатковий наповнювач – залізний сурик (20 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

Доведено, що покращені теплофізичні властивості має матеріал на основі епоксидіанового олігомеру ЕД-20 (100 мас. ч), твердника поліетиленполіаміну (10 мас. ч.), основного наповнювача – вугільний шлаку (10 мас.ч.), додаткового наповнювача – залізного сурику (40 мас.ч.).

У подальшому планується дослідити зносостійкість та корозійну стійкість розроблених матеріалів.

Список літератури

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. Букетов А.В. Визначення оптимального вмісту двокомпонентного наповнювача методом математичного планування експерименту / А.В. Букетов, М.В. Браїло, В.Л. Алексенко, В.М. Овдій // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ.–Випуск 44.–2014. – С. 18-27.
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
8. 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.

Buketov Andriy, Skyrdenko Vadim, Sapronov Alexander

Kherson State Maritime Academy, Kherson

Application of mathematical planning of the experiment for the optimal two-component filler content in epoxycomposites

Method of mathematical planning of the experiment to establish the optimal two-component filler content of different physical nature and dispersion to form a Cabinet with improved physical and mechanical properties.

The dependence of the content of dispersed fillers on physical, mechanical and thermal properties of epoxy composites to form a protective coating. The method of mathematical planning of the experiment determined the optimal content of dispersed coal slag (63...65 mcm) and fine iron ochre (10...20 mcm), which is: (OR) – 30 parts; (AP) – 20 parts, ED-20 – 100 parts, hardener PEPA – 10 parts – to form a material with improved physical and mechanical properties. The optimum content of particulate coal slag – 10 parts and fine iron ochre – 40 parts – to form a material with improved thermal properties.

Based on the results of physical and mechanical studies and results of mathematical experiment planning content optimized two-component particulate filler in epoxy composites with improved cohesive properties: tensile stress in bending – $\sigma_{3z} = 82,2$ МПа, modulus of elasticity – $E = 5,9$ GPa and temperature resistance (Martens) – $T = 352$ К.

epoxy composites, physical, mechanical and thermal properties, mathematics planning

Одержано 22.07.14

УДК 631.355.075

В.А. Грубань, асист.

Миколаївський національний аграрний університет

Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів очисних робочих органів кукурудзозбиральних машин

У даній роботі представлено теоретичні дослідження, які змістовно описують поведінку качанів під час їх контакту з притискними пристроями та надають можливість більш ретельніше вивчити таку складну технологічну операцію, як очищення качанів кукурудзи від обгортки. Отримано математичні залежності, що дозволяють визначити найбільш оптимальні режими роботи качаноочисного пристрою та основні кінематичні параметри притискних робочих органів, а саме гумових лопатей.

кукурудза, качаноочисний пристрій, очисні вальці, притискний пристрій, обгортка качанів

В.А. Грубань, асист.

Николаевский национальный аграрный университет

Обоснование конструктивно-технологических параметров очистительных рабочих органов кукурузозуборочных машин

В данной работе представлены теоретические исследования, которые содержательно описывают поведение початков во время их контакта с прижимными устройствами и предоставляют возможность более тщательно изучить такую сложную технологическую операцию, как очистка початков кукурузы от обертки. Получены математические зависимости, которые позволяют определить наиболее оптимальные режимы работы початкоочистительного устройства и основные кинематические параметры прижимных рабочих органов, а именно резиновых лопастей.

ключевые слова: кукуруза, початкоочистительное устройство, очистительные вальцы, прижимное устройство, обертка початков

Постановка проблеми. Існуючі на сьогоднішній день елементи теорії кукурудзозбиральних машин методологічно спираються на теорію продуктивності робочих машин, розроблену для інших галузей машинобудування [4, 5], теорію експлуатації машино-тракторного парку та вивчення їх роботи в віртуальних умовах експлуатації. Проектування машин для аграрного виробництва вимагає на сучасному етапі моделювання процесів з подальшою розробкою необхідної теорії, яка нерозривно пов'язує процеси проектування з реальними умовами експлуатації. Останні дозволяють тільки виявити непродуктивні витрати робочого часу, намітити шляхи його скорочення і отримати необхідні дані для прогнозування напрямів подальшого вдосконалення машин при проектуванні.

© В.А. Грубань, 2014