

Научная статья
УДК 674, 678

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
СВОЙСТВ ЛУЩЕНО-РУБЛЕНОГО
ДРЕВЕСНО-КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА (ЛРДКМ)
С КАРДАНОЛСОДЕРЖАЩЕЙ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЕЙ (КЭМ).**

**Антон Юрьевич Тесленко¹, Олег Федорович Шишлов²,
Виктор Владимирович Глухих³**

^{1,3} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

² ПАО «Уралхимпласт», Нижний Тагил, Россия

¹ a.teslenko@ucp.ru

² o.shishlov@ucp.ru

³ gluhihvv@m.usfeu.ru

Аннотация. В данной работе были использованы методы многофакторного планирования эксперимента с применением программного пакета *Statgraphics*. В результате выполнения плана были получены экспериментальные значения свойств ЛРДКМ, на основании которых были построены экспериментально-статистические модели. Была проведена оптимизация независимых факторов с целью получения ЛРДКМ с заданными свойствами.

Ключевые слова: лущено-рубленный, древесно-композиционный, карданолсодержащая эпоксидная матрица, фенолкамин

Original article

**EXPERIMENTAL AND STATISTICAL MODELS OF PROPERTIES
OF SHELLLED-CHOPPED WOOD COMPOSITE MATERIAL (SCWC)
WITH A CARDANOL-CONTAINING EPOXY MATRIX (CEM)**

Anton Yu. Teslenko¹, Oleg F. Shishlov², Viktor V. Glukhikh³

^{1,3} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

² JSC “Uralchimplast”, Nizhny Tagil, Russia

¹ a.teslenko@ucp.ru

² o.shishlov@ucp.ru

³ gluhihvv@m.usfeu.ru

Abstract. In this work, the methods of multifactorial planning of the experiment using the Statgraphics software package were used. As a result of the implementation of the experiment plan, experimental values of the properties of SCWC were obtained, on the basis of which experimental statistical models were constructed. The optimization of independent factors was carried out in order to obtain SCWC with the specified properties.

Keywords: shelled-chopped wood composite material (SCWC), cardanol containing epoxy matrix, phenalkamine, experimental and statistical models of the properties of SCWC

Наблюдается большой интерес к древесным композиционным материалам. Данные материалы широко используются в такой отрасли, как деревянное домостроение [1]. Требования к прочностным и экологическим характеристикам современных ДКМ диктуют необходимость разработки новых связующих и современных подходов к изготовлению ДКМ. Одним из таких связующих является карданолсодержащая эпоксидная матрица (КЭМ). В качестве отвердителя для получения КЭМ выступают фенолкамины, сырьем для синтеза которых является карданол – фенольный липид, получаемый из жидкости скорлупы ореха кешью [2].

Планирование эксперимента. Для изучения экспериментально-статистических моделей свойств материала ЛРДКМ средствами программного пакета *Statgraphics Centurion XV* (v.15.1.02) была сформирована план-матрица эксперимента. Матрица плана представляет собой трехфакторный ортогональный центрально-композиционный план Бокса-Уилсона с пятью опытами на нулевом уровне. В качестве независимых факторов были выбраны давление прессования (P_i), температура прессования (T_i), время прессования (τ_i) и зависимые: D – плотность, кг/м³; WA – водопоглощение за 24 ч, %; TC – теплопроводность, Вт · (м/К); $C_{1,2,3}$ – разрушающее напряжение при сжатии вдоль оси 1, 2 и 3 МПа; $B_{1, 2, 3}$ – разрушающее напряжение при трехточечном изгибе вдоль оси 1, 2 и 3 МПа; $S_{12, 13, 23}$ – разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости 1–2, 1–3 и 2–3 МПа; $I_{1, 2, 3}$ – ударная вязкость вдоль оси 1, 2 и 3 кДж/м².

Получение ЛРДКМ с КЭМ. Для изготовления лабораторных образцов ЛРДКМ был выбран метод прямого горячего прессования в жесткой оснастке. ЛРДКМ изготавливали из рубленого березового шпона и связующего (эпоксидная смола ЭД-20: фенолкамин; 100:50 м. ч.), расход составил 125г/м². Свойства полученных образцов ЛРДКМ определяли в соответствии со следующими стандартами: ГОСТ Р 57713, ГОСТ 3916.1, ISO 8302:1991, ГОСТ 4651, ГОСТ Р 56805, ГОСТ 56799, ГОСТ 4647.

Изучение влияния независимых факторов на свойства ЛРДКМ. Полученные результаты эксперимента были статистически обработаны средствами программного пакета *Statgraphics*, предварительные расчеты показали, что средние прочностные свойства (C_2 , B_2 , I_2 и S_{12}) ЛРДКМ незначи-

тельно отличаются от средних прочностных свойств (C_3 , B_3 , I_3 и S_{13}) с высокой степенью достоверности ($P < 0,001$). При изучении полученных статистических данных был сделан вывод о том, что ЛРДКМ можно отнести к трансверсально изотропным материалам. Для нахождения экспериментально-статистических моделей свойств ЛРДКМ за основу была принята регрессионная модель линейного полинома второй степени, уравнение (1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (1)$$

Средствами программного пакета *Statgraphics* был проведен регрессионный анализ полученных результатов эксперимента (табл. 1). В результате были получены адекватные уравнения регрессии с нормированными значениями β -коэффициентов, удовлетворяющие следующим условиям их адекватности: P -значение $\leq 0,05$; нормированный $R^2 \geq 0,50$.

Таблица 1

Параметры полученных уравнений регрессии
с натуральными значениями входных факторов

Зависимые факторы	Натуральные β -коэффициенты уравнений регрессии										R^2
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{11}	β_{22}	β_{33}	β_{12}	β_{13}	β_{23}	
D	342,95	29,48	1,28	1,12	2,52	0	0	0	0	0	0,98
WA	31,88	– 0,851	–0,078	0	–0,076	0	0	0	0	0	0,85
TC	0,08	0,004	0,0001	0,0002	0,0003	0	0	0	0	0	0,99
C_1	–380,71	5,37	0	0	0	0	0,055	0	– 0,106	0,035	0,95
C_2	33,08	3,72	0,21	0	0,235	0	0	0	– 0,101	0	0,90
B_1	–0,171	0,033	0	0	0,005	0	0	0	0	0	0,55
B_2	51,29	0,214	0	0	0	– 0,001	– 0,005	0	– 0,021	0	0,88
S_{12}	–19,69	1,79	0	0	0	0	0	0,0588	0	0	0,58
S_{23}	–86,52	1,16	0	0	0,173	0	0	0	0	0,014	0,72
I_1	– 2154,22	–4,63	–0,727	0	2,80	0,062	0,298	0	0,372	0	0,90
I_2	1515,37	– 27,97	–4,40	0	8,05	0	0	0	0	0	0,64

Оптимизация плана эксперимента. Для поиска рациональных значений технологических факторов (P , T , τ), обеспечивающих получение ЛРДКМ с максимальными значениями D , TC , прочностных свойств с минимальным значением WA , средствами программного пакета *Statgraphics* методом симплексов была проведена оптимизация композиционной функции (2), (3) и (4), а также была построена поверхность отклика целевой функции (рис. 1).

Оптимизация композиционной функции:

$$(G \circ F)(P, T, \tau) = G(F(P, T, \tau)) \quad (2)$$

$$F = (D, WA, TC, C_1, C_2, B_1, B_2, I_1, I_2, S_{12}, S_{23}) \quad (3)$$

$$y = D = f(P, T, \tau)$$

⋮

$$y = S_{23} = f(P, T, \tau) \quad (4)$$

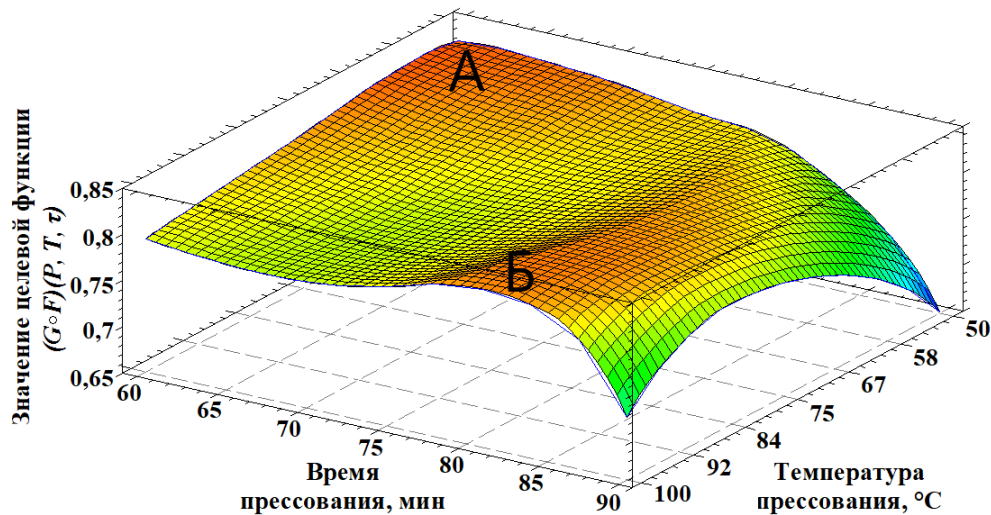


Рис. 1. Расчетная поверхность отклика целевой композиционной функции $(G \circ F)(P, T, \tau)$ при $P = 14$ МПа

Результаты оптимизации композиционной функции показали, что в изученной области факторного пространства на поверхности отклика можно наблюдать два экстремума – А и Б. Значения функции $(G \circ F)(P, T, \tau)$ для данных экстремумов равны 0,819206 и 0,828085 соответственно. Координаты вершин экстремумов равны $A = (x_2 = -1,471; x_3 = -1,113)$ и $B = (x_2 = 1,442; x_3 = 0,396)$. На основании полученных значений функции $(G \circ F)(P, T, \tau)$ для экстремумов А и Б можно отметить, что условиям поставленной задачи в большей мере соответствует вершина экстремума Б. Наличие экстремума А, соизмеримого по высоте с экстремумом Б, можно объяснить присутствием шумового фактора [3], которым является тепловой эффект реакции полимеризации. Используя найденные значения независимых факторов, мы изготовили образцы ЛРДКМ № 20 и № 21. Данные табл. 2 показывают хорошее соответствие между расчетными и фактическими значениями показателей свойств ЛРДКМ № 20 и удовлетворительное для ЛРДКМ № 21.

Таблица 2

Показатели ЛРДКМ № 20 и № 21

Свой- ство ЛРДКМ	Экстремум А		Экстремум Б		Расхожде- ние, % от расчета для экстр. А	Расхожде- ние, % от расчета для экстр. Б
	Расчет- ное зна- чение	Эксперименталь- ное значение	Расчет- ное зна- чение	Эксперименталь- ное значение		
1	2	3	4	5	6	7
D, кг/м ³	1136	1021	1217	1217	10,2	0,0
WA, %, за 24ч	8,22	14,77	6,22	6,78	44,3	8,3
ТС, ВТ/(м·К)	0,187	0,168	0,195	0,192	10,0	1,5
C ₁ , МПа	158,2	111,9	136,5	147,9	29,3	7,7
C ₂ , МПа	64,6	43,2	66,1	66,9	33,1	1,2
1	2	3	4	5	6	7
B ₁ , МПа	0,83	0,92	0,83	0,84	9,8	1,2
B ₂ , МПа	7,23	8,2	5,9	6,5	11,8	9,2
S ₁₂ , МПа	31,9	25,4	49,0	49,2	20,4	0,4
S ₂₃ , МПа	29,5	20,7	26,9	27,8	29,8	3,2
I ₁ , кДж/м ²	319	315	283	253	1,3	10,6
I ₂ , кДж/м ²	1 701	1 551	1 483	1 338	8,8	9,8

Проанализировав полученные результаты, можно отнести ЛРДКМ к трансверсально изотропным конструкционным материалам; изготовленные ЛРДКМ № 20 и № 21 соответствуют заявленным характеристикам на 89,4 % и 55,7 % соответственно.

Список источников

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г. : Распоряжение Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 312-р // Гарант.ру : [сайт]. URL: <http://www.garant.ru> (дата обращения: 28.05.2023).
2. Пакен А. М. Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы / пер. с нем. П. М. Валецкого. Л. : Госхимиздат, Ленингр. отделение, 1962. 963 с.
3. Пен Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion. Красноярск : СибГТУ-Кларетианум, 2003. 246 с.