

УДК 621.763

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ЖЕСТКОСТЬ ПРИ СЖАТИИ

О. А. ЛАПКО, М. И. МИХАЙЛОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлены результаты экспериментального исследования на жесткость эпоксидполиэфирного материала с добавлением карбида кремния. Варьируется состав композиционного материала (содержание полиэфирной смолы, содержание карбида кремния, зернистость карбида кремния). Получены оптимальные составы композиционного материала на основе испытаний на сжатие.

Ключевые слова: композиционный материал, эпоксидная смола, карбид кремния, полиэфирная смола, оптимизация, жесткость при сжатии.

RESEARCH OF EFFECT OF COMPOSITION OF THE COMPOSITE MATERIAL ON COMPRESSION STIFFNESS

O. A. LAPKO, M. I. MIKHAILOV

*Educational institution "Sukhoi State Technical University
of Gomel", the Republic of Belarus*

The article presents the results of experimental research on rigidity of epoxy-polyether material with addition of silicon carbide. The composition of the composite material varies (polyester resin content, silicon carbide content, silicon carbide grain). Optimal compositions of composite material based on compression tests are obtained.

Keywords: composite material, epoxy resin, silicon carbide, polyester resin, optimization, compression stiffness.

Введение

Полимерные композиционные материалы находят широкое применение в элементах различных конструкций. Они представляют собой гетерогенные, гетерофазные системы, свойства которых зависят от свойств исходных компонентов и параметров образующейся структуры.

Среди полимеров достаточно широко применяются эпоксидные смолы. Для эпоксидных полимеров вследствие наличия в них реакционноспособных гидроксильных и эпоксидных групп возможна их модификация с получением материалов с высокими показателями физико-механических свойств, что обеспечивает их перспективность среди других органических высокомолекулярных веществ.

Для придания требуемых свойств эпоксидным композитам в их состав вводятся абразивные наполнители [1]–[3]. В то же время с целью повышения пластичности эпоксидных композитов, в их состав дополнительно вводится полиэфирная смола. В связи с этим требуется получение зависимостей, отражающих показатели физико-механических свойств композитов от количественного состава компонентов.

В этом аспекте большой интерес представляют возможности модификации полимерных эпоксидных композиций одновременно полиэфирной смолой и карбидом

кремния при различном количественном их соотношении, а также различной зернистости наполнителя [4].

Целью данного исследования является получение зависимости жесткости при сжатии от состава композиционного материала на основе эпоксидных смол.

Постановка задачи и методика исследования

Исследования жесткости композиционного материала проводились в серии экспериментов при прикладывании сжимающей нагрузки. Испытания проводились на оборудовании INSTRON 5969 с предельной нагрузкой 50 кН [4].

Исследования проводились с применением ортогональных планов второго порядка [5]. Связующим материалом выбиралась эпоксидная смола марки ЭД-20 с отвердителем ПЭПА, концентрация которого составляла 10 мас. ч. В качестве варьируемых параметров принимались: содержание полиэфирной смолы; содержание карбида кремния черного и его зернистость (табл. 1). В качестве критерия оптимизации использовалась жесткость образца при сжатии.

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Полиэфирная смола, мас. ч.	Зернистость, мкм	Карбид кремния черный, мас. ч.
Обозначение	x_1	x_2	x_3
+1,215	32,72	271,5	16
+1,00	31	250	15
0,00	23	150	10
-1,00	15	50	5
-1,215	13,28	28,5	4

Центральный ортогональный план второго порядка составляли по известной методике полного факторного эксперимента типа $k = 2^3$, шести опытах в «звездных точках» и трех опытах в центре плана. Величина «звездного плеча» составила 1,215. Согласно плану эксперимента было проведено 17 опытов.

Размеры образцов: диаметр 9 мм, высота 15 мм (рис. 1). Сжатие производилось до максимальной нагрузки по прочности образца.

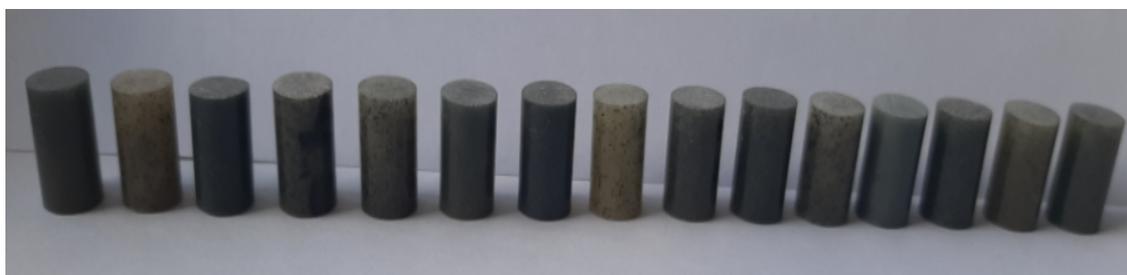


Рис. 1. Фотографии образцов

В качестве математической модели было выбрано уравнение второго порядка следующего вида [6]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2.$$

После определения численных значений коэффициентов уравнения регрессии выявлялись по критерию Стьюдента статистически незначимые коэффициенты, которые в математической модели приравнивались к нулю.

Доверительные интервалы $\Delta(a)$ для коэффициентов модели определялись по формуле

$$\Delta(a) = \pm t_{(P, m, N)} \frac{S_a^2}{\sqrt{mN}},$$

где $t_{(P, m, N)}$ – табличное значение критерия Стьюдента; N и m – соответственно общее количество экспериментов в центре плана.

Коэффициент математической модели считался статистически значимым, если соблюдалось соотношение $|a_i| > |\Delta a_i|$.

Результаты эксперимента

Во время испытаний на сжатие строились графики процесса нагружения $N = f(l)$ (рис. 2).

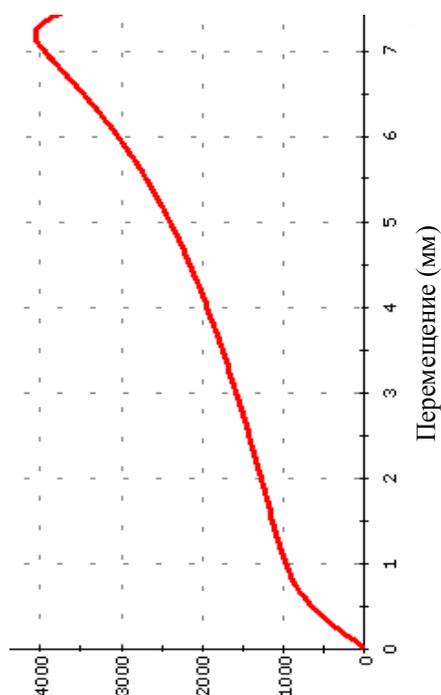


Рис. 2а. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (31 %, 250 мкм, 15 %)

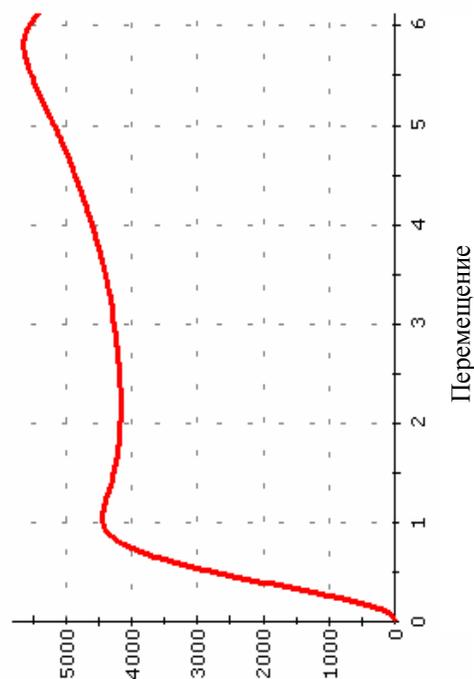


Рис. 2б. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (15 %, 250 мкм, 15 %)

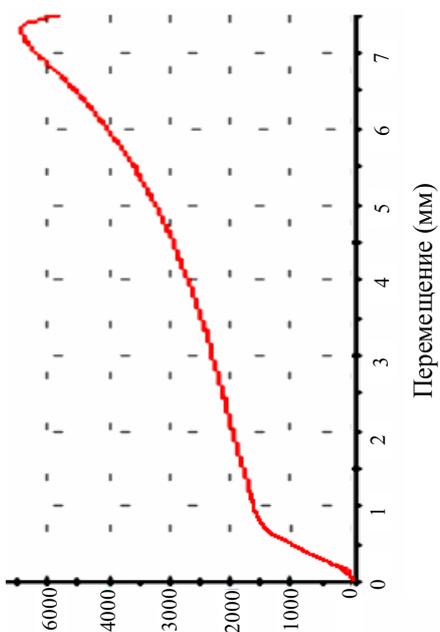


Рис. 2в. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (31 %, 50 мкм, 15 %)

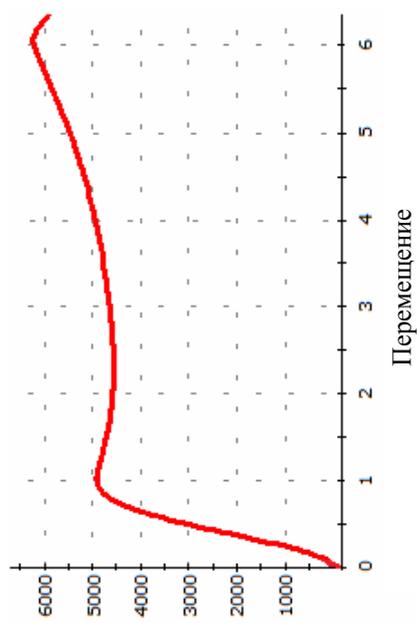


Рис. 2г. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (15 %, 50 мкм, 15 %)

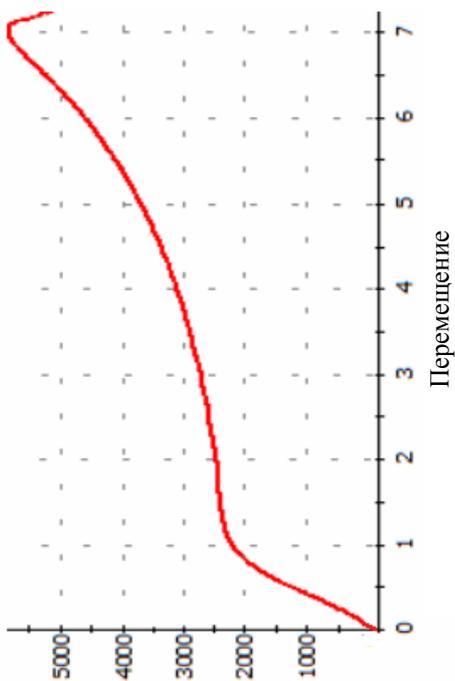


Рис. 2д. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (31 %, 250 мкм, 5 %)

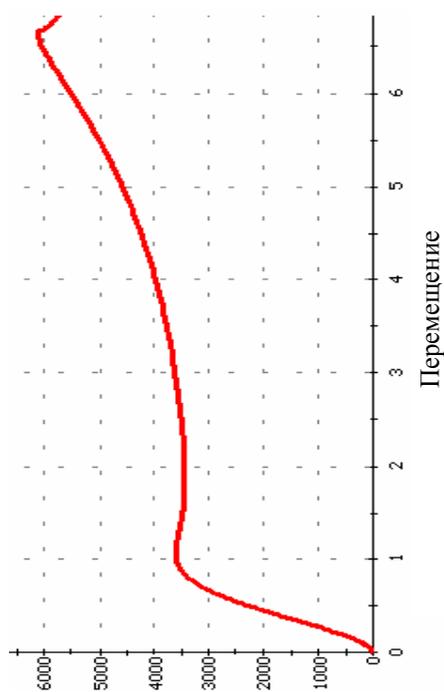


Рис. 2е. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (15 %, 250 мкм, 5 %)

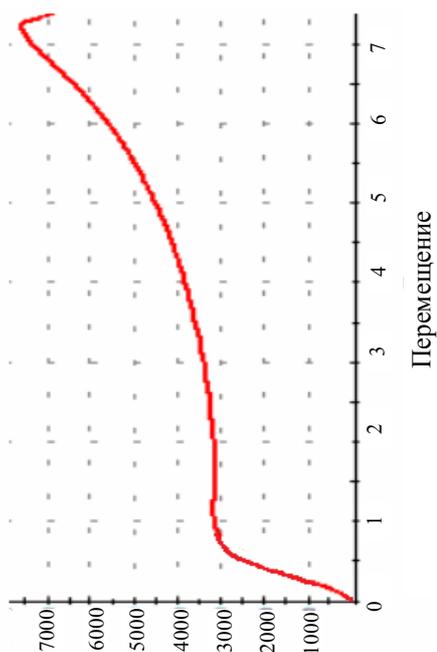


Рис. 2ж. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (31 %, 50 мкм, 5 %)

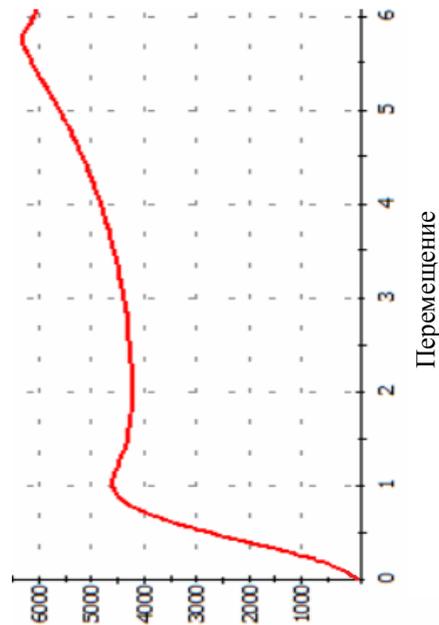


Рис. 2и. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (15 %, 50 мкм, 5 %)

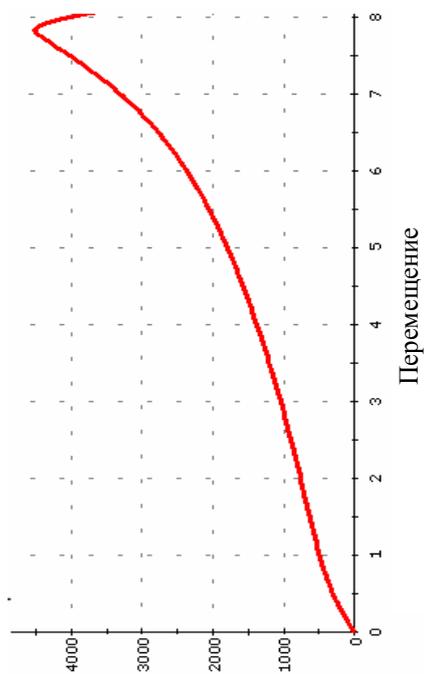


Рис. 2к. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (32,72 %, 150 мкм, 10 %)

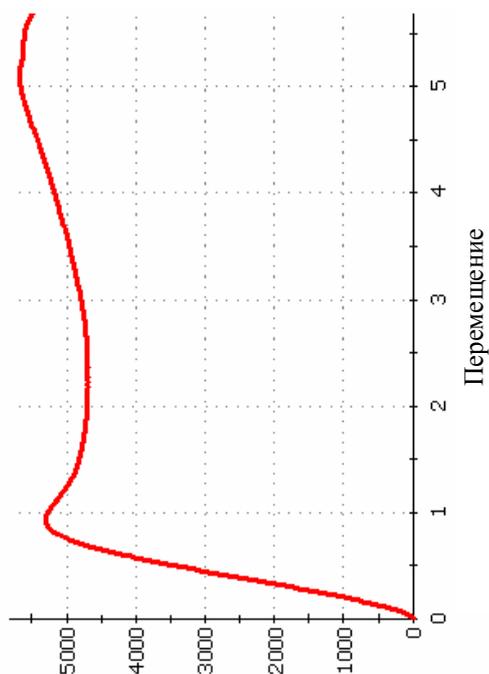


Рис. 2л. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (13,28 %, 150 мкм, 10 %)

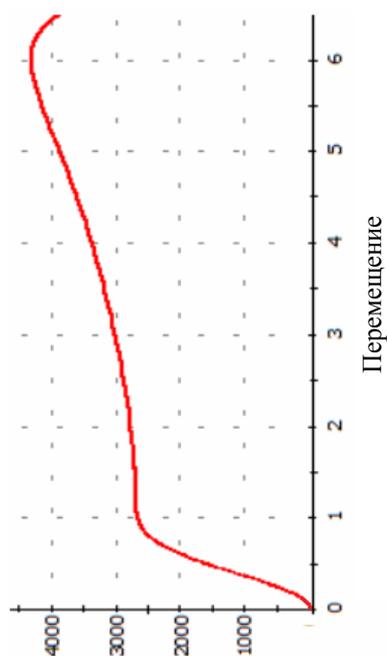


Рис. 2м. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (23 %, 271,5 мкм, 10 %)

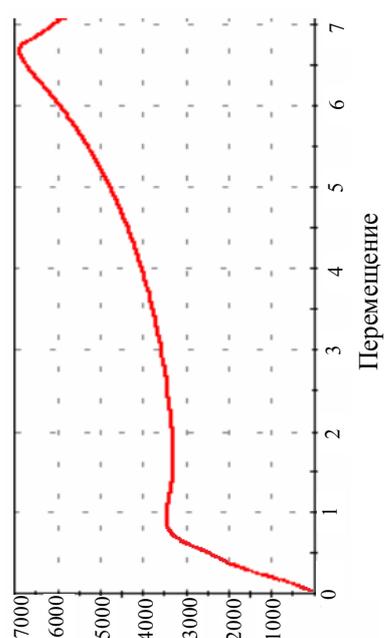


Рис. 2н. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (23 %, 28,5 мкм, 10 %)

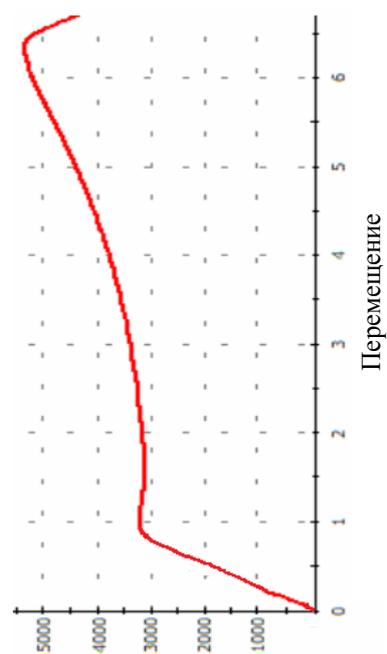


Рис. 2п. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (23 %, 150 мкм, 16 %)

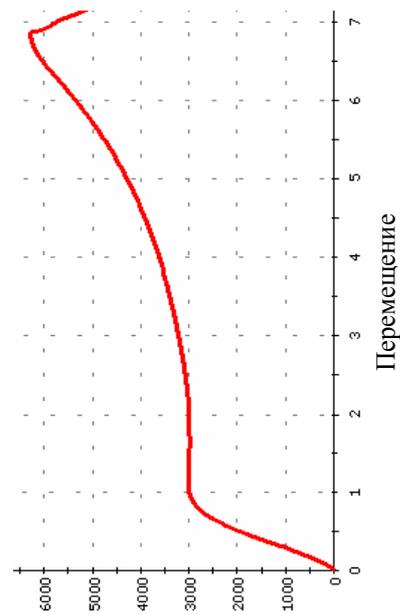


Рис. 2р. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (23 %, 150 мкм, 4 %)

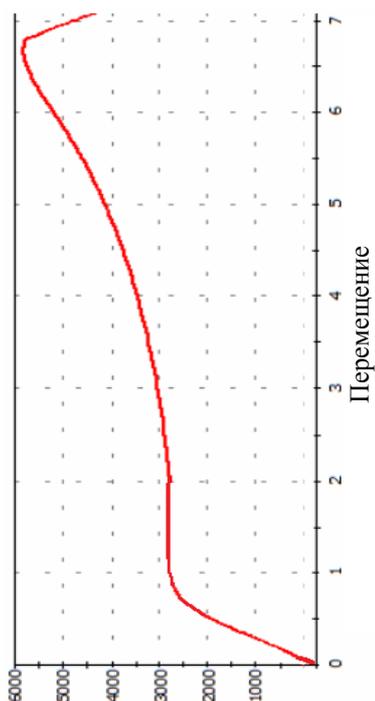


Рис. 2с. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (23 %, 150 мкм, 10 %)

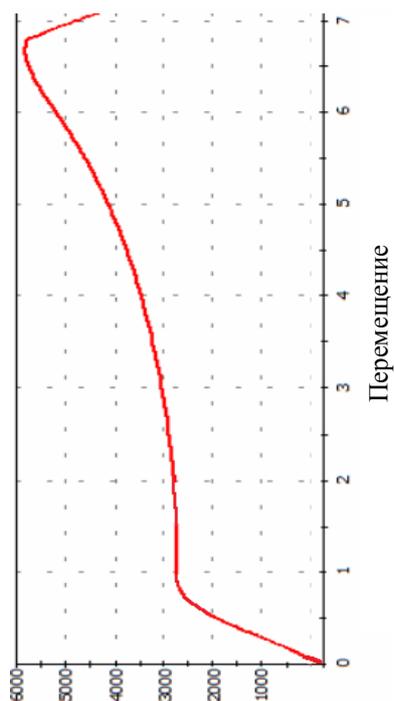


Рис. 2м. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (23 %, 150 мкм, 10 %)

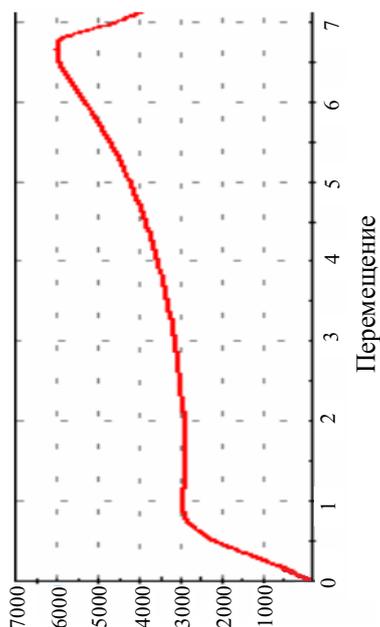


Рис. 2у. График зависимости перемещения образцов от нагрузки, содержащих полиэфирную смолу, зернистость, карбид кремния (23 %, 150 мкм, 10 %)

По данным результатов исследования составлялась таблица, в которую заносили значение жесткости образцов для каждого состава (табл. 2).

Таблица 2

Данные исследования образцов композиционного материала на сжатие

Номер опыта	Экспериментальное значение жесткости y_u	Расчетное значение жесткости \hat{y}_u	$(y_u - \hat{y}_u)^2$
1	1,2	1,1	0,01
2	5,19	5,1	0,0081
3	2,0	2,2	0,04
4	6,0	5,8	0,04
5	2,22	1,7	0,2704
6	4,62	5,3	0,4624
7	2,5	2,4	0,01
8	5,70	6,1	0,16
9	1,0	1,5	0,25
10	6,25	6,0	0,0625
11	3,33	3,3	0,0009
12	4,33	4,2	0,0169
13	3,7	3,6	0,01
14	3,85	3,9	0,0025
15	3,95	3,8	0,0225
16	3,75	3,8	0,0025
17	3,8	3,8	0

В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии в кодированном виде:

$$y = 3,715 - 1,823x_1 - 0,382x_2 - 0,076x_3 + 0,101x_1x_2 - 0,299x_1x_3 - 0,127x_1^2.$$

Проверку гипотезы об адекватности модели выполняют по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2},$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности; S_y^2 – дисперсия воспроизводимости.

Полученное расчетное значение критерия F сравнивали с табличным значением F_T , определяемым в зависимости от уровня значимости q и чисел степеней свободы k_1 и k_2 , с которыми определялись дисперсии $S_{ад}^2$ и S_y^2 . В данном случае при $k_1 = 15 - 3 - 1 = 11$, $k_2 = 3 - 1 = 2$ и 95%-м уровне значимости $F_T = 19,4$.

Значения выходного параметра дисперсии адекватности, вычисленные по уравнению регрессии, представлены в табл. 2.

Расчетные значения критерия Фишера составили $F = 12,07$, что позволяет заключить об адекватности уравнения регрессии в пределах исследуемой области.

После проведения статистической обработки результатов эксперимента, преобразовав модель из кодированного вида, получили:

$$k = 7,348 - 0,081x_1 - 0,007x_2 + 0,157x_3 + 0,00013x_1x_2 - 0,0075x_1x_3 - 0,002x_1^2.$$

На рис. 3 приведены поверхности откликов варьируемых факторов.

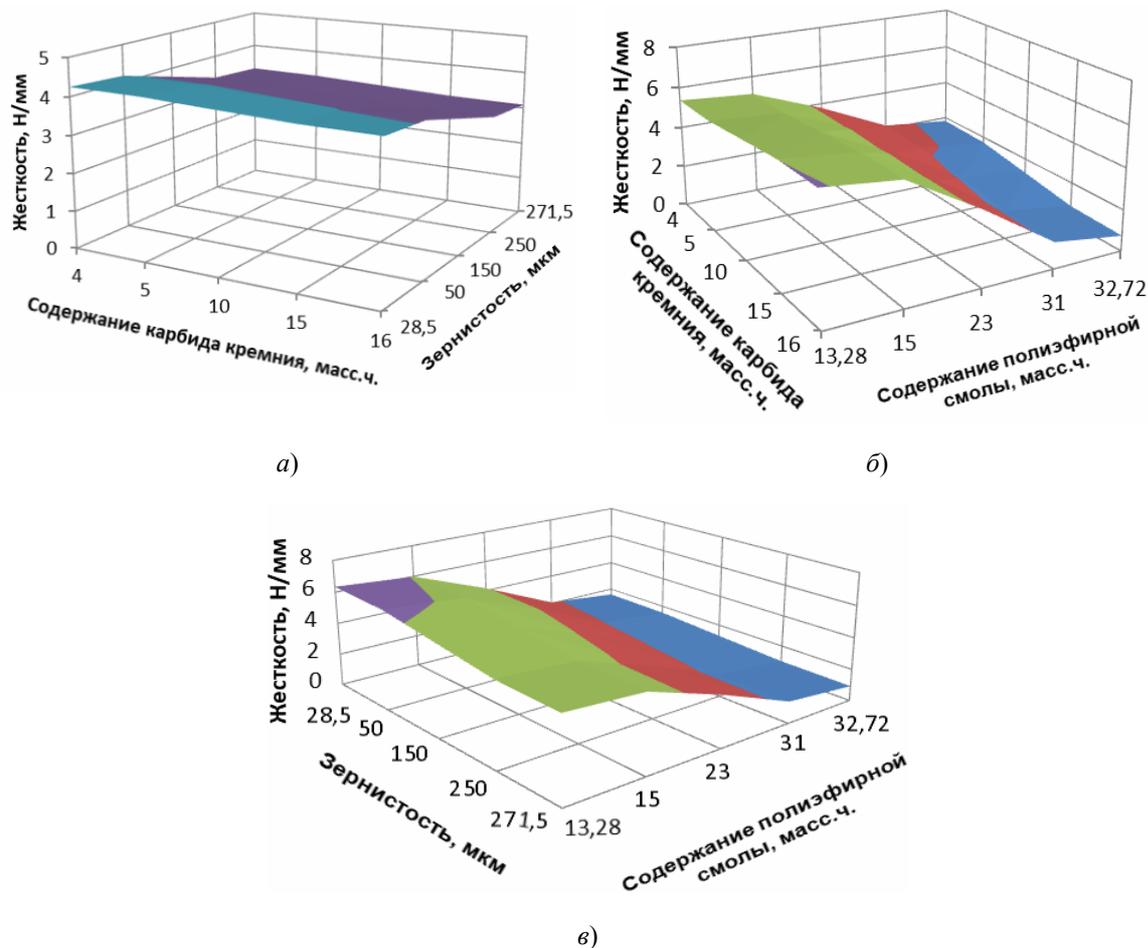


Рис. 3. Поверхности отклика жесткости образца в зависимости от следующих параметров:
a – зернистости карбида кремния и его содержания в мас. ч.; *б* – содержания полиэфирной смолы и карбида кремния в мас. ч.; *в* – содержания полиэфирной смолы в мас. ч. и зернистости карбида кремния

Полученные результаты позволяют заключить, что наибольшее влияние на коэффициент жесткости оказывает содержание полиэфирной смолы. Так, с увеличением ее содержания от 13,3 до 32,72 мас. ч. коэффициент жесткости уменьшался в 4,52 раза.

Заключение

Установлено влияние содержания полиэфирной смолы, карбида кремния черного и его зернистости на жесткость материала при сжатии.

Литература

1. Чернин, И. З. Эпоксидные полимеры и композиции / И. З. Чернин, Ф. М. Смехов, Ю. В. Хирдов. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.

2. Нильсон, Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсон. – М. : Химия, 1978. – 378 с.
3. Полимерная фрикционная композиция : пат. 7400 Респ. Беларусь : МПК7 C08J5/14 / Сысоев П. В., Шабакеева З. Я., Михайлов М. И. ; опубл. 30.09.2005.
4. Михайлов, М. И. Исследование свойств модифицированных эпоксидных композитов / М. И. Михайлов, О. А. Лапко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 28–34.
5. Тихомиров, В. Б. Математические методы планирования эксперимента при изучении нетканых материалов / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1968. – 155 с.
6. Михайлов, М. И. Основы научных исследований и инновационной деятельности : учеб. пособие / М. И. Михайлов ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 399 с.

Получено 26.05.2022