

УДК 620.171.34

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО МОДУЛЯ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ УГЛЕПЛАСТИКА**

***Костычева А.С.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

***Хаматдинова А.Д.***

*Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия*

**Аннотация:** В данной работе рассматривается зависимость модуля объемного сжатия от объемной доли волокна в композите. В качестве примера был взят образец из однонаправленного углеволокнистого композита, матрицей которого является эпоксидная смола. Исследование и расчет проводились в программном комплексе ANSYS Mechanical с использованием метода конечных элементов. Было получено значение для модуля объемного сжатия при заданных упругих характеристиках матрицы и волокна КМ. Оценка расчётов производилась с помощью сингулярных приближений по схеме вариационных границ Хашина-Штрикмана. Результаты, полученные в ходе работы, отражены на графике зависимости модуля объемного сжатия от объемной доли волокна.

**Ключевые слова:** композиционный материал, ячейка периодичности, гексагональная структура, эффективный модуль объемного сжатия, объемная доля волокна, углепластик, углеродное волокно, эпоксидная матрица.

***PREDICTION OF THE EFFECTIVE VOLUME COMPRESSION MODULUS  
OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTICS***

***Kostycheva A.S.***

*Student 4 year, Aerospace faculty,*

*Department of « Mechanics of composite materials and structures»,*

*Perm National Research Polytechnic University,*

*Perm, Russia*

***Hamatdinova A.D.***

*Student 4 year, Aerospace faculty,*

*Department of « Mechanics of composite materials and structures»,*

*Perm National Research Polytechnic University,*

*Perm, Russia*

**Annotation:** In this article, the dependence of the volume compression modulus on the volume fraction of fiber in the composite is considered. As an example, a sample of a unidirectional carbon fiber composite whose matrix is epoxy resin was taken. The study and calculation were carried out in the software package ANSYS Mechanical with the use of the method of finite elements. A value for the bulk compression modulus was obtained for the given elastic characteristics of the matrix and CM fiber. The calculations were evaluated using singular approximations according to the Hashin-Strickman variation bounds scheme. The results obtained in the course of the work are shown in the graph of dependence of the volume compression modulus on the fiber volume fraction.

**Keywords:** composite material, periodicity cell, hexagonal structure, effective bulk compression modulus, fiber volume fraction, carbon plastic, carbon fiber, epoxy matrix.

Композиционный материал (КМ) – искусственно созданный материал, состоящий из двух или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих, и связующей их матрицы), которые нерастворимы друг в друге и связаны друг с другом физико-химическими связями.

КМ обладают следующими признаками:

- свойства материала отличаются от свойств составляющих его компонентов;
- неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе;
- состав, форма и распределение компонентов задаются заранее;
- взаимодействие компонентов определяют свойства КМ [1].

Механические свойства КМ регулируются свойствами составляющих его элементов, а также прочностью связи между ними. Верно подобрав исходные компоненты и технологии их совмещения, получают требуемый эффективный и работоспособный материал с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов.

По способу образования высокой прочности и по структуре армирующие компоненты для КМ делятся на две группы: волокнистые и дисперсно-упрочненные. В данной работе используется КМ, армирующий углеродом.

Углеродное волокно – материал, состоящий из атомов углерода, представляющий собой тонкие нити. Так как микроскопические кристаллы, в которые объединены атомы углерода, выравниваются параллельно друг другу, волокно приобретает высокую прочность на растяжение.

УВ применяют для армирования композиционных, теплозащитных, хемостойких материалов в качестве наполнителей в различных видах углепластиков.

Эпоксидная смола – химическое соединение, которое является связующим для большого числа волокнистых композиционных материалов.

Эпоксидные смолы обладают следующими свойствами:

- легко и быстро затвердевают при любой температуре в диапазоне от 5°C до 150 °C в зависимости от отверждающего агента;
- минимальными внутренними нагрузками за счет малой усадки при затвердевании;
- высокой адгезионной прочностью;
- высокими механическими свойствами;
- высокой электроизоляцией;
- хорошей химической стойкостью.

Наилучшими считаются эпоксидные смолы, так как они обладают значительными механическими характеристиками, их применяют в производстве КМ в первую очередь [2].

Углепластики относятся к одним из наиболее перспективных полимерных композиционных материалов (ПКМ), что связано с высокими значениями их удельной прочности и жесткости. Создание новых изделий требует разработки новых углепластиков, обладающих повышенной прочностью и высокой надежностью. Решение этой задачи возможно при использовании современных экспериментальных методов и разработке теоретических подходов для оценки состояния поверхности волокон.

Интенсивное внедрение углепластиков в области промышленности, такие как авиа- и ракетостроение, судостроение и автомобилестроение, способствует активному изучению и улучшению их физико-механических характеристик.

Таким образом, определение эффективного модуля объемного сжатия углепластиков приобретает наибольшую актуальность [3].

### Постановка задачи

Данная работа направлена на определение эффективного модуля объемного сжатия однонаправленного композиционного материала с гексагональной структурой. В качестве матрицы взята эпоксидная смола, армирующим элементом выступает углеволокно. Расчеты проводились с использованием учебных материалов [4;7].

С помощью краевой задачи, которая состоит из замкнутой системы уравнений (1) находим поля напряжений  $\sigma(r)$  и деформаций  $\varepsilon(r)$ :

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j}(\vec{r}) &= 0, \\ \sigma_{ij}(\vec{r}) &= C_{ijmn}(\vec{r})\varepsilon_{mn}(\vec{r}), \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}[v_{i,j}(\vec{r}) + v_{j,i}(\vec{r})],\end{aligned}\quad (1)$$

граничные условия (2):

$$v_i(\vec{r})|_{\Gamma_\chi} = x_i(\vec{r}), \quad (2)$$

на части  $\Gamma_\chi$  границы  $\Gamma$  заданы перемещения (3), на части  $\Gamma_S$  границы  $\Gamma$  заданы производные перемещений (усилия):

$$\sigma_{ij}(\vec{r}) = n_j(\vec{r})|_{\Gamma_S} = S_i(\vec{r}). \quad (3)$$

Чтобы произвести анализ и вывести зависимость эффективного модуля сжатия композита от объемного содержания волокон используем программный продукт Microsoft Excel. Исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Матрица: эпоксидная смола	
$E_m$ , ГПа	$\nu_m$

3,2	0,37
Наполнитель: углеволокно	
$E_f$ , ГПа	$\nu_f$
250	0,3

Модуль сдвига:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} = 1,168 \text{ ГПа}$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} = 96,154 \text{ ГПа}$$

Модуль объемного сжатия:

$$K_m = \frac{E_m G_m}{3(3G_m - E_m)} = 4,103$$

$$K_f = \frac{E_f G_f}{3(3G_f - E_f)} = 208,334$$

По формуле обобщенного сингулярного приближения (4) найдем модуль объемного сжатия:

$$K^* = K_f \nu_f + K_m \nu_m - \frac{\nu_f \nu_m (K_f - K_m)^2}{K_m \nu_f + K_m \nu_m + S} \quad (4)$$

	S
Нижняя вариационная граница	$G_m$
Верхняя вариационная граница	$G_f$
Оценка Фойгта	$\infty$
Оценка Рейсса	0

По правилу смеси (5):

$$K = K_f \nu_f + K_m \nu_m \quad (5)$$

Результаты отображены в таблице 2 и представлены в виде графика (Рис. 1).

Таблица 2 – Изменение значения модуля объемного сжатия от объемного содержания матрицы и волокна

$v_m$	$v_f$	$K^*$				
		Правило смеси	Нижняя вариационная граница	Верхняя вариационная граница	Оценка Фойгта	Оценка Рейсса
1,0	0	4,1025641	4,1025641	4,1025641	4,102564	4,102564
0,9	0,1	24,525641	4,6718459	11,3106	24,52564	4,548452
0,8	0,2	44,9487179	5,3790007	19,635385	44,94872	5,103082
0,7	0,3	65,3717949	6,281016	29,358238	65,37179	5,811757
0,6	0,4	85,7948718	7,4713043	40,863632	85,79487	6,749005
0,5	0,5	106,217949	9,1143403	54,691244	106,2179	8,046671
0,4	0,6	126,641026	11,529106	71,623052	126,641	9,962144
0,3	0,7	147,064103	15,426203	92,83653	147,0641	13,07446
0,2	0,8	167,487179	22,775016	120,19085	167,4872	19,01502
0,1	0,9	187,910256	41,806569	156,80374	187,9103	34,84928
0	1,0	208,333333	208,33333	208,33333	208,3333	208,3333

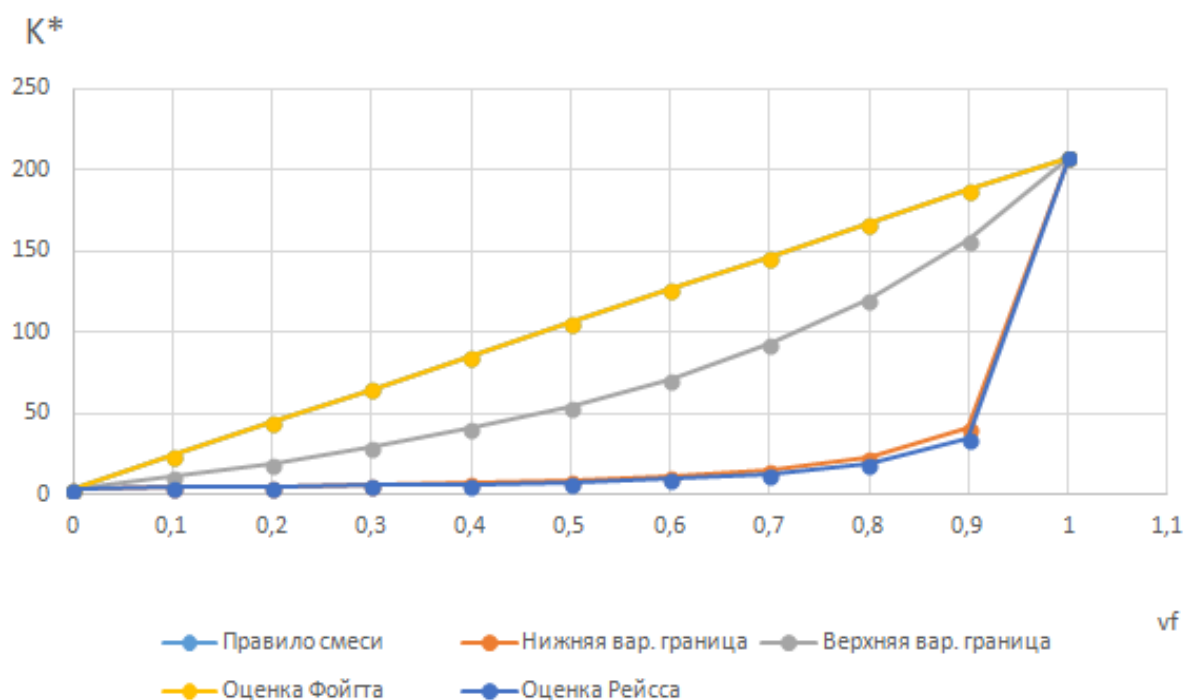


Рис. 1 – Зависимость модуля объемного сжатия от объемной доли волокна

Авторская разработка

### Практическая часть в ANSYS

Основной целью данной работы является определение эффективного модуля объемного сжатия. Решение было произведено на примере одной ячейки периодичности, имеющей гексагональную структуру (Рис. 2). С помощью ПО ANSYS Mechanical были найдены поля напряжений и деформаций в композите. Затем был произведен расчет эффективного модуля объемного сжатия.

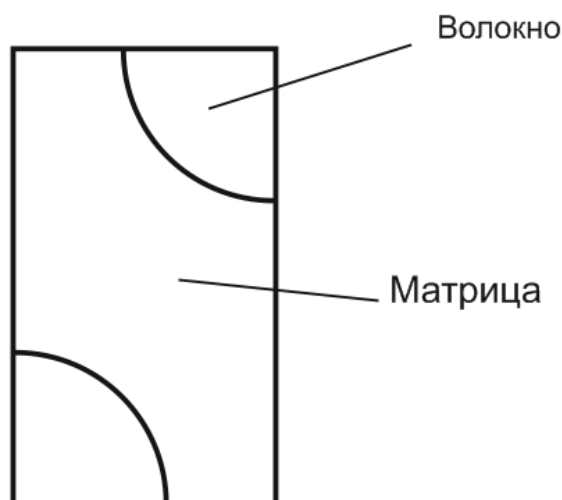


Рис. 2 – Ячейка периодичности

Авторская разработка

Задаем граничные условия для нижней горизонтальной грани и левой вертикальной (6) и используем метод конечных элементов. Ячейка периодичности принимает вид (Рис. 3):

$$U_x = U_y = 0 \quad (6)$$



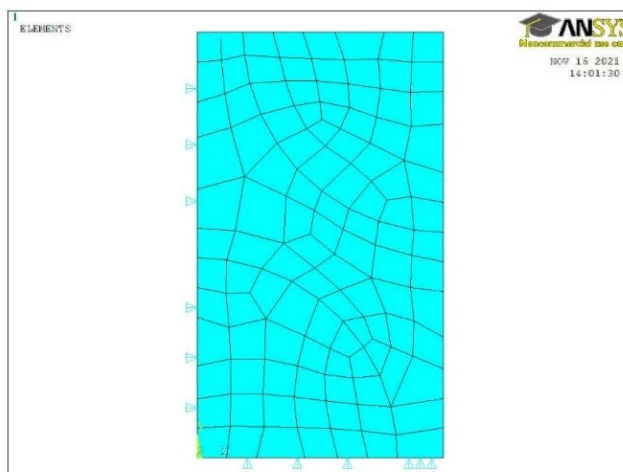


Рис. 3 – Разбивка гексагональной ячейки периодичности на конечные элементы

Авторская разработка

Задаем перемещения правой вертикальной грани и верхней горизонтальной (7):

$$U_x = U_y = 0,01, \quad (7)$$

Получим поля напряжений и деформаций на оси OX и OY (Рис.4 – Рис.7).

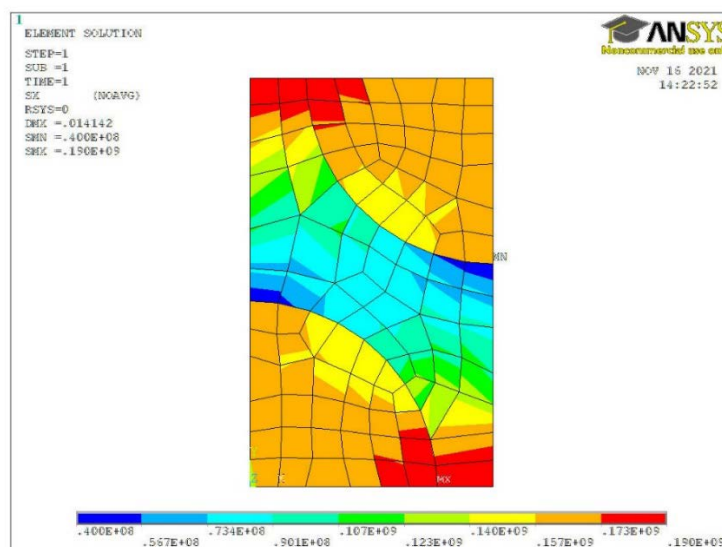


Рис. 4 – Напряжения в элементах по оси OX

Авторская разработка

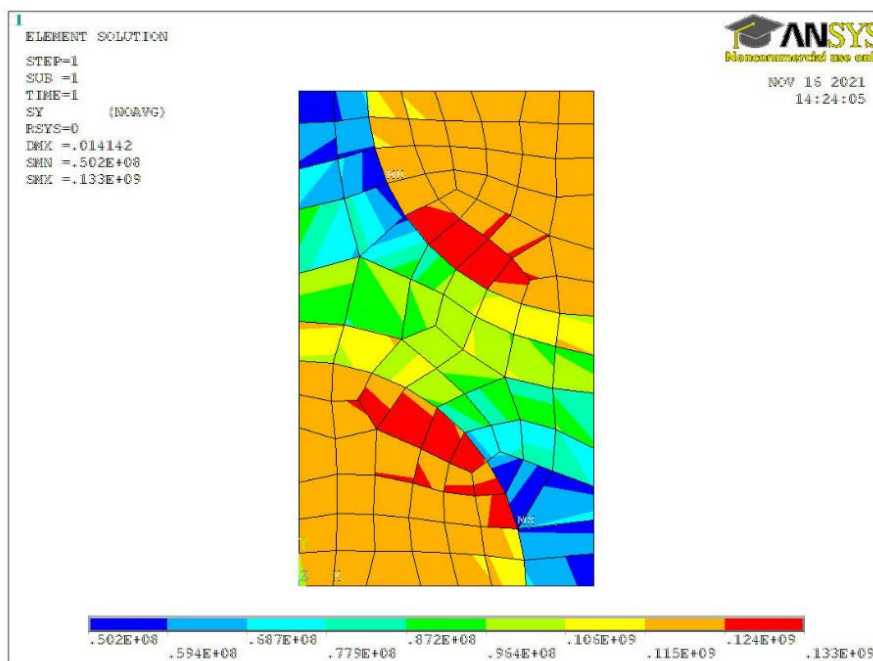


Рис. 5 – Напряжения в элементах по оси OY

Авторская разработка

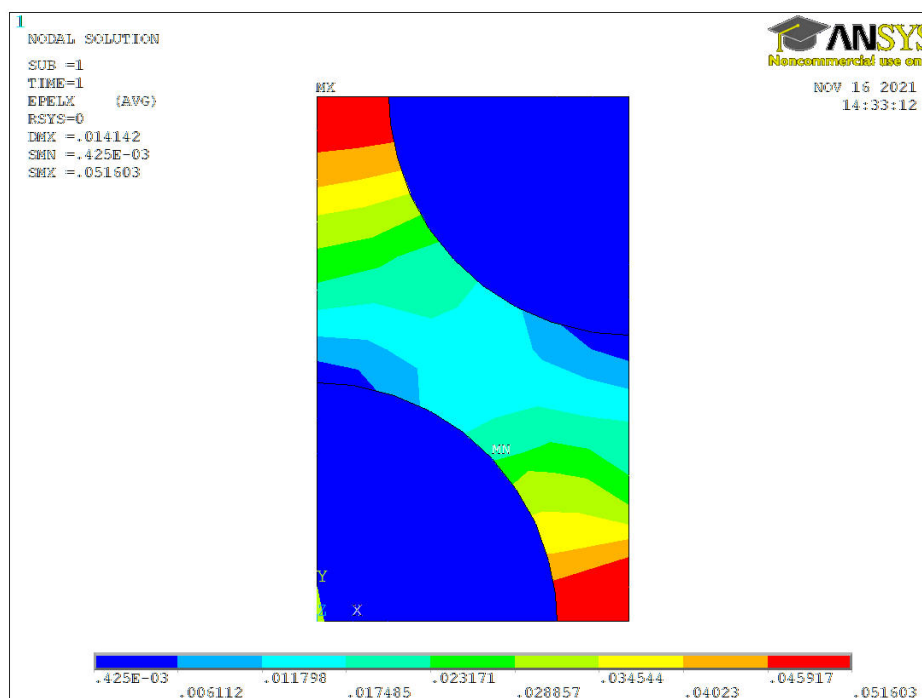


Рис. 6 – Деформации по оси OX в узлах

Авторская разработка

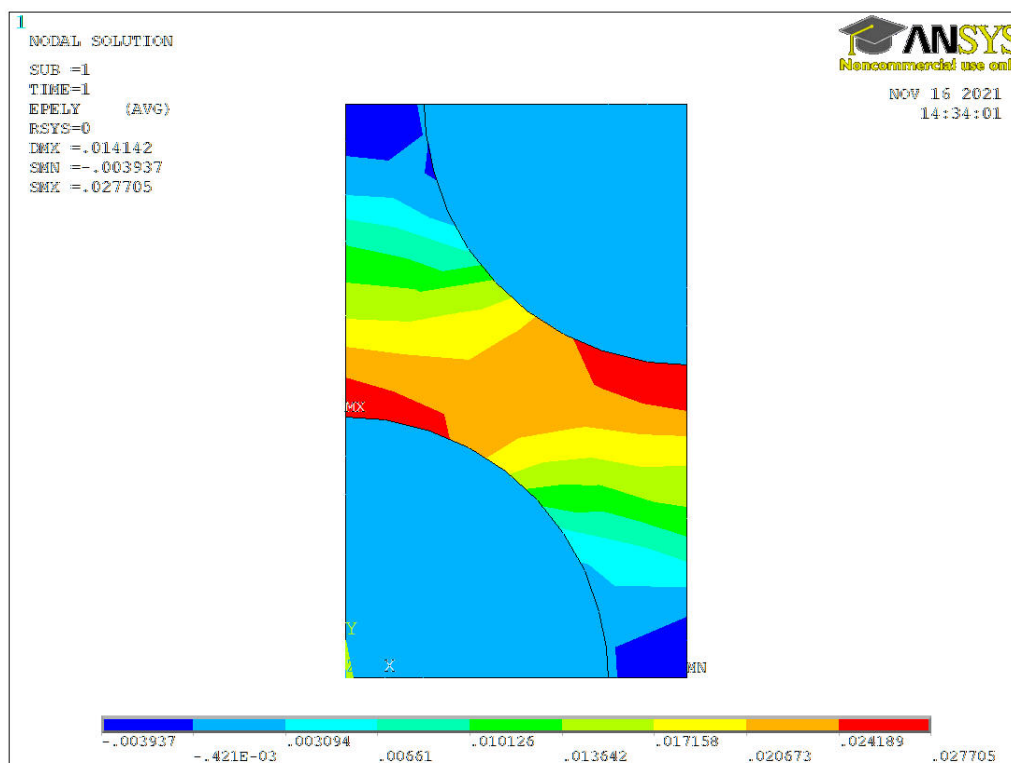


Рис. 7 – Деформации по оси ОУ в узлах

Авторская разработка

На основе полученных данных (Рис. 8):

TABLE LABEL	TOTAL
SX	0.152514E+11
SY	0.114747E+11
EPTOX	1.00639
EPTOY	0.571539
VOLU	1.73205
STRESS1	0.243549E+09
STRESS2	0.184224E+09
STRAIN1	0.173366E-01
STRAIN2	0.100023E-01

Рис. 8 – Данные для расчета эффективного модуля объемного сжатия  $K^*$

Авторская разработка

и используя формулу (8),

$$\sigma_{11}^* = \sigma_{22}^*, \quad \varepsilon_{11}^* = \varepsilon_{22}^*, \quad \varepsilon_{33}^* = 0,$$
$$\frac{1}{2}(\sigma_{11}^* + \sigma_{22}^*) = K^*(\varepsilon_{11}^* + \varepsilon_{22}^*), \quad (8)$$

$$K^* = \frac{\sigma_{11}^* + \sigma_{22}^*}{2 * (\varepsilon_{11}^* + \varepsilon_{22}^*)},$$

получим эффективный модуль объемного сжатия:

$$K^* = \frac{0,243549 \cdot 10^9 + 0,184224 \cdot 10^9}{2 * (0,173366 \cdot 10^{-1} + 0,100023 \cdot 10^{-1})} = 7,8235 \cdot 10^9 \text{ [8]}.$$

### Вывод

При решении задачи о нахождении эффективного модуля объемного сжатия ячейки периодичности анизотропного материала, имеющей гексагональную структуру, матрицей которой выступает эпоксидная смола, в качестве наполнителя – углеволокно, получили значения, которые не выходят за рамки допустимых пределов вариационных границ Хашина-Штрикмана. Эти значения были получены при использовании таких программ, как Microsoft Excel и ANSYS Mechanical. По полученным результатам были построены графики, с помощью которых была выявлена зависимость эффективного модуля объемного сжатия от объемной доли волокна. С увеличением объемной доли волокна модуль объемного сжатия также увеличивается, но зависимость между данными параметрами нелинейная. Работа была выполнена в рамках НИРС [9].

### Библиографический список

1. Влияние степени наполнения арматурой, предварительного циклического нагружения и температуры на механические характеристики волокнистых полимерных композиционных материалов: Учеб. Пособие/ А.В.

Бабушкин, А.В. Козлова, Д.С. Лобанов; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. Пермь, 2013. - 51 с.

2. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 1/Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта; Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.: ил. ISBN 5-217-00225-5

3. Композиционные материалы: Справочник/В. В. Васильев, К63 В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. Ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского.-М.: Машиностроение, 1990.-512.; ил.

4. О численном решении краевых задач механики деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел с граничными условиями третьего рода // Вильдеман В.Э., Зайцев А.В. Вычислительные технологии. 1996.Т. 1, № 2, С. 65-73.

5. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. – М.: Наука, 1984. – 17 с.

6. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов, Чекалкин А.А., Паньков А.А., Пермь, ПГТУ, 1999 – 150с.

7. Строительная механика, динамика и устойчивость композитных конструкций: учебное пособие/ Чекалкин А. А., Палкин Д. Д.; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. – 229.

8. САПР изделий из композиционных материалов. Моделирование процессов деформирования и разрушения в среде ANSYS: учеб.пособие / А.Г. Котов. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 351 с.

9. Методические указания по проведению научно-исследовательской работы для студентов бакалавриата по направлению «Материаловедение и технологии материалов» / Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А. - Пермь: ПНИПУ, 2017 - С. 40

*Оригинальность 90%*