

УДК 620.171.34

**ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Мохова А.В.

*студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,
Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Вершинина Е.А.

*студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,
Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация

В данной работе рассматривается углерод-углеродный композит и его эффективные упругие и прочностные характеристики. Для расчета реальных полей напряжений и деформаций в композите используется программный комплекс ANSYS Mechanical. В ходе работы определены значения модулей сдвига при разных объемных долях волокна тетрагональной укладки по модели Хашина-Штрикмана, области допустимых значений, построены графики зависимостей.

Заключением данной работы стало сравнение полученных и теоретических результатов.

Ключевые слова: композиционный материал, углерод-углеродный композит, углеродная матрица, углеродное волокно, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модель Хашина-Штрикмана.

***EFFECTIVE ELASTIC AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF
CARBON-CARBON COMPOSITES***

Mokhova A.V.

Student 4 year, Aerospace faculty,

Department of « Mechanics of composite materials and structures»,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Vershinina E.A.

Student 4 year, Aerospace faculty,

Department of « Mechanics of composite materials and structures»,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Annotation

This article examines a carbon-carbon composite and its effective elastic and strength characteristics. The ANSYS Mechanical software package is used to calculate real stress and strain fields in a composite. In the course of the work, the values of the shear moduli were determined at various volume fractions of tetragonal fiber according to the Hashin-Shtrikman model, a range of admissible values was constructed and graphs of dependences were plotted.

The completion of the work was a comparison of the obtained and theoretical results.

Keywords: composite, carbon-carbon composite, carbon matrix, carbon fiber, Poisson's ratio, Young's modulus, Hashin-Shtrikman model.

Композиционные материалы - это материалы, состоящие из 2х или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих и связующей их матрицы) и обладающие следующими признаками:

1. Не встречаются в природе, так как созданы человеком;
2. Состоят из 2х или более компонентов, различающихся по своему составу и разделенных выраженной границей (не должны растворяться или иными способами поглощать друг друга);
3. Имеет новые свойства, отличных от свойств составляющих их компонентов;
4. Неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе;
5. Состав, форма и распределение компонентов запроектированы заранее;
6. Свойства КМ определяются из взаимодействия компонентов[1].

Структурно КМ представляет собой непрерывную фазу-матрицу, в объеме которой распределены частицы наполнителя, имеющего четко выраженную границу раздела с матрицей.

КМ состоит из двух основных частей: матрицы (связующего) и наполнителя (армирующего компонента). Армирующий наполнитель в КМ несет силовую нагрузку. Матрица в КМ служит как для придания им упругих свойств, так и для распределения напряжений между волокнами [2].

Классифицируют КМ по следующим основным признакам:

1. по материалу матрицы;
2. по материалу армирующих элементов;
3. по методам получения.

В производстве КМ применяют следующие типы матриц:

1. углеродные: в зависимости от способа получения углеродная матрица, применяемая в УУКМ, может быть коксовой, пироуглеродной, комбинированной;
2. полимерные: при получении ПКМ полимеры используют либо в

чистом виде, либо в виде связующих. Полимерное связующее состоит из двух- или многокомпонентных систем, состоящих из синтетической смолы и отвердителей или инициаторов, катализаторов, ускорителей отверждения;

3. металлические: в технологии производства КМ металлические матрицы делят на матрицы на основе легкоплавких металлов и жаропрочные металлические матрицы [3].

Углерод-углеродный композиционный материал – материал, состоящий из углеродных волокон и углеродной матрицы. В основе процесса изготовления углерод-углеродных композитов находятся технологии создания армирующих каркасов и насыщения их матричным материалом. Многообразие возможных вариантов армирования углеродным наполнителем и использование различных способов образования углеродной матрицы позволяет создавать множество разновидностей УУКМ с широким спектром эксплуатационных свойств [4].

УУКМ имеют низкий удельный вес, высокую механическую прочность при повышенных температурах, высокую стойкость к термическим ударным нагрузкам, абляционную стойкость и рядом других ценных свойств. Преимущества этих композитов в сравнении с альтернативными высокотемпературными конструкционными материалами, такими как пироуглерод и пирографит, поликристаллические графиты, вольфрам, тантал, молибден и др., особенно важны при работе в условиях предельно высоких температур и скоростных газовых потоков [5].

Углерод-углеродные композиты применяются: в авиационной, автомобильной, химической, нефтедобывающей, энергетической промышленности, ж/д транспорте, ракетно-космической технике и медицине.

В основе процесса изготовления УУКМ находятся технологии создания армирующих каркасов и насыщения их матричным материалом.

Исходным компонентом для изготовления армирующего каркаса УУКМ являются углеродные волокна.

Затем из УВ изготавливается армирующий каркас различными методами:

1. полотняное переплетение, когда каждая нить основы и утка проходит поочередно сверху и снизу пересекающихся нитей;
2. сатиновое плетение – когда каждая нить проходит поочередно сверху, а затем снизу пересекающей ее нити;
3. саржевом плетении каждая нить основы и утка проходит поочередно сверху и снизу двух и четырех пересекающих ее нитей.

После изготовления армирующего каркаса проводится его насыщение матричным материалом. Углеродная матрица обеспечивает термостойкость УУКМ и позволяет наиболее полно реализовать в композите уникальные свойства УВ. Метод получения углеродной матрицы определяет ее структуру и свойства, а также характеристики УУКМ. При создании УУКМ их часто комбинируют для придания композиту необходимых свойств.

Постановка краевой задачи механики структурно неоднородных тел.

Для нахождения полей напряжений $\sigma(r)$ и деформаций $\varepsilon(r)$ требуется решить краевую задачу [6] состоящую из замкнутой системы уравнений:

$$\sigma_{ij,j}(\vec{r}) = 0$$

$$\sigma_{ij,j}(\vec{r}) = C_{ijmn}(\vec{r})\varepsilon_{mn}(\vec{r}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij}(\vec{r}) = \frac{1}{2} [u_{i,j}(\vec{r}) + u_{j,i}(\vec{r})]$$

и граничных условий:

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

если на части Γ_χ границы Γ заданы перемещения,

$$\sigma_{ij}(\vec{r}) = \eta_j(\vec{r}) |_{\Gamma_s} = S_i(r), \quad (3)$$

если на части Γ_S границы Γ заданы производные перемещений.

Аналитический метод расчета.

Для расчетов были приняты следующие характеристики, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механические характеристики компонентов расчетного КМ

Свойства	Коэффициент Пуассона ν	Модуль Юнга E , МПа
Углеродная матрица	0,34	70
Углеродное волокно	0,25	340

Вычисление модуля сдвига по формуле:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

Выполняется подстановка в формулу 4 соответствующих значений для матрицы и волокна, получим $G_m=26,1194$ МПа, $G_f=136$ МПа.

Произведем расчет модуля объемного сжатия по формуле 5:

$$K = \frac{E \cdot G}{3(3G-E)} \quad (5)$$

Выполним подстановку значений для матрицы и волокна из таблицы 1 в формулу 5, получим $K_m = 72,9167$ МПа, $K_f = 226,667$ МПа.

U_m, U_f - объемное содержание матрицы и волокна соответственно, варьируется от 0 до 1, с шагом 0,1.

Введем m^* - эффективный модуль сдвига в трансверсальной плоскости.

Модуль сдвига определяется по формуле 6, где устанавливаются пределы изменения данного материала, используя вилки Хашина-Штрихмана. По вилкам Хашина-Штрихмана определяем два модуля сдвига $m^*=G_{\perp}^*$ и G_{\parallel}^* .

Хашин-Штрихман в своей работе получил точные выражения, связывающие макроскопические модули композита с упругими свойствами и объемным содержанием элементов структуры.

$$G_m + \frac{\nu_f}{\frac{1}{G_f - G_m} + \frac{K_m + 2G_m}{2G_f(K_m + G_m)} \nu_m} \leq m^* \leq G_f + \frac{\nu_m}{\frac{1}{G_m - G_f} + \frac{K_f + 2G_f}{2G_m(K_f + G_f)} \nu_f} \quad (6)$$

Подставив в формулу 6 все значения, можно выполнить построение зависимости эффективного модуля сдвига от объемной доли волокна (рис. 2).

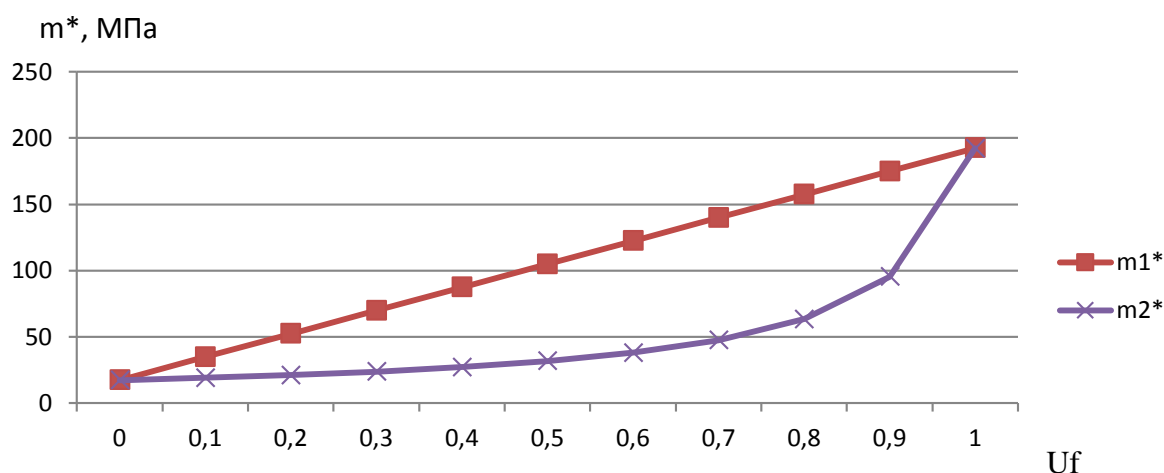


Рис. 1 - Зависимость эффективного модуля сдвига от объемной доли волокна

[Источник: Составлено автором]

Производится анализ однонаправленного углерод-углерода с тетрагональной укладкой цилиндрических волокон. Для расчета полей напряжений и деформаций в композите используется программный комплекс ANSYS Mechanical. Волокно и матрица прочно соединены на границе раздела. Граничные условия заданы в перемещениях.

Левая и правая грань закреплены неподвижными шарнирами, верхняя и нижняя грань перемещаются.

Ниже представлена элементная сетка фрагментов ячейки (рис. 2)

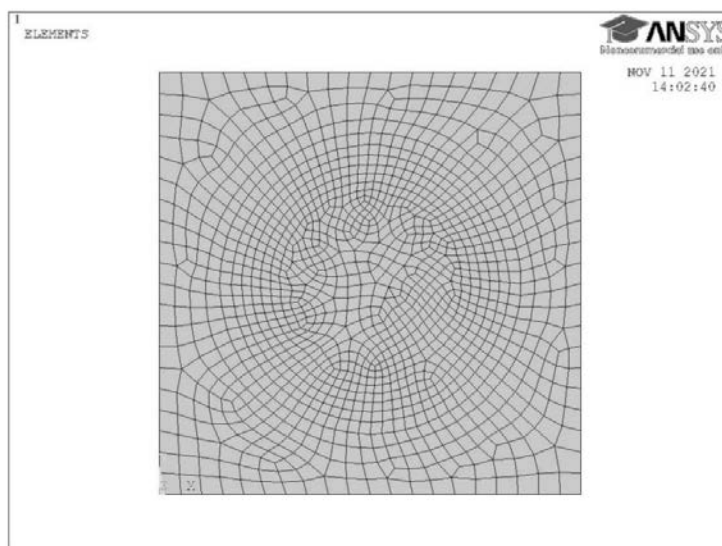


Рис. 2 – Сетка

[Источник: Составлено автором]

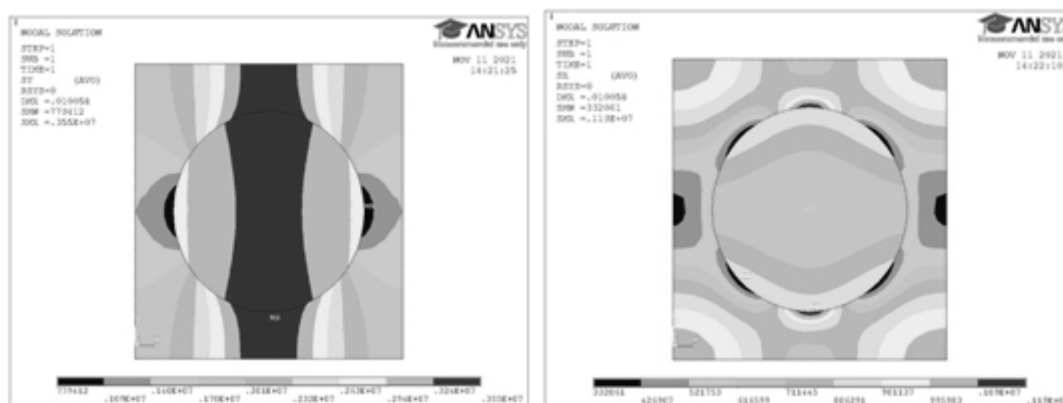


Рис. 3 – Напряжения по O_y и O_x

[Источник: Составлено автором]

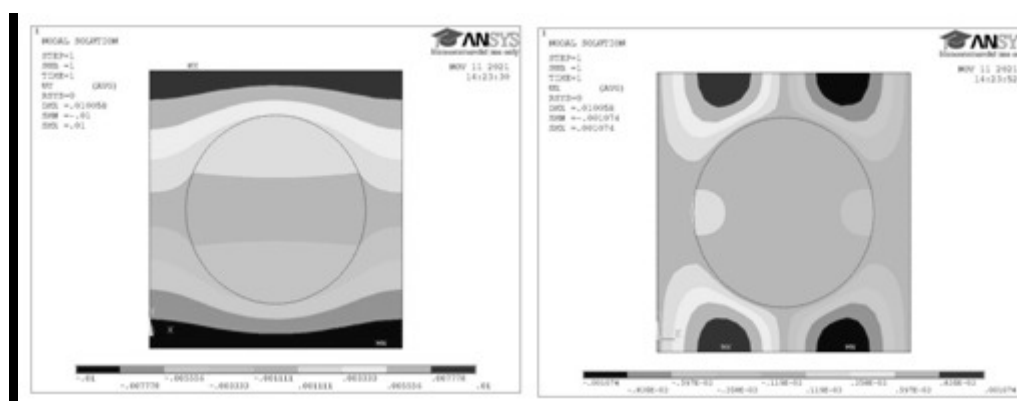


Рис. 4 – Деформации по O_y и O_x

[Источник: Составлено автором]

Получим аналитическим методом данные для расчета эффективного модуля сдвига, выраженного из формулы 6:

$$m^* = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_{11}^* - \sigma_{22}^*)}{\varepsilon_{11}^* - \varepsilon_{22}^*} \quad (7)$$

Полученные значения для модуля сдвига m^* от объемной доли U_f , представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Полученные модули сдвига при различных объемных долях для тетрагональной укладки

№	m^* , МПа	U_f
1	26	0
2	36	0.1
3	48	0.2
4	58	0.3
5	70	0.4
6	80	0.5
7	92	0.6
8	102	0.7
9	114	0.8
10	124	0.9
11	136	1

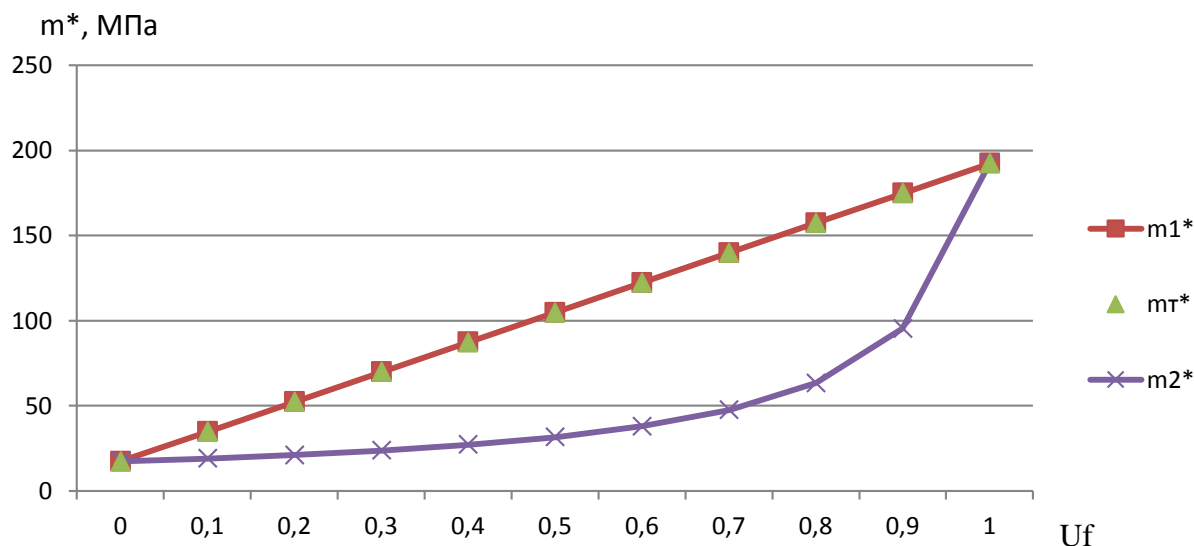


Рис. 5 - $m_{т}^*$ - полученные значения модулей сдвига при разных объемных долях волокна тетрагональной укладки; m_1^* , m_2^* - вилка Хашина-Штрикмана

В данной работе был рассмотрен углерод-углеродный композиционный материал с тетрагональной укладкой круглых волокон в матрице и его эффективные упругие и прочностные характеристики. Для расчета использован программный комплекс ANSYS Mechanical. В ходе работы были определены значения модулей сдвига при разных объемных долях волокна по модели Хашина-Штрикмана, области допустимых значений, построены графики зависимостей.

1. Полученный результат не выходит за пределы нижней и верхней границы вилки Хашина-Штрикмана, что говорит о правильности решения поставленной задачи.
2. На рис. 5 можно увидеть, что полученные значения модулей сдвига возрастают в зависимости от объемной доли армирующего компонента. При увеличении объемной доли волокна модуль сдвига стремится к значению модуля сдвига волокна.
3. Зависимость m^* от ν_f является существенно нелинейной. С ростом ν_f трансверсальность m^* возрастает.

Работа выполнена в рамках НИРС [7] с использованием лекций по механике конструкций из композиционных материалов [8].

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. Технология композиционных материалов: Учеб. Пособие/ А.М. Вотинков; Перм. гос. техн. уни-т. Пермь, 1998. 138с.
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. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов./Гуняев Г.М.-М.: Химия, 1981. -232сю, ил.

5. А.М. Потапов. Перспективы использования углерод-углеродных композиционных материалов на основе вискозных углеродных волокон для потребностей ракетно-космической техники// Вопросы атомной науки и техники, 2015. — № 5. — С. 152-156.

6. Соколкин Ю. В. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел / Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. - М.: Наука, 1984. – 116 с.

7. Макарова Е. Ю. Методические указания по проведению научно исследовательской работы для студентов бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» / Макарова Е. Ю., Соколкин Ю. В., Чекалкин А. А. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 40 с.

8. Чекалкин А.А., Паньков А.А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов/Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1999. - 150 с.

Оригинальность 78%