

УДК 539.32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Губин Н.А.

студент,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Россия, Пермь

Аннотация: Представлены результаты расчета и сравнения эффективных модулей объемного сжатия по мере изменения объемных долей волокна и матрицы в композиционном материале (далее КМ). Исследование было проведено для однонаправленных углепластиков, а именно волокнистого композиционного материала на основе связующего ЭДТ-10 и углепластиковых анизотропных волокон, при таком виде нагружения, как всестороннее сжатие. В результате была построена зависимость эффективного модуля сжатия композитного материала от объемного содержания волокон, также было выявлено, что при заданной доле волокна значение модуля сжатия КМ входит в допустимые пределы вариационных границ Хашина-Штрикмана.

Ключевые слова: эффективный модуль объемного сжатия, всестороннее сжатие, углепластик, связующее ЭДТ-10, эпоксидная матрица, анизотропные волокна, объемное содержание волокон, волокнистый композиционный материал.

DETERMINATION OF EFFECTIVE VOLUME COMPRESSION MODULES OF ONE-DIRECTIONAL CARBONS

Gubin N.A.

student,

Perm National Research Polytechnic University,

Russia, Perm

Abstract: The results of calculating and comparing the modulus of volumetric compression as the volume fractions of the fiber and matrix in the composite material (further CM) change are presented. The study was carried out for unidirectional carbon fiber plastics, a fibrous composite material based on the EDT-10 binder and anisotropic carbon fiber reinforced plastic fibers, under such a type of loading as a uniform pressure. As a result, the dependence of the effective modulus of compression of the composite material on the volume of the fiber fiber was constructed; it was also revealed that, for a given fraction of the fiber, the compression of the CM material is within the permissible limits of the Khashin-Shtrikman variation boundaries.

Key words: effective bulk modulus, all-round compression, carbon fiber reinforced plastic, EDT-10 binder, epoxy matrix, anisotropic fibers, fiber volumetric content, fibrous composite material.

КМ - материалы, состоящие из двух или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих, и связующей их матрицы) и обладающие определенными признаками [2].

Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать композиционные материалы с требуемыми значениями присущих им характеристик, например, прочности и модуля упругости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

Скорость повышения конкурентоспособности КМ по сравнению с другими материалами, имеющимися на рынке, обусловлена большим набором их свойств, которые в достаточной мере превосходят свойства классических материалов. К таким свойствам КМ относится их устойчивость к воздействиям внешней среды, в следствие чего их применение менее ограничено: они применяются там, где необходима устойчивость к высоким температурам, коррозии или большим нагрузкам.

Углепластики — это композитные материалы, наполнителем которых являются углеродные волокна. Данный класс полимерных композиционных материалов отличается тем, что имеет высокие значения прочности, низкую плотность, высокую усталостную прочность, низкую ползучесть. Также данные материалы считаются технологичными, так как изделия из них можно получить на стандартном технологическом оборудовании с минимальными трудовыми и энергетическими затратами.

Определение модулей всестороннего сжатия углепластиков приобретает актуальность, т.к. данные материалы используются в изготовлении деталей авиа- и ракетостроения, судостроения, автомобилестроения, которые работают в соответствующих условиях.

Постановка задачи.

Данная работа посвящена определению эффективных модулей объемного сжатия однонаправленных углепластиков. В качестве изотропной эпоксидной матрицы использовалась ЭДТ – 10. В качестве армирующего элемента использовались углепластиковые анизотропные волокна. Расчеты, проведенные в ходе исследований, были выполнены по методике, описанной в учебных материалах [3; 6].

Для нахождения полей напряжений $\sigma(r)$ и деформаций $\varepsilon(r)$ требуется решить краевую задачу состоящую из замкнутой системы уравнений (1):

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

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

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

и граничных условий (2):

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

если на части Γ_χ границы Γ заданы перемещения (3),

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

если на части Γ_S границы Γ заданы производные перемещений (усилия).

Расчет объемного модуля сжатия для ячейки периодичности.

Задача заключалась в расчёте объемного модуля сжатия. Программное обеспечение ANSYS Mechanical использовалось для нахождения полей напряжения и деформаций в композите. Задача была решена на одной ячейке периодичности, представляющей «круг в квадрате» (Рис. 1). Волокно и матрица прочно соединены между собой на границе раздела.

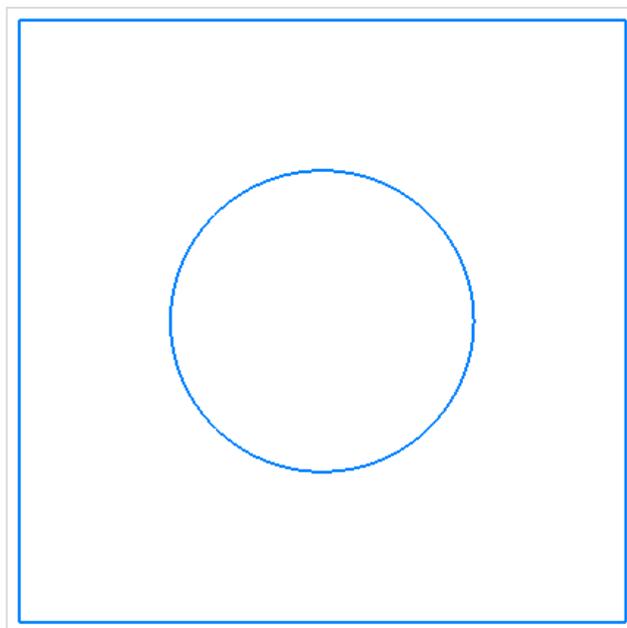


Рис. 1 – Ячейка периодичности: простой вид (авторская разработка)

Механические характеристики компонентов расчетного КМ были определены по лекционным материалам [6] и их значения составили:

Углеволокно:

Модуль Юнга $E = 2,4 \cdot 10^{11}$ Па, Коэффициент Пуассона $\nu_f = 0,27$

Эпоксидная матрица ЭДТ-10:

Модуль Юнга $E = 2,91 \cdot 10^9$ Па, Коэффициент Пуассона $\nu_f = 0,356$

Сторона ячейки $(a) = 6 \cdot 10^{-6}$

При расчетах объемная доля волокна составила $\nu_f \approx 0,6$.

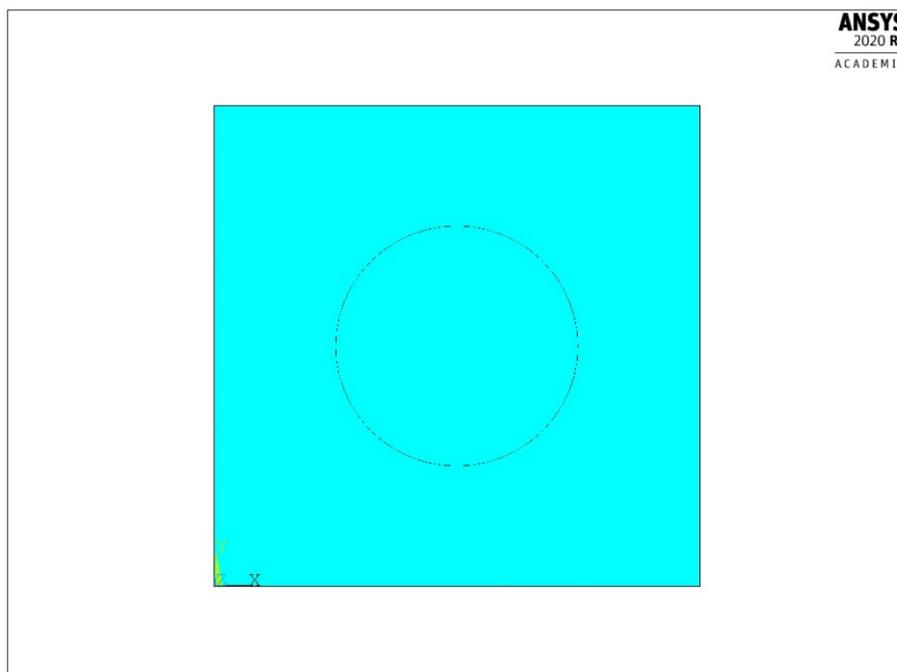


Рис. 2 – Ячейка периодичности в ANSYS (авторская разработка)

Далее ячейка разбивалась на конечные элементы и задавались граничные условия в перемещениях (рис. 3.).

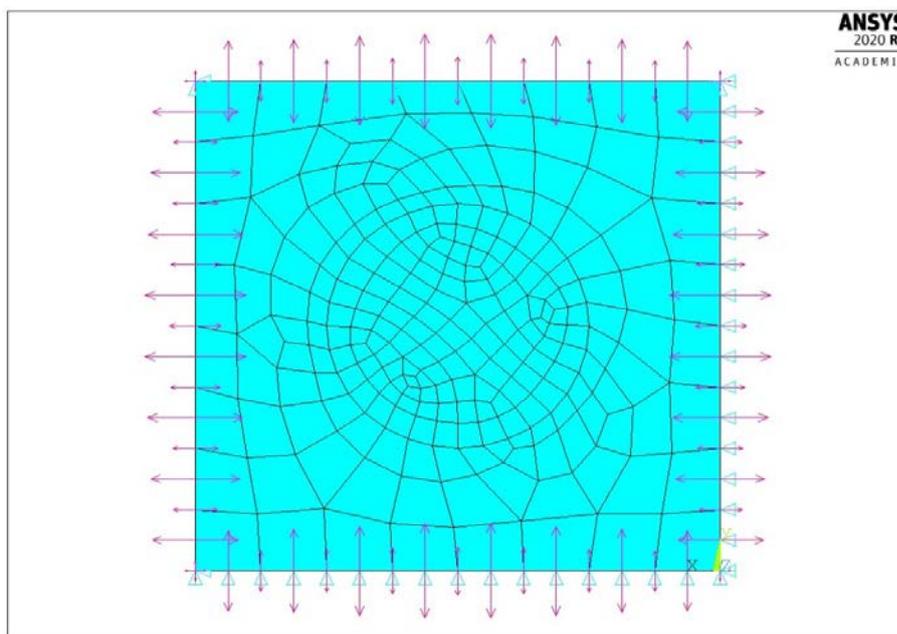


Рис. 3 – Сетка конечных элементов и граничные условия (авторская разработка)

После были получены значения напряжений и деформация для данной ячейки.

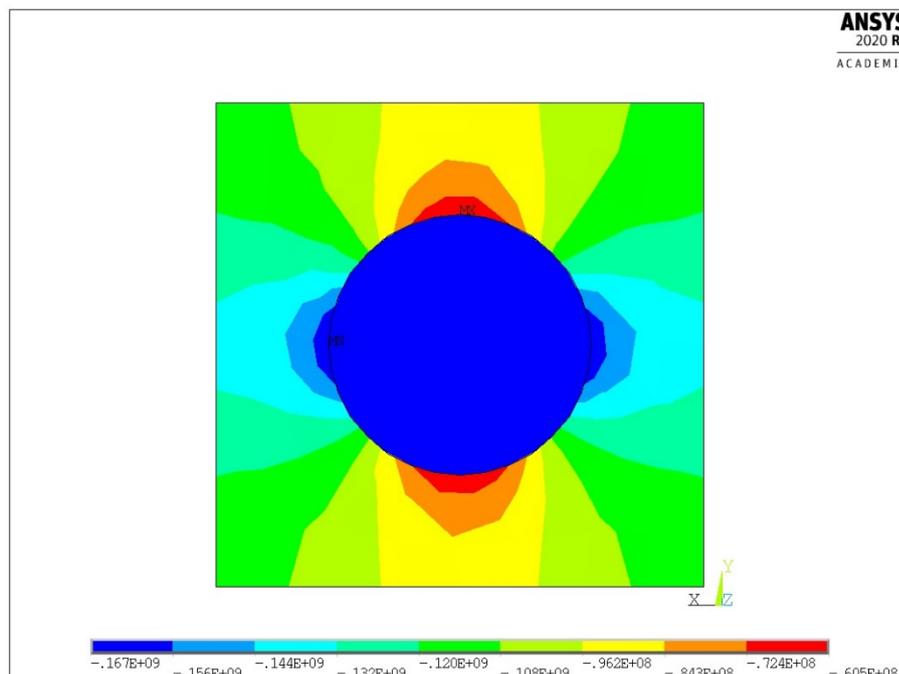


Рис. 4 – Графические результаты расчета (авторская разработка)

SUM ALL THE ACTIVE ENTRIES IN THE ELEM

TABLE LABEL	TOTAL
SX	0.315621E+11
SY	0.318005E+11
EPTOX	2.87410
EPTOY	2.98597
VOLU	0.360000E-10
SXPL	0.315621E+11
SYPL	0.318005E+11
EPXPL	2.87410
EPYPL	2.98597

Рис. 5 – Числовые результаты расчета (авторская разработка)

Полученные данные, используются для расчета эффективного модуля объемного сжатия, выражаемого из формулы (4):

$$\frac{1}{2}(\sigma_{11}^* + \sigma_{22}^*) = K^*(\varepsilon_{11}^* + \varepsilon_{22}^*) \quad (4)$$

$$K^* = 5,41 \cdot 10^9 \text{ Па.}$$

Зависимость эффективного модуля сжатия КМ от объемного содержания волокон.

Для того что бы построить зависимость эффективного модуля сжатия композита от объемного содержания волокон ниже приведена таблица физико-механических характеристик компонентов, которые будут использоваться для дальнейшего расчета с помощью программного продукта Microsoft Excel.

Также для расчета потребуется использование таких констант, как модуль объемного сжатия K и модуль сдвига G (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-механические характеристики компонентов

	Модуль Юнга E , Па	Коэффициент Пуассона ν	Модуль объемного сжатия K , ГПа	Модуль сдвига G , ГПа
Углеволокно	$2,4 \cdot 10^{11}$	0,27	72,46	39,37
Эпоксидная смола	$2,91 \cdot 10^9$	0,356	33,68	10,73

Определяем модуль объемного сжатия и модуль сдвига для матрицы и волокна по формулам:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

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

Объемное содержание волокна и матрицы изменяется от 0 до 1 (табл. 2), в соответствии с данной формулой:

$$v_f = 1 - v_m$$

Таблица 2 – Изменение объемного содержания волокна и матрицы в КМ

v_f	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
v_m	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0

Эффективный модуль сжатия определяется по формуле, которой устанавливаются пределы изменения данной характеристики КМ используя вилки Хашина-Штрикмана (5). Вилки Хашина-Штрикмана являются не улучшаемыми границами, которые можно получить, не рассматривая геометрии структурно неоднородной среды.

$$K_m + \frac{v_f}{\frac{1}{K_f - K_m} + \frac{v_m}{K_m + G_m}} \leq K^* \leq K_f + \frac{v_m}{\frac{1}{K_m - K_f} + \frac{v_f}{K_f + G_f}}, \quad (5)$$

где v_f, v_m – объемные доли волокна и матрицы.

Подставив в формулу (5) соответствующие значения и проведя расчеты, строим зависимость эффективного модуля объемного сжатия от объемной доли волокна (Рис. 6).

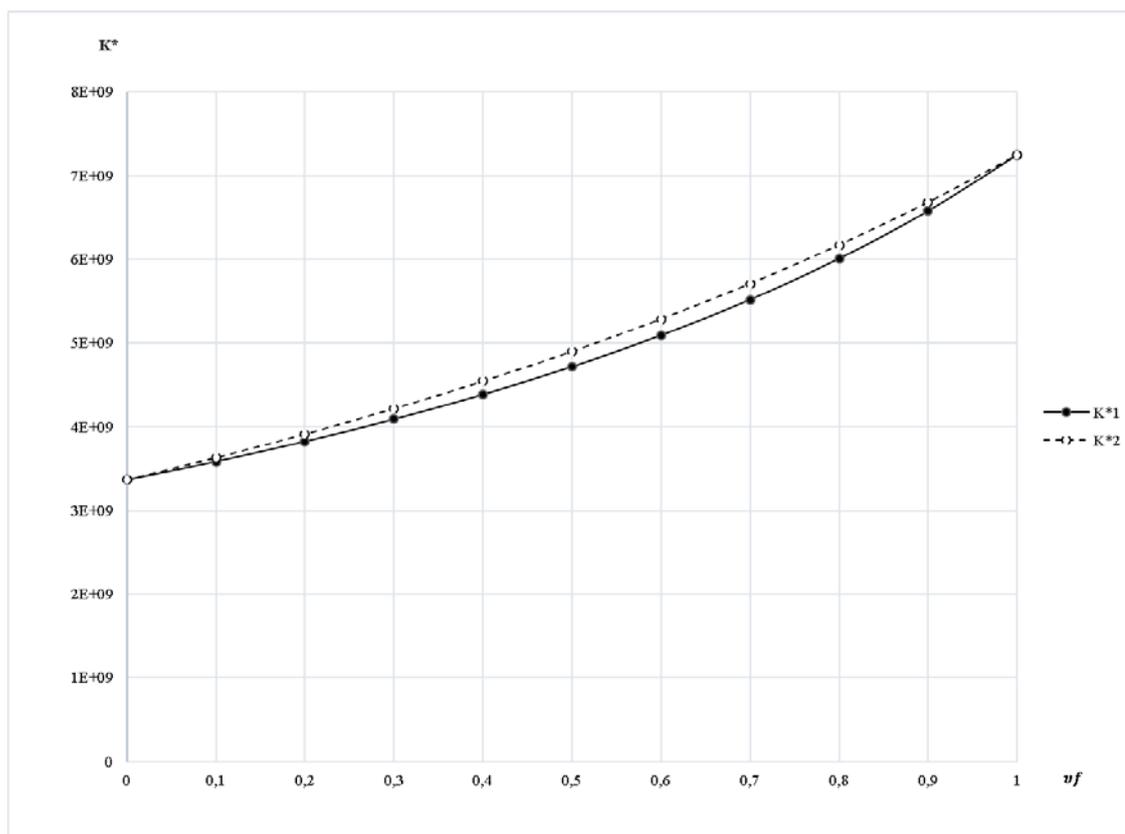


Рис. 6 – Зависимость модуля объемного сжатия от объемной доли волокна (авторская разработка)

Вывод.

Полученные результаты находятся в допустимых пределах вариационных границ Хашина-Штрикмана. В процессе расчета вариационных границ Хашина-Штрикмана использовались значения объемной доли, которые изменялись в пределах от 0 до 1, с шагом 0,1. Таким образом при решении поставленной задачи были корректно проведены расчёты эффективных модулей объемного сжатия для анизотропного композитного материала, состоящего из эпоксидной матрицы и углеволокна. В результате исследования было выяснено, что модуль объёмного сжатия при увеличении объёмной доли волокна в КМ, монотонно увеличивался, а зависимость, выявленная между ними нелинейна.

Работа выполнена в рамках НИРС [5].

Библиографический список

1. А.В. Рыбьякова, Ю.С. Мингалеева ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОНАПРАВЛЕННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА И УГЛЕПЛАСТИКА // MASTER`S JOURNAL. 2020. №1.
2. Бабушкин А.В. Функциональные и конструкционные углепластиковые и полимерные композиционные материалы/ А.В. Бабушкин// Материалы междисциплинарного курса МДК 11 - 2017. - С.4-5
3. Вильдеман В.Э., Зайцев А.В. О численном решении краевых задач механики деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел с граничными условиями третьего рода // Вычислительные технологии. 1996.Т. 1, № 2, С. 65–73.
4. 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 с; ил. ISBN 5-217-01113-0
5. Методические указания по проведению научно-исследовательской работы для студентов бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» / Е.Ю. Макарова, Ю.В. Соколкин, А.А. Чекалкин. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 40 с.
6. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. М.: Наука, 1984. – 17 с.
7. Чекалкин А.А., Паньков А.А., Лекции по механике конструкций из композиционных материалов, Пермь, ПГТУ, 1999 – 150с.

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

8. Яковлева В.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОНАПРАВЛЕННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА С ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ // Аллея Науки. 2018. №4(20).

Оригинальность 85%