

УДК 620.22-419.8:519.6-047.58

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДУЛЯ ОБЪЁМНОГО СЖАТИЯ УГЛЕПЛАСТИКА

Якимова И.А., Торощина А.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: yakimova.ira9@yandex.ru, lina.toroshina@yandex.ru

В данной статье представлены результаты расчёта углепластика с тетрагональной структурой армирования при помощи ANSYS Mechanical. Был определён эффективный модуль объёмного сжатия углепластика. Построены графики зависимости эффективного модуля объёмного сжатия от объёмной доли углеродного волокна. Проведена проверка полученных результатов с помощью вариационных границ Хашина-Штрикмана и границ Р. Хилла.

Ключевые слова: тетрагональная структура армирования, эффективный модуль объёмного сжатия, углепластик, объёмная доля, вариационные границы Хашина-Штрикмана, границы Р. Хилла.

NUMERICAL SIMULATION OF THE VOLUME COMPRESSION MODULE OF CARBON FIBER

Yakimova I.A., Toroshchina A.S.

This article presents the results of calculation of carbon fiber with tetragonal reinforcement structure using ANSYS Mechanical. An effective bulk compression modulus of carbon fiber has been determined. Graphs of the dependence of the effective volume compression module on the volume fraction of carbon fiber are plotted. Conducted verification of the results using variation of the boundaries of the Hanshin-Strikman and borders R. Hill.

Keywords: the tetragonal structure reinforcement, effective modulus of bulk compression, carbon fiber, volume fraction, variational boundary Hanshin-Strikman, border R. Hill.

Композиционные материалы (КМ) — материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или малорастворимые один в другом компоненты, разделенные поверхностями раздела. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, прочности связи по поверхности раздела и ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием технологических и эксплуатационных свойств [1].

Главное из преимуществ КМ по сравнению с традиционными материалами — это уникальное сочетание свойств. Как правило, эти материалы не являются «чемпионами» по отдельно

взятому свойству. Но по сочетанию определенных свойств им нет равных [2]. Это позволяет создавать уникальные материалы.

Наиболее перспективные КМ - углепластики, их наполнителем являются углеродные волокна (УВ), которые обладают комплексом свойств: высокая прочность и модуль упругости, стабильность размеров, стойкость к коррозии, низкая плотность. Наряду с высокими удельными характеристиками прочности и жесткости этот материал обладает существенной анизотропией механических свойств, склонностью трещинообразованию и накоплению дефектов [3].

Расчётным методом определяются механические характеристики композита. На начальном этапе применяют теоретические методы. Одним из способов удобного проведения расчётов является программный комплекс, но данные результаты могут быть недостоверными, поэтому для их проверки используются теоретические соотношения.

В данном исследовании был проведён расчёт однонаправленного волокнистого композиционного материала (ОВКМ) с тетрагональной структурой на сжатие с помощью ANSYS Mechanical. Был определён эффективный модуль объёмного сжатия. Проведена проверка полученных результатов с помощью вариационных границ Хашина-Штрикмана и границ Р. Хилла [4, 5].

Рассматривается постановка линейной краевой задачи для определения упругих свойств композитов, где деформации и напряжения определяются от действующих нагрузок, а закон Гука берётся для сплошной однородной среды:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}(r) &= 0, \\ \varepsilon_{ij}(r) &= \frac{1}{2}(u_{i,j}(r) + u_{j,i}(r)), \\ \sigma_{ij}(r) &= C_{ijkl}(r)\varepsilon_{kl}(r), \\ u_i(r)/\Gamma_u &= u_i^0, \end{aligned} \quad (1)$$

где C_{ijkl} — тензор модулей упругости, ε_{kl} — тензор малых деформаций, $u_i(r)$ — структурные перемещения [6, 7].

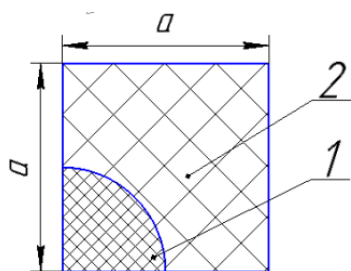


Рисунок 1 – Геометрия расчётной области,
где 1 — углеродное волокно, 2 — эпоксидная матрица

В качестве расчётной области (рис. 1) рассмотрим однонаправленный волокнистый композиционный материал с тетрагональной укладкой круглых стеклянных волокон в эпоксидной матрице (ЭДТ-10). Волокна и матрица являются упругими и изотропными. Характеристики материалов взяты из [8] и приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Механические характеристики материалов

Материалы	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Углеродное волокно	200	0,3
ЭДТ-10	2,91	0,356

Рассмотрим всестороннее сжатие. Граничные условия заданы в перемещениях $u_x = 0,01 * a$, $u_y = 0,01 * a$, где a — характерный размер длины ячейки периодичности, равный 1.

Строим геометрию, выбирая свойства материалов и задавая их характеристики. Далее разбиваем конструкцию на конечные элементы (рис. 2). Получаем поля напряжений (на рисунке 3 представлены поля напряжений σ_{xy} при объёмной доле волокна 0,5), которые являются неоднородными. Максимальные напряжения располагаются вблизи межфазной поверхности. Объёмную долю волокна изменяем от 0,1 до 0,9 с шагом 0,2.

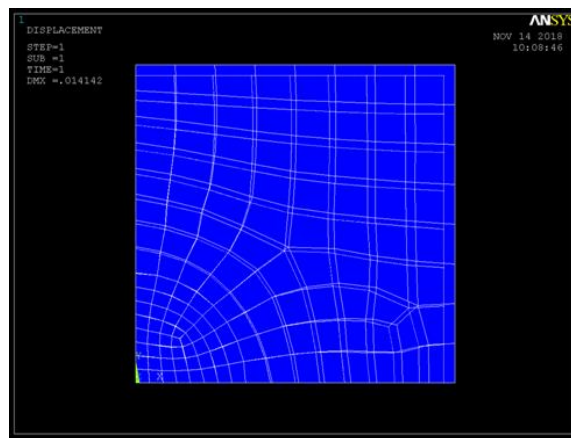


Рисунок 2 – Образец конструкции, разбитый на конечные элементы до и после деформирования

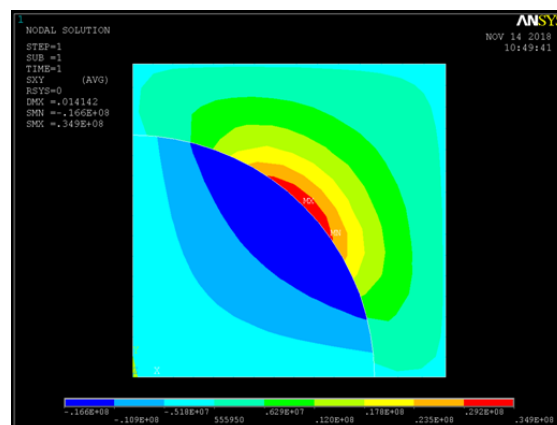


Рисунок 3 – Напряжения σ_{xy} , при объёмной доле волокна 0,5

В программном комплексе найдены расчётные значения напряжений и упругих деформаций. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Расчётные значения упругих деформаций и напряжений

Объёмная доля	σ_{11}^* (ГПа)	σ_{22}^* (ГПа)	ε_{11}^*	ε_{22}^*
0,1	7,59	7,57	0,915	0,905
0,3	8,11	8,10	0,817	0,811
0,5	24,2	2,44	1,878	1,999
0,7	53,0	5,39	1,695	1,960

Проводится расчёт эффективного модуля объёмного сжатия (K^*) по формуле [4]:

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

где $\varepsilon_{33}^* = 0$, так как решается плоская задача.

Значения ε_{11}^* , ε_{22}^* , σ_{11}^* , σ_{22}^* используем из таблицы 2.

Достоверность расчёта эффективного модуля объёмного сжатия проводится двумя проверочными формулами:

1) С учётом верхней и нижней вариационных границ Хашина – Штрикмана [4]:

$$K^* = K_f * v_f + K_m * v_m - \frac{v_f * v_m * (K_f - K_m)^2}{K_m * K_f + K_f * v_m + S}, \quad (3)$$

где K_f , K_m — модули объёмного сжатия волокна и матрицы; v_f , v_m — объёмные доли волокна и матрицы соответственно.

Вариационные границы Хашина-Штрикмана взяты из [4], где $s = G_f$, $s = G_m$ соответственно верхняя и нижняя границы. G_f , G_m — модули сдвига волокна и матрицы.

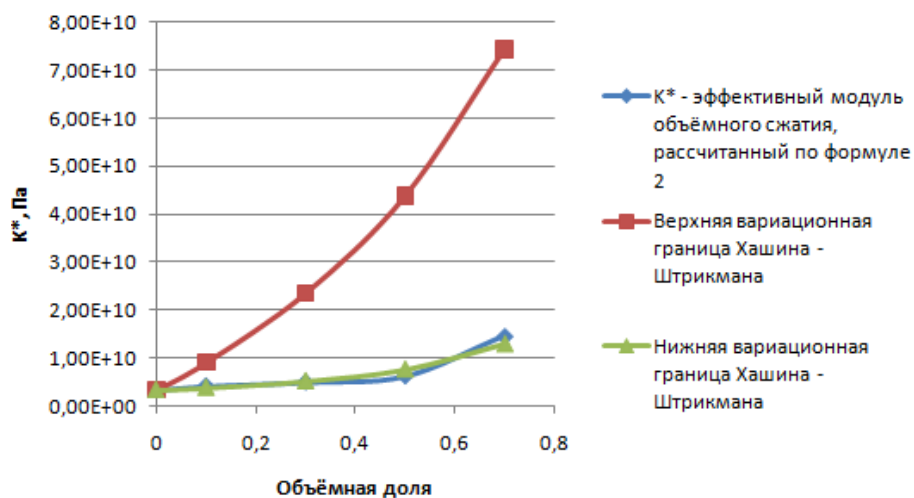


Рисунок 4 — Зависимость эффективного модуля объёмного сжатия от объёмной доли углеродного волокна

2) С учётом вилок Р. Хилла [4]:

$$\frac{v_f \cdot K_f \cdot (K_m + G_m) + v_m \cdot K_m \cdot (K_f + G_m)}{v_f \cdot (K_m + G_m) + v_m \cdot (K_f + G_f)} \leq K^* \leq \frac{v_f \cdot K_f \cdot (K_m + G_f) + v_m \cdot K_m \cdot (K_f + G_f)}{v_f \cdot (K_m + G_f) + v_m \cdot (K_f + G_f)}, \quad (4)$$

где G_f, G_m — модули сдвига волокна и матрицы, K_f, K_m — модули объёмного сжатия волокна и матрицы, v_f, v_m — объёмные доли волокна и матрицы соответственно.

Левая часть данного неравенства является нижней границей, а правая — верхняя, соответственно.

Для проверки точности расчёта были построены графики зависимости эффективного модуля объёмного сжатия от объёмной доли углеродного волокна (рис. 4, 5).

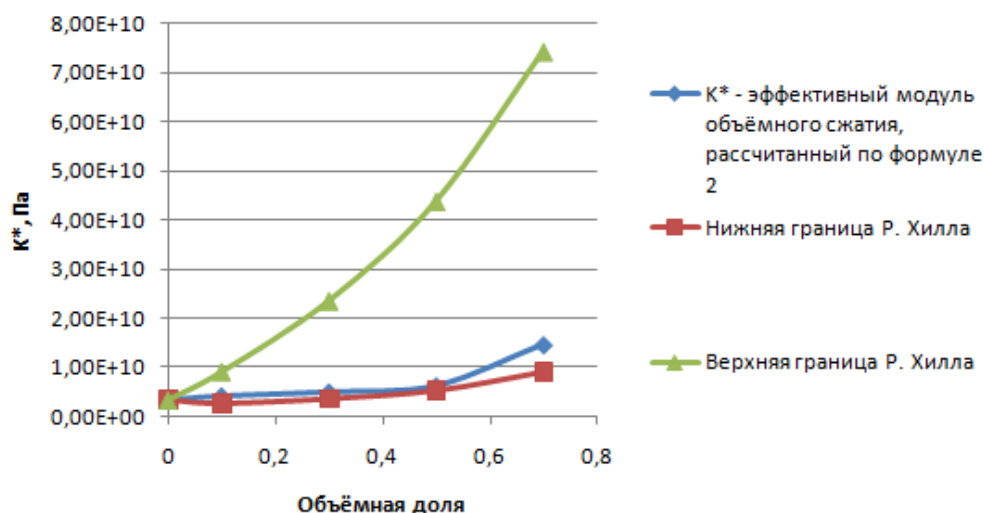


Рисунок 5 – Зависимость эффективного модуля объёмного сжатия от объёмной доли углеродного волокна

Выводы

При расчёте НДС заметно, что напряжения в материале распределены неравномерно и достигают максимальных значений вблизи межфазной поверхности. Результаты расчёта, полученные в программе ANSYS Mechanical, находятся в пределах вариационных границ Хашина-Штрикмана и границ Р.Хилла, что говорит о корректности расчёта. При объёмных долях меньше 0,5 эффективный модуль объёмного сжатия располагается параллельно нижней границе вилок. При значении больше 0,5 происходит резкое возрастание K^* . Он находится ближе к нижней границе и попадает в вилки.

Работа выполнена в рамках НИРС [9].

Список литературы

1. Сазонов М.А., Чернышова Т.А., Рохлин Л.Л. Композиционные материалы на магниевой основе, армированной частицами: изготовление и свойства // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 2. С. 3-22.

2. Перспективы развития производства авиационных деталей из композиционных материалов / А.В. Калгин, Ю.Е. Калинин, А.М. Кудрин, А.В. Малюченков, Ю.В. Панин, А.В. Ситников // Вестник воронежского государственного технического университета. 2011. № 11-2. С. 146-153.
 3. Думанский А.М., Русланцев А.Н., Таирова Л.П. Модель нелинейного деформирования углепластиков // Конструкции из композиционных материалов. 2013. № 4(132). С. 6-12.
 4. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. М.: Наука, 1984, - 16 с.
 5. Чекалкин А.А., Паньков А.А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов / Перм. гос. техн. ун-т, Пермь, 1999.-150 с.
 6. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А., Воинов А.М., Постных А.М., Чекалкин А.А. Технология и проектирование углерод - углеродных композитов и конструкций. М.: Наука, Физматлит, 1996 - 237 с.
 7. Динамика и устойчивость композитных конструкций: учебное пособие /А. А. Чекалкин, А. Г. Котов ; Пермский государственный технический университет .— Пермь : Изд-во ПГТУ, 2006 .— 65 с.
 8. Литвинов В. Б., Кобец Л.П., Тосканбаев М.С., Деев И.С., Бучнев Л.М. Структурно-механические свойства высокопрочных углеродных волокон //Композиты и наноструктуры. – №3. – 2011. – С. 39-50.
 9. 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 ПНИПУ, 2017. – 40 с.
-