

УДК 620.171.34

**ТРАНСВЕРСАЛЬНЫЕ МОДУЛИ СДВИГА ОДНОНАПРАВЛЕННОГО
ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА ПРИ ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ И
ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ УКЛАДКЕ С РАЗНЫМИ ОБЪЕМНЫМИ ДОЛЯМИ**

Гордеева А.А.

студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Кылосова К.Р.

студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Аннотация

В данной работе рассматривается однонаправленное борволокно с тетрагональной и гексагональной укладками цилиндрических волокон с разными объемными долями. Для расчета реальных полей напряжений и деформаций в композите используется программный комплекс ANSYS Mechanical. В ходе работы определены модули сдвига, их теоретические значения по модели Хашина-Штрикмана, области допустимых значений. Построены графики зависимости модуля сдвига от объемной доли наполнения для боропластика с тетрагональной и гексагональной структурами армирования.

Заключением данной работы стало сравнение полученных и теоретических результатов.

Ключевые слова: композиционный материал, боропластик, эпоксидная смола, тетрагональная структура армирования, гексагональная структура армирования, модуль сдвига, модель Хашина-Штрикмана

***TRANSVERAL SHIFT MODULES OF A SINGLE-DIRECTIONAL FIBROUS
COMPOSITE IN TETRAGONAL AND HEXAGONAL STRUCTURE WITH
DIFFERENT VOLUMES***

Gordeeva A.A.

student 4 year, Aerospace faculty,

Department of « Mechanics of composite materials and structures»,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Kylosova K.R.

student 4 year, Aerospace faculty,

Department of « Mechanics of composite materials and structures»,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Annotation

The present paper examines single-directional borofiber with tetragonal and hexagonal structure of cylindrical fibers with different volumes. The ANSYS Mechanical software system is used to calculate real stress and deformations in the composite. Were defined the shift modules, as well as their theoretical values by the Hashin-

Strikman model, and were obtained areas of acceptable values. Has been constructed a graphs of the dependence of the shift module from the volume of filling for boroplasty with tetragonal and hexagonal reinforcement structure. In the conclusion were compared the results to theoretical values.

Keywords: composite material, boroplasty, epoxy resin, tetragonal reinforcement structure, hexagonal reinforcement structure, shear module, Hashin-Strikman model.

Композитные материалы (КМ) несут в себе немалую актуальность во всех областях техники. Благодаря высоким удельным физико-механическим свойствам, КМ нашли широкое применение в ответственных высоконагруженных элементах конструкций, например: в ракетной технике – корпуса, обтекатели, сопла двигателей; в авиации – панели фюзеляжа; в военном производстве – защитные шлемы, жилеты; в автомобильной промышленности – шины, корпуса спортивных автомобилей; в судостроении – корпуса кораблей; в строительстве – панели, перекрытия зданий и сооружений [8].

Боропластик является одним из композиционных материалов, который содержит в качестве наполнителя борные волокна, внедрённые в термореактивную полимерную матрицу. Волокна могут быть как в виде мононитей и жгутов, которые оплетены вспомогательной стеклянной нитью или лентой, так и в переплетении борных нитей с другими нитями.

В связи с тем, что нити обладают высокой твёрдостью, получающийся материал обладает хорошими механическими свойствами и большой стойкостью к агрессивным условиям, но повышенная хрупкость материала затрудняет их обработку и накладывает ограничения на форму изделий из боропластиков. Этот материал, в частности, используется в авиационной и космической технике в деталях, подвергающихся длительным нагрузкам в условиях агрессивной среды, таких как большие температурные градиенты и химические реакции сгорания

топлива. Высокая стоимость борных волокон обусловлена особенностями технологии их получения.

В настоящее время ведутся исследования в области композиционных материалов, в особенности по определению их эффективных модулей [1, 6].

Полимерные композиционные материалы, а именно боропластики, изучаются для расширения применимости их в различных конструкциях. Плюсами применения боропластиков являются возможность уменьшения веса конструкции на 20—40%, увеличение ее жесткости и повышение эксплуатационной надежности изделия. Композиционные материалы, в основе которых лежат борволокна, имеют высокие показатели по прочности, жесткости и сопротивлению усталости. Сочетание именно данных свойств дает перспективу широкого использования боропластиков в авиационной и ракетно-космической технике [3,7].

Постановка краевой задачи механики структурно неоднородных тел

Для нахождения полей напряжений $\sigma(r)$ и деформаций $\varepsilon(r)$ требуется решить краевую задачу [4, с.20] состоящую из замкнутой системы уравнений:

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

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

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

и граничных условий:

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

если на части Γ_χ границы Γ заданы перемещения,

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

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

Аналитический метод расчета

Для расчетов были приняты следующие характеристики [5], которые приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Механические характеристики компонентов расчетного КМ

Свойства	Модуль Юнга E, Па	Коэффициент Пуассона ν
Эпоксидная смола ЭДГ-10	$3,9 \cdot 10^9$	$\nu_m = 0,32$
Бороволокно	$400 \cdot 10^9$	$\nu_f = 0,15$

Вычисление модуля сдвига по формуле [4]:

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

Выполняется подстановка в формулу (4) соответствующих значений для матрицы и волокна получим $G_m = 1,4$ ГПа, $G_f = 173$ ГПа.

Вычисление модуля объемного сжатия для волокна и матрицы по формуле [4]:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (5)$$

После подстановки в формулу (5) соответствующих значений для матрицы и волокна получаются следующие значения: $K_m = 3,6$ ГПа, $K_f = 190$ ГПа.

Введение обозначения G^* – эффективного модуля сдвига в трансверсальной плоскости. Модуль сдвига определяется по формуле, где устанавливаются пределы изменения данного материала, используя вилки Хашина-Штрикмана (6). Вилки Хашина-Штрикмана являются не улучшаемыми границами, которые можно получить, не рассматривая геометрии структурно неоднородного материала [4, с.15].

$$G_m + \frac{v_f}{\frac{1}{G_f - G_m} + \frac{K_m + 2G_m}{2G_f(K_m + G_m)} v_m} \leq G^* \leq G_f + \frac{v_m}{\frac{1}{G_m - G_f} + \frac{K_f + 2G_f}{2G_m(K_f + G_f)} v_f}, \quad (6)$$

где v_f, v_m – объемные доли волокна и матрицы соответственно.

Подставив в формулу (6) все значения, можно выполнить построение зависимости эффективного модуля сдвига от объемной доли волокна (рис. 1).

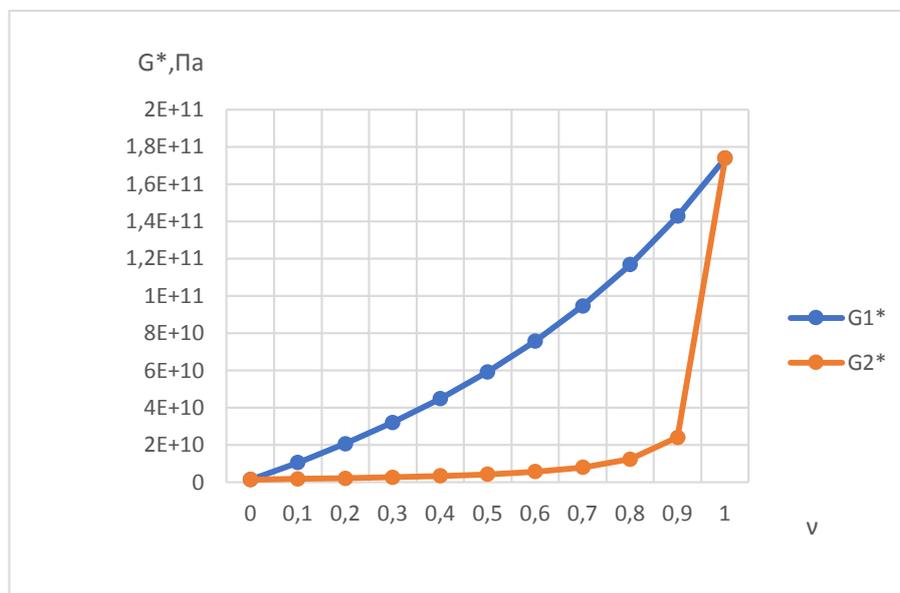


Рис.1. Зависимость эффективного модуля сдвига от объемной доли волокна

[Источник: Составлено автором]

Постановка задачи

Производится анализ однонаправленного боропластика с тетрагональной и гексагональной 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 нижняя грань закреплены неподвижными шарнирами, правая и верхняя грань перемещаются.

На рисунках представлены ячейки периодичности и конечно элементные сетки фрагментов ячейки (рис.2, рис. 3).

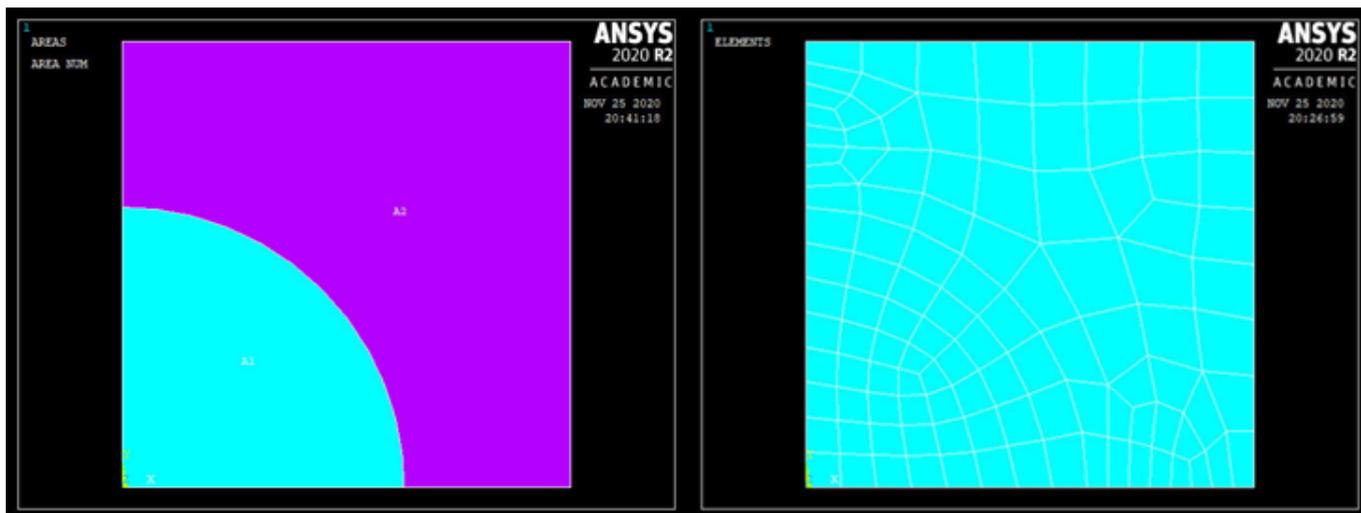


Рис. 2. Образец, с тетрагональной укладкой: A_1 – изотропные волокна боропластика; A_2 – изотропная эпоксидная матрица.

[Источник: Составлено автором]

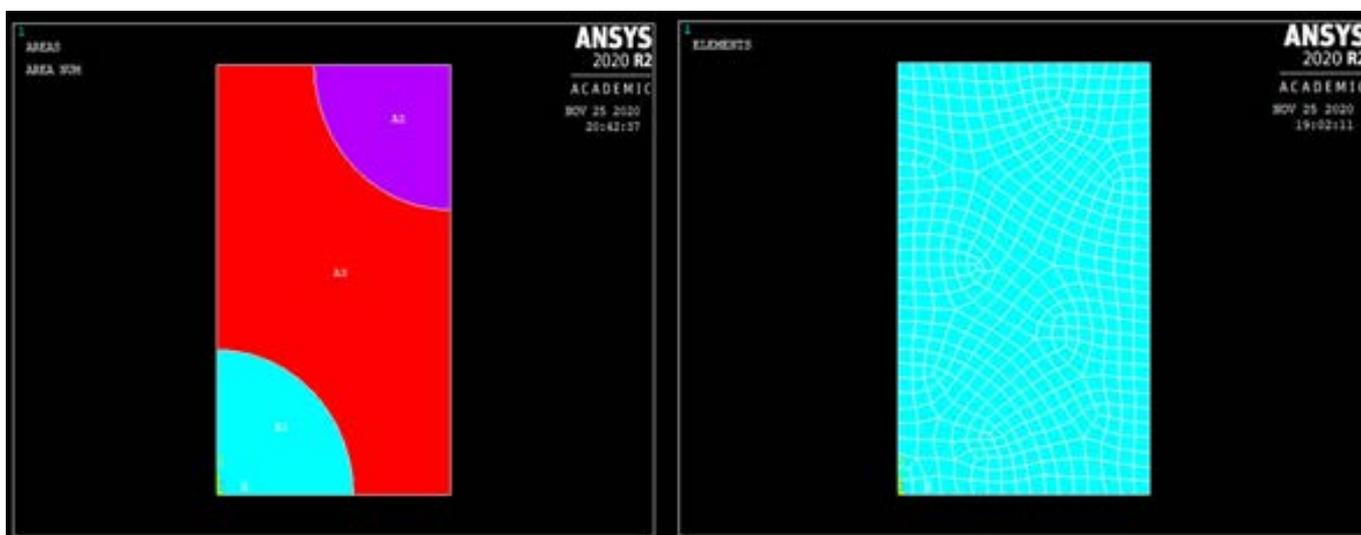


Рис. 1. Образец, с гексагональной укладкой: A_1 , A_2 – изотропные волокна боропластика; A_3 – изотропная эпоксидная матрица.

[Источник: Составлено автором]

По данным, полученным аналитическим методом, рассчитывается эффективный модуль сдвига, выражаемый из формулы [4]:

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

Полученные значения модулей сдвига при разных объемных долях волокна представлены в таблице 2.

Таблица 2

Полученные модули сдвига при различных объемных долях для гексагональной и тетрагональной укладки

ν_f	G^* , ГПА	G^* , ГПА
0.2	2.9	12.0
0.4	14.8	33.2
0.6	29.5	59.4
0.8	51.0	98.8

Для проверки корректности расчетов, значения из таблицы 2 соотносятся с графиком, представленным на рис. 1. Результат представлен на рис. 4.

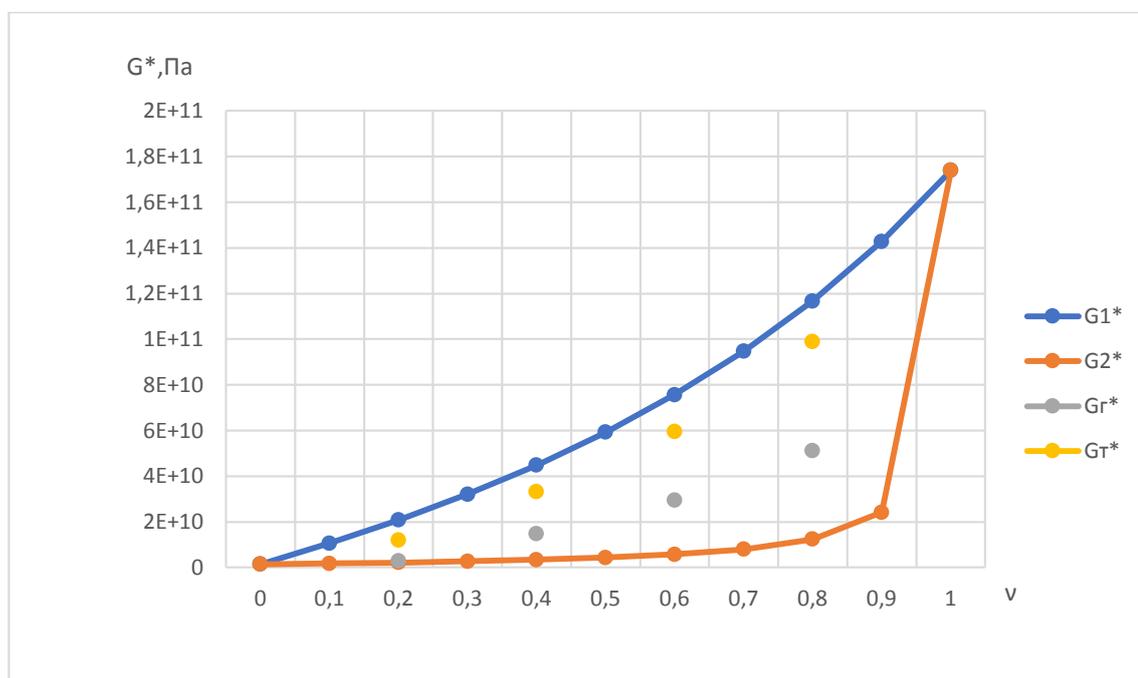


Рис. 4. $G_{Г}^*$ и $G_{Т}^*$ - полученные значения модулей сдвига при разных объемных долях волокна тетрагональной и гексагональной укладки соответственно; G_1^* , G_2^* - вилка Хашина-Штрикмана

[Источник: Составлено автором]

Вывод

1. Полученные результаты не выходят за пределы нижней и верхней границы вилки Хашина-Штрикмана, что говорит о правильности решения поставленной задачи.

2. На рис.4 можно увидеть, что эффективный модуль сдвига возрастает в зависимости от объемной доли армирующего компонента. При увеличении объемной доли волокна модуль сдвига стремится к значению модуля сдвига волокна.

3. Значения с тетрагональной укладкой волокна близки к верхней границе вилки Хашина-Штрикмана. Значения с гексагональной укладкой волокна близки к нижней границе вилки Хашина Штрикмана.

4. Зависимость G^* от v_f является существенно нелинейной. С ростом v_f трансверсальность G^* возрастает.

Работа выполнена в рамках НИРС [2].

Библиографический список

1. Аношкин А. Н. Численное прогнозирование упругих характеристик пространственно-армированных композиционных материалов / А. Н. Аношкин, П. В. Писарев, Д. А. Ермаков // Современные технологии и материалы новых поколений: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, г. Томск, 9-13 октября 2017 г.— Томск: Изд-во ТПУ, 2017. — [С. 56-57].
2. 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.
3. Пятаев С. Ф. Влияние температуры на прочность линейно-армированных боропластиков при сложном нагружении // Журнал Сибирского

- федерального университета. Математика и физика. – 2012. – Т. 5. – №. 2.
4. Соколкин Ю. В. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел / Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. - М.: Наука, 1984. – 116 с.
 5. Тарнопольский Ю. М. Пространственно-армированные композиционные материалы: справочник / Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А. - М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
 6. Ташкинов А. А. Прогнозирование эффективных теплофизических характеристик пироуглеродных матриц/ Ташкинов А. А., Шавшуков В. Е. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2002. - №10. – С. 135-143.
 7. Федотов А. А. Аналитическая модель клеевого ремонта повреждений обшивки летательного аппарата с учетом деградации свойств материала / Федотов А. А., Ципенко А. В. // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2016. – Т. 19. – №. 6.
 8. Чекалкин А. А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов / Чекалкин А. А., Паньков А. А. –Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, Пермь, 1999. -150 с.

Оригинальность 81%