

УДК 620.171.34

***СРАВНЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ОРГАНОПЛАСТИКА В
ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ И СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРАХ***

Казакова С.Е.

студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Чеботарева Е.А.

студент 4 курса, Аэрокосмический факультет,

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Аннотация

С помощью программной системы ANSYS выполнен расчёт полей напряжений и деформаций однонаправленного композиционного материала с тетрагональной и случайной структурами. Получены значения модуля Юнга для выбранных структур, проведен их сравнительный анализ. Для расчёта выбран композиционный материал с изотропным органическим волокном.

Ключевые слова: органопластик, композиционный материал, модуль Юнга, эффективные характеристики.

***COMPARISON OF THE YOUNG'S MODULUS OF ORGANOPLASTICS IN
TETRAGONAL AND RANDOM STRUCTURES***

Kazakova S. E.

4th year student, Aerospace Faculty,

Department of Mechanics of Composite Materials and Structures,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Chebotareva E. A.

4th year student, faculty of Aerospace,

Department of Mechanics of Composite Materials and Structures,

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Annotation

The stress and strain fields of a unidirectional composite material with tetragonal and random structures are calculated using the ANSYS software system. The values of the Young's modulus for the selected structures are obtained, and their comparative analysis is carried out. A composite material with an isotropic organic fiber was selected for the calculation.

Key words: organic plastics, composite material, the young's modulus, effective performance.

Современное состояние вопросов исследования

Композиционные материалы - материалы, состоящие из двух или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих, и связующей их матрицы) и обладающие некоторыми признаками, а именно:

1. Композиционные материалы не встречаются в природе, так как созданы человеком;
2. Материалы состоят из двух или более компонентов, которые различаются по своему составу и разделены выраженной границей (компоненты не должны растворяться или иными способами поглощать друг друга);
3. Композиты имеют свойства, отличные от свойств составляющих их компонентов;
4. На макромасштабе композиционные материалы анизотропные, на микромасштабе – изотропные;
5. При производстве состав, форма и распределение компонентов проектируются на стадии проектировки;
6. Свойства композиционных материалов определяются из взаимодействия его компонентов [1].

В настоящее время композиционные материалы конкурируют в производстве с такими основными конструкционными материалами, как железобетон, металл, дерево. Возможности композиционных материалов чрезвычайно широки благодаря многообразию матриц и наполнителей, неисчерпаемой вариабельности составов композитов на их основе и методов их модификации.

Органические арамидные и полиэтиленовые волокна в основном используются для производства полимерных композиционных материалов.

Материалы находят применение при изготовлении корпусов ракетных двигателей, защитных касок, пуленепробиваемых жилетов, лодок, хоккейных

ключек и другого спортивного снаряжения. При производстве полимерных композиционных материалов в качестве матричного материала чаще используются эпоксидные, либо полиэфирные связующие. Основными достоинствами этих волокон являются высокие механические свойства в широком диапазоне температур и хорошая химическая стойкость [2].

В представленной работе исследуются зависимости эффективных свойств композитов от объемного содержания волокон, с помощью программного комплекса ANSYS рассматривается распределение полей напряжений и деформаций в ячейке периодичности материала, проводится оценка результатов с помощью вариационных границ Хашина–Штрикмана.

Постановка задачи

Данная работа посвящена сравнению модуля Юнга органопластика в периодичной тетрагональной и случайной структурах. В качестве армирующего элемента использовалось органическое волокно. В качестве связующего – эпоксидная матрица. Работа выполнена в рамках НИРС [3].

Рассмотрим задачу для стохастического однородного тела объемом V с границей Γ , состоящую из замкнутой системы уравнений

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

и граничных условий

$$u_i(\vec{r})|_{\Gamma} = u_i^0,\tag{2}$$

где C_{ijmn} - тензор модулей упругости; ε_{ij} - тензор малых деформаций Коши; $u_i(\vec{r})$ - структурные перемещения, заданные на границе Γ ; u_i^0 - заданный вектор перемещений [5].

В качестве расчетной области рассмотрим материал с хаотичным расположением волокон в матрице (рис. 1а) и материал с тетрагональной укладкой волокон (рис. 1б). Органоволокна – изотропные и однородные, непрерывно связаны по границе раздела фаз.

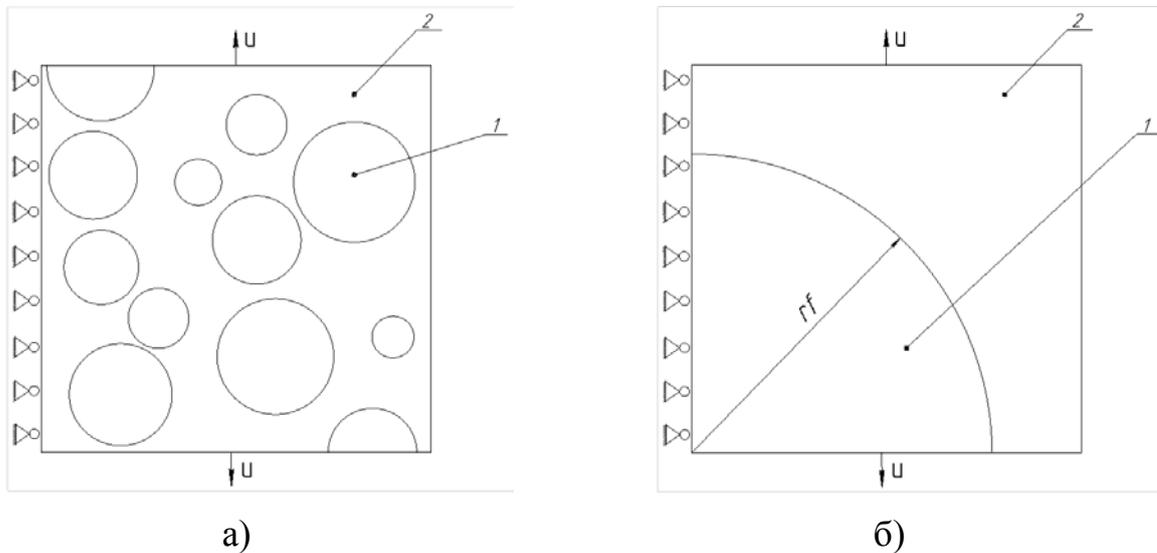


Рис. 1. Геометрия расчетной области и схема нагружения случайной структуры (а); тетрагональной периодичной структуры (б).

1 – органическое волокно; 2 – эпоксидная матрица.

[Источник: Составлено автором]

Реализация в ANSYS

Строим случайную геометрию (рис. 2), выбирая свойства материала и задавая его характеристики. Для изотропного органического волокна примем $E = 120$ ГПа, $\nu = 0,23$. Для эпоксидной матрицы: $E = 4$ ГПа, $\nu = 0,34$. Сторону ячейки принимаем $a = 0,06$ м, задаём объёмную долю волокна $v_f = 0,44$. Располагаем волокна в хаотичном порядке на расчетной области. Радиус волокон задаем в диапазоне от 0,00856 м до 0,0321 м.

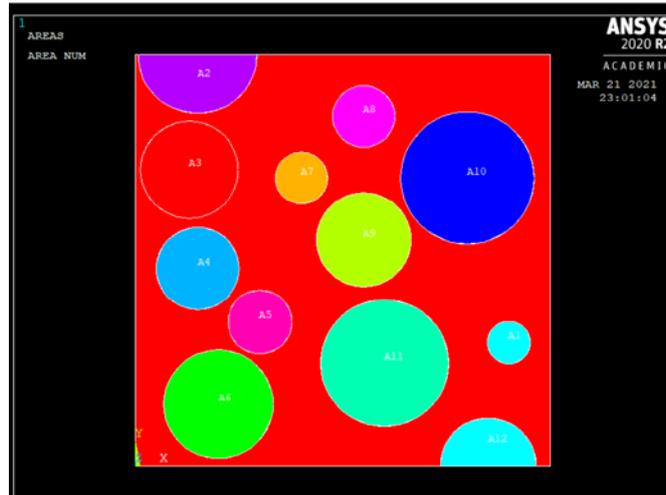


Рис. 2. Построение случайной геометрии
[Источник: Составлено автором]

Затем разбиваем конструкцию на конечные элементы (рис. 3) и задаем граничные условия в перемещениях:

$$u_x = 0, u_y = 0,01a$$

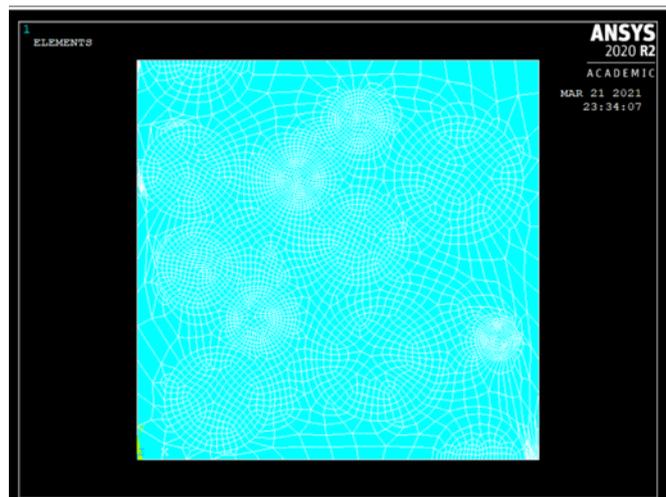


Рис. 3. Разбиение на конечные элементы и задание граничных условий в случайной структуре

[Источник: Составлено автором]

Диаграмма полей напряжений представлена на рис.4.

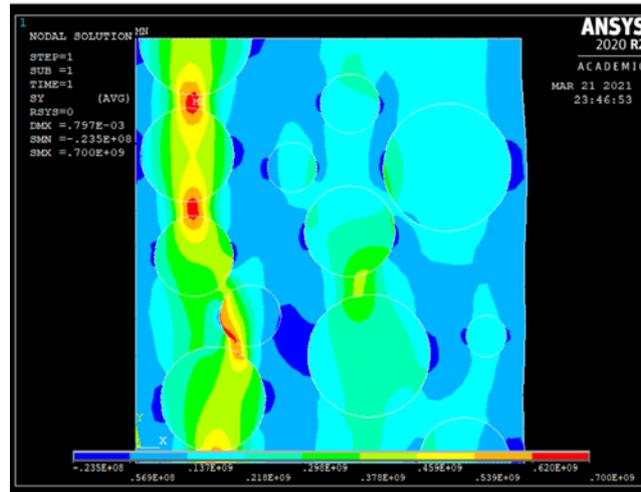


Рис. 4. Диаграмма полей напряжений случайной структуры вдоль оси X

[Источник: Составлено автором]

Диаграмма полей деформаций представлена на рис.5.

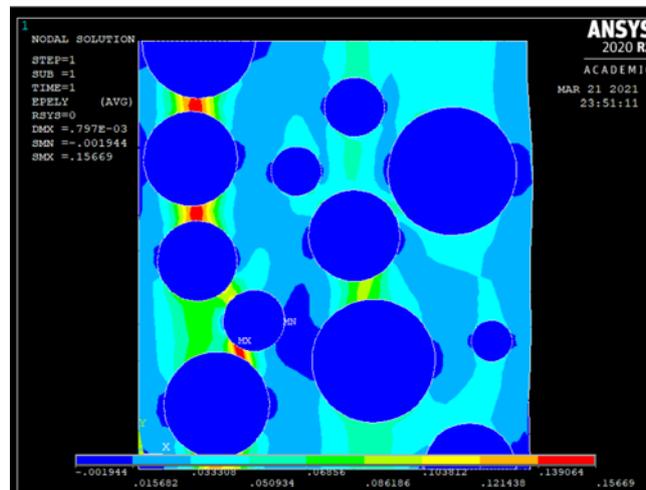


Рис. 5. Диаграмма полей деформаций случайной структуры вдоль оси X

[Источник: Составлено автором]

Вычисляем модуль Юнга для материала со случайной структурой:

$$E_{сл} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{696095}{0,00007208} = 9,7\text{ГПа.} \quad (3)$$

Далее строим тетрагональную ячейку периодичности с аналогичными свойствами и характеристиками материала. Волокно задаём как четверть окружности радиусом:

$$r_f = 2a \sqrt{\frac{v_f}{\pi}}, \quad (4)$$

где объемная доля вещества $v_f = 0,44$.

Затем разбиваем конструкцию на конечные элементы (рис. 6) и задаем граничные условия в перемещениях:

$$u_x = 0, u_y = 0,01a$$

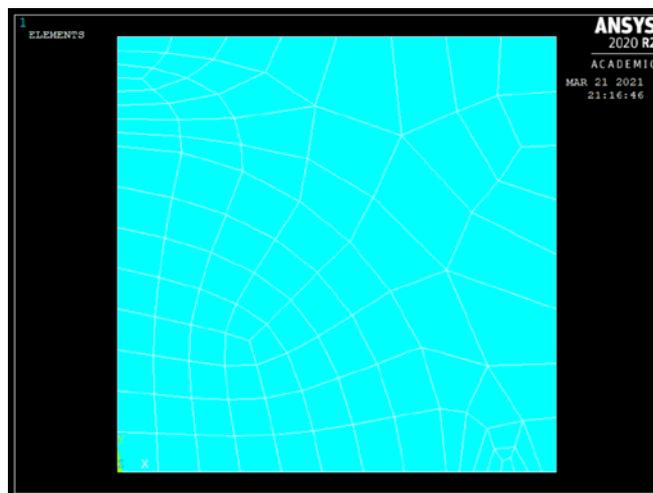


Рис. 6. Разбиение на конечные элементы и задание граничных условий в периодичной тетрагональной структуре

[Источник: Составлено автором]

Диаграмма полей напряжений представлена на рис.7.

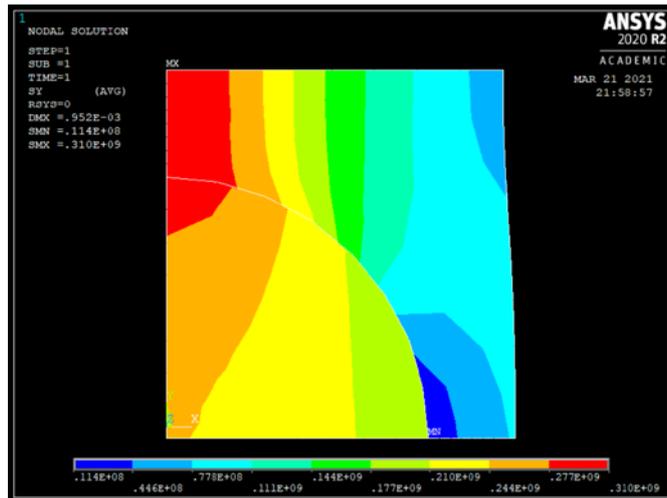


Рис. 7. Диаграмма полей напряжений периодичной тетрагональной структуры вдоль оси X
[Источник: Составлено автором]

Диаграмма полей деформаций представлена на рис.8.

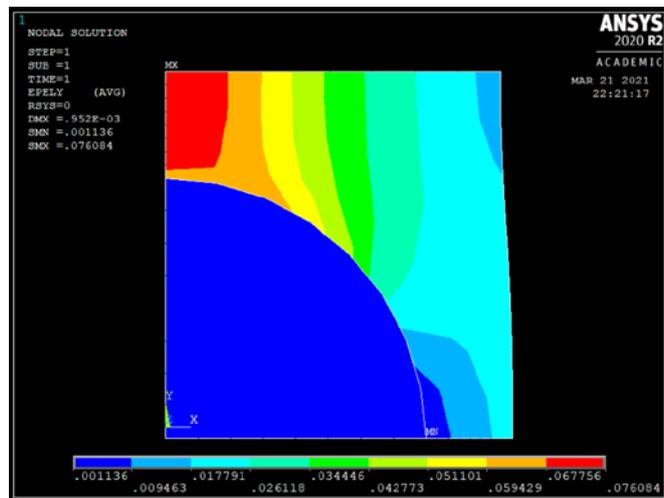


Рис. 8. Диаграмма полей напряжений периодичной тетрагональной структуры вдоль оси X
[Источник: Составлено автором]

Вычисляем модуль Юнга для материала с периодичной тетрагональной структурой через осредненные характеристики напряжений и деформаций:

$$\sigma_{ij}^* = \frac{1}{v} \int_v \sigma_{ij} dv, \quad \varepsilon_{ij}^* = \frac{1}{v} \int_v \varepsilon_{ij} dv. \quad (5)$$

$$E_{\text{тетр}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{652590}{0,0000723} = 9 \text{ ГПа}. \quad (6)$$

Для наглядного сравнения полученные результаты представлены в табл.1.

Таблица 1 - Полученные данные исследуемых структур

	Напряжения σ , Па	Деформации ε	Модуль Юнга E , ГПа
Сложная структура	696095	0,00007208	9,7
Периодическая тетрагональная структура	652590	0,0000723	9

Из решения стохастической задачи теории упругости микронеоднородных сред со случайной структурой получены формулы обобщенного сингулярного приближения

$$K^* = K_f v_f + K_m v_m - \frac{v_f v_m (K_f - K_m)^2}{K_m v_f + K_f v_m + s} \quad (7)$$

$$m^* = G_{\perp}^* = G_f v_f + G_m v_m - \frac{v_f v_m (G_f - G_m)^2}{G_m v_f + G_m v_m + s \frac{(3t+s)}{(3t+7s)}} \quad (8)$$

$$E_{\parallel}^* = E_f v_f + E_m v_m - \frac{4v_f v_m (v_f - v_m)^2}{\frac{v_f}{K_m} + \frac{v_m}{K_f} + \frac{1}{s}} \quad (9)$$

$$v_{\perp\parallel}^* = v_f v_f + v_m v_m - \frac{v_f v_m (v_f - v_m) \left(\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_m} \right)}{\frac{v_f}{K_m} + \frac{v_m}{K_f} + \frac{1}{s}} \quad (10)$$

$$G_{\parallel}^* = G_f v_f + G_m v_m - \frac{v_f v_m (G_f - G_m)^2}{G_m v_f + G_m v_m + s} \quad (11)$$

Выражения (7) – (11) обладают наибольшей степенью общности, так как из них вытекают и оценки Фойгта и Рейсса, и вариационные границы, и результаты самосогласованной модели. Так, если $s = t = \infty$, то имеем оценку Фойгта. Если $s = t = 0$, то имеем оценку Рейса. Принимая соответственно $s = G_f$, $t = K_f$ и $s = G_m$, $t = K_m$, будем иметь верхнюю и нижнюю вариационные границы Хашина-Штрикмана[4].

Данные эффективных характеристик для органопластика при разном объемном содержании волокон v_f представлены в табл.2.

Таблица 2 - Данные эффективных характеристик для органопластика

v_f	v_m	K^* , Па	E_{\perp}^* , Па	G_{\perp}^* , Па	E_{\parallel}^* , Па	$\nu_{\perp\parallel}^*$, Па
0	1	4E+09	3,9E+09	1,49E+09	4E+09	0,34
0,1	0,9	7E+09	8,35E+09	3,24E+09	1,57E+10	0,368583
0,2	0,8	1E+10	1,33E+10	5,25E+09	2,73E+10	0,36827
0,3	0,7	2E+10	1,89E+10	7,59E+09	3,89E+10	0,358321
0,4	0,6	2E+10	2,55E+10	1,03E+10	5,05E+10	0,34399
0,5	0,5	3E+10	3,34E+10	1,36E+10	6,21E+10	0,327301
0,6	0,4	3E+10	4,28E+10	1,76E+10	7,37E+10	0,309195
0,7	0,3	4E+10	5,43E+10	2,26E+10	8,53E+10	0,290173
0,8	0,2	5E+10	6,87E+10	2,89E+10	9,68E+10	0,270524
0,9	0,1	6E+10	8,72E+10	3,73E+10	1,08E+11	0,250428
1	0	7E+10	1,12E+11	4,88E+10	1,2E+11	0,23

K^* - модуль объёмного сжатия

E_{\perp}^* - модуль Юнга в трансверсальной плоскости;

G_{\perp}^* - модуль сдвига в трансверсальной плоскости;

E_{\parallel}^* - модуль Юнга в направлении армирования;

$\nu_{\perp\parallel}^*$ - коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение в плоскости, перпендикулярной направлению армирования при растяжении в этой плоскости;

v_f, v_m - объемные доли волокна и матрицы.

Выводы

1. Рассмотрены два фрагмента композита с различной укладкой круглых изотропных органических волокон в эпоксидной матрице для плоского случая.

2. Были рассчитаны поля напряжений и деформаций тетрагональной периодической ячейки и ячейки случайной структуры. Поля напряжений являются существенно неоднородными. Максимальные напряжения находятся вблизи межфазной поверхности матрицы.

3. Для тетрагональной периодической ячейки максимальные значения напряжений равны 0,031 ГПа, максимальные значения деформаций 0,76. Для ячейки со случайной структурой 0,76 ГПа и 0,157, соответственно.

4. Произведен сравнительный анализ модуля Юнга случайной и периодической структур композиционного материала. В результате значение модуля Юнга для случайной структуры на 9,4 % больше, чем значение модуля Юнга для тетрагональной структуры.

5. Полученные значения модуля Юнга для обоих случаев входят в диапазон границ Хашина – Штрихмана.

6. Получены эффективные характеристики композиционного материала при данных параметрах и заданной объемной доле.

Библиографический список

1. Бабушкин А.В. Функциональные и конструкционные углепластиковые и полимерные композиционные материалы/ А.В. Бабушкин // Материалы междисциплинарного курса МДК 11 - 2017. – 2-3 с.
2. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 52 с.

3. 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.
4. Соколкин Ю. В. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел / Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. // М.: Наука, 1984. – 14 -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.

Оригинальность 80%