

УДК 620.18

***РАСЧЁТ ПОПЕРЕЧНОГО МОДУЛЯ ЮНГА ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА ИЗ  
ОДНОНАПРАВЛЕННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА***

***Кунгурцева Е.Г.***

*Студент 4 курса,*

*Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

*Россия, г.Пермь*

**Аннотация:** Статья посвящена нахождению зависимости поперечного модуля Юнга параллелепипеда из стеклопластика от объемной доли волокна. Рассмотрена статистическая краевая задача для структурно-неоднородного тела. Найдены поля напряжений и деформаций в однонаправленном стеклопластике, при разных значениях объемной доли волокна с помощью метода конечных элементов, в программном комплексе ANSYS. Посчитаны значения модулей Юнга. Построен график зависимости поперечного модуля Юнга от объемной доли волокна. Сделан вывод, что полученная зависимость является нелинейной.

**Ключевые слова:** композиционный материал, стеклопластик, поперечный модуль Юнга, метод конечных элементов, ANSYS.

***THE CALCULATION OF THE TRANSVERSE YOUNG'S MODULUS OF A  
PARALLELEPIPED MADE OF UNIDIRECTIONAL FIBERGLASS***

***Kungurtseva E.G.***

*Student 4 course,*

*Aerospace faculty*

*Department of "Mechanics of composite materials and structures"  
Perm National Research Polytechnic University  
Russia, Perm*

**Abstract:** the article is devoted to finding the dependence of the transverse young's modulus of a fiberglass parallelepiped on the volume fraction of the fiber. The statistical boundary value problem for a structurally inhomogeneous body is considered. Stress and strain fields are found in unidirectional fiberglass, at different values of the fiber volume fraction using the finite element method, in the ANSYS software package. The values of young's modules are calculated. A graph of the dependence of the transverse young's modulus on the volume fraction of the fiber is constructed. It is concluded that the obtained dependence is nonlinear.

**Keywords:** composite material, fiberglass, the transverse young's modulus, finite element method, ANSYS.

Композитными материалами являются такие неоднородные (гетерогенные) материалы, которые состоят из двух или более взаимно нерастворимых компонентов (фаз).

Композиционные материалы обычно классифицируются по форме включений:

- макрочастицы (гранулы),
- короткие (или разорванные) волокна,
- непрерывные длинные волокна (нити),
- слои [1].

Первые работы в области механики композиционных материалов были связаны с изучением эффективных свойств микронеоднородных материалов с помощью правила смеси. В 1946 году И. М. Лифшиц и Л. Н. Розенцвейг [2] решали стохастическую краевую задачу, рассчитывая макроскопические

Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМН Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

характеристики поликристаллов. В настоящее время достаточно высоко развито прогнозирование эффективных линейно- и нелинейно-упругих свойств, упругопластических и вязкоупругих характеристик, а также процессов деформирования и разрушения анизотропных материалов [3].

Множество современных исследований посвящено расчету макроскопических свойств композитов [4, 5, 6, 7], так как это является одной из центральных проблем в механике структурно-неоднородных сред.

В данной работе используется такой материал как стеклопластик, который является волокнистым материалом. Наполнителем данного материала служит стекловолокно, а матрицей – эпоксидная смола ЭДТ-10. Стеклопластик широко используется в различных отраслях машиностроения, так как обладает высокими механическими свойствами, малому удельному весу и высокой теплостойкости. Кроме того к большому количеству деталей из стеклопластиков, например таких, как корпуса летательных аппаратов, магнитопрозрачные кожухи и корпуса геофизических приборов, высоковольтные электроизоляторы, телескопические шахтные стойки и т.д., предъявляются высокие требования по точности размеров, точности расположения поверхностей и шероховатости. В данной книге приведены исследования в области обработки стеклопластиков [8].

Свойства используемого материала представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства материалов

Стекловолокно		Эпоксидная смола ЭДТ-10	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
$E_p, Па$	1E+11	$E_m, Па$	2,91E+9
$\nu_p$	0,21	$\nu_m$	0,356

Нахождение полей напряжений  $\sigma(\vec{r})$  и деформаций  $\varepsilon(\vec{r})$  требует решения краевой задачи [9, с.20], состоящей из замкнутой системы уравнений:

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

и граничных условий:

$$u_i(\vec{r})|_{\Gamma_x} = x_i(\vec{r}) \quad (2)$$

если на части границы  $\Gamma_x$  заданы перемещения,

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

если на части границы  $\Gamma_S$  заданы производные перемещений (усилия).

Для решения задачи используем численный метод.

Рассмотрим однонаправленный стеклопластик с тетрагональной укладкой цилиндрических волокон. Для расчета полей напряжений и деформаций в композите используем программный комплекс ANSYS Mechanical 19.02, реализующий метод конечных элементов [10, 11].

Данный композиционный материал имеет форму куба, армированного девятью волокнами.

Реализуется одноосное растяжение по оси  $Y$ .

Нижняя часть параллелепипеда закреплена с помощью шарниров, ограничивающих перемещение по оси  $Y$ . Узел с координатами  $(0,0,0)$  закреплён шарнирами, запрещающими перемещения вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . К верхней части приложено перемещение по оси  $Y$ .

Необходимо провести анализ напряжённо-деформированного состояния параллелепипеда, армированного волокнами, при различных объёмных долях волокна.

Рассмотрим ход решения на примере параллелепипеда с объёмной долей  $V_f = 0,3$ .



Затем, зададим граничные условия. Нижнюю грань закрепим шарнирами, ограничивающими перемещения по оси  $Y$ , и в узле с координатами  $(0,0,0)$  ограничим перемещение по всем трём направлениям. К верхней – приложим перемещения по оси  $Y$ .

Получим поля напряжений  $\sigma_y$  (рис.3) и деформаций  $\epsilon_y$  (рис.4).

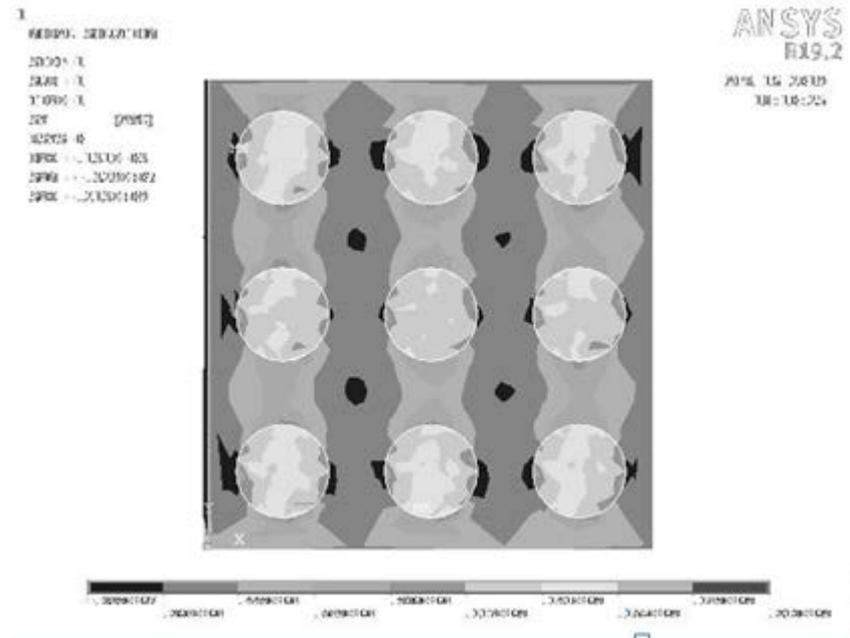


Рис. 3 – Поле напряжений  $\sigma_y$ .

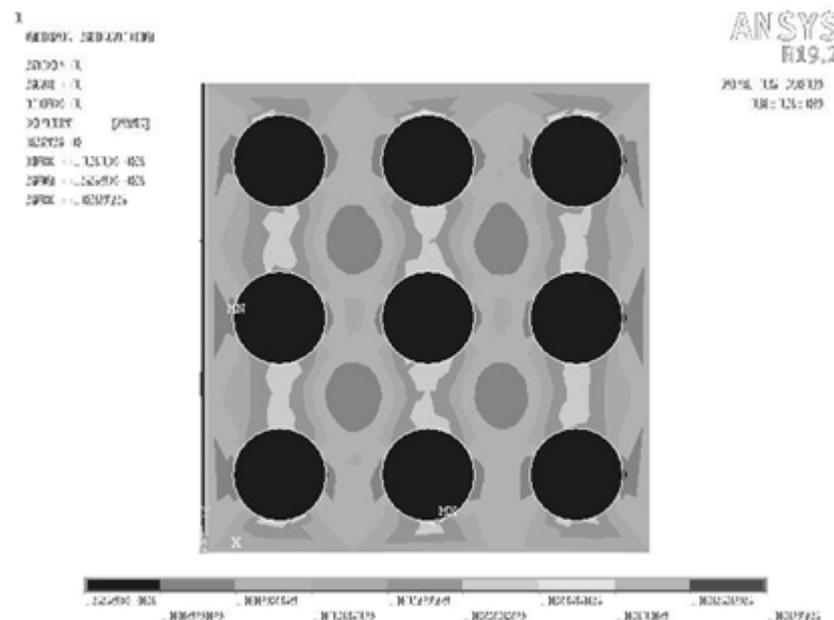


Рис. 4 – Поле деформаций  $\epsilon_y$ .

На рисунке 3 видно, что максимальные напряжения  $\sigma_y$  возникают на границе раздела волокна и матрицы. Напряжения в матрице ниже, чем напряжения в волокнах.

Из рисунка 4 можно сделать следующие выводы. Максимальные деформации  $\varepsilon_y$  возникают в матрице. Деформации волокон намного ниже деформаций, возникающих в матрице.

Рассчитаем макроскопический поперечный модуль Юнга. Для этого воспользуемся следующими формулами.

$$\sigma_{ij}^* = \frac{1}{V} \int \sigma_{ij} dV_k \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij}^* = \frac{1}{V} \int \varepsilon_{ij} dV_k \quad (6)$$

$$E^* = \frac{\sigma_{ij}^*}{\varepsilon_{ij}^*} \quad (7)$$

В итоге, для доли  $V_f = 0,3$  получим модуль Юнга равный:

$$E^* = 6,02 * 10^9 \text{ Па.}$$

Аналогичные расчёты проведём для объёмных долей  $V_f$ , равных 0,1; 0,5; 0,6 (табл.2).

Таблица 2 – Полученные значения модулей Юнга при разных объёмных долях волокна

$v_f$	$E^*$ , ГПа
0,1	3,75
0,3	6,02
0,5	9,67
0,6	15,05

Построена зависимость поперечного модуля Юнга от объёмной доли волокна (рис.5).

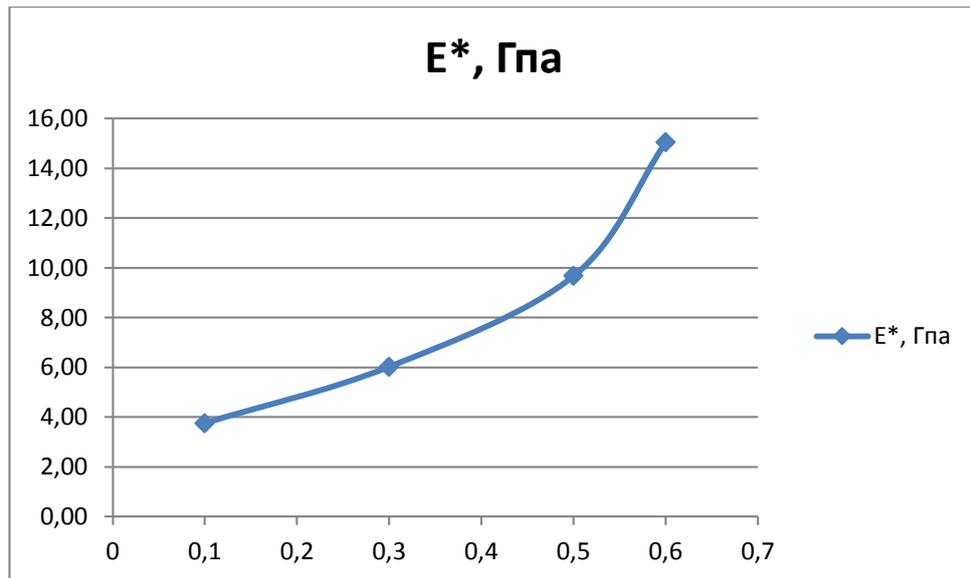


Рис. 5 – Зависимость эффективного модуля Юнга от объёмной доли волокна

По данному графику можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении объёмной доли волокна поперечный модуль Юнга возрастает не линейно, причём скорость возрастания при малых объёмных долях ниже, чем при больших.
2. При увеличении объёмной доли поперечный модуль Юнга композита стремится к значению модуля Юнга волокна.
3. При уменьшении объёмной доли поперечный модуль Юнга композита стремится к значению модуля Юнга матрицы.

#### Библиографический список:

1. Скворцов Ю.В., Конспект лекций по дисциплине Механика композиционных материалов. — Самара: Издательство СГАУ им.С.П. Королева, 2013. — С. 4.
2. Лифшиц И. М., Розенцвейг Л. Н. К теории упругих свойств поликристаллов // ЖЭТФ. – 1946. – Т. 16, вып. 11. – С. 967-980.
3. Численная методика определения эффективных характеристик однонаправленно армированных композитов / С. Дария Заде // Вестник

- НТУ «ХПИ». Серия: Динамика и мощность машин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2013 – № 58 (1031). – С. 71-77.
4. Базарова Е.В., Злыгостева А.С., Курица О.В. Расчет эффективных модулей сдвига однонаправленного стеклопластика // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. - 2018. - № 4(20). - С. 33-41.
  5. Гаврюшина Н. Т., Букеткин Б. В. Исследование прочности армированных композитных образцов при трехточечном изгибе // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12.
  6. Ташкинов А.А., Шавшуков В.Е. Прогнозирование эффективных теплофизических характеристик пироуглеродных матриц // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – №10. – 2002 – с. 135-143.
  7. Эффективные упругие свойства высокопористых композитов с учетом естественного разброса свойств матрицы / Е. Ю. Макарова, Ю. В. Соколкин // Научно-технический вестник Поволжья. - 2012. - № 6. - С. 24-27., ВАК.
  8. Мозговой Н.И., Марков А.М. Стеклопластик и особенности его механической обработки, Барнаул, АГТУ, 2012– 98 с.
  9. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. М.: Наука, 1984 – 116 с.
  10. Чекалкин А.А., Котов А.Г. Динамика и устойчивость композитных конструкций/Перм. гос. техн. ун-т, Пермь, 2006.-66 с.
  11. Чекалкин А.А., Паньков А.А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов/Перм. гос. техн. ун-т, Пермь, 1999.-150 с.

*Оригинальность 85%*