

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ  
СДВИГА ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ОРГАНОПЛАСТИКА**

**Ляпунов Д.О.**

*Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

*Россия, г.Пермь*

**Панкратов К.Н.**

*Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет*

*Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

*Россия, г.Пермь*

**Аннотация:** В данной работе были вычислены значения эффективных модулей сдвига трансверсально-изотропного органопластика с помощью математических расчетов и программного комплекса ANSYS Mechanical. Расчеты были проведены с разными объемными долями волокна (30%, 60%, 80%). Был построен график зависимости эффективного модуля сдвига от объемной доли волокна.

**Ключевые слова:** органопластик, эффективный модуль, объемная доля, эффективные характеристики, метод конечных элементов, модуль сдвига, ANSYS.

***NUMERICAL FORECASTING OF EFFECTIVE SINGLE-DIRECTIONAL  
ORGANOPLASTIC SHIFT MODULES***

***Lyapunov D.O.***

*Student 4 course, Aerospace faculty*

*Department of "Mechanics of composite materials and structures"*

*Perm National Research Polytechnic University*

*Russia, Perm*

***Pankratov K.N.***

*Student 4 course, Aerospace faculty*

*Department of "Mechanics of composite materials and structures"*

*Perm National Research Polytechnic University*

*Russia, Perm*

**Annotation:** In this work, the values of the effective shear moduli of unidirectional organoplastics were calculated using mathematical calculations and in the ANSYS Mechanical software package. The calculations were carried out with different volume fractions of fiber (30%, 60%, 80%). A plot was constructed of the effective shear modulus versus volume fraction of fiber.

**Keywords:** organoplastics, effective modulus, volume fraction, effective characteristics, finite element method, shear modulus, ANSYS.

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, на транспорте – шины, корпуса спортивных автомобилей, в судостроении – корпуса кораблей, в строительстве – панели, перекрытия зданий и сооружений [1].

Композиционные материалы — это материалы, с гетерогенной структурой, имеющие две и более фазы. Одна из которых несет основную нагрузку (наполнитель), а вторая (матрица) связывает компоненты армирования между собой. Основная её роль — это перераспределение нагрузки между включениями. Так же, её часто называют связующим. Наполнитель должен иметь границу раздела и не растворяться в матрице. Взаимодействовать компоненты могут по поверхности раздела фаз, что и определяет эффективные свойства изделия [2].

Полимерные композиты (ПКМ) – это композиты, в которых материалом матрицы является полимер. В органопластиках наполнителем является органическое волокно.

Органические волокна выделяет их низкая плотность, которая ниже, чем у стеклянных и угольных наполнителей. Самым часто встречающимся органическим наполнителем является арамидное волокно. Состоит оно преимущественно из амидных групп, соединенных с фениловыми кольцами.

Конструкции, полученные на их основе, обладают высокой сопротивляемостью к ударным и знакопеременным нагрузкам, что дало им надолго закрепиться в средствах защиты от пуль и осколочных ранений в составе бронежилетов.

Отдельно стоит упомянуть органопластики в виде антифрикционных материалов. Конкретно в роли тихходных подшипников скольжения. Их выделяет тишина работы при недостаточном смазывании.

Но не стоит забывать о существенных недостатках органических композитов: недостаточная прочность при сжимающих нагрузках и изгибе, высокая ползучесть. Особенно большое влияние на характеристики оказывает повышенная влажность и вода.

Одной из основных задач механики деформируемого твердого тела является определение упругих характеристик композита по свойствам его компонентов [3,4].

В настоящее время большое количество работ связано с численным прогнозированием эффективных характеристик композиционных материалов, в том числе и модуль сдвига в трансверсальной плоскости  $G^* = m^*$ . Именно поэтому разработка методики численного прогнозирования упругих характеристик ПКМ, является актуальной задачей [5,6].

В монографии [7] приведены расчеты эффективных упругих характеристик для однонаправленного композиционного материала с непрерывными волокнами.

В рамках данной работы была дана постановка краевой задачи [6,7], состоящей из системы уравнений (уравнений равновесия, закон Гука (физические соотношения) и геометрических соотношения Коши)

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

и граничных условий в перемещениях

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

## ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

Вычисления были проведены с изменением объемной доли волокна (30%, 60%, 80%). Композиционный материал с гексагональной структурой состоял из матрицы на основе эпоксидной смолы ЭДТ-10 и наполнителя из органических волокон (Таблица 1). В расчётной модели матрица являлась изотропной, а волокна - ортотропными.

Таблица 1 – Упругие характеристики компонентов исходного композита

Материал	Модуль Юнга E, ГПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
ЭДТ-10	3,1	0,42
Органическое волокно	$E_x = 121$ $E_y = E_z = 3,35$	$\nu_{xy} = 0,27$ $\nu_{yz} = \nu_{xz} = 0,17$

Численное решение данной задачи осуществлялось в пакете ANSYS Mechanical методом конечных элементов (МКЭ) (рис. 1) [8].

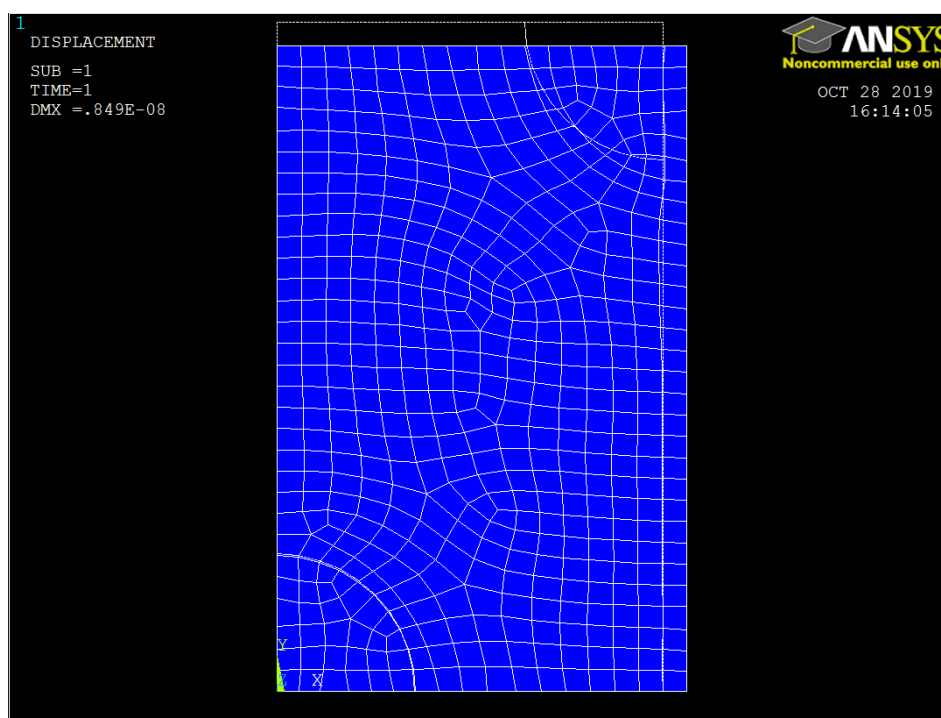


Рис.1. Ячейка периодичности, разбитая на конечные элементы в пакете ANSYS Mechanical

С помощью упругих характеристик матрицы и волокна были найдены их модули сдвига  $G$  и модули объемного сжатия  $K$ .

Для проверки результатов, полученных в комплексе ANSYS Mechanical, используются вилки Хашина-Штрикмана. Их границы берутся из [9]:

$$G_m + \frac{v_f}{\frac{1}{G_f - G_m} + \frac{K_m + 2G_m}{2G_f(K_m + G_m)} v_m} \leq m^* \leq G_f + \frac{v_m}{\frac{1}{G_m - G_f} + \frac{K_f + 2G_f}{2G_m(K_f + G_f)} v_f}, \quad (3)$$

Где:  $K_f, K_m$  — модули объёмного сжатия волокна и матрицы соответственно;

$v_f, v_m$  — объёмные доли волокна и матрицы;

$G_f, G_m$  — модули сдвига волокна и матрицы.

В неравенстве (3) левая часть является нижней границей вилки, а правая – верхней.

Используя найденные значения после расчетов напряжений и деформаций, найдем модуль сдвига  $m^*$  из [9,10]:

$$m^* = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_{11}^* - \sigma_{22}^*)}{\epsilon_{11}^* - \epsilon_{22}^*} \quad (4)$$

Далее был построен график зависимости эффективного модуля сдвига от объемной доли волокна вместе с вилками Хашина-Штрикмана (рис. 2).

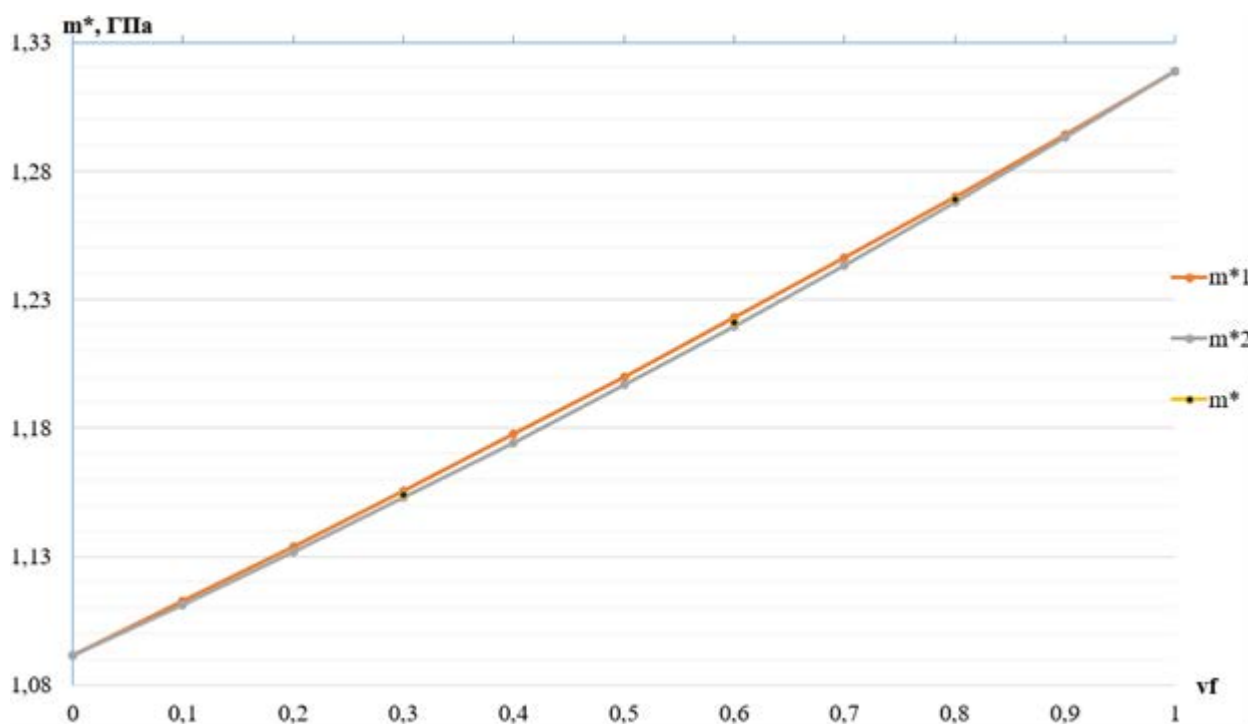


Рис. 2. Зависимость эффективного модуля сдвига  $m^*$  от объемной доли волокна  $v_f$  ( $m^*_{1}$  – верхний предел вилки,  $m^*_{2}$  – нижний предел вилки,  $m^*$  – эффективный модуль сдвига при определенной объемной доле)

По результатам, полученным в ходе выполнения данной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Полученные значения не выходят за пределы границ вилки Хашина-Штрикмана, что показывает правильность решения данной задачи.
2. На рис. 2 видно явное возрастание эффективного модуля сдвига в зависимости от объемной доли армирующего компонента.
3. При увеличении объемной доли волокна, стремится к значению, которое соответствует модулю сдвига волокна.
4. Найденные значения с объемной долей волокна до 50-60% расположены близко к нижней границе вилки. Далее эффективный модуль сдвига начинает резко возрастать, тем самым показывая зависимость  $m^*(v_f)$  нелинейной.

5. Малая ширина вилки обусловлена схожестью свойств матрицы и волокон. Так как органопластики представляют собой полимер, армированный полимером.

**Работа выполнена в рамках НИРС [11].**

### **Библиографический список**

1. Чекалкин А.А., Паньков А.А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов / Перм. гос. техн. ун-т, Пермь, 1999. -150 с.
2. 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.
3. Брытков, Е.В. Механика композиционных материалов: учебное пособие / Е.В. Брытков, В.А. Санников; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2012.-74 с.
4. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами / Е. В. Куимова, Н. А. Труфанов // Вестник Самарского государственного университета. - 2009. – №4. - С. 129-148.
5. 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].
6. 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.



7. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. М.: Наука, 1984. – 116 с.
8. Ю. И. Димитриенко, А. И. Левина, П. Боженик. Конечно-элементное моделирование локальных процессов переноса в пористых средах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2008. - № 3. - С. 90-102.
9. Хашин З., Штрикман С. О некоторых вариативных принципах анизотропной и неоднородной упругости // Вестник МГСУ. Физика. Твердые тела. – т. 10. – 1962, с. 335-342.
10. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во МГУ, 1984 – 336 с.
11. 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.

*Оригинальность 81%*