

УДК 678.067.7.019:004.42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕПЛАСТИКА С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ В ТРАНСВЕРСАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Бердникова Н.И., Тякина А.Б.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: natalya.berdnickova2017@yandex.ru , aisylu.tyakina@mail.ru

Проведен расчет однонаправленного волокнистого углепластика. Получена зависимость эффективного модуля Юнга и эффективного модуля сдвига от количества структурных дефектов. Были рассмотрены материал без дефектов, с одним и двумя структурными дефектами. Был сделан вывод об увеличении значений поперечного модуля Юнга и модуля сдвига при наличии структурных включений. Расчеты выполнены в ANSYS Mechanical.

Ключевые слова: Композиционный материал, углепластик, эффективные упругие характеристики, структурные дефекты, МКЭ (метод конечных элементов).

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE CHARACTERISTICS OF CARBON FIBER WITH STRUCTURAL DEFECTS IN THE TRANSVERSAL PLANE

Berdnikova N.I., Tyakina A.B.

The calculation of the unidirectional fibrous carbon fiber composite is carried out. Dependence of the effective Young's modulus and effective shear modulus on the number of structural defects in material is obtained. Material without defects, material with one and two structural defects were considered. It was concluded that the increase values of the transverse Young modulus and shear modulus in the presence of structural inclusions. Calculations are carried out in ANSYS Mechanical.

Key words: composite material, carbon plastic, effective elastic characteristics, structural defects, FEM (finite element method).

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационной технике занимает в настоящее время относительно малую долю от их общего объема потребления. Но именно в этой области композиционные материалы находят преимущественно специфическое и эффективное применение. В авиационной технике требования к свойствам материалов наиболее высокие, чем в других областях применения, это относится к таким важным характеристикам, как малая масса, высокие прочность и жесткость и хорошая стойкость к усталостным напряжениям. Композиционные материалы являются единственными существующими в настоящее время материалами способными отвечать предъявляемым высоким требованиям. Использование

композитов в конструкциях летательных аппаратов позволяет добиться существенных результатов в снижении массы, увеличении надежности и ресурса [1, 3]. Объем их применения в современной авиационной технике постоянно возрастает и если 30 лет назад на них приходилось всего 5% от массы авиационного планера, то в настоящее время объем применения композитов достигает 50 % от массы авиационного планера, обеспечивая ее снижение на 20-25% [2, 3].

Получение и изучение новых композиционных материалов, направленное изменение их структуры и свойств — одно из основных направлений в современной науке и технологии. Широкое распространение при изготовлении силовых конструкции летательных аппаратов получили углепластики на основе эпоксидных связующих.

В настоящее время разработаны углепластики нового поколения, которые начали внедрять в конструкции летательных аппаратов и другие области применения.

Массовое применение композиционных материалов при создании конструкций современной техники требует учета и исследования различных факторов. Один из которых, возникновение разных технологических дефектов. Предметом нашего исследования является изучение влияния дефектов структуры материала на эффективные свойства материала. Для решения таких задач необходимы комплексные теоретико-экспериментальные исследования, направленные на выяснение характера проявления физической картины процессов, протекающих как в элементах конструкции, так и в материале при возможных эксплуатационных нагрузках.

Одним из перспективных методов оценки влияния дефектов на поле напряженно-деформированного состояния конструкции является компьютерное моделирование с использованием современных пакетов конечно-элементного анализа [4].

Целью работы является расчет и выявление зависимости влияния количества дефектов на эффективные упругие характеристики однонаправленного волокнистого углепластика.

В данном исследовании проводился расчет в программном комплексе ANSYS Mechanical. В нем были определены эффективные упругие характеристики углепластика, а именно эффективные модуль сдвига и модуль Юнга для трех случаев, когда материал: без дефектов, с одним и с двумя структурными дефектами.

На уровне структурных элементов остаются справедливыми феноменологические уравнения и соотношения механики, т.е. элементарным микрообъемам составляющим элементы структуры. Структурные напряжения удовлетворяют в отсутствии массовых сил уравнениям равновесия [5].

$$\sigma_{ij,j}(\vec{r}) = 0, \quad (1)$$

где $\sigma_{ij,j}$ — тензор структурных напряжений.

Тензор структурных деформаций $\varepsilon_{ij,j}$ связан с вектором структурных перемещений $u_{i,j}$ соотношений Коши.

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

$$\sigma_{ij}(\vec{r}) = C_{ijmn}(\vec{r}) \cdot \varepsilon_{ij}(\vec{r}), \quad (3)$$

где C_{ijmn} – тензор модулей упругости.

Поля микронапряжений и микродеформаций являются случайными однородными полями внутри каждого элементарного макрообъема статистически однородной среды.

Макроскопические напряжения и деформации могут быть выражены через микроскопические посредством равенств.

$$\sigma_{ij}^* = \frac{1}{V} \int \sigma_{ij} dV \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij}^* = \frac{1}{V} \int \varepsilon_{ij} dV, \quad (5)$$

где ε_{ij}^* – тензор макроскопических деформаций, σ_{ij}^* – тензор макроскопических деформаций.

Значения осредненных полевых тензоров зависят не только от координаты точки тела V , вокруг которой выделен элементарный макрообъем, но и от размера макрообъема.

Макроскопические уравнения равновесия

$$\sigma_{ij}^*(\vec{r}) = 0 \quad (6)$$

Геометрические уравнения

$$\varepsilon_{ij,j}^*(\vec{r}) = \frac{1}{2}[u_{i,j}^*(\vec{r}) + u_{j,i}^*(\vec{r})] \quad (7)$$

Уравнения в граничных условий

$$u(\vec{r})|_{\Gamma_x} = u_{0i}(\vec{r}) \quad (8)$$

Физические уравнения

$$\sigma_{ij}^* = f_{ij}^*(a_{kl}^*, \varepsilon_{kl}^*) \quad (9)$$

Уравнения, связывающие нормальные напряжения и линейные деформации, содержат четыре упругие константы и имеют вид

$$\varepsilon_{11}^* = \frac{1}{E_{\perp}^*} \sigma_{11}^* - \frac{\nu_{\perp\perp}^*}{E_{\perp}^*} \sigma_{22}^* - \frac{\nu_{\perp\parallel}^*}{E_{\parallel}^*} \sigma_{33}^*, \quad (10)$$

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

$$\varepsilon_{22}^* = \frac{1}{E_{\perp}^*} \sigma_{22}^* - \frac{\nu_{\perp\perp}^*}{E_{\perp}^*} \sigma_{11}^* - \frac{\nu_{\perp\parallel}^*}{E_{\parallel}^*} \sigma_{33}^* ,$$

$$\varepsilon_{33}^* = \frac{1}{E_{\parallel}^*} \sigma_{33}^* - \frac{\nu_{\perp\parallel}^*}{E_{\parallel}^*} (\sigma_{11}^* - \sigma_{22}^*) .$$

Кроме того, модуль сдвига G_{\parallel}^* находим по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_{12}^* &= 2G_{\perp}^* \varepsilon_{12}^* , \\ \sigma_{13}^* &= 2G_{\parallel}^* \varepsilon_{13}^* , \\ \sigma_{23}^* &= 2G_{\parallel}^* \varepsilon_{23}^* . \end{aligned} \tag{11}$$

Определив напряжения и деформации во всех точках объема ячейки периодичности, соответствующие заданным макронапряжениям, можно вычислить и макроскопические модули упругости среды [6, 7].

В качестве расчетной области рассмотрим изотропный однонаправленный волокнистый композиционный материал с тетрагональной укладкой углеволокна в эпоксидной матрице (ЭДТ-10), объемная доля волокна составляет 0,45. В качестве материала для структурных дефектов возьмем железо. Все структурные элементы прочно соединены по границе раздела. Характеристики материалов взяты из [8] и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические характеристики материалов

	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Углеволокно	200	0,3
ЭДТ – 10	2,9	0,35
Железо	200	0,3

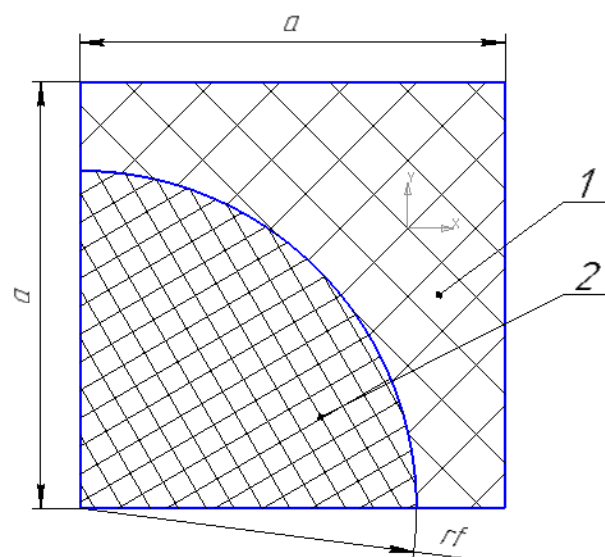


Рисунок 1 - Геометрия расчетной области, где 2 – углеволокно, 1 – эпоксидная матрица

Чтобы изучить влияние дефектов структуры на эффективные характеристики материала, рассмотрим три случая: материал без дефектов, с одним и с двумя структурными дефектами. Первым шагом строим геометрию (рисунок 1), задавая свойства материала и его характеристики. Принимаем граничные условия в перемещениях $u_x = 0,01 \cdot a$ для расчета модуля Юнга и $u_x = 0,01 \cdot a$, $u_y = 0,01 \cdot a$ для расчета модуля сдвига, где a – характерный размер длины ячейки периодичности. Затем разбиваем конструкцию на конечные элементы (рисунок 2- рисунок 4).

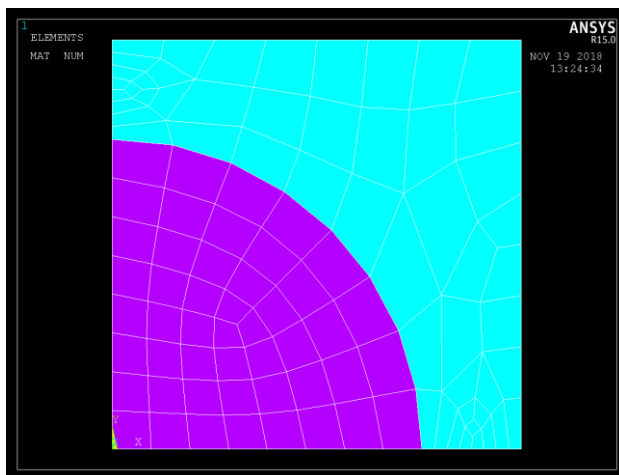


Рисунок 2 - Элемент конструкции без дефектов, разделенный на конечные элементы

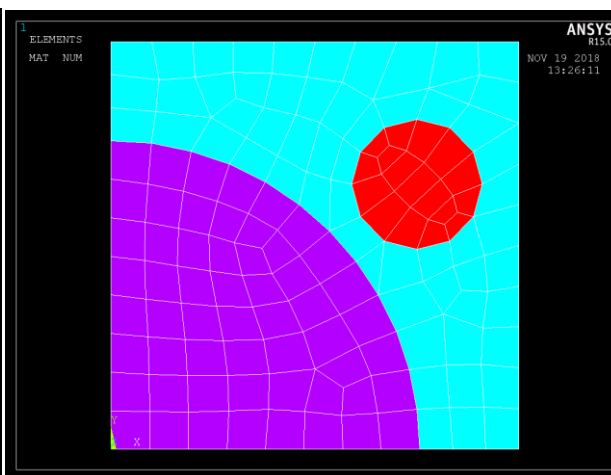


Рисунок 3 - Элемент конструкции с одним дефектом, разделенный на конечные элементы

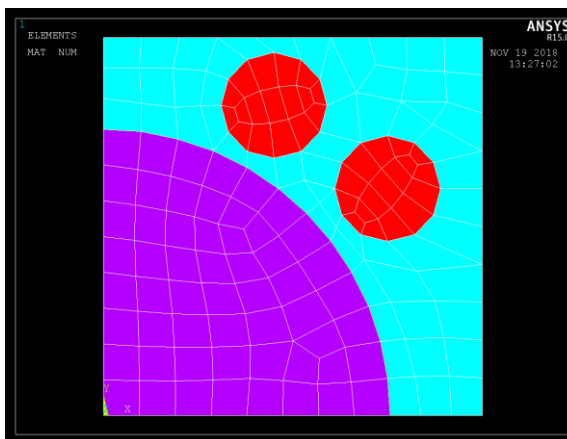


Рисунок 4 - Элемент конструкции с двумя дефектами, разделенный на конечные элементы

Анализируя полученные данные в системе ANSYS и подставляя их в формулы (6)-(11), получаем значения для E_{\perp}^* и G_{\perp}^* .

Таблица 2 – Результаты расчетов

	Без дефектов	1 структурный дефект	2 структурных дефекта
E_{\perp}^* , ГПа	6,981261	8,525159	8,90780
G_{\perp}^* , ГПа	1,625220	2,151682	2,76174

Вывод: произведен расчет однонаправленного волокнистого углепластика. Учтено влияние количества дефектов на эффективные упругие характеристики. Наличие структурных включений приводит к увеличению значений поперечных модуля Юнга и модуля сдвига. Количественно изменение значений можно выразить в процентном соотношении: один структурный дефект приводит к увеличению значения модуля Юнга на 22%, модуля сдвига на 32%; два структурных дефекта на 28% и 70% соответственно в сравнении с бездефектным состоянием материала. Такую большую разницу в показаниях можно объяснить тем, что характеристики матрицы значительно отличаются от свойств волокна и дефектов.

Предоставленные в статье результаты получены в рамках научно-исследовательской практики [7]

Список литературы

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»/ Е.Н. Каблов //Авиационные материалы и технологии. — 2015. — №1 (34). — С. 3-33.
 2. Гришина О.И. Аспекты применения высокопрочных и высокомодульных волокнистых металлических композиционных материалов авиационного назначения (обзор)/ О.И. Гришина, В.Н. Кочетов, А.А. Шавнев, В.М. Серпова //Труды ВИАМ. 2014.— №10. — С. 5
 3. Платонов А.А. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега / А.А. Платонов, М.И. Душин // Труды ВИАМ.— 2015.— №11.— С. 6.
 4. Аношкин А.Н. Расчет напряженно-деформированного состояния пластины из полимерных композиционных материалов с дефектом в виде расслоения / А.Н. Аношкин, П.В. Писарев, В.Ю. Зуйко, М.А. Аликин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.— 2015. — С. 18.
 5. Чекалкин А.А. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов /, А.А. Чекалкин, А.А. Паньков.— Пермь : Изд-во ПГТУ, 1999 .— 151 с.
 6. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций./ Ю.В. Соколкин [и др.].— М.: Наука, Физматлит, 1996.— 237с.
 7. Макарова Е.Ю. 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.
 8. Структурно-механические свойства высокопрочных углеродных волокон/ Литвинов В. Б [и др.]// Композиты и наноструктуры. — 2011. — №3.— С. 39-50.
-