

УДК 620.18

**ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕПЛООВОГО
РАСШИРЕНИЯ ОТ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ВОЛОКНА В
ОДНОНАПРАВЛЕННОМ БОРОПЛАСТИКЕ**

Матушкин А.А.

Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Садилова Е.А.

Студентка 4 курса, Аэрокосмический факультет

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

Аннотация: В данной статье проводится исследование температурной зависимости коэффициента линейного теплового расширения боропластика от объемной доли волокна, что очень важно для конструкционных материалов, которые могут применяться при высоких температурах, например в ракетостроении и авиастроении. Исследование проводится с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Найдены значения коэффициента линейного теплового расширения и построен график его зависимости от объемной доли волокна. Получен вывод, что зависимость является нелинейной. Обнаружено, что при нулевом содержании волокна коэффициент теплового расширения становится таким же, как и у матрицы.

Ключевые слова: композиционный материал, борные волокна, боропластик, эпоксидная смола, коэффициент линейного теплового расширения, метод конечных элементов, программный комплекс ANSYS.

***THE DEPENDENCE OF THE COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL
EXPANSION OF THE VOLUME FRACTION OF FIBER IN
UNIDIRECTIONAL BOROPLASTIC***

Matushkin A.A.

Student 4 course, Aerospace faculty

Department of "Mechanics of composite materials and structures"

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Sadilova A.A.

Student 4 course, Aerospace faculty

Department of "Mechanics of composite materials and structures"

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Annotation: This article studies the temperature dependence of the coefficient of linear thermal expansion of boroplastics on the volume fraction of the fiber, which is very important for structural materials that can be used at high temperatures, for example in rocket and aircraft engineering. The research is carried out using the finite element method in the ANSYS software package. The values of the coefficient of linear thermal expansion are calculated and a graph of its dependence on the volume fraction of the fiber is constructed. It is concluded that

the dependence is nonlinear. It was found that at zero fiber content, the coefficient of thermal expansion becomes the same as that of the matrix.

Keywords: composite material, boroplastic, boron fibers, epoxy resin, linear thermal expansion coefficient, finite element method, ANSYS software package

Коэффициент линейного теплового расширения (сокр. КЛТР) является одной из наиболее значимых характеристик твердых тел. Исследование температурной зависимости в настоящее время очень важно для конструкционных материалов, которые могут применяться при высоких температурах. Например, в ракетостроении и авиастроении требуются КМ с определенным набором химических и физических характеристик, в том числе, необходимым критерием является стойкость к высоким температурам. Данные, полученные в ходе исследования, могут быть использованы и при определении ряда других теплофизических характеристик.

Композиционный материал (сокр. КМ) или композит – это искусственно созданный неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих и связующей их матрицы), различающихся по физическим и химическим свойствам, которые в совокупности дают новые специфические свойства. К компонентам предъявляют следующие требования: должны быть хорошо совместимы друг с другом и не вступать в реакцию, не должны растворяться или иным другим способом поглощать друг друга. Механическое поведение композита определяется из соотношения свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочности связи между ними. Эффективность и пригодность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, обеспечивающих

прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик [2].

Свойства композиционных материалов зависят от набора компонентов, их сочетания, прочности связи и количественного соотношения между ними. Армирующие компоненты используются разнообразные и могут быть представлены в виде лент, волокон, нитей, жгутов или многослойных тканей. Связующее, второй компонент композиционных материалов, применяется разнообразное. Оно необходимо для создания прочной связи на межатомном уровне. Объемная доля волокна - это процентное соотношение волокна и связующего в элементарной ячейке объема. При изменении объемной доли волокна, существенно меняются характеристики, поэтому следует зафиксировать эту разницу и проиллюстрировать зависимость.

КМ с борными включениями используются не часто, в силу сложности и дороговизны процесса изготовления. Боропластики – это композиции из полимерного связующего и упрочнителя – борных волокон. Для изготовления бороволокнитов используют модифицированные полиамидные и эпоксидные связующие. Бор углеродные материалы отличаются от повышенной жаростойкостью, что связано с образованием на поверхности изделий сплошной, самовосстанавливающейся борной пленки, обладающей повышенной термостойкостью и твердостью карбидной фазы. Волокна могут быть представлены в виде мононитей или в виде жгутов, оплетенных вспомогательной стеклянной нитью, либо лент, в которых борные нити переплетены с другими нитями. Благодаря большой твердости нитей, материал имеет высокие механические свойства и большую стойкость к агрессивным условиям среды. [7]. Изделия из борных материалов способны длительное время работать на воздухе при темпер. до 1500 °С, выдерживают

многократные резкие теплосмены от 20 °С до 2350 °С и практически не смачиваются расплавленными цветными металлами. Потенциально КМ с борными волокнами обладают превосходными свойствами, поэтому возникает необходимость проведения исследования КЛТР с целью внедрения боропластиков в производство элементов конструкций для отраслей промышленности.

Данная работа посвящена нахождению зависимости коэффициента линейного теплового расширения боропластика от объемной доли волокна. Результаты получены при проведении научно-исследовательской практики [6]. Для расчёта берется однонаправленный боропластик, состоящий из борных волокон и эпоксидной матрицы ЭДТ- 10, находящийся в состоянии всестороннего сжатия. Расчёты коэффициента Пуассона, модуля Юнга, модуля объемного сжатия и коэффициента теплового расширения проводятся по теоретическим формулам, а расчёт полей напряжений и деформаций в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS [3].

Для расчёта возьмем однонаправленный боропластик с тетрагональной укладкой цилиндрических волокон.

Свойства борных волокон:

$$E_f = 4.00 * 10^{11} \text{ Па}, \nu_f = 0.25, \alpha = 7 * 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}};$$

Свойства эпоксидной смолы:

$$E_f = 2.91 * 10^9 \text{ Па}, \nu_f = 0.365, \alpha = 5.5 * 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}};$$

Объемные доли, используемые в расчетах, взяты в диапазоне: 10-90% с шагом в 10%.

В основу расчетов положена статическая краевая задача для структурно- неоднородного тела V с границей Γ [1], состоящая из системы уравнений и граничных условий (1):

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j}(r^{\rightarrow}) = 0 \\ \sigma_{ij,j}(r^{\rightarrow}) = C_{ijmn}(r^{\rightarrow})\varepsilon_{mn}(r^{\rightarrow}) \\ \varepsilon_{ij}(r^{\rightarrow}) = 12[u_{i,j}(r^{\rightarrow}) + u_{j,i}(r^{\rightarrow})] \\ u_i(r^{\rightarrow})|_{\Gamma_\chi} = \chi_i(r^{\rightarrow}) \end{cases} \quad (1)$$

Воспользуемся программным комплексом ANSYS для расчета полей напряжений и деформаций в композитном материале [4;5]. Задача решается на одной ячейке периодичности. Граничные условия в перемещениях задавались следующим образом $U_x = U_y = 0.01$ метра (Рис.1).

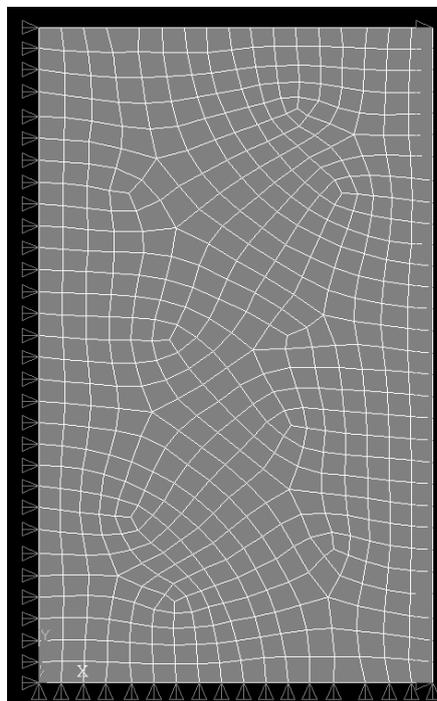


Рис.1 Конечно – элементарная сетка с заданными граничными условиями

Из уравнений, связывающих нормальные напряжения и линейные деформации (2), выражаем эффективный модуль объемного сжатия (3), при $\sigma_{11}^* = \sigma_{22}^*, \varepsilon_{11}^* = \varepsilon_{22}^*, \varepsilon_{33}^* = 0$.

$$\frac{1}{2}(\sigma_{11}^* + \sigma_{22}^*) = K^*(\varepsilon_{11}^* + \varepsilon_{22}^*) + l^* \varepsilon_{33}^* \quad (2)$$

$$K^* = \frac{\sigma_{11}^* + \sigma_{22}^*}{2 * (\varepsilon_{11}^* + \varepsilon_{22}^*)} \quad (3)$$

Для характеристики сокращений плоскости $r_1 0 r_2$, вычислим коэффициент Пуассона (4).

$$\nu_{\perp\parallel}^* = \left(\frac{\nu_f - \nu_m}{\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_m}} \right) * \left(\frac{1}{K^*} - \frac{\nu_f}{K_f} - \frac{\nu_m}{K_m} \right) + \nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m \quad (4)$$

Находим модуль Юнга в направлении армирования, для этого используем формулу (5).

$$E_{\parallel}^* = E_f \nu_f + E_m \nu_m \quad (5)$$

Вычислив нужные нам значения, подставляем их в формулу (6). Получаем коэффициент теплового расширения в направлении $0 r_3$.

$$a_{\parallel}^* = a_f \nu_f + a_m \nu_m + \frac{a_f - a_m}{\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f}} \left[\frac{3(1 - 2\nu_{\perp\parallel}^*)}{\frac{\nu_f}{K_f} - \frac{\nu_m}{K_m}} E_{\parallel}^* - \frac{\nu_f}{K_f} - \frac{\nu_m}{K_m} \right] \quad (6)$$

На основе полученных значений построен график зависимости коэффициента теплового расширения от объемной доли волокна (Рис.2).

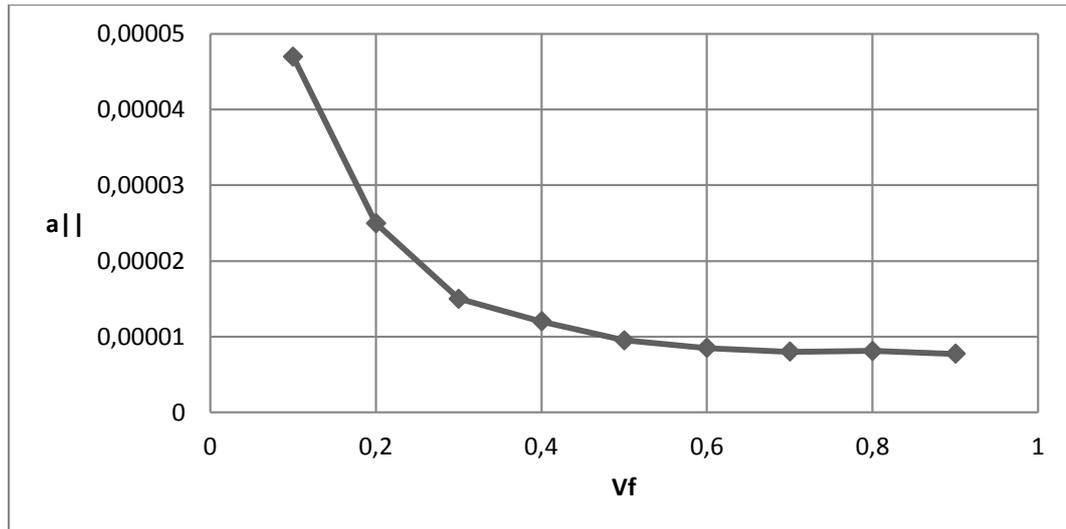


Рис. 2 Зависимость коэффициента теплового расширения в направлении Oz от объемной доли волокна

Вывод:

1. В ходе работы была получена нелинейная зависимость коэффициента теплового расширения. Это означает, что у материала существенно «подсакаивают» характеристики с уменьшением/увеличением объемной доли волокна.

2. При анализе расчетов выявлено, что с увеличением объемной доли волокна коэффициент теплового расширения композиционного материала стремится к значению, которое соответствует коэффициенту теплового расширения для волокна.

3. Обнаружено, что при нулевом содержании волокна, коэффициент теплового расширения становится таким же, как и у матрицы [8].

Библиографический список

1. Вильдеман В.Э., Зайцев А.В. О численном решении краевых задач механики деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел с

граничными условиями третьего рода // Вычислительные технологии. 1996. Т. 1, № 2, С. 64–73.

2. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Зайцев А.В. Эволюция структурных повреждений и макроразрушение неоднородной среды на закритической стадии деформирования // Механика композитных материалов. 1997. Т. 33, № 3, С. 330–339.

3. Динамика и устойчивость композитных конструкций: учебное пособие / А. А. Чекалкин, А. Г. Котов; Пермский государственный технический университет—Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006.— 66 с.

4. Лекции по механике конструкций из композиционных материалов / А.А. Чекалкин, А.А. Паньков— Пермь: Изд-во ПГТУ, 1999.— 150 с.

5. Любин Дж., Справочник по композиционным материалам. – М.: Машиностроение, 1988. – 180 с.

6. 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

7. Композиционные материалы: В 8-ми т. Пер с англ. Под ред Л. Браутмана, Р. Крока.-М.: Машиностроение, 1978 –Т. 3. Применение композиционных материалов в технике/ Под ред. Б. Нотона, 1978, 511с., ил.

8. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. М.: Наука, 1984. – 17 с.

Оригинальность 75%