

УДК 620.18

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА
МОЛИБДЕНОВОЙ ОСНОВЕ**

Костарев А.В.

Студент 4 курса, Аэрокосмический факультет

Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация:

В данной работе исследуется взаимосвязь коэффициента линейного теплового расширения от объёмной доли матрицы ЭДТ-10 и наполнителя в виде молибденового волокна, что немаловажно для композитных материалов, потому что в технической сфере промышленности всё чаще и чаще присутствуют высокие температуры, а также требуются коррозионностойкие сплавы. Исследование проводили в программном комплексе ANSYS с помощью метода конечных элементов. Посчитана величина полей напряжений, а также деформаций армирующего материала в виде молибденового волокна с объёмно-центрированной структурой. Рассчитаны эффективные модули упругости, а также модуль сдвига, коэффициент теплового расширения в зависимости от изменения объёмной доли молибденового волокна. Получены значения эффективных свойств композитов от процентного содержания объёма волокон. Для визуализации полученных в ходе работы результатов построен график зависимостей модуля Юнга и коэффициента теплового расширения от объёмной доли волокна. В итоге получена оценка расчётов с помощью сингулярных приближений по схеме вариационных границ Фойгта-Рейса. Сделана

энтимема, что функциональная взаимосвязь, которая в ходе исследования получилась нелинейной.

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

DETERMINATION OF THE THERMAL CHARACTERISTICS OF A UNIDIRECTIONAL COMPOSITE MATERIAL BASED ON MOLYBDENUM

Kostarev A. V.

Student 4 course, Aerospace Faculty

Department of "Mechanics of Composite Materials and Structures»

Perm National Research Polytechnic University,

Perm, Russia

Annotation:

In this paper, we study the relationship between the coefficient of linear thermal expansion from the volume fraction of the EDT-10 matrix and the filler in the form of molybdenum fiber, which is not unimportant for composite materials, because high temperatures are increasingly present in the technical field of industry. The study was carried out in the ANSYS software package using the finite element method. The magnitude of the stress fields and deformations of the reinforcing material in the form of a molybdenum fiber with a volume-centered structure is calculated. The effective elastic modulus, as well as the shear modulus, and the coefficient of thermal expansion are calculated depending on the change in the volume fraction of the molybdenum fiber. The values of the effective properties of composites as a percentage of the fiber volume are obtained. To visualize the results obtained in the course of the work, a graph of the dependences of the Young's modulus and the coefficient of thermal expansion on the volume fraction of the fiber is constructed. As a result, we estimate the calculations using singular

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

approximations according to the Voigt-Reis variational boundary scheme. The entymeme is made that the functional relationship, which in the course of the study turned out to be nonlinear.

Keywords: composite material, molybdenum fibers, molybdenum, epoxy resin, coefficient of linear thermal expansion, finite element method, ANSYS software package.

Композиционные материалы — это материалы, состоящие из двух или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих и связующей их матрицы) и обладающие свойствами, отличными от суммарных свойств их составляющих компонентов. Компоненты композитов не должны растворяться или иным способом поглощать друг друга. Они должны быть хорошо совместимы. Свойства композиционных материалов нельзя определить только по свойствам компонентов, без учёта их взаимодействия [2].

Молибденит люди узнали достаточно давно. Схожесть с галенитом и графитом обыграло плохую шутку. Все три минерала именовали идентично — Molybdaena. Молибден — металл, довольно редкий. В природе его найти в чистом виде невозможно, и можно получить только путём термохимических реакций. Молибден относится к классу тугоплавких металлов, что делает его применение уникальным в сферах, связанных с высокими диапазонами температур. Достоинства данного металла заключается в том, что, у него высокая удельная прочность и модуль упругости, прекрасная термостойкость, устойчивость к коррозии, а также низкий коэффициент расширения при нагреве.

Применяется молибден в следующем:
- большую часть данного металла используется в радиоэлектронике

- возрастает применение в авиатехнике: для обшивки ракет и капсул, в соплах ракетных двигателей, а также в ракетах на твердом топливе.

- Распространено использование молибдена и его сплавов в атомной энергетике, в отрасли трубопроводов охлаждения, оболочек тепловыделяющих монтажных сборок.

- Больше $2/3$ изготовленного материала используют в металлургии, как легирующую примесь к стали.

В представленной публикации исследуются соотношения эффективных характеристик теплового линейного расширения от объемного содержания волокон молибдена. В программном комплексе ANSYS высчитываются напряжения и деформации в периодической ячейке выбранного материала, после чего проводится вывод полученных значений с помощью вариационных границ Фойгта-Рейса.

Для расчёта берётся однонаправленный молибденовый композиционный материал, состоящий из молибденовых волокон и эпоксидной матрицы ЭДТ-10, находящийся в состоянии всестороннего сжатия. Расчёты модуля Юнга, коэффициента Пуассона, модуля объемного сжатия и коэффициента теплового расширения проводятся по теоретическим представленным формулам, а расчёт напряжений, в том числе и деформаций в программе конечно-элементного анализа ANSYS [3].

Постановка задачи

Данная публикация нацелена на определение тепловых характеристик однонаправленного молибденового композиционного материала с тетрагональной структурой. Матрица взята марки ЭТД-10, армирующим элементом композиционного материала будут являться изотропные молибденовые волокна. Работа выполнена в рамках НИРС с

соответствующими указаниями [8]. Рассмотрим задачу для стохастического однородного тела объёмом V с границей Γ , состоящую из замкнутой системы уравнений:

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

$$\begin{cases} u_i(\vec{r})|_{\Gamma} = u_i^0 \\ u_j(\vec{r})|_{\Gamma} = u_j^0 \end{cases} \quad (2)$$

где C_{ijmn} – тензор модулей упругости; ε_{mn} – тензор малых деформаций Коши; $u_i(\vec{r})$, $u_j(\vec{r})$ – структурные перемещения, заданные на границе Γ ; u_i^0 , u_j^0 – заданные вектора перемещений. [6]

Практическая часть в ANSYS

Воспользуемся программным комплексом ANSYS для нахождения величины напряжений и деформаций в композитном материале [6;7]. Поставленная задача решается на одной ячейке периодичности. Граничные условия в перемещениях задавались следующим образом $U_x = U_y = 0.01$ метра (Рис.1).

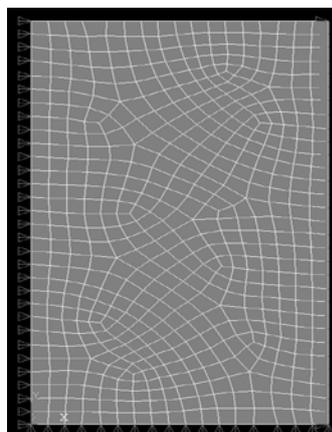


Рис.1 Конечно – элементарная сетка с заданными граничными условиями (Авторская разработка)

Физико-механические характеристики компонентов структуры

Физико-механические характеристики компонентов стеклопластика представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Физико-механические характеристики компонентов композиционного материала на основе молибденовых волокон

Характеристика материала	Изотропное молибденовое волокно	Эпоксидная матрица ЭДТ-10
Коэфф. Пуассона ν	0,3	0,356
Модуль сдвига G , ГПа	122	1,073
Модуль объемного сжатия K , ГПа	274,4	3,368
Коэф. линейного температурного расширения α , K^{-1}	0,00000498	0,000065
Модуль Упругости(Юнга) E , ГПа	329,3	2,91

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).

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

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

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

В выражении (5) для разных оценок значения s различно.

Для оценки Рейса

$$s = \frac{G_m G_f}{G_f V_m + G_m V_f}$$

Для оценки Фойта

$$s = G_f V_f + G_m V_m$$

Вычислив нужные нам значения, подставляем их в формулу (6).
Получаем коэффициент линейного теплового расширения.

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

Подставив все имеющиеся значения в представленные выше формулы, строим графики зависимостей эффективных характеристик материала, изображённого на рисунке 2.

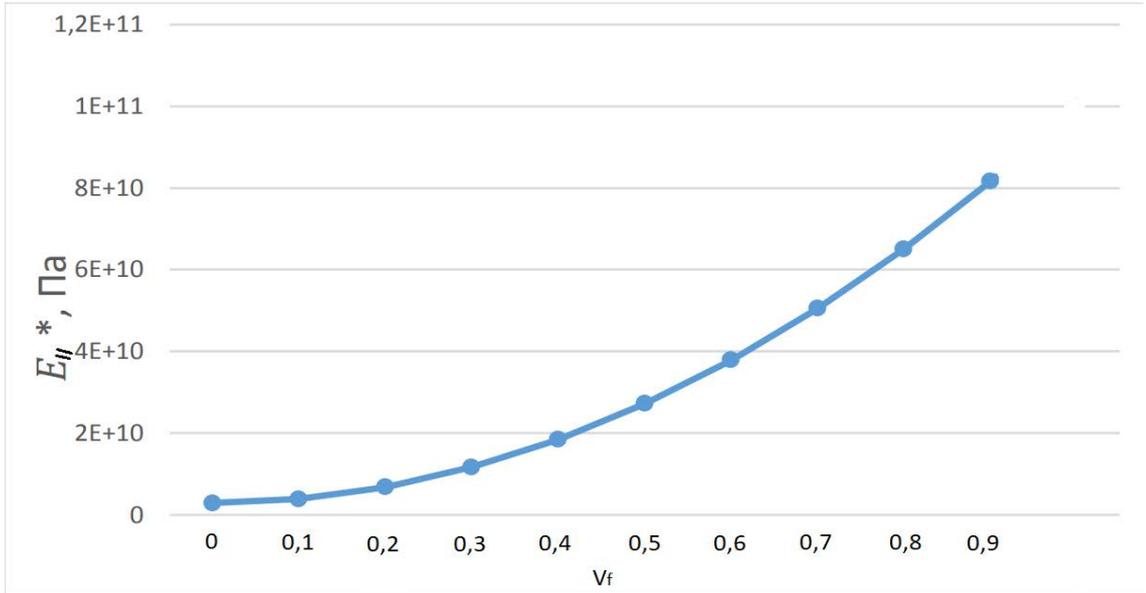


Рис. 2 График зависимости модуля Юнга от объемной доли молибдена (Авторская разработка)

На основе полученных значений построен график зависимости коэффициента теплового расширения от объемной доли волокна молибдена представленных на рисунке 3.

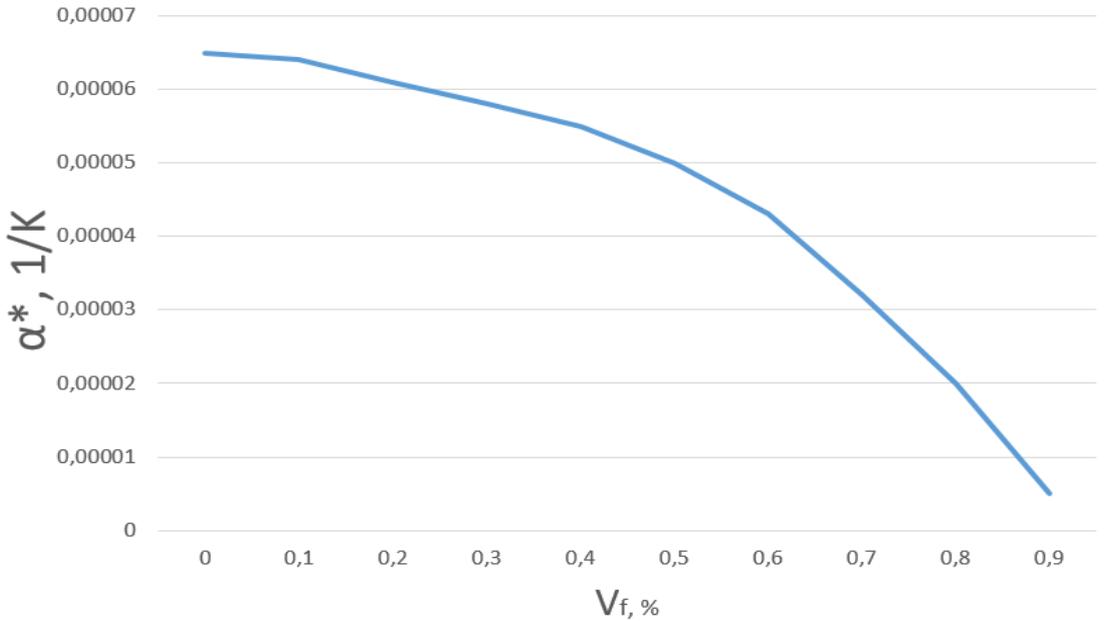


Рис. 3 График зависимости коэффициента теплового расширения от объемной доли волокна молибдена (Авторская разработка)

Вывод:

1. В процессе поставленной задачи была выведена нелинейная зависимость коэффициента теплового расширения. Это говорит о том, что у материала значительно изменяются характеристики с уменьшением или увеличением объемной доли молибденового волокна в композиционном материале.

2. Произведено вычисление модуля сдвига, модуля Юнга, коэффициента теплового расширения при различных объёмных долях волокна молибдена. Выведена корреляция эффективных свойств композитов от объемного содержания волокон молибдена в композиционном материале.

3. Получена оценка значений способом вариационных границ Фойгта–Рейса, и по этим результатам эффективных свойств не выходят за пределы нижней вариационной границы, следовательно, поставленная задача выполнена правильно.

4. При проверке расчетов выявлено, что с повышением объёмной доли волокна молибдена коэффициент теплового расширения композиционного материала устремляется к значению, которое совпадает коэффициенту теплового расширения для волокна молибдена.

5. Обнаружено, что при нулевом значении объемной доли волокна, коэффициент теплового расширения будет таким же, как и у матрицы [9].

Библиографический список

1. Агте К., Вацек И. Вольфрам и молибден. - М.: Энергия, 196.-229 с.
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. Зеликман А. Н. Молибден. - М.: Металлургия, 1970. – 440 с.

5. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: «МИСИС», 1999. -416 с.

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

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

8. 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.

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

Оригинальность 81%