

УДК 621.3.082.61  
DOI 10.17513/snt.39859

## ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ

Маматов Э.У., Ташполотов Ы.

*Ошский государственный университет, Ош, e-mail: mamatov.elbek@list.ru, itashpolotov@mail.ru*

В работе рассмотрены некоторые виды композитных материалов, их свойства и области их применения. В качестве примера приводится многослойная композитная оболочка, подвергнутая воздействию источника тепла с направленной лучевой мощностью. Анализируются тепловые свойства многослойной композитной оболочки с тепловой и структурной точек зрения, основанных на послойной теории, используемой для моделирования структурной части оболочки. Изучено влияние направления лучевого потока, ортотропии материала и толщины пластины на характер термических напряжений и деформаций многослойной композитной оболочки при максимальной температуре. Приведены краткие сведения о коэффициентах теплопроводности базальтовых волокон и высокодисперсных материалов. Рассматривается геометрия многослойной композитной оболочки определенной формы и последовательности укладки слоев. Уточняются высота, толщина и ширина многослойной композитной оболочки. Рассмотрены свойства материала волокна и матрицы, а также общие параметры композитной пластины, теплопередачи и луча в программе моделирования COMSOL Multiphysics. Отображены формула расчета коэффициента теплопроводности и правила смешивания перпендикулярно направленных многослойных композитных волокон. Проведено компьютерное моделирование объектов и физических процессов при получении численных результатов и прогнозировании поведений объектов в различных средах.

**Ключевые слова:** коэффициент теплопроводности, базальтовое волокно, тепловое расширение, многослойный композит, ортотропия, оболочка

## THERMAL EXPANSION OF A MULTILAYER COMPOSITE SHELL

Mamatov E.U., Tashpolotov Y.

*Osh State University, Osh, e-mail: mamatov.elbek@list.ru, itashpolotov@mail.ru*

The paper considers some types of composite materials, their properties and their applications. As an example, a multilayer composite shell exposed to a heat source with directed beam power is given. The thermal properties of a multilayer composite shell are analyzed from a thermal and structural point of view, based on the layered theory used to model the structural part of the shell. The influence of the direction of the beam flux, the orthotropy of the material and the thickness of the plate on the nature of thermal stresses and deformations of a multilayer composite shell at maximum temperature has been studied. Brief information is provided on the thermal conductivity coefficients of basalt fibers and highly dispersed materials. The geometry of a multilayer composite shell of a certain shape and sequence of layers is considered. The height, thickness and width of the multilayer composite shell are specified. The properties of the fiber and matrix material, as well as the general parameters of the composite plate, heat transfer and beam in the COMSOL Multiphysics modeling program are considered. The formula for calculating the thermal conductivity coefficient and the rules for mixing perpendicularly directed multilayer composite fibers are displayed. Computer modeling of objects and physical processes is carried out in obtaining numerical results and predicting the behavior of objects in various environments.

**Keywords:** thermal conductivity coefficient, basalt fiber, thermal expansion, multilayer composite, orthotropy, symmetry

Композитные материалы часто используются в конструкциях, где способность адаптировать такие свойства, как жесткость и прочность, делает их привлекательными по сравнению с традиционными инженерными материалами. В дополнение к конструкционным применениям композиты также используются в тех областях, где важны как тепловые, так и структурные свойства. Следовательно, сопряженный термоструктурный анализ тонких структур становится все более важным с точки зрения моделирования [1, с. 1–16].

В данной работе многослойная композитная оболочка, подвергнутая воздействию источника тепла с направленным лучом, анализируется с тепловой и структурной точек зрения. Подход, основанный

на теории слоев, используется для моделирования структурной части оболочки. Цель работы – проведение расчета коэффициента теплопроводности на основе правила смешивания перпендикулярно направленных углеродных волокон в эпоксидной смоле; введение свойств углеродного волокна и эпоксидной смолы в компьютерную программу моделирования и симуляции; изучение влияния положения источника тепла на профили напряжений и деформаций.

Одной из основных характеристик композиционных, теплоизоляционных и других видов материалов является коэффициент теплопроводности. Коэффициент теплопроводности волокнистого, высокодисперсного материала зависит от интенсивности тепло-, и массообменных процессов в композитном

материале и их протекания, а также он зависит от плотности волокон [2, с. 75–81].

Композитный волокнистый материал из базальтовых горных пород выделяется высокой прочностью, низкой горючестью и неплохой шумоизоляцией. В качестве примера можно рассмотреть базальтовый мат шириной 10 см и с плотностью 100 кг/м<sup>3</sup>, что равносильно теплоизоляции кирпичной стены толщиной 1,20 м [3, с. 15–24; 4, с. 416–422].

С увеличением размера волокон композита теплопроводность увеличивается. В высокодисперсных волокнах базальта размером 5–15 мкм диаметр микропор между волокнами возрастает, что приводит к повышению конвекционных воздушных потоков. Теплоизоляционные материалы на основе базальтовых волокон обладают коэффициентом теплопроводности 0,032–0,048 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [5].

Эффективной средой для численной реализации целей данной работы является компьютерная программа COMSOL Multiphysics, позволяющая смоделировать и симулировать физические процессы [6, с. 277].

#### Определение модели

Геометрия многослойной композитной оболочки состоит из шести плоских слоев Н-образной формы, уложенных друг на друга. Высота секции составляет 25 см, толщина полотна – 15 см, ширина фланца – 25 см, толщина фланца – 5 см. Геометрия многослойной композитной оболочки показана на рис. 1.

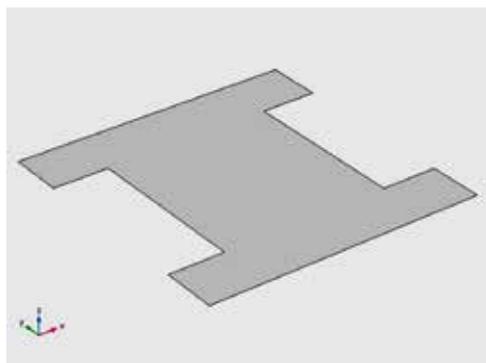


Рис. 1. Геометрия многослойной композитной оболочки

#### Последовательность укладки

Каждый слой композитной оболочки имеет толщину 0,125 мм, как показано на рис. 3. Композитная оболочка имеет [30/-45/75/-75/45/-30] последовательность укладки, как показано на рис. 2. Эта последовательность укладки является антисим-

метричной по отношению к средней плоскости композитной оболочки.

Трехмерное представление геометрии, а также первое основное направление материала, показывающее ориентацию волокон в каждом слое физической геометрии, показаны на рис. 4 и 5 соответственно.

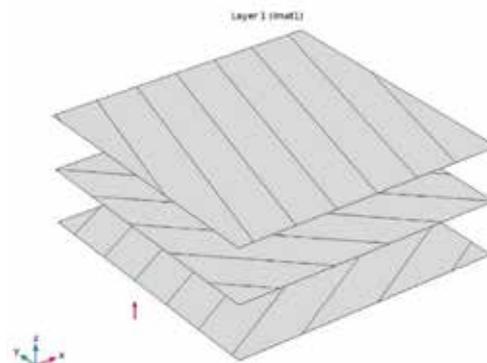


Рис. 2. Последовательность укладки [30/-45/75/-75/45/30], показана ориентация волокон в каждом слое снизу вверх

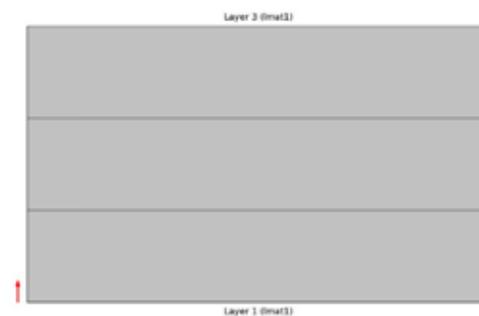


Рис. 3. Вид многослойной композитной оболочки по толщине, показывающий толщину (0,125 мм) каждого слоя

#### Свойства материала

Все слои многослойной композитной оболочки изготовлены из углеродных волокон в эпоксидной смоле. Свойства гомогенизированного ортотропного эластичного материала (матрица упругости) приведены в табл. 1. В ней представлены только ненулевые элементы матрицы эластичности.

Таблица 1

Матрица эластичности композитного материала

Матрица эластичности	Значение
$\{D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{22}, D_{23}, D_{33}, D_{44}, D_{55}, D_{66}\}$	$\{141.34, 3.35, 3.35, 10.25, 2.83, 10.25, 4.52, 2.95, 4.52\}$

Гомогенизированные ортотропные тепловые свойства многослойной композитной оболочки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Теплопроводность многослойной композитной оболочки

Теплопроводность	Значение (Вт/(м·К))
$\{k_{11}, k_{22}, k_{33}\}$	$\{6.2, 0.5, 0.5\}$

Поскольку анализ является стационарным, значения плотности и теплоемкости при постоянном давлении для многослойной композитной оболочки не влияют на результаты и устанавливаются равными единице. Все упругие и термические свойства материала задаются в системе координат многослойной композитной оболочки (локальные направления материала слоя), где первая ось совпадает с ориентацией волокна.

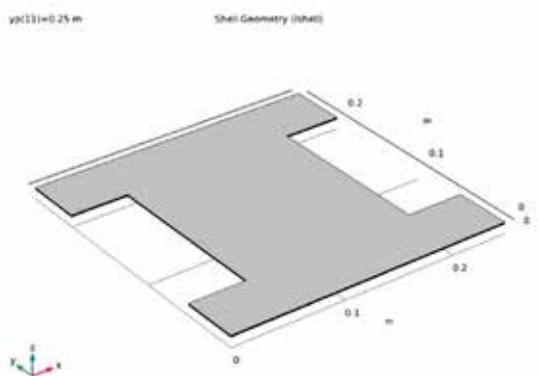


Рис. 4. Трехмерное геометрическое изображение многослойной композитной оболочки

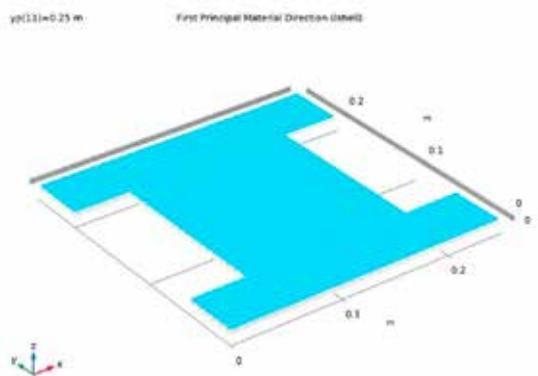


Рис. 5. Первое основное направление материала, показывающее ориентацию волокон в каждом слое физической геометрии. Угол наклона слоя используется в качестве цвета для каждого слоя

#### Коэффициент теплового расширения

Гомогенизированное значение коэффициента теплового расширения ламината для заданных свойств волокна и матричного материала рассчитываются с использованием правила смешивания. Свойства составляющих материалов, необходимые для определения коэффициента теплового расширения ламината, приведены в табл. 3.

Исходя из свойств материала, приведенных в табл. 3, коэффициенты теплового расширения для ламината в направлении волокон, а также перпендикулярно направлению волокон рассчитываются по правилу смешивания по формулам 1-3.

$$\alpha_{11} = \frac{V_f \alpha_{1f} E_{1f} + V_m \alpha_m E_m}{V_f E_{1f} + V_m E_m}, \quad (1)$$

$$\nu_{12} = \nu_{12f} V_f + \nu_m V_m, \quad (2)$$

Таблица 3

Свойства углеродного волокна и эпоксидной смолы

Свойства материала	Значение	Описание
$V_f$	0,6	Объемная доля волокна
$V_m$	0,4	Объемная доля матрицы
$E_{1f}$	230[GPa]	Модуль Юнга волокна в направлении волокна
$E_m$	4[GPa]	Модуль Юнга матрицы
$\nu_{12f}$	0,2	Коэффициент Пуассона волокна
$\nu_m$	0,35	Матричный коэффициент Пуассона
$\alpha_{1f}$	-0,6E-6[1/K]	Коэффициент теплового расширения волокна в направлении волокна
$\alpha_{2f}$	8,5E-6[1/K]	Коэффициент теплового расширения волокна перпендикулярно направлению волокна
$\alpha_m$	55E-6[1/K]	Коэффициент теплового расширения матрицы

$$\alpha_{22} = \alpha_{33} = (1 + \nu_m) V_m \alpha_m + (1 + \nu_{12f} \frac{\alpha_{1f}}{\alpha_{2f}}) V_f \alpha_{2f} - \nu_{12} \alpha_{11}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов теплового расширения слоев композитной оболочки, рассчитанные с использованием этих выражений, приведены в табл. 4. Коэффициент теплового расширения в направлении волокон на три порядка меньше, чем коэффициент, перпендикулярный направлению волокна. Это связано с тем, что углеродные волокна имеют отрицательный коэффициент теплового расширения в направлении волокон.

**Таблица 4**

Коэффициенты теплового расширения слоев композитной оболочки

Коэффициент теплового расширения	Value (1/K)
$\{\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33}\}$	$\{3,72E-8, 3,47E-5, 3,47E-5\}$

*Граничные условия и нагрузки*

К модели применяются следующие граничные условия и нагрузки:

– Конструктивные граничные условия: Края при  $X = 0$  и  $X = 25$  см фиксированы.

– Тепловые граничные условия. Температура установлена на комнатную температуру по краям при  $X = 0$  и  $X = 25$  см. Конвективный тепловой поток с коэффициентом теплопередачи  $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  наносится на нижнюю поверхность многослойной композитной оболочки (внешнюю границу раздела нижнего слоя).

– Тепловые нагрузки: На верхнюю поверхность многослойной композитной оболочки (внешнюю границу раздела верхнего слоя) наносится луч мощностью  $10 \text{ Вт}$ . Положения источника луча по оси  $x$  и  $z$  фиксируются в пространстве на расстоянии  $12,5 \text{ см}$  и  $25 \text{ см}$ , в то время как у-образное положение балки варьируется от  $0$  до  $25 \text{ см}$ . Стандартное отклонение балки принимается равным  $1/10$  от ее высоты (или  $z$ -положения), что составляет  $2,5 \text{ см}$ .

**Результаты исследования и их обсуждение**

Температурный профиль в композитной оболочке, когда источник теплового излучения находится над ее центром, показан на рис. 6. Максимальная температура наблюдается только в центре оболочки и распределяется по всем направлениям от центра. Распределение температуры также можно проверить, создав линейные графики вдоль осей  $X$  и  $Y$ , как показано на модели.

Влияние ортотропии материала и ориентации слоев проявляется в характере тепловых напряжений и деформаций, как показано на рис. 7. Общий характер тепловых напряжений аналогичен температурному профилю, показанному на рис. 6, поскольку оболочка подвергается только тепловым нагрузкам. Однако можно наблюдать интересную картину деформации, вызванную ортотропией и ориентацией слоев.

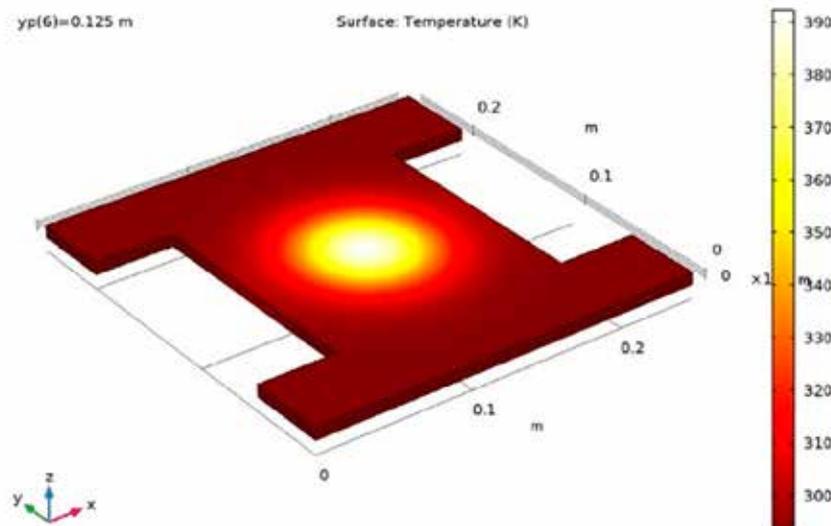


Рис. 6. Температурный профиль при  $u_y = 12,5 \text{ см}$

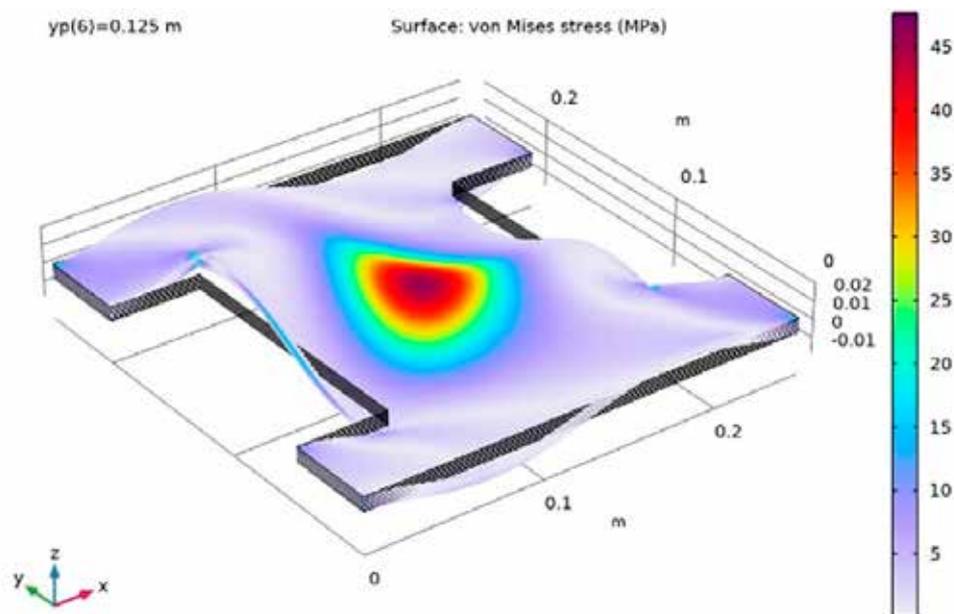


Рис. 7. Распределение напряжений фон Мизеса в многослойной композитной оболочке при  $y_p = 0,125$  м

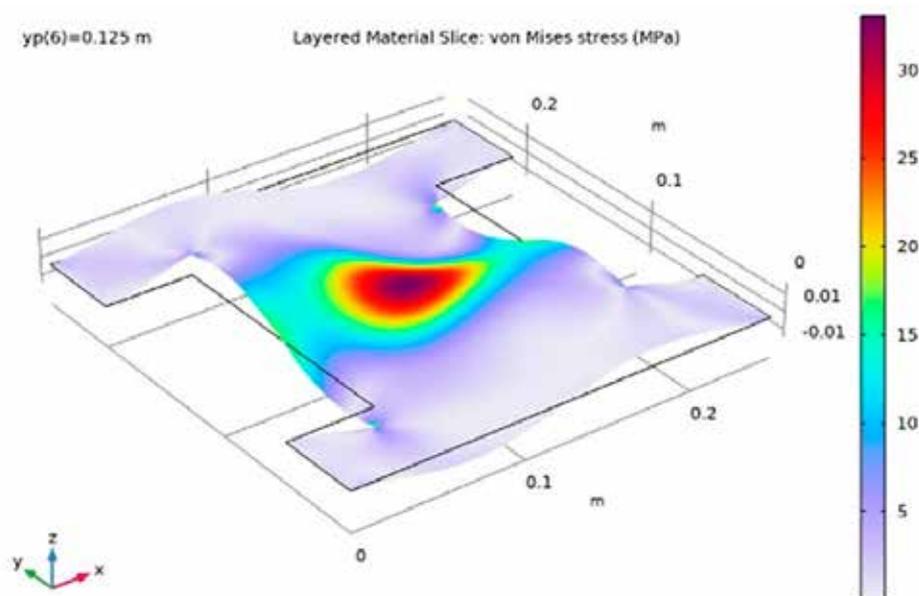


Рис. 8. Распределение напряжений фон Мизеса в средней плоскости многослойной композитной оболочки при положении балки  $(y_p) = 0,125$  м

Чтобы увидеть влияние ориентации слоев на распределение напряжений по фон Мизесу, в средней плоскости многослойной композитной оболочки создается график слоистого среза материала, как показано на рис. 8. Можно видеть, что он имеет другое распределение напряжений, а также величину по сравнению с рис. 7, на котором показано распределение напряжений для верхнего слоя.

На рис. 9 показано изменение напряжения фон Мизеса по толщине в четырех различных местах оболочки. Неравномерность напряжения по слоям видна на графике. Существует вращательная симметрия напряжений между точками, расположенными между ними.

На рис. 10–13 показаны распределения напряжений фон Мизеса и различных ком-

понентов тензора напряжений в системе координат слоистого материала. Напряжения нанесены на график в средней плоскости каждого слоя. Эффект антисимметричной укладки хорошо виден на рис. 10–12. Например, распределение напряжений в слое 1 и в слое 6 аналогично, но антисимметрично

относительно средней плоскости многослойного композитного материала.

На рис. 13 показано распределение напряжения сдвига, а также антисимметричный рисунок. Знак напряжения меняется на противоположный при сравнении верхнего и нижнего слоев из-за антисимметрии.

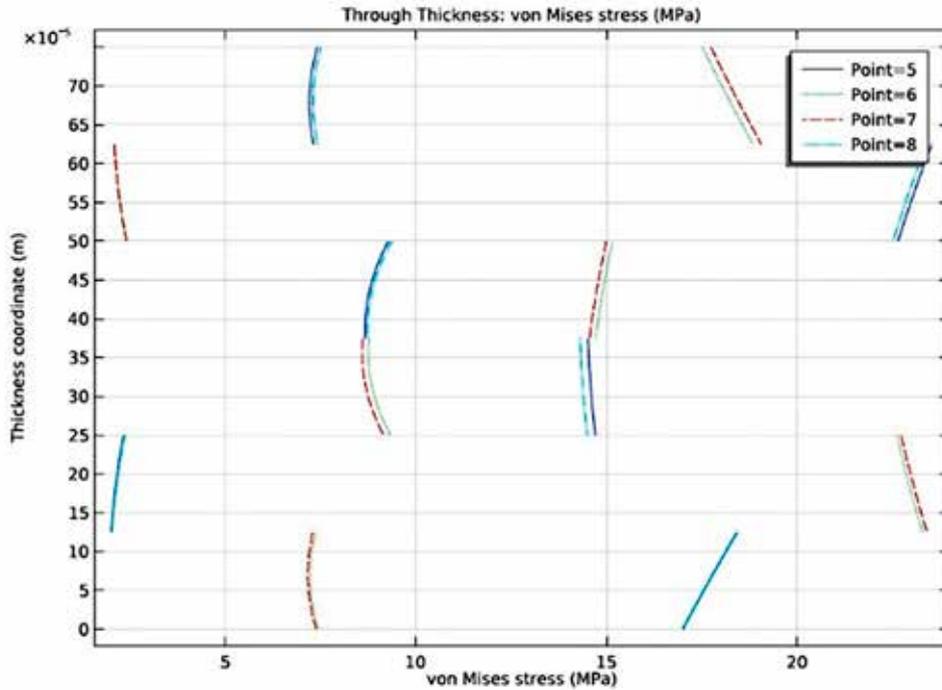


Рис. 9. Изменение напряжения фон Мизеса по толщине в выбранных точках при  $u_y = 0,125$  м

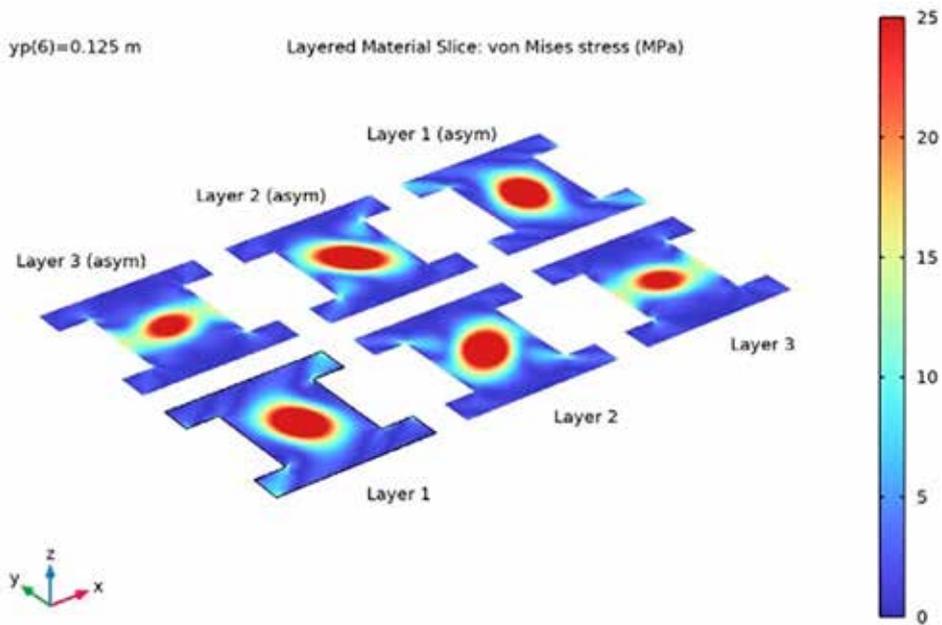


Рис. 10. Напряжение фон Мизеса в системе координат ламината в средней плоскости каждого слоя при  $u_y = 0,125$  м

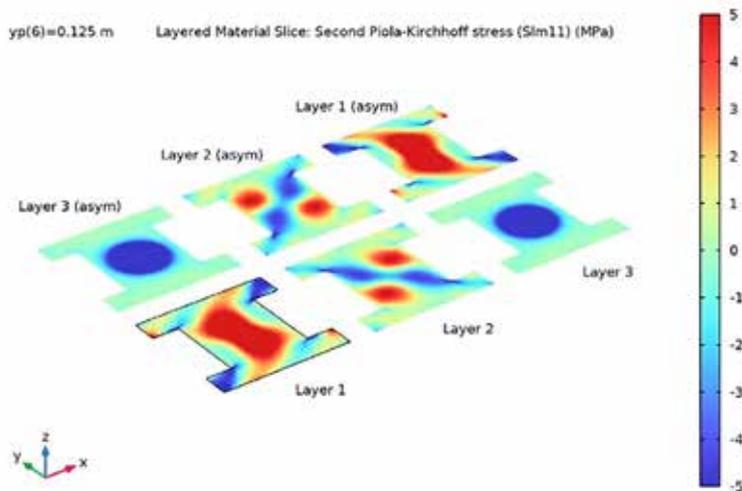


Рис. 11. Составляющая напряжения 11 (направление волокон) в средней плоскости каждого слоя при  $y_p = 0,125$  м

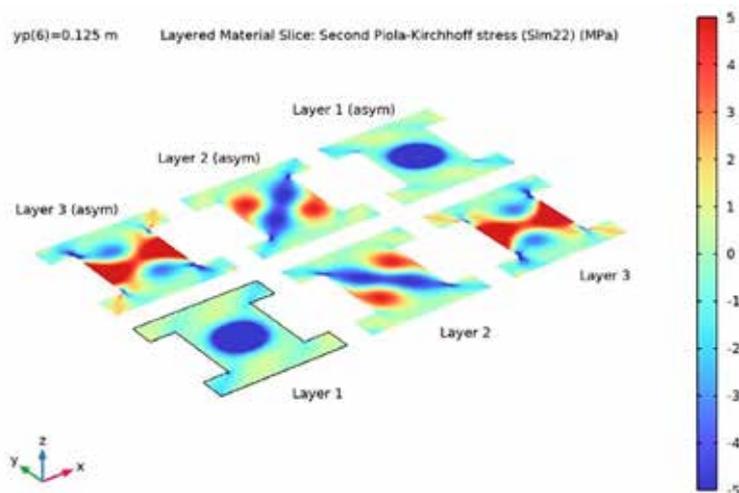


Рис. 12. Составляющая напряжения 22 (поперечная направлению волокон) в средней плоскости каждого слоя при  $y_p = 0,125$  м

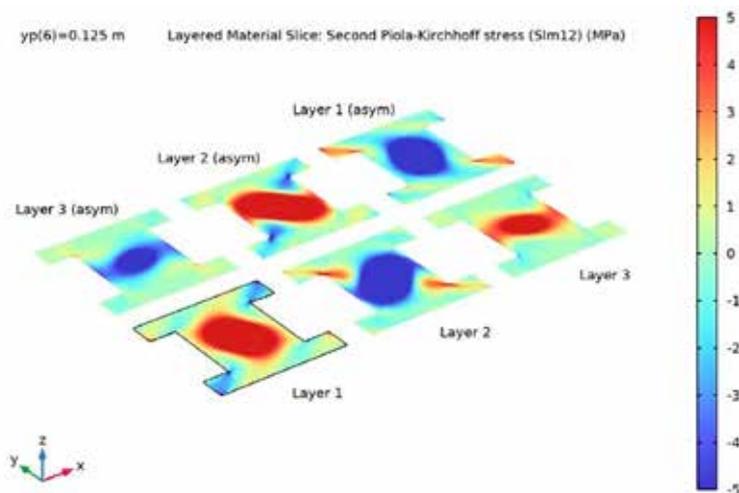


Рис. 13. Составляющая напряжения 12 (сдвиг в плоскости) в средней плоскости каждого слоя при  $y_p = 0,125$  м

### Выводы

1. Проведен расчет коэффициента теплопроводности на основе правила смешивания перпендикулярно направленных базальтовых волокон и матрицы.

2. Введены и рассмотрены свойства материала углеродного волокна и эпоксидной смолы, а также общие параметры пластины, теплопередачи и луча в программе компьютерного моделирования. Установлено, что коэффициент теплового расширения в направлении волокна на три порядка меньше, чем коэффициент, перпендикулярный направлению волокна.

3. Зафиксировано, что максимальная температура наблюдается, когда источник теплового излучения находится над центром оболочки, и она распределяется по всем направлениям, удаленным от центра. Посредством компьютерной программы продемонстрировано, что на распределение температуры также влияет направление позиции луча и толщина пластины.

4. Влияние ортотропии материала и ориентации слоев проявляется в характере тепловых напряжений и деформаций.

### Список литературы

1. Чистов А.Н., Кладов М.Ю., Пронин И.Б., Смирнов А.С. Экспериментальное определение теплопроводности композиционных материалов в широком диапазоне значений при комнатной температуре // Наука и инновации. 2019. № 9. URL: <http://engjournal.ru/articles/1920/1920.pdf> (дата обращения: 21.10.2023). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1920.

2. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. Теплопроводность композита, армированного волокнами // Новые материалы и технологии. 2013. № 5. С. 75–78.

3. Айдаралиев Ж.К., Исманов Ю.Х., Кайназаров А.Т. Влияние характеристик базальтового расплава на процесс образования волокон // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6, № 6. С. 15–24.

4. Айдаралиев Ж.К., Жолдошова Ч.К., Абдыкалык кызы Ж., Атырова Р.С. Физико-механические характеристики плавленого базальта // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8, № 9. С. 416–422.

5. Базальтовый утеплитель: характеристики, теплопроводность и свойства. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.izomat.ru/about/articles/bazaltovyy-uteplitel-kharakteristiki-teploprovodnost-i-svoystva> (дата обращения: 05.12.2023).

6. Ташполотов Ы., Маматов Э. Определение прочностных характеристик базальтового композита в COMSOL Multiphysics // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9, № 7. С. 276–285. DOI: 10.33619/2414-2948/92/39.