

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛАМИНИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Надымова Н.П., Паушкина К.К.

Научный руководитель профессор Глушков Д.О.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

С увеличением масштабов космической деятельности и потребности в более высоком уровне энергообеспечения возникают новые сложные задачи для аэрокосмической и энергетической отраслей. В связи с этим возрастает потребность в материалах, которые могут выдерживать экстремальные условия работы в космическом пространстве и обеспечивать эффективную работу энергоустановок. Одним из ключевых требований к новым материалам является их высокая прочность и устойчивость к термическим и механическим нагрузкам. Разработка материалов, способных выдерживать экстремальные температуры и давления, является приоритетной задачей для инженеров и ученых. Эти материалы должны обладать также высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к радиационному воздействию.

Таковыми свойствами обладают ламинарные композиты. Это отдельные слои, которые состоят из высокомодульных, высокопрочных волокон в полимерном, металлическом или керамическом матричном материале. Несмотря на их высокие прочностные свойства, применение таких композитов в промышленности ограничено из-за их хрупкости при низких температурах. Существуют разные способы улучшения механических свойств, например, создание металл/керамических слоистых композитов. Такие композиты являются перспективными материалами современной техники и для их широкого применения необходимо точно знать, как они ведут себя в тех или иных условиях теплообмена.

Таким образом, целью данной работы является создание физико-математической модели и программная реализация численных алгоритмов, обеспечивающих расчет свойств различных ламинированных композитов при варьировании параметров окружающей среды в широких диапазонах.

Физическая модель ламинарного композита представлена на рисунке 1.

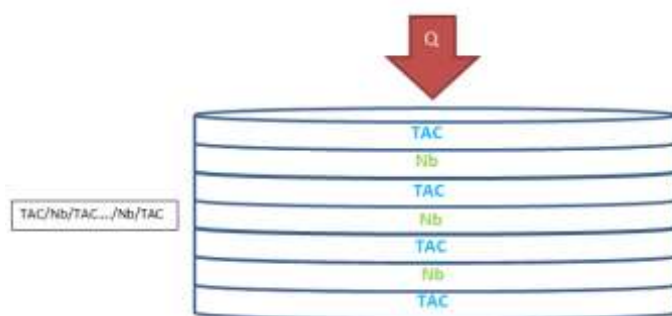


Рис. 1. Физическая модель ламинарного композита

Задача по определению температурного поля в многослойном двумерном объекте решена методом конечных разностей (МКР) на равномерной сетке при помощи неявной четырехточечной разностной схемы.

Нестационарный перенос теплоты теплопроводностью описывается уравнением Фурье-Кирхгофа, устанавливающим связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T),$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, $Q_w(x, y, z, t, T)$ – мощность внутренних источников тепловыделения, T – температура.

Математическая постановка задачи будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < L$$

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$\begin{cases} t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq L \\ x = 0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k(T_l - T) \text{ или } -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, \text{ или } -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = T, t > 0 \\ x = L: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0 \end{cases}$$

где k – коэффициент теплоотдачи, T_l – температура на левой границе, t – время, q – тепловой поток.

Физическая модель процесса представляет собой ламинированный композит, включающий слои керамики ($TAC=Ti_3Al(Si)C_2$) и ниобия (Nb). Теплофизические характеристики материалов приведены в таблице 1. Слои чередуются в одинаковой последовательности, внешние слои изготовлены из керамики TAC. В задаче варьировались количество слоев, соотношения толщин материалов и условия теплообмена с окружающей средой.

Таблица

Теплофизические свойства материалов

№	Материал	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость (T в К), Дж/(кг·К)	Теплопроводность (T в К), Вт/(м·К)
1	TAC	4400	$-392,9 \cdot \exp(-(T-273)/308,2)+913,3$	$-4,74 \cdot \exp(-(T-273)/562,7)+19,16$
2	Nb	6471,2	$256,5 \cdot \exp(0,0002 \cdot T)$	$-3 \cdot 10^{-6} \cdot T^2+0,018 \cdot T+47,85$

Зависимости времен выхода на стационар температуры внутри пластины композитного материала от соотношения толщин и количества слоев материалов представлены на рисунках 2 и 3.

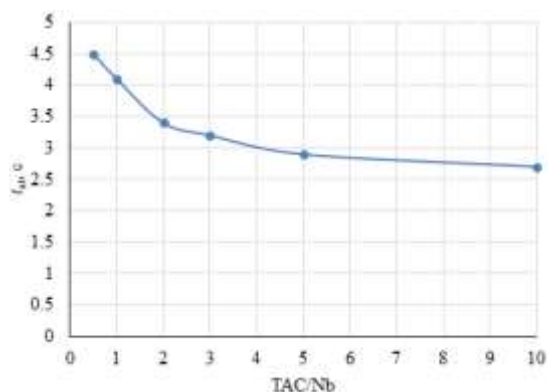


Рис. 2. Зависимость времен выхода на стационар температуры внутри пластины композитного материала (31 слой) от соотношения толщин материалов

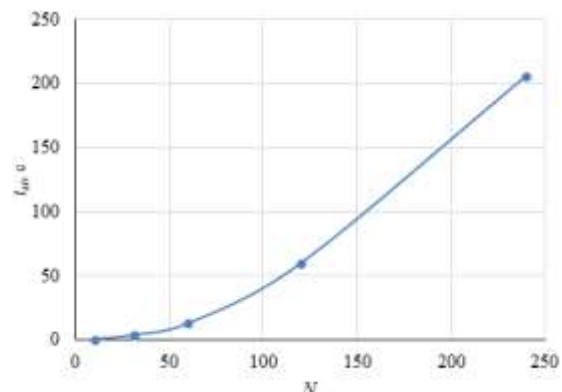


Рис. 3. Зависимость времен выхода на стационар температуры внутри пластины композитного материала от количества слоев материалов

По результатам расчетов выявлена следующая закономерность: чем выше соотношение толщин TAC/Nb, тем меньше время требуется для достижения стационарного температурного поля. Также было установлено, что увеличение количества слоев материалов приводит к увеличению времени установления стационарной температуры. Таким образом, можно сделать вывод, что скорость достижения стационарного состояния зависит не только от соотношения толщин, но и от общего количества слоев. При увеличении количества слоев теплота переносится через большее количество границ раздела материалов. На каждой границе происходят процессы теплообмена, которые задерживают распространение теплоты. Это приводит к увеличению необходимого времени для установления стационарного температурного распределения. Кроме того, важно учитывать теплофизические свойства материалов. Материалы с высокой теплопроводностью способствуют более быстрой передаче тепла и сокращают время выхода на стационар. Материалы с низкой теплопроводностью, напротив, создают большее термическое сопротивление и замедляют процесс установления стационарного состояния. Стоит также отметить, что условия теплообмена на границе системы с окружающей средой влияют на скорость установления стационарной температуры. Если система хорошо теплоизолирована, теплообмен с внешней средой минимален, и время достижения стационарного состояния будет меньше. В случае, когда система имеет значительный теплообмен с окружающей средой, установление стационарного состояния замедляется. В целом, процесс установления стационарной температуры в системе зависит от комплекса факторов, включая соотношение толщин материалов, количество слоев, теплофизические свойства материалов и условия теплообмена на границе с окружающей средой.

Таким образом, в данной работе разработана программная реализация математической модели процесса теплообмена ламинарного композита с окружающей средой при варьировании теплофизических свойств отдельных материалов, с помощью которой возможно прогнозировать время выхода температуры внутри композита на стационар при различных механизмах теплообмена.

Литература

1. Bai Y., Sun M., Cheng L., Fan S. Developing high toughness laminated HfB₂-SiC ceramics with ductile Nb interlayer // Cer. Int. – 2019. – Vol. 45, No. 16. – P. 20977-20982.