

В задаче (1) требуется определить неизвестное начальное условие по известным температурным наблюдениям:  $u(x_i, y_j, t_k) = u_{ijk}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}$ .

Решение построено с использованием следующих методов: метод параметрической идентификации с использованием двумерных линейно-непрерывными базисных функций, триангуляция области, метод переменных направлений, минимизация функционала невязки, регуляризация Тихонова, невязный градиентный спуск, параллельный блочный алгоритм прогонки, решётчатый поиск параметра регуляризации.

Разработаны алгоритм и программный комплекс, проведены вычислительные эксперименты по восстановлению начального условия описанной выше задачи. Показано, что использование графических процессоров позволяет быстрее выполнять вычисления «узких» по производительности мест в сравнении обычными многопроцессорными системами даже с учётом времени, затраченного на копирование данных между устройствами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-19-00420).*

#### Список литературы

- 1 **Формалёв, В. Ф.** Математическое моделирование сопряжённого теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами / В. Ф. Формалёв, С. А. Колесник. – М. : ЛЕНАНД, 2019. – 320 с.
- 2 **Колесник, С. А.** Метод идентификации нелинейных компонентов тензора теплопроводности анизотропных материалов / С. А. Колесник // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 2. – С. 119–132.
- 3 **Колесник, С. А.** Идентификация компонентов тензора теплопроводности анизотропных композиционных материалов / С. А. Колесник // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 111–120.
- 4 **Формалёв, В. Ф.** Моделирование сопряженного тепло-обмена в пакетах малогабаритных плоских газодинамических сопел с охлаждением / В. Ф. Формалёв, С. А. Колесник, Е. Л. Кузнецова // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 5. – С. 735.

УДК 539.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ

*Г. И. КРИВЕНЬ, А. А. ОРЕХОВ*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

В работе исследуется устойчивость модифицированных композитов, армированных волокнами с «выращенными» на их поверхности вискерсами (микро-наноструктурами) [1–5]. Отработаны аналитические и численные решения по оценке физико-механических свойств модифицированных композитов, методики проектирования и рационального выбора параметров для реализации высоких демпфирующих динамических характеристик одновременно с высокой локальной устойчивостью элементов структуры при сжатии.

На различных масштабных уровнях исследована устойчивость модифицированных композитов с возможным искривлением волокон под действием сжимающих нагрузок и влияние характеристик межфазного слоя на процесс локальной потери устойчивости.

Показано, что межфазный слой с регулируемой жесткостью позволяет не только повысить прочность, жесткость и демпфирующие свойства композита в целом (за счет повышения трансверсальной прочности), но и при одной и той же объемной доле армирующих волокон (для классического композита армирующим элементом выступает волокно, а для рассматриваемого модифицированного композита – волокно с выращенными на его поверхности наноструктурами) позволяет добиться существенно большей локальной устойчивости, определяющей характерный тип микроповреждений при сжатии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-3607.2022.1.1*

#### Список литературы

- 1 Grafting straight carbon nanotubes radially onto carbon fibers and their effect on the mechanical properties of carbon/carbon composites / Q. Song [et al.] // Carbon. – 2012. – Vol. 50. – P. 3943–3960.

2 In-terfacial shearing strength and reinforcing mechanisms of an epoxy composite reinforced using a carbon nanotube/carbon fiber hybrid / Fu-Hua Zhang [et al.] // Journal of Material Science. – 2019. – Vol. 2009, no. 13. – P. 3574–3577.

3 On remarkable loss amplification mechanism in filled and layered composite materials / S. Lurie [et al.] // Applied Composite Materials. – Vol. 21, is. 1. – P. 179–196.

4 Strength, stiffness, and damping properties of whiskerized fiber composites with longitudinal shear / G. I. Kriven // Composites: Mechanics, Computations, Applications (12:4) 1–22.

5 **Кривень, Г. И.** Оценка демпфирующих свойств композитов / Г. И. Кривень // Труды МАИ. – 2022. – Вып. 127.

УДК 539.3

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С ВИСКЕРСАМИ, ВЫРАЩЕННЫМИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ПОВЕРХНОСТИ ВОЛОКНА

Г. И. КРИВЕНЬ, Е. С. РЫЖОВА

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Исследование и оптимизация теплопроводных свойств композитных материалов с вискерами, выращенными на поверхности волокон, имеют важное значение в различных областях, особенно при решении задач, связанных с эффективным рассеиванием тепла. В последние годы внимание исследователей сосредотачивается на улучшении механических характеристик композитов путем внедрения функциональных волокон с вискерами, которые выращены перпендикулярно поверхности основных волокон. Эта модификация композитов способствует существенному улучшению их тепловых свойств.

В современных технологиях разработки волокнистых композитов активно применяются вискеры – наноструктуры, выращенные на поверхности волокон. В роли таких вискерсов могут выступать, например, углеродные нанотрубки (УНТ), такие волокна иногда называют «Фуззи». Улучшение свойств композитов зависит от характеристик вискерсов, выращенных на поверхности волокна, что делает эту волокнистую систему функциональной. Исследования [1–3] показали, что модификация поверхности волокна УНТ может привести к созданию композитов с улучшенными жесткостными, прочностными и демпфирующими свойствами.

Оценка эффективных свойств и моделирование теплопроводности волокнистых композитов с вискерами играют ключевую роль в прогнозировании и оптимизации их характеристик. Такие композиты обычно состоят из трех фаз: волокна, вискеризованного межфазного слоя и матрицы [4]. Волокно обеспечивает механическое усиление и одновременно служит для передачи тепла. Вискеризованный межфазный слой выполняет функцию связующего агента между волокном и матрицей, что повышает эффективность передачи нагрузки и снижает концентрацию напряжений [5].

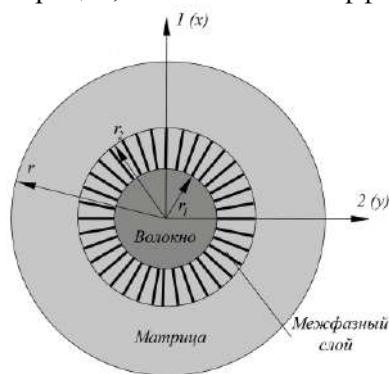


Рисунок 1 – Структура модифицированного композитного материала с вискеризованными волокнами

Исследования [6–8] указывают на то, что включение углеродных нанотрубок в небольших количествах может существенно увеличить теплопроводность композита. Это позволяет преобразовать полимерные композиты в проводящие материалы, что делает их многофункциональными. Размеры и характеристики волокон, а также их ориентация, объемная доля и расположение в композите, толщина межфазного слоя – все эти параметры играют важную роль в определении теплопроводности модифицированных композитов с вискерами [1, 5, 9, 10].

Целью данной работы является определение влияния объемного содержания вискерсов, толщины межфазного слоя и объемного содержания модифицированных волокон на эффективный коэффициент теплопроводности.

На рисунке 1 изображена структура исследуемого модифицированного композитного материала, который содержит вискеризованные волокна. Вискеризованный межфазный слой представляет собой нанокompозит, состоящий из вискерсов и матрицы.