

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].

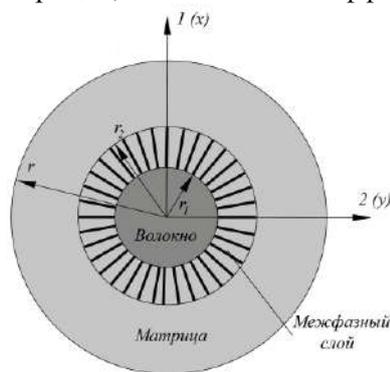


Рисунок 1 – Структура модифицированного композитного материала с вискеризованными волокнами

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.

При исследовании теплопроводности модифицированных композитов с волокнами мы предполагаем определенную структуру композита. Конкретно мы рассматриваем композит с трансверсально-изотропной структурой, где плоскость изотропии перпендикулярна направлению волокон. Волокно и матрица считаются изотропными материалами. Вискеризованный межфазный слой рассматривается как трансверсально-изотропный материал с плоскостью изотропии, перпендикулярной к вискерсам.

Для определения эффективного коэффициента теплопроводности модифицированного композита мы используем двухэтапную процедуру гомогенизации.

На первом этапе мы определяем эффективный коэффициент теплопроводности вискеризованного слоя. Используется полидисперсная модель среды с цилиндрическими включениями для расчета эффективного коэффициента теплопроводности. После определения эффективного коэффициента теплопроводности вискеризованного межфазного слоя мы находим эффективный коэффициент теплопроводности волокнистого композита с использованием расширенной полидисперсной модели среды с цилиндрическими включениями, адаптированной для многофазных сред.

Далее проводится сравнительная оценка эффективных коэффициентов теплопроводности модифицированных композитов с вискеризованными волокнами и аналогичных классических композитов. Это позволяет оценить влияние вискерсов на теплопроводность композита и определить, какие модификации способствуют улучшению теплопроводных свойств материала.

В результате исследования влияния объемного содержания модифицированного волокна, объемной концентрации вискерсов и толщины вискеризованного межфазного слоя на эффективный коэффициент теплопроводности модифицированного композита с вискеризованными волокнами было установлено, что увеличение эффективного коэффициента теплопроводности достигается за счет увеличения объемного содержания вискерсов в вискеризованном межфазном слое и увеличения объемного содержания включения – модифицированного волокна. Кроме того, установлено, что в случае модификации композита углеродными нанотрубками, выращенными перпендикулярно поверхности волокна, возможно управление эффективным коэффициентом теплопроводности в относительно широком диапазоне.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3607.2022.1.1.*

#### Список литературы

- 1 Лурье, С. А. О прочности модифицированного композита с вискеризованными волокнами / С. А. Лурье, Г. И. Кривень, Л. Н. Рабинский // Композиты и наноструктуры. – 2019. – Т. 11, No. 1. – С. 1–15.
- 2 Strength, stiffness, and damping properties of whiskerized fiber composites with longitudinal shear / G. I. Kriven [et al.] // Composites: Mechanics, Computations, Applications this link is disabled. – 2021. – 12 (4). – P. 1–22.
- 3 Кривень, Г. И. Оценка демпфирующих свойств композитов / Г. И. Кривень // Труды МАИ. – 2022. – Вып. 127.
- 4 Microstructure of Directionally Modified SiC Whisker C/SiC Composites Prepared With LA-CVI Technique. / J. Wang [et al.] // Frontiers in Materials. – 2020. – Vol. 7. – <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00155>.
- 5 Synthesis and Characterization of SiC@SiO<sub>2</sub>/BN/PI Composites by in-situ Polymerization. / G. Jiming [et al.] // Journal of Inorganic Materials. – 2021. – Vol. 36, no. 1. – P. 36. – <https://doi.org/10.15541/jim20200360>.
- 6 Carbon nanotube composites for thermal management / M. J. Biercuk [et al.] // Appl Phys Lett. – 2002. – Vol. 80, no. 15. – P. 2767–2769.
- 7 Thermal properties and percolation in carbon nanotube–polymer composites / P. Bonnet [et al.] // Appl Phys Lett. – 2007. – No. 91. – P. 201910.
- 8 Enhanced thermal conductivity of carbon fiber/phenolic resin composites by the introduction of carbon nanotubes / Y. A. Kim [et al.] // Appl Phys Lett. – 2007. – No. 90. – P. 093125.
- 9 Improvement the Flame Retardancy and thermal Conductivity of Epoxy Composites via Melamine Polyphosphate-Modified Carbon Nanotubes / X. Shi [et al.] // Polymers. – Vol. 14, no. 15. – 2022. – P. 3091. – <https://doi.org/10.3390/polym14153091>.
- 10 Epoxy/melamine polyphosphate modified silicon carbide composites: Thermal conductivity and flame retardancy analyses / X. Shi [et al.] // E-Polymers. – Vol. 22, no. 1. – 2022. – P. 742–751. – <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-0070>.

УДК 539.3

## МЕТОДЫ ОЦЕНОК МОДУЛЯ ПОТЕРЬ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА

*Г. И. КРИВЕНЬ, Д. С. ШАВЕЛКИН*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Композиты, армированные волокнами, обеспечивают более высокое материальное затухание, чем наиболее распространенные металлы. Это связано в первую очередь с наличием вязкоупругого