

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@SiO₂/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

материала – полимерной матрицы, но также высокое материальное затухание может быть достигнуто и за счет включения тонкого вязкоупругого слоя между волокном и матрицей [1, 2]. В вязкоупругом слое между волокном и матрицей реализуется интенсивная диссипация энергии за счет высокого уровня сдвиговых деформаций на границе включения и матрицы. Демпфирующие свойства композитных структур широко изучались в работах [3–5].

Исследуется пассивное демпфирование волокнистого композита, связанное с перестройкой внутренней структуры материала. Для этого используется метод вязкоупругой аналогии, согласно которому свойства вязкоупругого материала задаются комплексными величинами. Для исследования модуля потерь определяются эффективные свойства композита с применением различных методов.

Метод Рейсса является одним из самых простых методов определения свойств композитных материалов как двухфазным, так и многофазным. Осреднение по методу Рейсса является решением для композита, подвергнутого постоянной деформации и постоянному напряжению. На полученный по этому методу результат влияет объемная доля включения и свойства материалов, входящих в состав композита.

Метод трех фаз основан на полидисперсной модели и методе самосогласования (эффективного поля), и построен, чтобы получить точное решение для эффективного модуля сдвига [6]. Модель впервые была предложена Кристенсеном для сферических и цилиндрических (волокнистых) композитов. Идея этого метода основана на рассмотрении трехфазного материала. При проведении осреднения по формуле Эшелби рассматривается задача о симметричной ячейке из трех фаз. Первая и вторая фазы являются соответственно включением и матрицей, обладающими модулями упругости включения и матрицы. Модуль упругости третьей фазы считается равным эффективному модулю упругости эффективного гомогенного материала и является искомой величиной.

Волокнистый композит, образованный волокном, вязкоупругим межфазным слоем и матрицей, у которого физические свойства волокна и матрицы равны между собой, рассмотрен отдельно как слоистый композит и как композит с цилиндрическим включением. Такой волокнистый композит подвергается двум видам нагружения: чистому сдвигу вдоль волокна и чистому сдвигу поперек волокна.

Ввиду того, что свойства волокна и матрицы одинаковые, считается, что оба композита состоят из двух слоев: жесткого включения и вязкоупругой матрицы. Тогда модуль потерь такого композита можно определить при помощи метода Рейсса, используя формулу $1/\mu_{eff} = f/\mu_2 + (1-f)/\mu_1$, где f – объемное содержание вязкоупругого слоя. При заданной угловой частоте эффективный модуль сдвига определяется как $\mu_{eff} = \mu' + i\mu''$, где μ'' – модуль потерь, μ' – модуль накопления.

Также модуль потерь такого композита можно определить по методу трех фаз, расширенному на многофазную среду. Для этого используются формулы для чистого сдвига вдоль волокна и чистого сдвига поперек волокна, приведенные в работе [7]. Положим, что радиус включения волокна, покрытого вязкоупругим слоем, равен радиусу матрицы, т. е. $r_2 = r_3$.

Исследуются зависимости эффективных сдвиговых модулей потерь от толщины межфазного вязкоупругого слоя Δr_1 . Считаем, что волокно и вязкоупругий слой являются изотропными материалами со следующими свойствами: модуль объемного расширения волокна $k_1 = 40$ ГПа, модуль сдвига волокна $\mu_1 = 30$ ГПа, модуль объемного расширения и вязкоупругого межфазного слоя $k_2 = 4$ ГПа, модуль сдвига вязкоупругого межфазного слоя $\mu_2 = 0,02(1+i)$ ГПа.

В результате исследования оказалось, что использование метода Рейсса позволяет получить результаты, полностью соответствующие результатам, полученным по методу трех фаз в случае чистого сдвига вдоль волокна. Однако в случае чистого сдвига поперек волокна метод Рейсса приводит к завышенным численным результатам модуля потерь, нежели метод трех фаз, а также не позволяет отследить еще одну область пиковых значений эффективного модуля потерь. Кроме того, оказалось, что модуль потерь может значительно меняться в зависимости от толщины вязкоупругого слоя.

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

Список литературы

- 1 **Finegan, I. C.** Analytical modeling of damping at micromechanical level in poly-mer composites reinforced with coated fibers / I. C. Finegan, R. F. Gibson // *Compos. Sci. Technol.* – 2000. – no 60(7). – P. 1077–1084.
- 2 **Gusev, A. A.** Loss amplification effect in multiphase materials with viscoelastic interfaces / A. A. Gusev, S. A. Lurie // *Macromolecules.* – 42 (14). – P. 5372–5377 (2009).
- 3 **Finegan, I. C.** Improvement of damping at the micromechanical level in polymer composite materials under transverse normal loading by the use of special fiber coatings / I. C. Finegan, R. F. Gibson // *J. Vibr. Acoust.-Trans. Asme.* – 120(2). – 623–627 (1998).
- 4 On remarkable loss amplification mechanism in fiber reinforced laminated composite materials / S. Lurie [et al.] // *Appl. Compos. Mater.* – 2014. – 21(1). – P. 179–196.
- 5 **Gusev, A. A.** Optimum microstructural design of coated sphere filled viscoelastic composites for structural noise and vibration damping applications / A. A. Gusev // *Int. J. Solids Struct.* – 2017. – 128. – P. 1–10.
- 6 **Лурье, С. А.** О прочности модифицированного композита с вискеризованными волокнами / С. А. Лурье, Г. И. Кри-вень, Л. Н. Рабинский // *Композиты и наноструктуры.* – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 1–15.
- 7 **Кристенсен, Р. М.** Введение в механику композитов / Р. М. Кристенсен. – М. : Мир, 1982. – 334 с.
- 8 Strength, stiffness, and damping properties of whiskerized fiber composites with longitudinal shear / G. I. Kriven [et al.] // *Composites: Mechanics, Computations, Application* this link is disabled. – 2021. – No. 12 (4). – P. 1–22.

УДК 512.548

САМОСОВМЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ n -АРНЫХ ГРУПП ОТНОСИТЕЛЬНО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ВЕРШИН ШЕСТИУГОЛЬНИКОВ

Ю. И. КУЛАЖЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Самосовмещение элементов n -арных групп это достаточно новое и перспективное направление исследований в области теории n -арных групп, которое разрабатывается автором. Основное отличие и преимущество полученных результатов от известных исследований в области самосовмещений правильных многоугольников, многогранников, прямой, окружности заключается в том, что рассматриваются самосовмещения элементов (точек) n -арных групп и рассматриваемые геометрические объекты далеко не всегда имеют правильную геометрическую форму. Очевидно, что область исследований является гораздо более обширной по отношению к известным ранее исследованиям в области самосовмещений, а сами исследования, несомненно, послужат развитию общей теории n -арных групп, в том числе и их приложений.

В представляемой работе специальным образом строятся шестиугольники на полуабелевой n -арной группе $G = \langle X, ()^{[-2]} \rangle$ и устанавливается, что произвольная точка $p \in G$ самосовмещается относительно последовательности вершин построенных шестиугольников.

Используемые понятия и обозначения можно найти в [1].

Приведем полученный результат.

Теорема. Пусть G – полуабелевая n -арная группа, элементы a, b, c, d, u, ϑ – произвольные точки из G .

Произвольная точка $p \in G$ самосовмещается относительно последовательности вершин следующих шестиугольников:

$$\begin{aligned} & \langle S_u(b), S_u(a), S_d(a), S_d(b), S_\vartheta(b), S_\vartheta(a), \rangle \\ & \langle S_u(b), S_u(c), S_d(c), S_d(b), S_\vartheta(b), S_\vartheta(c), \rangle, \\ & \langle S_u(c), S_u(a), S_d(a), S_d(c), S_\vartheta(c), S_\vartheta(a), \rangle. \end{aligned}$$

То есть справедливы следующие равенства:

$$\begin{aligned} S_{S_\vartheta(a)}(S_{S_\vartheta(b)}(S_{S_d(b)}(S_{S_d(a)}(S_{S_u(a)}(S_{S_u(b)}(p)))))) &= p, \\ S_{S_\vartheta(c)}(S_{S_\vartheta(b)}(S_{S_d(b)}(S_{S_d(c)}(S_{S_u(c)}(S_{S_u(b)}(p)))))) &= p, \\ S_{S_\vartheta(a)}(S_{S_\vartheta(c)}(S_{S_d(c)}(S_{S_d(a)}(S_{S_u(a)}(S_{S_u(c)}(p)))))) &= p. \end{aligned}$$

Список литературы

- 1 **Кулаженко, Ю. И.** Полиадические операции и их приложения : [монография] / Ю. И. Кулаженко. – Минск : Издательский центр БГУ, 2014. – 311 с.