

Научная статья

УДК 620.22

DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-112-118

Влияние углеродных волокон на коэффициент теплопроводности полимерных композитов конструкционного назначения

Заира Муссавна Жирикова^{✉1}, Владимир Закиевич Алоев²,
Кантемир Владимирович Алоев³

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, проспект Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

³Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, улица Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

³kantemir.aloev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0765-9790>

Аннотация. Статья посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме создания высокопрочных конструкционных материалов с повышенной теплопроводностью. Детали и узлы из полимерных материалов в процессе эксплуатации испытывают тепловые нагрузки. Выделяющееся тепло необходимо отводить в окружающее пространство, в противном случае детали и узлы из полимерных материалов перегреваются, что снижает надёжность их работы. Эта проблема решается использованием полимерных материалов с высоким коэффициентом теплопроводности. Эффективным способом повышения их теплопроводности является модификация свойств базовых полимеров путем введения наполнителей с высокой теплопроводностью. Выбором типа наполнителя, изменением его содержания и морфологии можно целенаправленно изменить теплопроводность полимерного композита. Наиболее перспективными для этих целей являются углепластики на основе фенилона, наполненные короткими углеродными волокнами. В работе исследована теплопроводность полимерных композитов на основе фенилона, наполненных углеродными волокнами. Показано, что значение коэффициента теплопроводности углепластиков на основе фенилона обусловлено теплопроводностью фенилона, описанной уравнением Дебая, и характером пространственного распределения углеродных волокон.

Ключевые слова: полимерный композит, фенилон, углеродное волокно, коэффициент теплопроводности, углепластик, фактор ориентации, фрактальная размерность

Для цитирования: Жирикова З. М., Алоев В. З., Алоев К.В. Влияние углеродных волокон на коэффициент теплопроводности полимерных композитов конструкционного назначения // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 3(49). С. 112–118. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-112-118

Original article

The effect of carbon fibers on the thermal conductivity coefficient of polymer composites for structural purposes

Zaira M. Zhirikova^{✉1}, Vladimir Z. Aloeov², Kantemir V. Aloeov³

^{1,2}Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik, Russia, 360030

³Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya Street, 117198, Moscow

^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

³kantemir.aloev@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the current problem of creating high-strength structural materials with increased thermal conductivity. Parts and assemblies made of polymer materials experience thermal stress during operation, which leads to their overheating. The generated heat must be removed to the surrounding space, otherwise the parts and assemblies made of polymer materials overheat, which reduces the reliability of their operation. This problem is solved by using polymer materials with a high coefficient of thermal conductivity. An effective way to increase their thermal conductivity is to modify the properties of the base polymers by introducing fillers with high thermal conductivity. Changing its content and morphology by choosing the type of filler, it is possible to change purposefully the thermal conductivity of the polymer composite. Phenylene-based carbon plastics filled with short carbon fibers are the most promising for these purposes. The thermal conductivity of polymer composites based on phenylene filled with carbon fibers is investigated. It is shown that the value of the thermal conductivity coefficient of carbon fiber plastics based on phenylene is due to the thermal conductivity of phenylene, well described by the Debye equation and the nature of the spatial distribution of carbon fibers.

Keywords: polymer composite, phenylene, carbon fiber, thermal conductivity coefficient, carbon fiber, orientation factor, fractal dimension

For citation: Zhirikova Z.M., Alov V.Z., Alov K.V. The effect of carbon fibers on the thermal conductivity coefficient of polymer composites for structural purposes. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;3(49):112–118. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-112-118

Введение. В настоящее время полимерные материалы находят широкое применение в сельскохозяйственном машиностроении в качестве конструкционных материалов [1].

Детали и узлы из полимерных материалов в процессе эксплуатации испытывают тепловые нагрузки. Выделяющееся тепло необходимо отводить в окружающее пространство, в противном случае детали и узлы из полимерных материалов перегреваются, что снижает надёжность их работы [2, 3]. Это проблема решается использованием полимерных материалов с высоким коэффициентом теплопроводности.

Известно, что полимерные материалы относятся к классу низкотеплопроводных материалов с коэффициентом теплопроводности порядка (0,1–0,4) Вт/(м·К) [4].

Эффективным способом повышения их теплопроводности является модификация свойств базовых полимеров путем введения наполнителей с высокой теплопроводностью.

Выбором наполнителей можно целенаправленно изменить теплопроводность полимерного композита. Это изменение определяется теплопроводностью наполнителя, его содержанием и морфологией (включая размер, соотношение сторон и расположение), а также термическим сопротивлением материала на поверхности контакта [5]. Исследования показали, что наполнители с высоким соотношением сторон, превышающим порог

перколяции, создают непрерывные, эффективные пути теплопередачи.

Углеродные волокна (УВ) как один из основных кандидатов на роль наполнителей с высокой теплопроводностью обладают сверхвысокой осевой теплопроводностью (900 Вт·м⁻¹·К⁻¹) и высокой термической стабильностью [6]. Высокое соотношение сторон и микронная длина УВ облегчает их выравнивание и соединение, формируя непрерывные тепловые каналы для повышения теплопроводности полимерного композита. В работах [7, 8] показано, что по мере повышения содержания волокон наблюдается рост теплопроводности.

Цель исследования – изучение влияния углеродных волокон на коэффициент теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона.

Материалы, методы и объекты исследования. В качестве полимерного связующего использован ароматический полиамид-фенилон С-2 (ТУ 6-05-226-72), имеющий температуру стеклования 553К, в виде мелкодисперсного порошка с насыпной плотностью 330 кг/м³ [9]. В качестве наполнителя использовано высокомодульное углеродное волокно (УВ) марки «Урал 15», имеющий диаметр 7–9 мкм, длину 3 мм, плотность 1320 кг/м³. Массовое содержание УВ в исследуемых образцах составляло 15%, что соответствует объемному наполнению $\phi_n \approx 0,115$.

Образцы для испытаний готовили «сухим» способом, включающим смещение компонентов во вращающемся электромагнитном поле. Для этого в реактор загружали порошкообразный полимер, УВ и неравновесные ферромагнитные частицы длиной 40 мкм. Далее реактор помещали в расточку генератора электромагнитного аппарата. Под воздействием вращающегося электромагнитного поля ферромагнитные частицы начинают вращаться, сталкиваясь между собой, в результате чего УВ равномерно (хаотически) распределяются в полимерной матрице. В результате соударений частицы истираются, и продукты износа попадают в композицию. Для удаления ферромагнитных частиц после смешивания использовали два метода сепарации: магнитной и механической [10].

Определение коэффициента теплопроводности композитов производилось на измерителе ИТ- λ -400 согласно ГОСТ 23630.2-79. Для измерений использовались образцы в форме диска диаметром $15 \pm 0,3$ мм, высотой $3 \pm 0,1$ мм. Контактная поверхность исследуемого образца была ровной, гладкой, не имеющей раковин, трещин и других дефектов, а торцы были перпендикулярны к продольной оси образца.

Результаты исследования. В работе [11] описывается два основных подхода к анализу эффективной теплопроводности полимерных композитов, состоящих из непрерывной полимерной матрицы и волокнистого армирующего наполнителя. Наиболее часто используется подход, основанный на допущении о том, что полимерные композиты можно рассматривать как систему сопротивлений. Такой подход является универсальным для любого явления проводимости.

Теплопроводность в полимерных материалах при отсутствии в них пустот (пор) в идеале является аддитивной функцией теплопроводности составляющих его компонент (полимерной матрицы и армирующего наполнителя), а также пространственной ориентации наполнителя.

Теоретическое исследование явлений теплопроводности в композитных материалах проводилось при условии идеального равномерного распределения составляющих его фаз [11]. Предполагалось, что углеродные волокна в полимерной матрице распределены равномерно, параллельно и на одинаковом расстоянии друг от друга. Однако подобная

идеальная модель композитного материала отличается от реальной структуры. Для реальных композитных материалов характерна неравномерность в распределении волокон, отсутствие взаимной параллельности и наличие пустот. Помимо этого, применение теоретических уравнений для прогнозирования теплофизических свойств композиционных материалов ограничивается отсутствием информации о свойствах самих наполнителей и матрицы. В связи с этим в уравнениях для теоретических расчетов коэффициента теплопроводности вместо реальных физических величин, характеризующих отдельные компоненты композита, и вместо переменных параметров часто используют коэффициент объемной проводимости матрицы и системы волокон.

Использование коэффициента объемной проводимости позволяет учитывать не только физические свойства, но и геометрические особенности композитного материала.

Результаты исследования зависимости коэффициента теплопроводности λ от продолжительности смешивания компонентов во вращающемся электромагнитном поле t для углепластиков на основе фенилона приведены на рисунке 1. Можно видеть, что при небольших $t < 30$ с величины λ относительно невелики, а при $t > 60$ с наблюдаются более высокие значения λ и выход зависимости $\lambda(t)$ на асимптотическую ветвь (плато). Такой тип зависимости характерен для периодических (квазипериодических) структур с последующим переходом системы к хаотическому поведению [12].

Синергетический характер зависимости основных структурных характеристик (например, фрактальной размерности d_f) от продолжительности смешивания компонентов во вращающемся электромагнитном поле t для рассматриваемых углепластиков обнаружен также в работе [12]. Показано, что в интервале $t = 5 \div 120$ с наблюдается синусоидальная зависимость $d_f(t)$, которая при $t \leq 120$ с приближается к постоянной величине d_f .

Следовательно, сравнение данных работы [12] и зависимости $\lambda(t)$, приведенной на рисунке 1, предполагает, что наиболее высокий коэффициент теплопроводности для исследуемых углепластиков достигается при равномерном (хаотическом) распределении волокон в полимерной матрице [13].

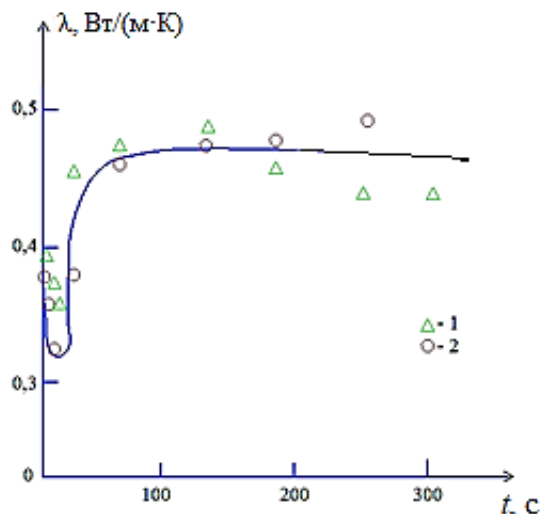


Рисунок 1. Влияние времени смешивания t фенилона С-2 с углеродным волокном во вращающемся электромагнитном поле на коэффициент теплопроводности λ : 1 – магнитная сепарация; 2 – механическая сепарация

Figure 1. Effect of mixing time t of phenylone C-2 with carbon fiber in a rotating electromagnetic field on the thermal conductivity coefficient λ : 1 – magnetic separation; 2 – mechanical separation

Коэффициент теплопроводности рассчитывается согласно уравнению [14]:

$$\lambda = \frac{1}{3} C \bar{v} \bar{l}_n \quad (1)$$

где

$\bar{v}$ – средняя скорость звука в композите;

C – теплоемкость композита;

$\bar{l}_n$ – среднее значение длины свободного пробега фононов.

Величина скорости звука в композите $\bar{v}$ определяется по формуле [15]:

$$\bar{v} = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2)$$

где

ρ – плотность композита;

E – модуль упругости композита.

Среднее значение длины свободного пробега фононов для аморфного состояния полимеров принимается равным характерному размеру неоднородности структуры. В работе [16] характерным размером неоднородности структуры принимается длина области локального порядка, а в работе [17] – длина

полимерного сегмента. Применение кластерной модели структуры аморфных полимеров позволило авторам [18] показать, что указанные выше определения величины $\bar{l}_n$ совпадают. Согласно этой модели области локального порядка представляют собой систему из параллельных статистических сегментов. Длину статистического сегмента $l_{ст}$ можно определить по формуле [19]:

$$l_{ст} = l_0 \cdot C_\infty \quad (3)$$

где

$l_0 = 1,47 \text{ \AA}$ – длина скелетной связи основной цепи для фенилона [20];

C_∞ – характеристическое отношение, являющееся показателем статистической гибкости полимерной цепи [21]. Для фенилона $C_\infty = 3$ [20].

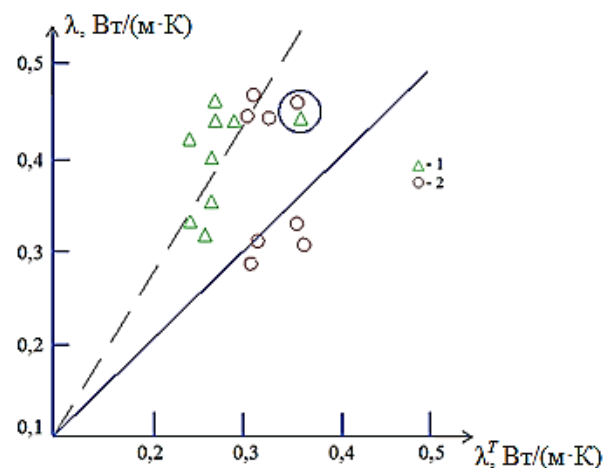


Рисунок 2. Сравнение экспериментальных λ и рассчитанных по уравнению (1) λ^T величин коэффициента теплопроводности для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепараций.

Кружком обведены точки данных для образцов с отрицательной связью структуры ($t=60 \text{ с}$)

Figure 2. Comparison of experimental λ and calculated by equation (1) values λ^T of the thermal conductivity coefficient for carbon fiber reinforced plastics based on phenylone, obtained using magnetic (1) and mechanical (2) separation. The data points for samples with negative structural coupling ($t=60 \text{ s}$) are circled

На рисунке 2 приведено сравнение полученных экспериментально λ и рассчитанных по уравнению (1) λ^T значений коэффициента

теплопроводности для исследуемых углепластиков. Как можно видеть, эта корреляция распадается на две прямые, причем одна из них соответствует равенству $\lambda = \lambda^T$. На эту прямую ложатся четыре точки данных с наименьшими значениями λ . (рис. 1). Напомним, что уравнение (1) получено для однофазных материалов. Это предполагает, что наименьшие значения λ определяются только структурой полимерной матрицы. Две точки данных (обведены кружком) получены для $t=60$ с и относятся к структурам с отрицательной обратной связью, т. е. являются переходными от квазипериодической структуры к хаотической [22]. Для остальных композитов, в том числе и для всех углепластиков с хаотическим распределением волокон в полимерной матрице, выполняется условие $\lambda > \lambda^T$. Иначе говоря, в данном случае совокупность волокон наполнителя увеличивает теплопроводность углепластиков. Для учета этого эффекта авторы [23] использовали известный прием [11]: в уравнение для расчета коэффициентов проводимости вместо реальных физических величин, характеризующих отдельные компоненты композиционного материала, и вместо переменных параметров, согласующих экспериментальные и расчетные данные, можно ввести коэффициент объемной проводимости, который учитывает не только физические свойства, но и геометрические особенности композиционного материала. Такой подход обусловлен тем, что волокнистые и пористые изоляционные материалы обычно характеризуются именно их объемными свойствами [11].

Коэффициент теплопроводности композитов определяется согласно уравнению [11]:

$$\ln \lambda = \varphi_n \ln \lambda^* + (1 - \varphi_n) \ln \lambda^M, \quad (4)$$

где

λ^* – эффективный объемный коэффициент теплопроводности системы волокон;

λ^M – коэффициент теплопроводности полимерной матрицы.

Полагая $\lambda^M = 0,30$ Вт/м·К, согласно данным рисунка 2 можно рассчитать величину λ^* из уравнения (4). На рисунке 3 показано влияние фактора ориентации η углеродных волокон на коэффициент теплопроводности углепластиков на основе фенилона С-2. Согласно работе [24], фактор ориентации воло-

кон η характеризует состояние системы волокон полимерной матрицы. Как можно видеть, по аналогии с данными рисунка 2 наблюдается линейная зависимость $\lambda^*(\eta)$, которая распадается на две прямые, и между ними находятся точки данных для углепластиков с $t=60$ с, обладающих отрицательной обратной связью в структуре. Величина λ^* для углепластиков, полученных при малых t , намного ниже, чем для образцов с хаотическим распределением волокон в полимерной матрице, т. е. полученных при $t \geq 120$ с. Это обстоятельство определяет рост λ для углепластиков, у которых продолжительность смешивания компонентов во вращающемся электромагнитном поле достаточно велика.

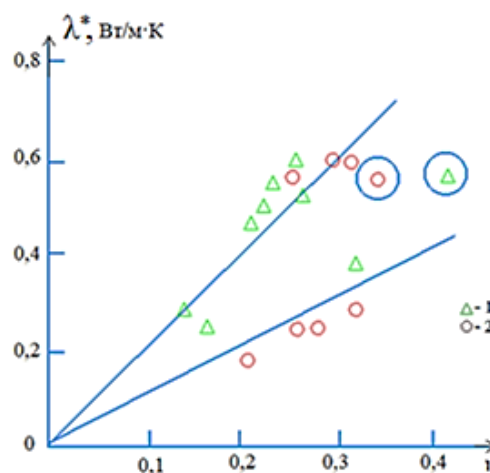


Рисунок 3. Влияние фактора ориентации η волокон на коэффициент теплопроводности λ^* углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепараций. Кружком обведены точки данных для образцов с отрицательной связью структуры ($t=60$ с)

Figure 3. The influence of the fiber orientation factor η on the thermal conductivity coefficient λ^* of carbon fiber plastics based on phenylene obtained using magnetic (1) and mechanical (2) separations. The data points for samples with negative structure coupling ($t=60$ s) are circled

Выводы. Полученные результаты демонстрируют, что значение коэффициента теплопроводности углепластиков обусловлено теплопроводностью фенилона, описанной уравнением Дебая, и характером пространственного распределения углеродных волокон.

Список литературы

1. Фатхуллин А. О возможности применения полимерных композиционных материалов в сельскохозяйственном машиностроении // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2016. № 2. С. 21–32. EDN: VVILFX
2. Thermal conductive carbon filled polymer composites / Y. Yoo, H. Kim, B. Jeon [et al.] // Proc. 18th Intern. Conf. Comp. Mat. Korea, August 21–26. 2011. Pp. 3–20.
3. Криваткин А., Сауенко Ю. Теплоотсеивающие пластмассы – вызов алюминию // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 1. С. 54–56. EDN: MTCEDJ
4. Новиченок Л. Н., Шульман З. П. Теплофизические свойства полимеров. Минск: Наука и техника, 1971. 120 с.
5. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory / N. Burger, A. Laachachi, M. Ferriol [et al.] // Progress in Polymer Science. 2016. Vol. 61. Pp. 1–28. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.05.001
6. Wei Feng, Mengmeng Qin, Yiyu Feng. Toward highly thermally conductive all-carbon composites: Structure control // Carbon. 2016. Vol. 109. Pp. 575–597. DOI.org/10.1016/j.carbon.2016.08.059
7. Zheng X., Kim S., Park Ch.Woo. Enhancement of thermal conductivity of carbon fiber-reinforced polymer composite with copper and boron nitride particles // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 121. Pp. 449–456. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.03.030
8. Stress induced carbon fiber orientation for enhanced thermal conductivity of epoxy composites / Maohua Li, Z. Ali, Xianzhe Wei [et al.] // Composites: Part B. 2021. Vol. 208. P. 108599. DOI.org/10.1016/j.compositesb.2020.108599
9. Соколов Л. Б., Кузнецов Г. А., Герасимов В. Д. Фенилон – термостойкий ароматический полиамид // Пластические массы. 1967. № 9. С. 21–23.
10. Структурный аспект межфазной адгезии в углепластиках / Г. В. Козлов, А. И. Буря, В. З. Алоев, Ю. Г. Яновский // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 2. С. 35–38. EDN: ILFYCT
11. Зиблэнд Х. Тепло- и электропроводность полимерных композиционных материалов. В кн.: Промышленные полимерные композиционные материалы / Под. ред. Ричардсона. Москва: Химия, 1980. С. 284–319.
12. Иванова В. С., Кузеев И. Р., Закирничная М. М. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. Уфа: Изд-во УГНГУ, 1998. 366 с. ISBN 5-7831-0211-3. EDN: UKMQFB
13. Айбиндер С. Б., Андреева Н. Г. Влияние наполнителей на теплофизические, механические и антифрикционные свойства полимеров // Известие АН. Лат. ССР, Сер. физ. и техн. наук. 1983. № 5. С. 3–18.
14. Кителъ Ч. Введение в физику твердого тела. Москва: Изд-во физ.-мат. лит. 1963. 696 с.
15. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. Москва: Наука, 1984. 400 с.
16. Перепечко И. И., Голубь П. Д., Насонов А. Д. Изучение теплофизических свойств полимеров с помощью акустических измерений // Высокомолекулярные соединения. Серия А. Физика полимеров. 1984. Т. 26. № 6. С. 470–473.
17. Забатта Ю. Ф. Механизм теплопроводности аморфных полимеров // Высокомолекулярные соединения. Серия А. Физика полимеров. 1991. Т. 33. № 1, С. 42–49.
18. Kozlov G.V., Zaikov, G.E. Structure of the polymer amorphous state. Utrecht; Boston: VSP, 2004. 465 с. ISBN 9067644013
19. Wu S. Chain structure and entanglement. J. Polymer Sci: Part B: Polymer Phys. 1989. V. 27. N 24. Pp. 723–741.
20. Aharoni S.M. On entanglements of flexible and rodlike polymers. Macromolecules. 1983. V. 16. N 9. Pp. 1722–1728.
21. Будтов В. П. Физическая химия растворов полимеров. Санкт-Петербург: Химия, 1992. 384 с. ISBN 5-7245-0623-8.
22. Kozlov G.V., Виря А.И., Zaikov G.E. Influence of feedback in the structure of carbon plastics on their properties // Journal of Applied Polymer Science. 2006. Vol. 100. N 4. Pp. 2817–2820. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.03.030
23. Козлов Г. В., Буря А. И., Овчаренко Е. Н. Теплопроводность углепластиков на основе фенилона // Известия КБНЦ РАН. 2006. № 1. С. 137–141.
24. Буря А. И., Козлов Г. В., Казаков М. Д. Описание формирования структуры углепластиков в рамках синергетики твердого тела // Композиционные материалы в промышленности («Славполиком»): материалы 24-й ежегодной Международной конференции. Ялта – Киев, 2004, С. 246–248.

References

1. Fatkhullin A. On the possibility of using polymer composite materials in agricultural engineering. *Agricultural machinery: service and repair*. 2016;(2):21–32. (In Russ.). EDN: VVILFX
2. Thermal conductive carbon filled polymer composites / Y. Yoo, H. Kim, B. Jeon [et al.]. Proc. 18th Intern. Conf. Comp. Mat. Korea, August 21–26. 2011. Pp. 3–20.
3. Krivatkin A., Saunenkov Yu. Heat-dissipating plastics – a challenge to aluminum. *Solid-State Lighting*. 2010;(1):54–56. (In Russ.). EDN: MTCEDJ
4. Novichenok L.N., Shulman Z.P. *Teplofizicheskie svoystva polimerov* [Thermophysical properties of polymers]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1971. 120 p.
5. Burger N., Laachachi A., Ferriol M. [et al.]. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*. 2016;61:1–28. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.05.001
6. Wei Feng, Mengmeng Qin, Yiyu Feng. Toward highly thermally conductive all-carbon composites: Structure control. *Carbon*. 2016;109:575–597. DOI.org/10.1016/j.carbon.2016.08.059
7. Zheng X., Kim S., Park Ch. Woo. Enhancement of thermal conductivity of carbon fiber-reinforced polymer composite with copper and boron nitride particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 121. Pp. 449–456. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.03.030
8. Li Maohua, Ali Z., Wei Xianzhe [et al.]. Stress induced carbon fiber orientation for enhanced thermal conductivity of epoxy composites. *Composites: Part B*. 2021;208:108599. DOI.org/10.1016/j.compositesb.2020.108599
9. Sokolov L.B., Kuznetsov G.A., Gerasimov V.D. Phenylon – heat-resistant aromatic polyamide. *Plasticheskie massy*. 1967;(9):21–23. (In Russ.)
10. Kozlov G.V., Burya A.I., Aloev V.Z., Yanovskiy Yu.G. The structural aspect of interfacial adhesion in carbon plastics. *Physical mesomechanics*. 2005;8(2):35–38. (In Russ.). EDN: ILFYCT
11. Zibland H. *PlasTeplo- i elektroprovodnost' polimernykh kompozitsionnykh materialov*. V kn.: *Promyshlennyye polimernyye kompozitsionnyye materialy*. Pod. red. Richardsona. [Thermal and electrical conductivity of polymer composite materials. In: Industrial polymer composite materials]. Ed. Richardson. Moscow: Himiya, 1980. Pp. 284–319. (In Russ.)
12. Ivanova V.S., Kuzev I.R., Zakirnichnaya M.M. *Sinergetika i fraktaly. Universal'nost' mekhanicheskogo povedeniya materialov* [Synergetics and fractals. Universality of mechanical behavior of materials]. Ufa: Izd-vo UGNGU, 1998. 366 p. ISBN 5-7831-0211-3. (In Russ.). EDN: UKMQFB
13. Aibinder S.B., Andreeva N.G. Influence of fillers on thermophysical, mechanical and antifriction properties of polymers. *Izvestie AN. Lat. SSR, Ser. fiz. i tekhn. nauk*. 1983;(5):3–18. (In Russ.)
14. Kitel Ch. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to Solid State Physics]. Moscow: Izd-vo fiz.-mat. liter., 1963. 696 p. (In Russ.)
15. Krasilnikov V.A., Krylov V.V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku* [Introduction to Physical Acoustics]. Moscow: Nauka, 1984. 400 p. (In Russ.)
16. Perepechko I.I., Golub P.D., Nasonov A.D. Study of thermophysical properties of polymers using acoustic measurements. *Polymer Science. Series A*. 1984;26(6): 470–473. (In Russ.)
17. Zabatta Yu.F. Mechanism of thermal conductivity of amorphous polymers. *Polymer Science. Series A*. 1991;33(1):42–49.
18. Kozlov G.V., Zaikov, G.E. Structure of the polymer amorphous state. Utrecht; Boston: VSP, 2004. 465 c. ISBN 9067644013
19. Wu S. Chain structure and entanglement. *J. Polymer Sci: Part B: Polymer Phys*. 1989;27(24):723–741.
20. Aharoni S.M. On entanglements of flexible and rodlike polymers. *Macromolecules*. 1983;16(9):1722–1728.
21. Budtov V.P. Physical chemistry of polymer solutions. Saint Petersburg: Khimiya, 1992. 384 p. ISBN 5-7245-0623-8. (In Russ.)
22. Kozlov G.V., Virua A.I., Zaikov G.E. Influence of feedback in the structure of carbon plastics on their properties // *Journal of Applied Polymer Science*. 2006. Vol. 100. N4. Pp. 2817–2820.
23. Kozlov G.V., Burya A.I., Ovcharenko E.N. Thermal conductivity of carbon fiber reinforced plastics based on phenylene. *News of Kabardino-Balkarian scientific center of RAS*. 2006;(1):137–141.
24. Burya A.I., Kozlov G.V., Kazakov M.D. Description of the formation of the structure of carbon fiber reinforced plastics within the framework of solid state synergetics. *Kompozitsionnyye materialy v promyshlennosti («Slavpolikom»): materialy 24-j ezhegodnoj Mezhdunarodnoj konferencii* [Composite materials in industry (Slavpolikom): materials of the 24th annual International conference]. Yalta – Kyiv, 2004. Pp. 246–248.

Сведения об авторах

Жирикова Заира Муссавна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4378-8131, Scopus ID: 55558043600, Researcher ID: AAF-3690-2022

Алоев Владимир Закиевич – доктор химических наук, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4533-8035, Scopus ID: 6505993830, Researcher ID: AAF-3822-2022

Алоев Кантемир Владимирович – аспирант кафедры теории права и государства, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», SPIN-код: 6392-4344, Researcher ID: JNS-4428-2023

Information about the authors

Zaira M. Zhirikova – Candidate of Physic-mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4378-8131, Scopus ID: 55558043600 Researcher ID: AAF-3690-2022

Vladimir Z. Alov – Doctor of Chemical Sciences, Professor in the chair of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4533-8035, Scopus ID: 6505993830, Researcher ID: AAF-3822-2022

Alov Kantemir Vladimirovich – Postgraduate Student of the Department of Theory of Law and State, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, SPIN-code: 6392-4344, Researcher ID: AAF-3822-2022

Авторский вклад. Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант статьи.

Author's contribution. All authors have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. All authors have read and approved the final version of this article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 19.08.2025;
одобрена после рецензирования 05.09.2025;
принята к публикации 11.09.2025.*

*The article was submitted 19.08.2025;
approved after reviewing 05.09.2025;
accepted for publication 11.09.2025.*