

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса
Technologies, Machines and Equipment for the Agro-industrial Complex

Научная статья

УДК 620.22

doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-88-95

Влияние структурных характеристик углеродных волокон
на механические свойства углепластиков
на основе фенилона

Владимир Закиевич Алоев¹, Заира Муссавна Жирикова^{✉2},
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

¹aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

^{✉2}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

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

Аннотация. Статья посвящена проблеме создания конструкционных полимерных композитов, обладающих высокими значениями эксплуатационных свойств. Наиболее перспективными для этих целей являются углепластики на основе фенилона, наполненные короткими углеродными волокнами. Наполнение фенилона твердыми волокнами повышает жесткость, сопротивляемость текучести, прочность, огнестойкость, вязкость разрушения, трибологическую износостойкость, снижает коэффициент теплового расширения и трения. Полимерные композиты на основе фенилона являются структурно сложными телами, состоящими из полимерной матрицы, наполнителя и межфазной области. Обнаружена зависимость структуры и свойств углепластиков от продолжительности смешения компонентов, причем эта зависимость имеет синергетический характер. Подобный характер структуры подразумевает взаимосвязь характера структуры с распределением, ориентацией и агрегацией углеродных волокон. Исследована зависимость управляющего параметра структуры углепластиков (фактора ориентации волокон) от продолжительности смешения компонентов во вращающемся электромагнитном поле для трех используемых длин неравновесных ферромагнитных частиц. Определена оптимальная длина ферромагнитных частиц, при которой возможна максимальная ориентация углеродных волокон в полимерной матрице. Показано, что фактор ориентации волокон определяет формирование структуры углепластиков только в определенных пределах, контролируемых молекулярными и структурными характеристиками полимерной матрицы. Использование вариации фрактальной размерности структуры углепластиков позволило рассчитать возможные изменения его механических свойств.

Ключевые слова: углеродное волокно, фенилон, ферромагнитные частицы, ориентация волокон, термический кластер, модуль упругости, фрактальная размерность

Для цитирования. Алоев В. З., Жирикова З. М., Алоев К. В. Влияние структурных характеристик углеродных волокон на механические свойства углепластиков на основе фенилона // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2024. № 4(46). С. 88–95. doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-88-95

Original article

Influence of Structural Characteristics of Carbon Fibers on Mechanical Properties of Phenylon-based Carbon Fiber

Vladimir Z. Alov¹, Zaira M. Zhirikova^{✉2}, Kantemir V. Alov³

^{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-Maklay Street, Moscow, Russia, 117198

¹aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

^{✉2}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

³kantemir.aloev@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the problem of creating structural polymer composites with high values of operational properties. The most promising for these purposes are phenylene-based carbon fiber plastics filled with short carbon fibers. Filling phenylene with hard fibers increases stiffness, flow resistance, strength, fire resistance, fracture toughness, tribological wear resistance, reduces the coefficient of thermal expansion and friction. Phenylene-based polymer composites are structurally complex bodies consisting of a polymer matrix, a filler and an interfacial region. The dependence of the structure and properties of carbon fiber plastics on the duration of mixing of the components has been found, and this dependence has a synergistic character. Such a nature of the structure implies the relationship of the nature of the structure from the distribution, orientation and aggregation of carbon fibers. The dependence of the control parameter of the carbon fiber structure (fiber orientation factor) on the duration of displacement of components in a rotating electromagnetic field for three lengths of nonequilibrium ferromagnetic particles used is investigated. The optimal length of ferromagnetic particles has been determined at which the maximum orientation of carbon fibers is possible. The structure of carbon fiber plastics is a synergetic system, which means that its main characteristics depend on the duration of displacement. The synergistic nature of the carbon fiber structure means the relationship between the nature of the structure and the distribution, orientation and aggregation of carbon fibers. It is shown that the fiber orientation factor determines the formation of the carbon fiber structure only within certain limits controlled by the molecular and structural characteristics of the polymer matrix. The use of variations in the fractal dimension of the carbon fiber structure made it possible to calculate possible changes in its mechanical properties.

Keywords: carbon fiber, phenylon, ferromagnetic particles, fiber orientation, thermal cluster, modulus of elasticity and fractal dimension

For citation. Alov V.Z., Zhirikova Z.M., Alov K.V. Influence of Structural Characteristics of Carbon Fibers on Mechanical Properties of Phenylon-based Carbon Fiber. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2024;4(46):88–95. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-88-95

Введение. В настоящее время наиболее перспективным для использования в качестве конструкционных материалов являются полимерные композиционные материалы, наполненные углеродными волокнами. Наполнение полимеров твердыми волокнами придает этим материалам ряд желательных свойств: повышает жесткость, сопротивляемость текучести, прочность, огнестойкость, вязкость разрушения, трибологическую износостойкость, снижает коэффициент теплового рас-

ширения и трения. При этом в качестве наиболее распространенных полимерных матриц следует назвать ароматический полиамид – фенилон [1].

Известно [2], что полимерные композиты являются структурно-сложными твердыми телами, основные структурные компоненты которых составляют полимерная матрица, наполнитель и межфазные области. Как показано в работе [3], структура углепластиков является синергетической системой, означающий

зависимость ее основных характеристик как функции продолжительности смещения.

Синергетический характер структуры углепластиков подразумевает взаимосвязь характера структуры с распределением, ориентацией и агрегацией углеродных волокон. В связи с этим **целью настоящей работы является** изучение влияния указанных характеристик на механические свойства углепластиков на основе фенилона.

Материалы, методы и объекты исследования. В качестве полимерного связующего использован ароматический полиамид фенилон С-2 [1], а в качестве наполнителя – углеродное волокно (УВ) диаметром $7\div 9$ мкм, длиной 3 мм. Содержание УВ составляло 15% (по массе). Композит готовили «сухим» способом, включающим смешение компонентов во вращающемся электромагнитном поле. Для этого в реактор загружали порошкообразный полимер, УВ и неравноосные ферромагнитные частицы длиной 20, 40 и 70 мм. Далее реактор помещали в расточку генератора электромагнитного аппарата. Под воздействием вращающегося электромагнитного поля ферромагнитные частицы начинают вращаться, сталкиваясь между собой, в результате чего улучшается степень ориентации УВ и равномерное (хаотическое) распределение их в полимерной матрице. В результате соударений частицы истираются и продукты износа попадают в композиты. Для удаления ферромагнитных частиц после смешения использовали два метода: магнитной и механической сепарации [4].

Образцы для исследования механических свойств готовили методом горячего прессования при температуре 603 К и давлении 55 МПа. Испытания на сжатие выполнены на машине FP-100 при температуре 293 К и скорости деформации 10^{-3} с^{-1} .

Результаты исследования. Исследование формирования структуры углепластиков на основе термостойкого ароматического полиамида фенилон С-2 проводили с использованием методов синергетики [5], фрактального анализа [6] и кластерной модели аморфного состояния полимеров [7].

Для количественной характеристики структуры углепластиков выбрана фрактальная (хаусдорфова) размерность d_f структуры углепластиков, являющаяся универсальным информа-

тором структурного состояния вещества, которая рассчитывалась из уравнения [8]:

$$d_f = (d - 1) (1 + v), \quad (1)$$

где:

d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае $d=3$);

v – коэффициент Пуассона, определяемый по результатам механических испытаний с помощью соотношения [9]:

$$\frac{\sigma_\tau}{E} = \frac{1 - 2\nu}{6(1 + \nu)}, \quad (2)$$

где:

σ_τ – предел текучести;

E – модуль упругости.

Следующей структурной характеристикой или управляющим параметром структуры углепластиков (точнее межфазных областей) является фактор ориентации волокон η [2], величину которого можно определить из следующего уравнения [10]:

$$\sigma_p^k = \eta \tau (\bar{l} / \bar{d}) \bar{\varphi}_n + \sigma_p^m (1 - \varphi_n) \quad (3)$$

где:

η – фактор ориентации волокон;

τ – предел текучести полимерной матрицы на сдвиг;

\bar{l} / \bar{d} – отношение средних значений длины и диаметра УВ;

φ_n – объемное содержание наполнителя ($\varphi_n \approx 0,056$);

σ_p^m – напряжение разрушения полимерной матрицы.

Для вычисления фактора ориентации волокон η согласно уравнению (3) приняты следующие значения входящих в него параметров:

$\tau = \frac{\sigma_\tau}{\sqrt{3}} = 46 \text{ МПа}$, $(\bar{l} / \bar{d}) \approx 300$, $\varphi_n \approx 0,056$. На-

пряжение разрушения полимерной матрицы σ_p^m рассчитано согласно формуле [11]:

$$\sigma_p^m = 1,4 \cdot 10^5 \left(\frac{\varphi_{кл}}{2N_A S l_0 C_\infty} \right)^{5/6}, \quad (4)$$

где:

$\varphi_{кл}$ – относительная доля областей локального порядка (кластеров) для объемной полимерной матрицы;

N_A – число Авогадро;

S – площадь поперечного сечения макромолекулы;

l_0 – длина скелетной связи основной цепи;

C_∞ – характеристическое отношение, которое является показателем статистической гибкости полимерной цепи [12].

Для фенилона $S=17,6 \text{ \AA}$ [13], $l_0=1,25 \text{ \AA}$ и $C_\infty=3$ [14], а величина $\phi_{\text{кл}}$ определяется с помощью уравнения [6]:

$$d_f = 3 - 6(\phi_{\text{кл}} / S \cdot C_\infty)^{1/2}, \quad (5)$$

где:

d_f – фрактальная (хаусдорфова) размерность структуры углепластиков, которая оценивается согласно формуле (1) при условии $d=3$, т.е.

$$d_f = 2(1 + \nu) \quad (6)$$

В уравнении (6) ν – коэффициент Пуассона, величину которого можно рассчитать по результатам механических испытаний с помощью уравнения (2).

В связи с тем, что при рассматриваемом способе приготовления углепластиков используются одни и те же полимерные связующие и наполнитель при их постоянном содержании, то естественно предположить, что изменение структуры и свойств углепластиков как функции времени t является следствием вариации структуры наполнителя. Под структурой наполнителя подразумевается сочетание таких факторов, как ориентация волокон, степень их агрегации и распределение волокон в полимерной матрице.

Как показано в работе [3], изменение распределения углеродных волокон в полимерной матрице, определяющего синергетический характер структуры углепластиков, реализуется за счет вращения в электромагнитном поле неравноосных ферромагнитных частиц. Исследованы углепластики, полученные с использованием ферромагнитных частиц с длиной $l_\phi=40$ мм. В работе [15] исследовано влияние длины ферромагнитных частиц на изменение структуры углепластиков как функции продолжительности смешивания компонентов во вращающемся электромагнитном поле.

На рисунке 1 приведены результаты исследования зависимости управляющего па-

раметра структуры углепластиков (фактора ориентации волокон) η от продолжительности смешивания t компонентов во вращающемся электромагнитном поле t для трех используемых длин неравноосных ферромагнитных частиц. Как можно видеть, форма кривых $\eta(t)$ для всех трех l_ϕ одинакова. В области периодического (упорядоченного) поведения наблюдается экстремальное поведение η , а затем при переходе к хаотическому поведению – выход на асимптотическую величину $\eta \approx 0,25$, одинаковую для всех использованных значений l_ϕ . В области $t < 180$ с абсолютные значения η являются четко выраженной функцией l_ϕ : наименьшие η получены для $l_\phi=20$ мм, наибольшие – для $l_\phi=40$ мм, тогда как η для $l_\phi=70$ мм имеют промежуточные значения. Можно предположить, что ферромагнитные частицы с $l_\phi=20$ мм слишком короткие для эффективной ориентации волокон, а частицы $l_\phi=70$ мм слишком длинные и им трудно ориентироваться в электромагнитном поле. Таким образом, оптимальная длина ферромагнитных частиц составляет примерно 40 мм. Выход величин η на асимптотическую ветвь при $t \geq 80$ с, предполагает суперпозицию длина ферромагнитных частиц – время.

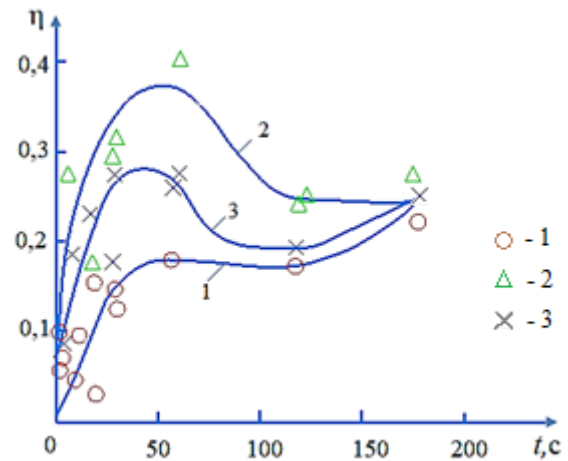


Рисунок 1. Зависимость фактора ориентации волокон η от продолжительности смешивания компонентов во вращающемся электромагнитном поле t для углепластиков на основе фенилона с применением ферромагнитных частиц длиной 20 (1), 40 (2) и 70 (3) мм

Figure 1. Dependence of the fiber orientation factor η on the duration of mixing of components in a rotating electromagnetic field t for carbon fiber plastics based on phenylene using ferromagnetic particles with lengths of 20 (1), 40 (2) and 70 (3) mm

Управляющий параметр структуры углепластиков η определяет ее характеристики, что следует из зависимости фрактальной размерности структуры d_f от η , приведенной на рис. 2. Как видно, эта зависимость линейна, наблюдается рост d_f по мере увеличения η , но большее число данных позволяет получить более общую корреляцию, где наиболее интересны предельные случаи, т.е., участки, где величина d_f не зависит от η , а контролируется молярными и структурными характеристиками полимерной матрицы. Как следует из данных рис. 2, при $\eta \leq 0,15$ величины d_f отклоняются от линейной зависимости и подчиняются условию $d_f = \text{const} = 2,25$. Оценить теоретически это граничное значение d_f можно двумя способами [15]. Во-первых, в рамках концепции термического кластера максимальная величина $\phi_{\text{кл}}$ дается уравнением [16]:

$$\phi_{\text{кл}} = \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right)^{0,4}, \quad (7)$$

где:

T_c и T – температуры стеклования и испытаний соответственно. При условии, что $T_c = 540$ К и $T = 293$ К, получим $\phi_{\text{кл}} \approx 0,74$. В свою очередь, предельное значение C_∞ можно оценить с помощью эмпирического уравнения [17]:

$$T_c = 191(S / C_\infty)^{1/2},$$

согласно которому $C_\infty = 2,20$.

Расчет согласно уравнению (5) при указанных предельных значениях $\phi_{\text{кл}}$ и C_∞ дает минимальное значение $d_f = 2,17$ для углепластиков, что хорошо согласуется с величиной $d_f = 2,25$, полученной из графика на рис. 2.

Второй метод оценки нижней границы d_f предполагает использование уравнения [6]:

$$C_\infty = \frac{2d}{d(d-1)(d-d_f)} + \frac{4}{3}, \quad (8)$$

Согласно которому при $C_\infty = 2,20$ снова $d_f = 2,17$. Таким образом, теоретическая оценка нижней граничной величины d_f (штриховая горизонтальная линия 1 на рис. 2) хорошо согласуется с данными полученными из графика на рис. 2.

Оценить верхнее предельное значение d_f можно аналогичным способом, но для этого в уравнении (7) используется показатель

$1,60$, а $C_\infty = 3$ [16]. Тогда минимальная величина $\phi_{\text{кл}} = 0,286$ и согласно уравнению (5) максимальное значение $d_f = 2,56$, что снова хорошо согласуется с данными рис. 2. Следовательно, зависимость $d_f(\eta)$ для углепластиков в общем случае аналитически можно выразить так [15]:

$$\left. \begin{aligned} d_f &= 2,11, \text{ для } \eta \leq 0,15, \\ d_f &= 2 + 1,77\eta, \text{ для } 0,15 < \eta < 0,35, \\ d_f &= 2,56, \text{ для } \eta \geq 0,35. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

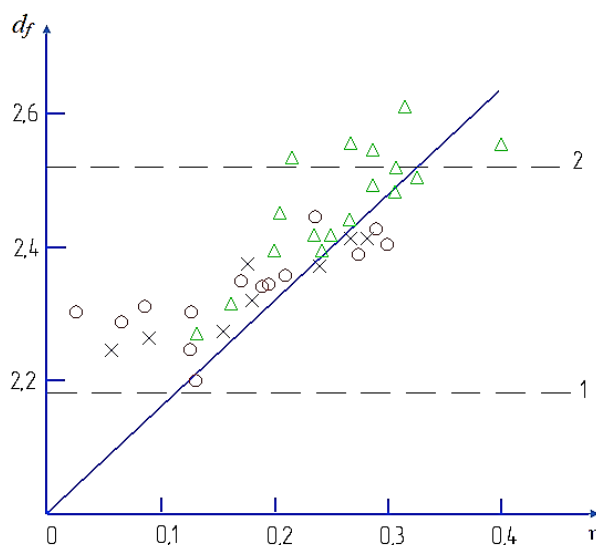


Рисунок 2. Зависимость фрактальной размерности структуры d_f от фактора ориентации волокон η для углепластиков на основе фенолона. Горизонтальные штриховые линии указывают теоретические минимальное (1) и максимальное (2) значения d_f . Обозначения те же, что и на рисунке 1

Figure 2. Dependence of the fractal dimension of the d_f structure on the fiber orientation factor η for carbon fiber plastics based on phenylene. Horizontal dashed lines indicate the theoretical minimum (1) and maximum (2) values of d_f . The designations are the same as in Figure 1

Структурная характеристика d_f определяет свойства углепластиков, что позволяет получить соотношения структура – свойства для них. Для проверки этого положения авторы [15] выбрали модуль упругости E_k , характеризующий жесткость углепластиков. На рис. 3 приведена зависимость $E_k(d_f)$, которая оказалась общей для всех трех величин l_ϕ . Оценим предельные значения E_k , исходя из определенных выше соответствующих

величин d_f . Как известно [18], размерности d_f и D_f связаны между собой уравнением

$$D_f = 1 + \frac{1}{3 - d_f} \quad (10)$$

Используя уравнение

$$E_k = 10,8\sigma_t(AD_f - 1) \quad (11)$$

при $\sigma_t = \text{const} = 230$ МПа, $A = \text{const} = 0,9$ и рассчитанные выше предельные значения d_f , получим минимальное значение $E_k = 1,35$ Па, а максимальное – $E_k = 3,21$ ГПа, что превосходно согласуется с данными рисунка 3. Экстраполяция графика $E_k(d_f)$ к $d_f = 2,0$ дает $E_k \approx 1,1$ ГПа, а расчет E_k по уравнению (11) при $D_f = d_f = 2$ – величину 1 ГПа, т.е., достаточно близкие значения.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что максимальная ориентация углеродных волокон возможна при оптимальной длине ферромагнитных частиц, применяемых при смешивании компонентов. Показано, что фактор ориентации волокон определяет формирование структуры углепластиков только в определенных пределах, контролируемых молекулярными и структурными характеристиками

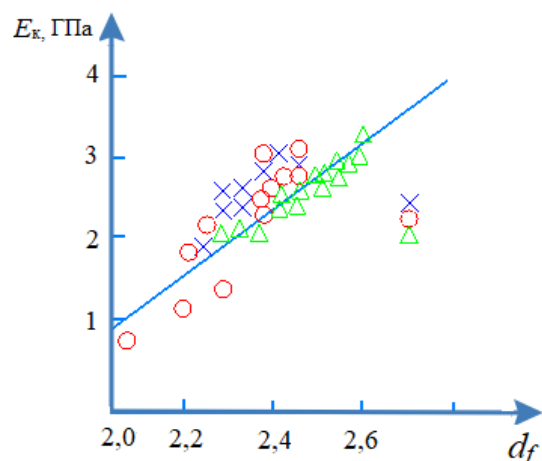


Рисунок 3. Зависимость модуля упругости E_k от фрактальной размерности структуры d_f для углепластиков на основе фенилона.

Обозначения те же, что и на рисунке 1

Figure 3. Dependence of the elastic modulus of the E_k on the fractal dimension of the d_f structure for carbon fiber plastics based on phenylene.

The designations are the same as in Figure 1

полимерной матрицы. Использование вариации фрактальной размерности структуры углепластиков позволило рассчитать возможные изменения его механических свойств.

Список литературы

1. Соколов Л. Б., Кузнецов Г. А., Герасимов В. Д. Фенилон – термостойкий ароматический полиамид // Пластические массы. 1967. № 9. С. 21–23.
2. Буря А. И., Козлов Г. В. Описание формирования структуры углепластиков в рамках синергетики твердого тела // Композиционные материалы в промышленности: материалы 24-й ежегодной Международной научно-практ. конф., 31 мая-4 июня 2004. Ялта-Киев: УИН «Наука, техника. Технология», 2004. С. 246–248.
3. Буря А. И., Козлов Г. В. Синергетика структуры полимерных композитов, формируемой во вращающемся электромагнитном поле // Наука, техника и высшее образование: проблемы и тенденции развития: материалы научно-практической конференции. Вып.1. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2004. С. 56–58.
4. Буря А. И., Козлов Г. В., Свердловская О. С. Синергетика формирования межфазных областей в углепластике на основе фенилона // Вопросы химии и химической технологии. 2004. № 4. С. 109–112.
5. Иванова В. С., Кузеев И. Р., Закирничная М. М. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. Уфа: Изд-во УГНТУ. 1998. 363 с. EDN: UKMQFB
6. Козлов Г. В., Новиков В. У. Синергетика и фрактальный анализ сетчатых полимеров. Москва: Классика, 1998. 112 с.
7. Козлов Г. В., Новиков В. У. Кластерная модель аморфного состояния полимеров // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 7. С. 717–764.
8. Баланкин А. С. Синергетика деформируемого тела. Москва: Изд-во МО СССР. 1991. 404 с.
9. Козлов Г. В., Сандитов Д. С. Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. Новосибирск: Наука, 1994. 261 с.
10. Товмасян Ю. М., Тополкараев В. А., Берлин Ал. Ал. Структурная организация и механические свойства полиэтилена высокой плотности, наполненного короткими стекловолокнами // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1986. Т. 28. № 6. С. 1162–1167.

11. Новиков В. У., Козлов Г. В., Липатов Ю. С. Исследование межфазного слоя в наполненных полимерах и использование концепции фракталов // Пластические массы. 2003. № 10. С. 4–8.
12. Будтов В. П. Физическая химия растворов полимеров. Санкт-Петербург: Химия. 1992. 384 с.
13. Aharoni S.M. Correlations between chain parameters and failure characteristics of polymers below their glass transition temperature // *Macromolecules*. 1985. Vol. 18. No. 12. Pp. 2624–2630.
14. Aharoni S.M. on entanglements of flexible and rod like polymers // *Macromolecules*. 1983. Vol. 16. No. 9. Pp. 1722–1728.
15. Козлов Г. В., Шустов Г. Б., Буря А. И. Влияние длины ферромагнитных частиц на структуру и свойства углепластиков на основе фенилона // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2004. № 9. С. 156–162.
16. Козлов Г. В., Липатов Ю. С. Описание структуры полимерной матрицы дисперсно-наполненных композитов как термического кластера: Критические индексы // *Механика композитных материалов*. 2003. Т. 39. № 1. С. 89–96.
17. Новиков В. Н., Козлов Г., Заиков Г. Е. Прогнозирование структуры и свойств полимеров при квазистатическом растяжении // *Каучук и резина*. 1999. № 1. С. 13–19.
18. Новиков В. У., Козлов Г. В. Фрактальная параметризация структуры наполненных полимеров // *Механика композитных материалов*. 1999. Т.35. № 3. С. 269–290.

References

1. Sokolov L.B., Kuznetsov G.A., Gerasimov V.D. Phenylon – heat-resistant aromatic polyamide. *Plasticheskiye massy*. 1967;(9):21–23. (In Russ.)
2. Burya A.I., Kozlov G.V. Description of the formation of the structure of carbon fiber reinforced plastics within the framework of solid state synergetics. *Kompozitsionnyye materialy v promyshlennosti: materialy 24-y yezhegodnoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakt. konf., 31 maya-4 iyunya 2004* [Composite materials in industry: Proc. of the 24th annual International scientific-practical. conf., May 31-June 4, 2004. Yalta-Kyiv: UIN "Nauka, tekhnika. Tekhnologiya", 2004. Pp. 246–248. (In Russ.)
3. Burya A.I., Kozlov G.V. Synergetics of the structure of polymer composites formed in a rotating electromagnetic field. *Nauka, tekhnika i vyssheye obrazovaniye: problemy i tendentsii razvitiya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Vyp.1* [Science, technology and higher education: problems and development trends. Proceedings of the scientific and practical conference. Issue 1]. Rostov-on-Don: Izd-vo RGU, 2004. Pp. 56–58. (In Russ.)
4. Burya A.I., Kozlov G.V., Sverdlikovskaya O.S. Synergetics of interphase formation in carbon fiber reinforced plastics based on phenylone. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2004;(4):109–112. (In Russ.)
5. Ivanova V.S., Kuzeev 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 UGNTU, 1998. 363 p. (In Russ.). EDN: UKMQFB
6. Kozlov G.V., Novikov V.U. *Sinergetika i fraktal'nyy analiz setchatykh polimerov* [Synergetics and fractal analysis of network polymers]. Moscow: Klassika. 1998. 112 p. (In Russ.)
7. Kozlov G.V., Novikov V.U. Cluster model of the amorphous state of polymers. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2001;171(7):717–764. (In Russ.)
8. Balankin A.S. *Sinergetika deformiruyemogo tela* [Synergetics of a deformable body]. Moscow: Izd-vo MO SSSR. 1991. 404 p. (In Russ.)
9. Kozlov G.V., Sanditov D.S. *Angarmonicheskie efekty i fiziko-mekhanicheskie svoystva polimerov* [Anharmonic effects and physico-mechanical properties of polymers]. Novosibirsk: Nauka. 1994. 261 p. (In Russ.)
10. Tovmasyan Yu.M., Topolkaev V.A., Berlin A.I. Structural organization and mechanical properties of high-density polyethylene filled with short glass fibers. *Polymer Science. Series A*. 1986;28(6):1162–1167. (In Russ.)
11. Novikov V.U., Kozlov G.V., Lipatov Yu.S. Study of the interfacial layer in filled polymers and the use of the fractal concept. *Plasticheskiye massy*. 2003;(10):4–8. (In Russ.)
12. Budtov V.P. *Fizicheskaya khimiya rastvorov polimerov* [Physical chemistry of polymer solutions]. Saint Petersburg: Khimiya, 1992. 384 p. (In Russ.)
13. Aharoni S.M. Correlations between chain parameters and failure characteristics of polymers below their glass transition temperature. *Macromolecules*. 1985;18(12):2624–2630.

14. Aharoni S.M. on entanglements of flexible and rod like polymers. *Macromolecules*. 1983;16(9):1722–1728.
15. Kozlov G.V., Shustov G.B., Burya A.I. Influence of the length of ferromagnetic particles on the structure and properties of carbon fiber reinforced plastics based on phenylone. *University News. North-Caucasian region. Technical sciences*. 2004;(9):156–162. (In Russ.)
16. Kozlov G.V., Lipatov Yu.S. Description of the structure of the polymer matrix of dispersed-filled composites as a thermal cluster: Critical indices. *Mechanics of Composite Materials*. 2003;39(1):89–96. (In Russ.)
17. Novikov V.N., Kozlov G., Zaikov G.E. Prediction of the structure and properties of polymers under quasi-static tension. *Kauchuk i rezina*. 1999;(1):13–19. (In Russ.)
18. Novikov V.U., Kozlov G.V. Fractal parametrization of the structure of filled polymers. *Mechanics of Composite Materials*. 1999;35(3):269–290. (In Russ.)

Сведения об авторах

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

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 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: AAF-3822-2022

Information about the authors

Vladimir Z. Aloev – 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

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

Aloev K. 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 настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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