

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 631.3.004.67:621.35.035.4

doi:10.30987/2658-6436-2022-1-15-23

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Юрий Евгеньевич Кисель¹, Алексей Алексеевич Ульянов²,

Виктор Викторович Камынин³

^{1, 2, 3} Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск, Россия

¹ ypk2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5986-3922>

² al_ulianov@mail.ru

³ vic071974@yandex.ru

Аннотация. Показано применение методов твердотельного моделирования для расчета упругих свойств и напряженно-деформированного состояния композиционных материалов, упрочненных волокнами. Разработана модель композиционного материала, включающая основу и волокна. Определены упругие свойства и эквивалентные напряжения в волокнистом композиционном материале с различным содержанием волокон.

Ключевые слова: композит, композиционный материал, волокна, наполнитель, модуль упругости

Для цитирования: Кисель Ю. Е., Ульянов А. А., Камынин В. В. Совершенствование методов расчета упругих характеристик волокнистых композитов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1 (15). С. 15-23. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-15-23.

Original article

Open Access Article

IMPROVING THE METHODS FOR CALCULATING ELASTIC CHARACTERISTICS OF FIBRE COMPOSITES

Yuri E. Kisel¹, Alexey A. Ulianov², Viktor V. Kaminin³

^{1, 2, 3} Bryansk State University of Engineering and Technology

¹ ypk2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5986-3922>

² al_ulianov@mail.ru

³ vic071974@yandex.ru

Abstract. Applying solid-state modelling methods for calculating the elastic properties and stress-strain state of fibre-reinforced composite materials is shown. A model of a composite material including a base and fibres is developed. The elastic properties and equivalent stresses in a fibrous composite material with different fibre content are determined.

Keywords: composite, composite material, fibres, filler, elastic modulus

For citation: Kisel Yu. E., Ulianov A. A., Kaminin V. V. Improving the methods for calculating elastic characteristics of fibre composites. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 1 (15). pp. 15-23. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-15-23.

Введение

Методы оценки физико-механических свойств композиционных материалов рассматривались в ряде работ [1 – 8]. Наиболее широкое применение получили теоретические методы: «правило смесей», энергетический метод и метод Рейли и др. [9 – 11]. Степень достоверности результатов, полученных с их помощью, не в полной мере соответствует требованиям исследователей. Вопрос о применении метода конечных элементов для расчета свойств композитов, который позволяет уточнить теоретическое

определение упругих свойств и прочностных характеристик материалов, не нашел широкого отражения в известной нам литературе [10, 11]. Поэтому целью работы была разработка конечно-элементных моделей композиционных материалов с волокнистыми включениями. На основе приближенных аналитических зависимостей и конечно-элементных моделей необходимо провести расчет упругих свойств композиционных материалов с волокнистыми включениями.

Методика исследований

При разработке конечно-элементной модели предполагали, что композит состоит из основы и наполнителя (волокнистых включений), материалы которых представляют собой изотропные и линейно упругие среды. В качестве основного параметра, характеризующего состав материала, принимали объемное содержание наполнителя в композите (V_v , % об.) [1].

Модель композита представляли в виде системы кубов, в которые включен ежевидный волокнистый наполнитель (рис. 1).

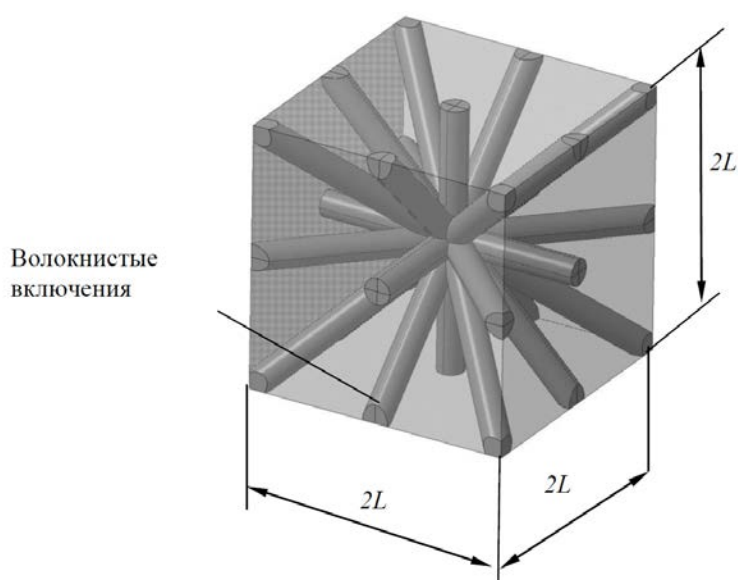


Рис. 1. Кубические частицы, содержащие волокнистые включения
Fig. 1. Cubic particles containing fibrous inclusions

Содержание включений определяли с помощью зависимости:

$$V_v = 4,4875 \frac{\pi(d/L)^2}{4} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где d – диаметр волокна; $2L$ – длина ребра (см. рис. 1).

Предполагали, что на макроуровне стержень из волокнистого композита нагружен растягивающей силой, приложенной на его торцах. В выделенном объеме композита одно из системы однонаправленных ребер решетки будет располагаться параллельно оси стержня. В силу наличия циклической симметрии исходной задачи ограничимся расчетом области композита в виде куба со стороной L , один из углов которого расположен в центре частицы (рис. 2).

Модель композита нагружали растягивается силой P (см. рис. 2). Ввиду того, что куб взаимодействует с соседними объемами материала, на каждой грани модели должно иметь место равенство нормальных перемещений по всей ее площади (грани при деформации остаются плоскими и углы между ними не изменяются).

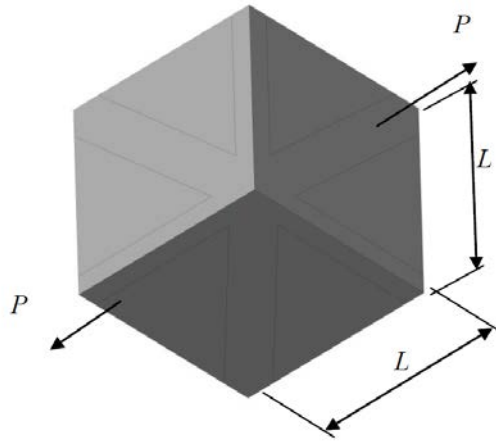


Рис. 2. Рассматриваемая часть материала
Fig. 2. Analyzed part of material

В кубической модели на гранях OXY , OXZ и OYZ устанавливали нулевые перемещения по нормали к плоскости (рис. 3).

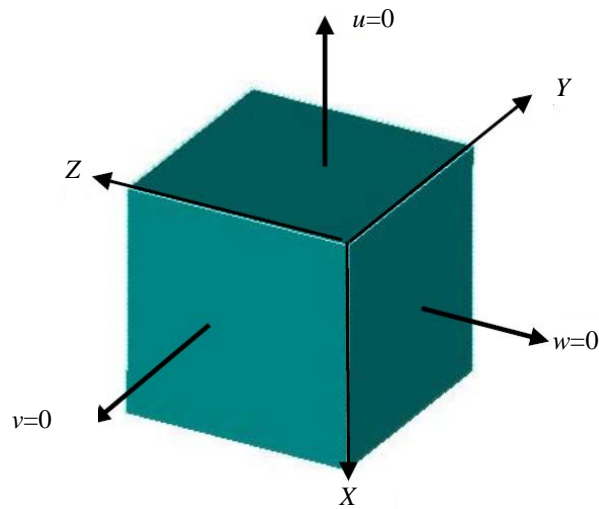


Рис. 3. Граничные условия модели на гранях OXY , OXZ и OYZ
Fig. 3. Boundary conditions of model on the OXY , OXZ and OYZ edges

На грани модели $X = L$ задавали перемещения ΔL_x (рис. 4).

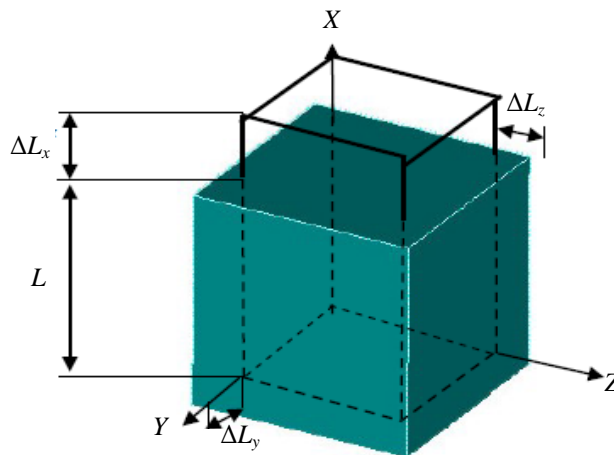


Рис. 4. Условия деформации модели композита
Fig. 4. Deformation conditions of composite model

Предполагали, что сила P и деформация ΔL_x связаны выражением:

$$\Delta L_x = \frac{P}{E_k A}, \quad (2)$$

где E_k – приведенный модуль упругости композита; $A = L^2$ – площадь грани куба.

Из выражения (2) выразим модуль упругости композита:

$$E_k = \frac{P}{\Delta L_x A}. \quad (3)$$

Таким образом, значение E_k можно вычислить по формуле (3), задавая перемещение ΔL_x , и вычислив для него усилие P с помощью метода конечных элементов. Коэффициент Пуассона композита (μ_k) при этом определялся следующей зависимостью:

$$\mu_k = \frac{\Delta L_y}{\Delta L_x} = \frac{\Delta L_z}{\Delta L_x}. \quad (4)$$

Для создания модели основы композита без наполнителя первоначально построили сплошной куб, а затем вырезали в нем объем волокнистого включения. Куб формировали с помощью базового набора твердотельных примитивов. Из условия физического подобия модели принимали $L = 1$. В плоскости OXY создавали поверхность в виде квадрата со стороной равной 1,0 (рис. 5, а). Для создания объемного тела выдавливали квадрат по нормали к рабочей плоскости на расстояние, равное 1,0 (рис. 5, б). Затем из модели основы вырезали объем восьмой части включения (рис. 6, а). В результате выполнения этих операций получали геометрическую модель основы композита без включения (рис. 6, б).

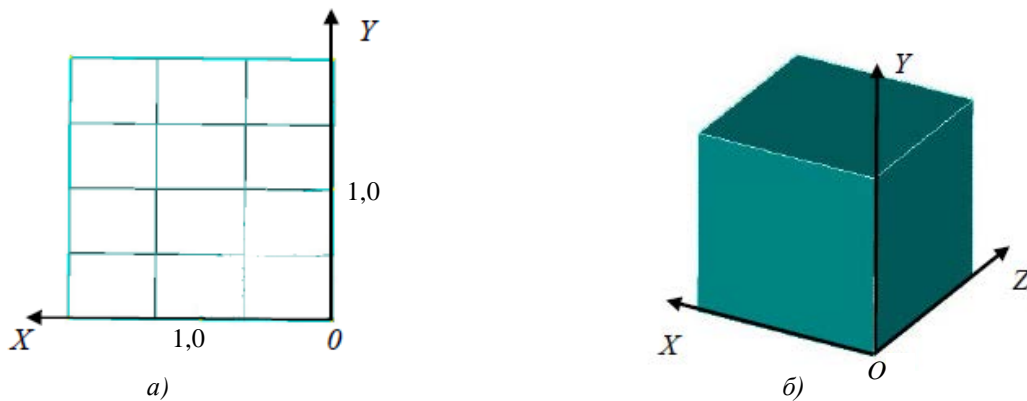


Рис. 5. Формирование модели основы:

a – квадрат в рабочей плоскости OXY ; *б* – куб, полученный выдавливанием квадрата вдоль оси Z

Fig. 5. Creation of basis model

a – a square in the working plane of the OXY ; *b* – a cube obtained by squeezing a square along the Z axis

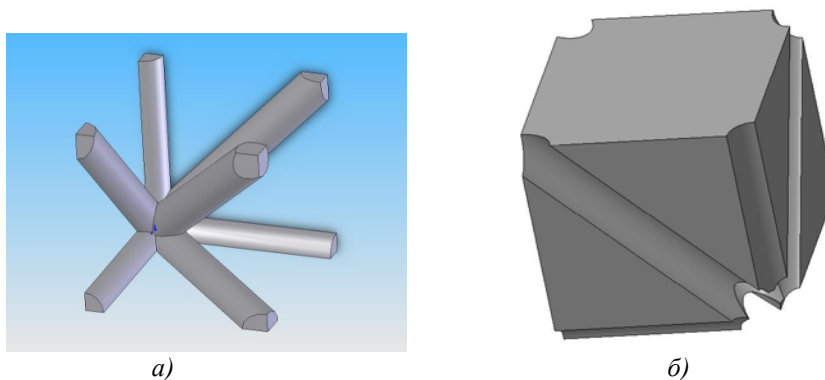


Рис. 6. Твердотельные модели твердого включения (а) и основы (б) композита

Fig. 6. Solid models (a) and composite basics (b)

Для создания конечно-элементной модели композита на основе его геометрической

модели использовали команды разбиения и редактирования сетки конечных элементов программы MSC.PATRAN-NASTRAN [12]. Принимали максимальный размер конечного элемента для граней куба 0,2, для дуг окружности – 0,1. Автоматически генерировали на поверхностях тел узлы и конечные элементы. Для обеспечения совпадения узлов на соприкасающихся поверхностях включения и основы использовали команды модификации сетки конечных элементов.

Модель композита разбивали на объемные конечные элементы с квадратичными функциями формы (рис. 7). Выбирали автоматический способ выравнивания геометрии модели, отказываясь от укрупнения сетки конечных элементов.

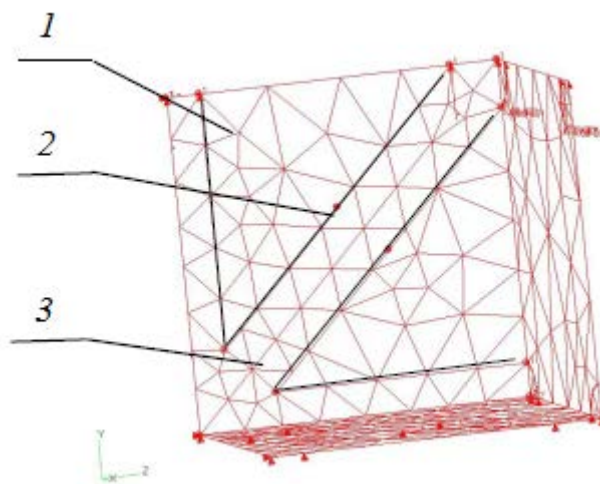


Рис. 7. Модель композита с разбиением на конечные элементы
 1 – основа; 2 – граница раздела основы и включения; 3 – твердое включение
Fig. 7. Composite model with dividing into finite elements

Для создания необходимых граничных условий в узлах на грани OXY запретим перемещения вдоль оси Z , в узлах на грани OXZ – вдоль оси Y , в узлах на грани OYZ – вдоль оси X . С помощью элемента типа Rigid объединим на гранях $X = L$, $Y = L$ и $Z = L$ все узлы по степени свободы, связанной с перемещениями по нормали (рис. 8).

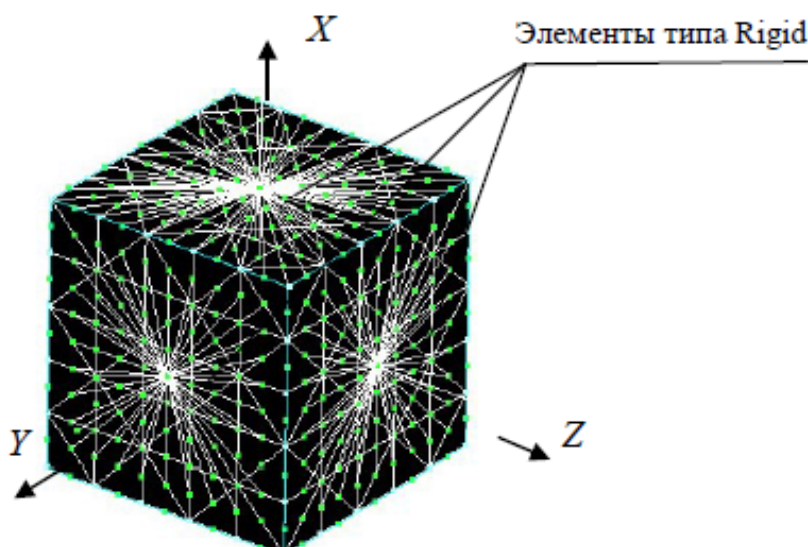


Рис. 8. Свяывание узлов на грани модели элементом типа Rigid
Fig. 8. Conjunction of nodes on the model edge by means of Rigid element

Нагружение модели композита задавали перемещением узлов грани $X = L$ на ΔL вдоль оси X (рис. 9).

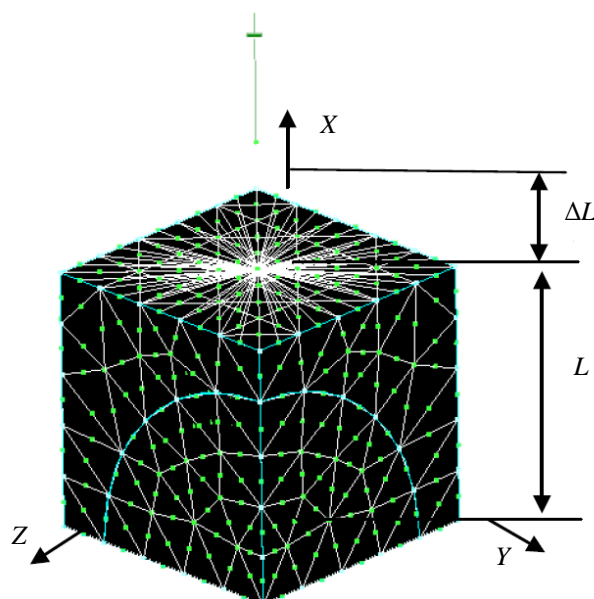


Рис. 9. Схема нагружения модели
Fig. 9. Model loading scheme

Так как вводилось допущение, что сцепление между компонентами композита является идеальным, узлы на поверхности, разделяющей основу и включение, автоматически объединяли друг с другом. Для этого использовали команды меню контроля совпадающих узлов. После выполнения команды объединения узлов, стыкующиеся конечные элементы волокнистого наполнителя и матрицы композита должны иметь общие узлы на границе раздела.

Результаты исследований и их обсуждение

С помощью конечно-элементной модели выполняли расчет композита железо – карбид ванадия. На рис. 10 представлены результаты вычисления напряжений на гранях модели в композите ($V_v = 20\%$ (об.)).

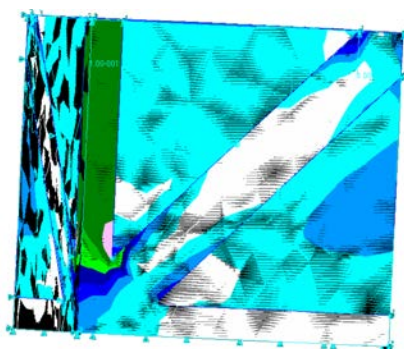
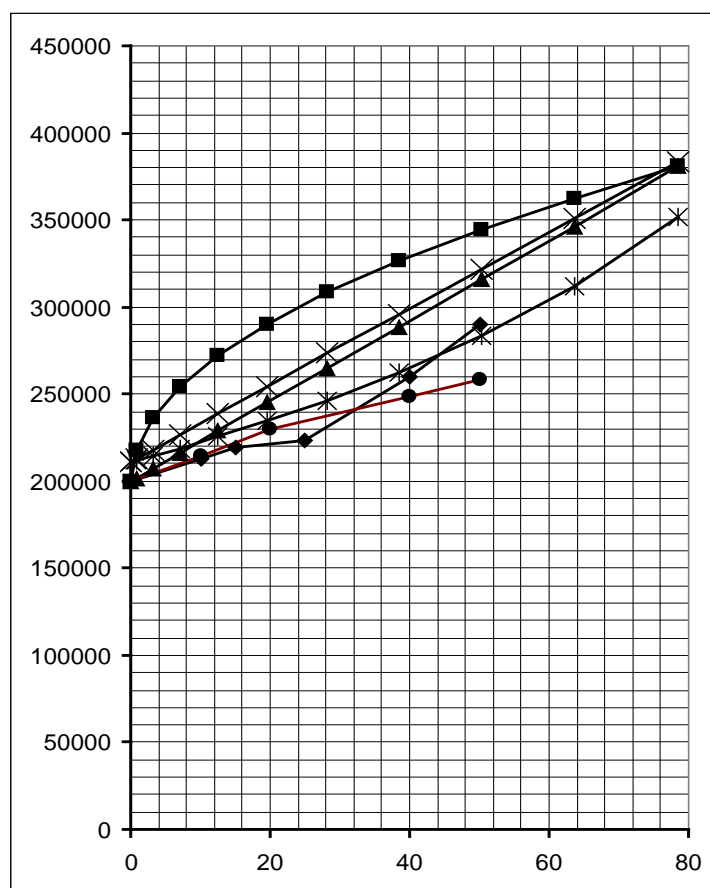


Рис. 10. Изображение распределения напряжений на поверхностях модели композита
Fig. 10. Pattern of tensions distribution on the surfaces of composite model

Результаты расчетов модуля упругости композита карбид ванадия – железо при содержании наполнителя от 10 % об. до 50 % об. методом конечных элементов и других теоретических методов приведены на рис. 11.



- — метод Рейли;
- ×— — энергетический метод верхняя граница;
- *— — энергетический метод нижняя граница;
- ▲— — правило смесей;
- — метод конечных элементов (шаровидно-волокнистая модель);
- ◆— — метод конечных элементов (кубическая модель).

Рис. 11. Значения модуля упругости композита в зависимости от объемного содержания дисперсной фазы
Fig. 11. Values of composite elastic modulus depending on volume content of dispersed phase

Исследования показали, что модуль упругости композита с ростом содержания наполнителя увеличивался. Значения модуля упругости, рассчитанные по «правилу смесей» и верхней границы энергетического метода, практически совпадали. Опыт применения «правила смесей» для расчета механических свойств композиционных материалов, упрочненных твердыми включениями, показал, что этот метод дает несколько завышенные значения модуля упругости в сравнении с экспериментальными данными [13 – 15].

Наиболее близкие результаты к экспериментальным значениям модуля упругости показал Метод Рейли. Результаты расчета упругих свойств композитов, полученные с помощью метода конечных элементов для различных моделей, получились достаточно близкими к значениям E_k , найденным теоретическими методами и укладываются между верхней и нижней границами, установленными энергетическим методом. Это говорит о возможности применения метода конечных элементов в рассматриваемой постановке для оценки упругих характеристик композиционных материалов с волокнистыми включениями.

Заключение

Представленная схема использования метода конечных элементов для расчета композиционных материалов с волокнистыми включениями позволяет получать достаточно

высокую точность определения упругих характеристик деформируемых объектов такого типа.

Список источников:

References:

1. **Кобелев, А.Г.** Материаловедение. Технология композиционных материалов / А.Г. Кобелев, М.А. Шаронов О.А. Кобелев, В.П. Шаронова / М.: КНОРУС, 2014. – 270 с.
2. **Васильев, В.В.** Композиционные материалы / В.В. Васильев, В.Д. Протасов / М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
3. **Галимов, Э.Р.** Материаловедение для транспортного машиностроения: учебное пособие / Э.Р. Галимов, Л.В. Тарасенко, М.В. Унчикова и др. / СПб.: Лань, 2013. – 443 с.
4. **Димитриенко, Ю.И.** Метод конечных элементов для решения локальных задач механики композиционных материалов / Ю.И. Димитриенко, А.П. Соколов / М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 68 с.
5. **Гурьянов, Г.В.** Определение параметров микроструктуры электрохимических покрытий по их дилатации / Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 2. – С. 33-37.
6. **Kisel Y.E., Serpik I.N., Markaryants L.M., Bezik V.A., Guryanov G.V., Bezik D.A.** Calculation of the elastic characteristics of composite materials with dispersed inclusions // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Т. 10. – № 24. – С. 44018-44022.
7. **Перов, С.Н.** Исследование применимости метода конечных элементов для оценки параметров механики разрушения конструктивных элементов из композиционных материалов / С. Н. Перов, С. А. Чернякин // Журнал Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. № 4-2. – С. 480-483.
8. **Котович, А.В.** Решение задач теории упругости методом конечных элементов: учебное пособие / А.В. Котович, И.В. Станкевич / М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 112 с.
9. **Фудзии, Т.** Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзак / М.: Мир, 1982. – 232 с.
10. **Кисель, Ю.Е.** Повышение долговечности деталей сельскохозяйственной техники электротермической обработкой композиционных электрохимических покрытий. Автореферат дис. ... доктора технических наук. Сарат. гос. аграр. ун-т им. Н.И. Вавилова. Саратов, 2014.
11. **Капитонов, А.М.** Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства: монография / А.М. Капитонов, В.Е. Редькин / Красноярск: Сиб.федер.университет, 2013. – 532 с.
12. **Шимкович, Д.А.** Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д.А.Шимкович / М.: ДМК, 2001. – 448 с.
13. **Сильман, Г.И.** Конструкционные стали. Рекомендации по выбору марки стали и вида ее термической и химико-термической обработки для деталей машин и конструкций. Учебное пособие. /
1. Kobelev A.G., Sharonov M.A., Kobelev O.A., Sharonova V.P. Materials Science. Technology of Composite Materials. Moscow: KNORUS, 2014. 270 p.
2. Vasiliev V.V., Protasov V.D. Composite Materials. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 512 p.
3. Galimov E.R., Tarasenko L.V., Unchikova M.V. et al. Materials Science for Transport Engineering. St. Petersburg: Lan, 2013. 443 p.
4. Dimitrienko Yu.I., Sokolov A.P. Finite Element Method for Solving Local Problems in the Mechanics of Composite Materials. Moscow: BMSTU Publ., 2010. 68 p.
5. Guryanov G.V., Kissel Yu.E. Determining the Parameters of the Electrochemical Coating Microstructure by Their Dilatation. Industrial Laboratory. Materials Diagnostics, 2014, vol. 80, no. 2, pp. 33-37.
6. Kisel Y.E., Serpik I.N., Markaryants L.M., Bezik V.A., Guryanov G.V., Bezik D.A. Calculation of the Elastic Characteristics of Composite Materials with Dispersed Inclusions. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44018-44022.
7. Perov S.N., Chernyakin S.A. Studying the Applicability of the Finite Element Method for Assessing the Fracture Mechanics Parameters of Structural Elements Made of Composite Materials. Izvestiya of Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 2013, vol. 15, no. 4-2, pp. 480-483.
8. Kotovich A.V., Stankevich I.V. Solution of Thermal Conductivity Problems by the Finite Element Method. Moscow: BMSTU Publ., 2012. 112 p.
9. Fujii T., Dzako M. Fracture Mechanics of Composite Materials. Moscow: Mir, 1982. 232 p.
10. Kisel, Yu.E. Improving the Durability of Agricultural Machinery Parts by Electrothermal Treatment of Composite Electrochemical Coatings. Doct. Diss. Saratov State Vavilov Agrarian University. Saratov, 2014.
11. Kapitonov A.M., Redkin V.E. Physical and Mechanical Properties of Composite Materials. Elastic Characteristics. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ., 2013. 532 p.
12. Shimkovich D.A. Calculation of Structures in MSC/NASTRAN for Windows. Moscow: DМК Press Publ., 2001. 448 p.
13. Silman, G.I. Structural Steels. Recommendations on Choosing Steel Grade and Type of its Thermal and Chemical-Thermal Treatment for Machine Parts and Structures. Bryansk: Bryansk State Engineering and

Г.И. Сильман / Брянск: БГИТА, 1999. – 70 с.

14. **Гурьянов, Г.В.** Определение параметров микроструктуры электрохимических покрытий по их дилатации / Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 2. – С. 33-37.

15. **Хаяси, Т.** Композиционные материалы / Т. Хаяси. – Ника гирен, 1971. – 85 с.

Technology Academy, 1999. 70 p.

14. Guryanov G.V., Kissel Yu.E. Determining the Parameters of the Electrochemical Coating Microstructure by Their Dilatation. Industrial Laboratory. Materials Diagnostics, 2014, vol. 80, no. 2, pp. 33-37.

15. Hayashi T. Composite Materials. Nika Giren, 1971. 85 p.

Информация об авторах:

Юрий Евгеньевич Кисель

доцент, доктор технических наук, профессор
Брянского государственного инженерно-
технологического университета

Алексей Алексеевич Ульянов

доцент, кандидат технических наук, доцент
Брянского государственного инженерно-
технологического университета

Виктор Викторович Камынин

доцент, кандидат технических наук, заведующий
кафедрой Брянского государственного инженерно-
технологического университета

Information about authors:

Yuri Evgenievich Kisel

Associate Professor, Doctor of Technical Sciences,
Professor of Bryansk State University of Engineering
and Technology

Alexey Alekseevich Uliyanov

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Bryansk State Engineering and
Technology University

Viktor Viktorovich Kaminin

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
Head of the Department of Bryansk State University of
Engineering and Technology

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 29.12.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022;
принята к публикации 12.01.2022.**

**The article was submitted 29.12.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for
publication 12.01.2022.**

Рецензент – Киричек А.В., доктор технических наук, профессор, Брянский
государственный технический университет.

Reviewer – Kirichek A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Bryansk State Technical
University.