

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Палкин Д.Д., Чекалкин А.А. Численное моделирование коэффициентов трения однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 54–63. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.07

Please cite this article in English as:

Palkin D.D., Chekalkin A.A. Numerical modeling of friction coefficients of unidirectional fibrous composites of tetragonal structure. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 2, pp. 54-63. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 2, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.07

УДК 621.891:001.891.573

Д.Д. Палкин, А.А. Чекалкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ТРЕНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ
ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**

В последние десятилетия композиционные материалы применяют в качестве замещения классических материалов для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств и характеристик механизмов и конструкций. В случае использованных в узлах трения необходимо учитывать факторы, характерные для применяемых в них композиционных материалов, как, например, влияние компонентов структуры или неоднородность среды.

В данной работе изучается модель контактного взаимодействия «сталь – композит» с целью анализа эффективного коэффициента трения однонаправленного волокнистого композиционного материала с тетрагональной структурой.

В основе решения контактной задачи с позиции механики композиционных материалов предложен метод локального приближения, который позволяет учитывать влияние компонентов структуры. Для реализации двумерного моделирования задачи применен прикладной пакет ANSYS Mechanical. При построении сетки модели использовался конечный элемент с четырьмя узлами Plane 182. Считалось, что в зоне контакта выполняется условие идеального контакта. Моделировались четыре варианта ячеек со степенью износа 0, 25, 50 и 75 % для анализа влияния износа.

В результате получены данные об изменении коэффициента трения в зависимости от степени износа для трибопары «сталь – композит» и проанализированы поля напряжений в периодической ячейке композита. Коэффициент трения композиционного материала существенно зависит от степени износа в плоскости армирования, определяется структурной неоднородностью в зоне контакта и соответствующим распределением полей напряжений.

Представленная методика в данной работе предлагает исследовать трибологические характеристики с точки зрения механики композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, трибологические характеристики, численное моделирование, контактные напряжения, тетрагональная структура, сухое трение, метод локального приближения, коэффициент трения, волокнистые композиционные материалы, однонаправленные композиционные материалы.

D.D. Palkin, A.A. Chekalkin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL MODELING OF FRICTION COEFFICIENTS OF UNIDIRECTIONAL FIBROUS COMPOSITES OF TETRAGONAL STRUCTURE

Currently, composite materials are used as a replacement for traditional materials in order to improve the characteristics and efficiency of the operational properties of structures for various purposes. In the case of friction nodes, it is necessary to take into account factors characteristic of the composite materials used in them, such as the influence of structural components or the heterogeneity of the medium.

The article considers a model of contact interaction of unidirectional fibrous composites with a tetragonal arrangement of fibers to determine the coefficient of friction of the material.

To solve the contact problem, it is proposed to use the method of local approximation, which is based on the effect of short-range order in the interaction of inhomogeneities and is based on the principle of locality. The ANSYS application package was used for the numerical implementation of the problem. In two-dimensional modeling of the stress state in the steel-composite contact zone, a finite element grid with four nodes (Plane 182) was used and the condition of ideal contact at the interface was applied. To account for the effect of the wear value on the coefficient of friction in a steel-composite pair, four configurations of a tetragonal cell in the contact zone were simulated.

As a result of the study, the change in the coefficient of friction for the steel-composite pair was determined depending on the amount of wear and the distribution fields of normal and contact stresses in the components of the composite material structure were obtained. The coefficient of friction of the composite in the reinforcement plane significantly depends on the degree of wear of the material, is determined by the structure of the inhomogeneous material in the contact zone and the corresponding distribution of structural stress fields

The described research methodology in the article allows us to consider tribological characteristics from the perspective of mechanics of composite materials.

Keywords: coefficient of friction, fibrous composite materials, polymer composite materials, numerical modeling, contact stresses, local approximation method, unidirectional composite materials, tetragonal structure, dry friction, tribological characteristics.

Введение

Для проектирования машин и механизмов из композитов необходимы соответствующие методы, которые основываются на механике гомогенных тел и принимают во внимание неоднородность материала. Для этой цели разработаны методы механики композиционных материалов, которые позволяют прогнозировать характеристики и свойства различных структур материалов: упругие, упругопластические и вязкоупругие свойства [2; 3], жесткостные и прочностные характеристики [4–6], характеристики усталостной долговечности [7; 8] и другие свойства композитов. По этой причине данные методы подходят для прогнозирования характеристик материала для практически любого назначения конструкций.

При применении в узлах трения композиционных материалов их трибологические характеристики, т.е. коэффициент трения и износостойкость, не являются реальными свойствами материала, но зависят от системы, в которой эти композиционные материалы должны работать [9]. При исследовании трибологических характеристик композиционных материалов нужно принимать во внимание влияние множества факторов. В рамках опытных исследований стоит учитывать геометрию трибопары, кинематику движения, присутствие и вид смазочного материала и др. [10]. Рационально применять универсальную машину трения с потенциалом модификации под различные назначения [10] и осуществлять различные виды трения: сухое трение, вязкое трение.

Проводятся исследования в области влияния волокон и/или добавок в материале [11–15], влияние температур при трении [12; 15; 16]. В работе [17] реализован учет влияния компонентов материала в случае однонаправленных волокнистых композиционных материалов через известное в теории механики композиционных материалов правило смесей [18]. Установлено, что правило смесей не всегда дает правильные результаты, а оценки коэффициента трения представляются завышенными.

Задача о контактном взаимодействии неоднородных тел

Коэффициент трения – одна из основополагающих трибологических характеристик материалов, и для нахождения ее разработан закон Амонтона – Кулона (1). Он позволяет определять коэффициенты для традиционных однородных материалов [19]:

$$F_{\text{тр}} = kN, \quad (1)$$

где k – коэффициент трения, $F_{\text{тр}}$ – сила трения, N – сила нормальной реакции.

В случае композиционных материалов он не учитывает влияние фаз композита между собой. Допустим, что на уровне компонентов закон применим, то можно воспользоваться подходами механики композиционных материалов. И, таким образом, это позволяет прогнозировать эффективный коэффициент трения композита.

Предметом исследования данной статьи является изучение эффективного коэффициента трения волокнистого композита с помощью методов механики композитов. Объектом исследования явля-

ются однонаправленные стекло- и углепластики, которые представляют собой полимерный материал, армированный непрерывными волокнами в одном направлении. На практике в качестве армирующего наполнителя используются нити, волокна, жгуты на основе стекловолокна, углеродных или органических волокон [1–9; 11–16].

На рис. 1 представлена двумерная модель однонаправленного волокнистого композиционного материала с тетрагональной структурой при контактном взаимодействии. Ячейка периодичности имеет прямоугольную форму (рис. 1). Будем считать, что на границе раздела «волокно – матрица» выполняется условие совместности деформаций и условие идеального контакта в зоне контакта между ячейкой и стальной опорой. Для неоднородной среды предполагается, что осредненные по ячейке периодичности поля структурных напряжений и деформаций соответствуют макроскопическим [1]. В качестве метода механики композиционных материалов будет использоваться метод локального приближения, и на основе его будет проведен анализ контактной задачи [1].

Подход механики композитов к задаче контактного взаимодействия

Одним из распространенных методов механики композиционных материалов является метод локального приближения. Он опирается на эффект ближнего порядка во взаимодействии микронеоднородностей компонентов структуры материала. В основе метода заложен принцип локальности. Рассматривая, что материал является средой с регулярной структурой, можно заключить, что метод позволяет заменить периодическую задачу краевой задачей для области, содержащей, причем достаточно малое, конечное число включений [1]. В этом случае систему разрешающих уравнений можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}(\vec{r}) &= 0, \\ \sigma_{ij}(\vec{r}) &= \lambda(\vec{r})\varepsilon_{\alpha\alpha}(\vec{r})\delta_{ij} + 2\mu(\vec{r})\varepsilon_{ij}(\vec{r}), \\ \varepsilon_{ij}(\vec{r}) &= \frac{1}{2}[u_{i,j}(\vec{r}) + u_{j,i}(\vec{r})]. \end{aligned} \quad (2)$$

Упругие постоянные Ламе $\lambda(\vec{r})$ и $\mu(\vec{r})$ в физических уравнениях являются кусочно-однородными периодическими функциями, а макронапряжения будут соответствовать структурным напряжениям на границе ячейки периодичности:

$$\sigma_{ij}(\vec{r})|_{\omega} = s_{ij}. \quad (3)$$

Это следует из эквивалентности объемного и поверхностного осреднения и условия однородного распределения напряжений на поверхности ячейки периодичности [1]. Так как метод исполь-

зует эффект ближнего порядка, то боковые границы ячейки периодичности в плоскости контакта не перемещаются. Для простоты анализа материал матрицы и волокна считается однородным и изотропным. Расчетная схема приведена на рис. 2.

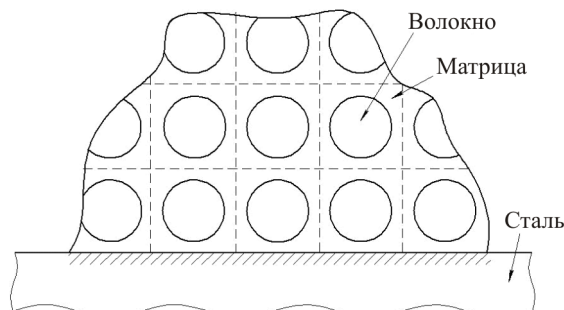


Рис. 1. Двумерная модель однонаправленного волокнистого композиционного материала при контактном взаимодействии

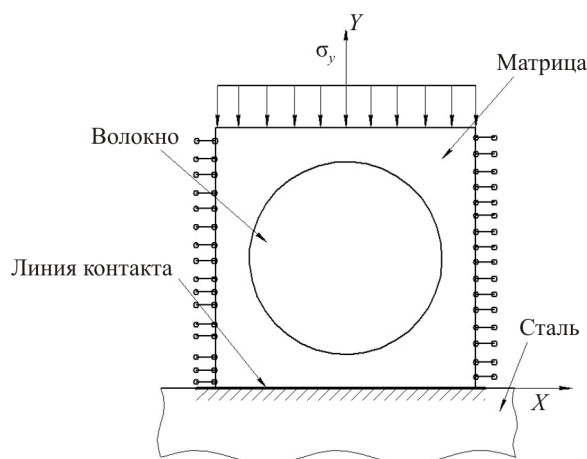


Рис. 2. Принцип локальности в задаче контактного взаимодействия однонаправленного волокнистого композита с деформируемым телом

Методика исследования и моделирование

Реализация контактной задачи выполнялась в программе ANSYS Mechanical [20; 21] на основе метода конечных элементов. Используя метод локального приближения, будут определяться эффективные коэффициенты трения композиционных материалов. В композите выделяется ячейка периодичности (рис. 2), которая присуща всему материалу и будет находиться на границе зоны контакта со стальной опорой. На верхнюю границу ячейки накладываются сжимающие напряжения (см. рис. 2), свою очередь возникнет контактное взаимодействие между стальной опорой и композитом. В зоне контакта между двумя материалами будет выполняться условие идеального контакта. Контактные напряжения при проведении МКЭ-анализа определяются для каждого прилегающего к линии контакта «сталь – компо-

зит» конечного элемента на ребре, принадлежащем линии контакта. Использование закона трения (1) для компонентов структуры однонаправленного композита позволяет определить силу трения на отдельных участках линии контакта, соответствующих ребрам сетки конечных элементов. Следует отметить, что в пределах ребра конечного элемента контактное взаимодействие осуществляется или для пары «сталь – волокно», или для пары «сталь – матрица». В полученной модели использовалась сетка конечных элементов (Plane 182).

По полученным контактным напряжениям элементов определяется суммарная сила трения:

$$F_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n F_{\text{тр}}^i. \quad (4)$$

Учитывая, что закон трения (1) выполняется для волокнистого композита на макроскопическом уровне, то силу трения в паре «сталь – композит» можно выразить следующим образом:

$$F_{\text{тр}} = kF_N = k\sigma_y \delta, \quad (5)$$

где σ_y – заданные напряжения; δ – размер контакта; k – коэффициент трения композиционного материала. Тогда эффективный коэффициент трения однонаправленного волокнистого материала с тетрагональной структурой для пары «сталь – композит» можно получить из соотношений (4) и (5):

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n F_{\text{тр}}^i}{\sigma_y \delta}. \quad (6)$$

Полученное соотношение существенно отличается от рекомендуемого для оценки триботехнических свойств композитов [17; 26] правила смесей:

$$k = V_1 k_1 + V_2 k_2, \quad (7)$$

где V_1 , V_2 – объемные доли волокон и матрицы; k_1 , k_2 – коэффициенты трения «сталь – волокно» и «сталь – матрица».

Данные для проведения расчетов

В качестве объектов моделирования выступают углепластик и стеклопластик на основе эпокси-

сидной матрицы. Данные по этим материалам представлены в табл. 1.

В табл. 2 отображены характеристики ячейки для каждого из композитов.

На верхней границе ячейки периодичности задаются напряжения $\sigma_y = 100 \text{ Н/м}^2$.

Реализация и результаты численного моделирования

Решение заданной контактной задачи сводится к анализу напряженного состояния компонентов структуры композита. В рамках этого предусмотрено моделирование четырех вариантов ячейки при износе ее 0; 25; 50 и 75 %. С помощью этого будет учтено влияние износа на эффективный коэффициент трения. На рис. 3 отображено разбиение конечно-элементной сетки в зоне контакта и распределение нормальных по отношению к плоскости контакта «сталь – композит» напряжений для четырех конфигураций ячеек. Как видим, поля структурных напряжений являются неоднородными и значительно зависят от формы ячейки периодичности неоднородного материала в зоне контакта. На рис. 3, а–г, представлены нормальные напряжения для однонаправленного стеклопластика с объемной долей волокна 71,5 % при износе ячейки в зоне контакта 0; 25; 50 и 75 % соответственно.

Существенное различие полей структурных напряжений в зоне контакта определяет зависимость триботехнических свойств однонаправленного композита от величины износа. Стоит отметить, что гипотезу о постоянстве напряжений в пределах компонента структуры композиционного материала невозможно использовать из-за неоднородности напряженного состояния. И таким образом, правило смеси (7) ограничивается в применении для оценки коэффициента трения в случае трибопары «сталь – композит».

Распределения контактных напряжений в стеклопластике и углепластике представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Распределение нормальных контактных напряжений обладает значительной неоднородностью даже при взаимодействии «сталь – матрица» (рис. 4, а и рис. 5, а); наличие более жесткого включения в виде стеклянного или углеродного

Таблица 1

Упругие свойства и коэффициенты трения материалов

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент трения по стали
Эпоксидное связующее [22; 24]	4	0,34	0,12
Углеродное волокно ВМН-4 [22; 25]	270	0,28	0,15
Стекловолокно С-стекло [22; 25]	70	0,22	0,50
Сталь [22; 25]	200	0,25	–

Таблица 2

Характеристики ячеек периодичности

Композиционный материал	Размер ячейки периодичности, мкм	Диаметр волокна, мкм	Объемная доля волокна, %
Стеклопластик	6,28	6	71,5
Углепластик	6,28	5,26	55

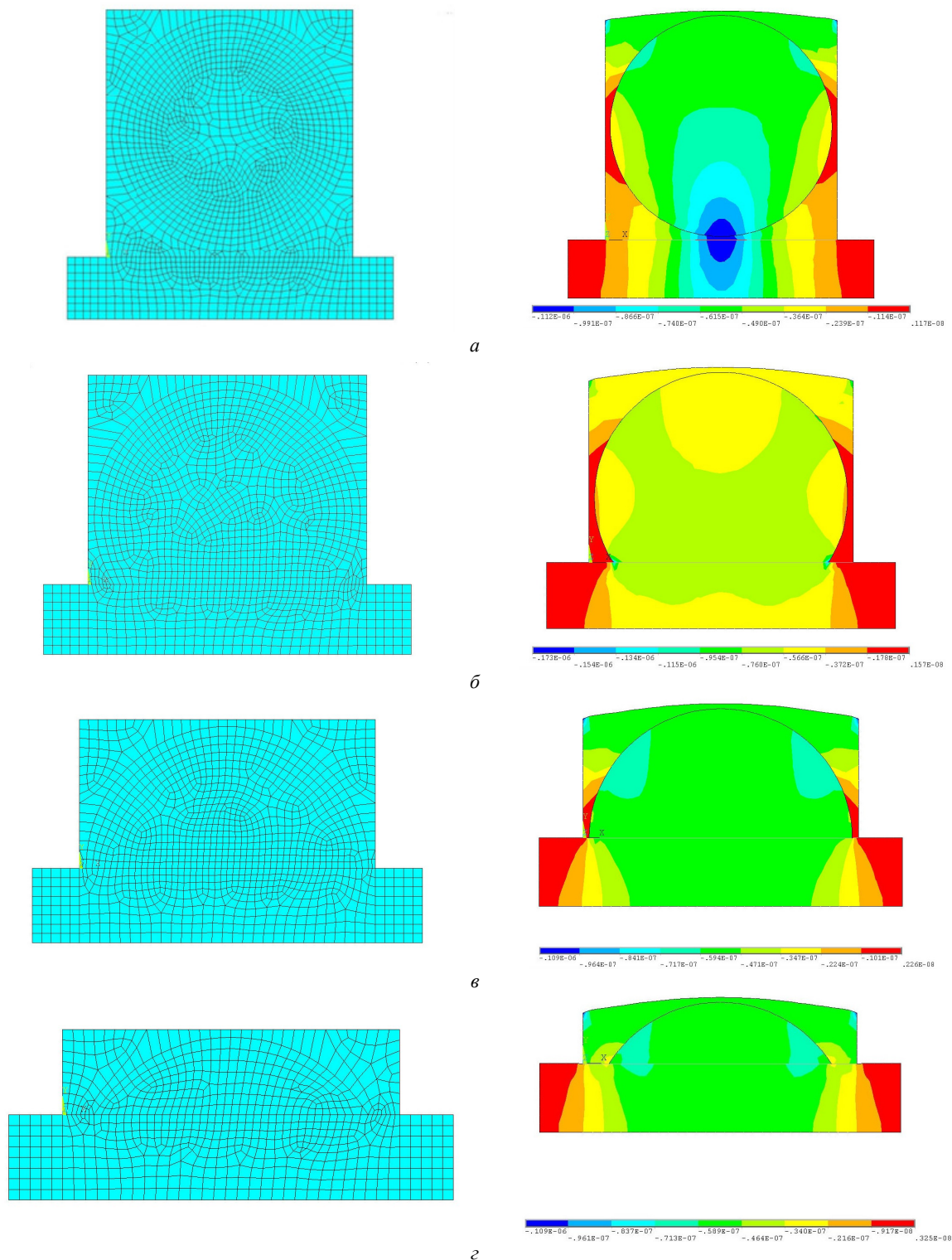


Рис. 3. Сетка конечных элементов и поля нормальных напряжений (МПа) однонаправленного стеклопластика при различной степени износа: а – отсутствует; б – 25 %; в – 50 %; г – 75 %

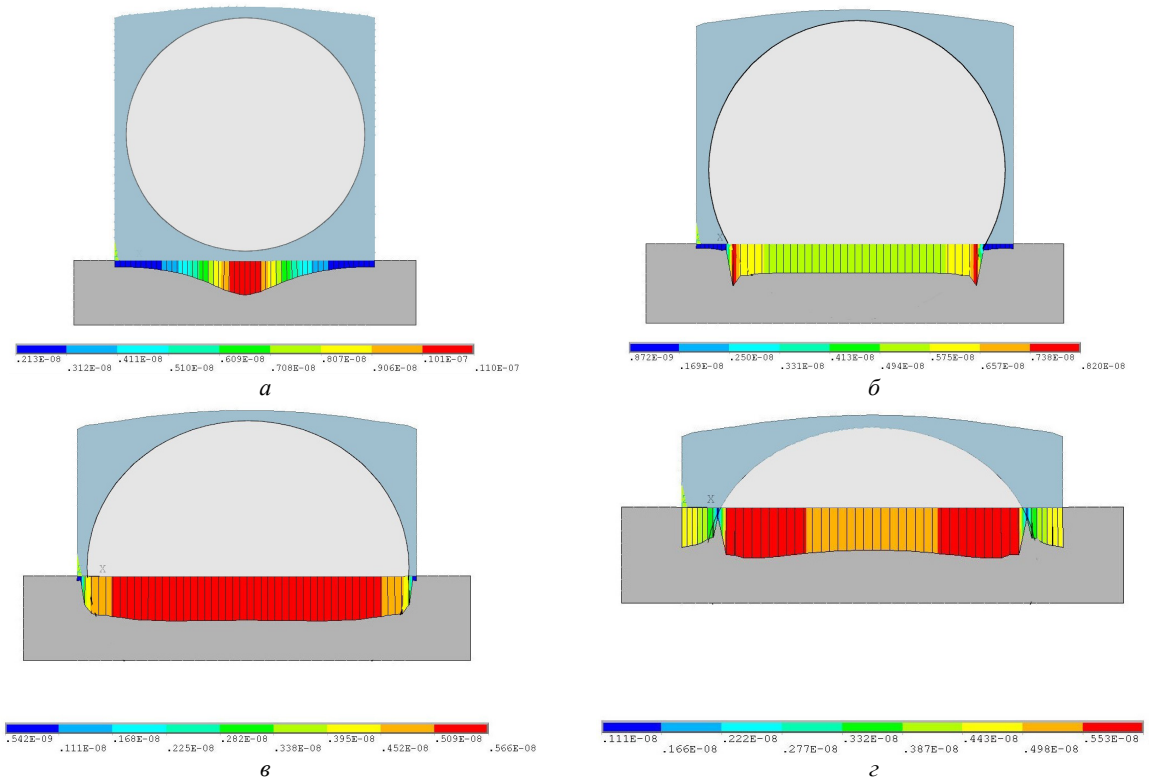


Рис. 4. Контактные напряжения (МПа) в стеклопластике: *а* – отсутствует; *б* – 25 %; *в* – 50 %; *г* – 75 %

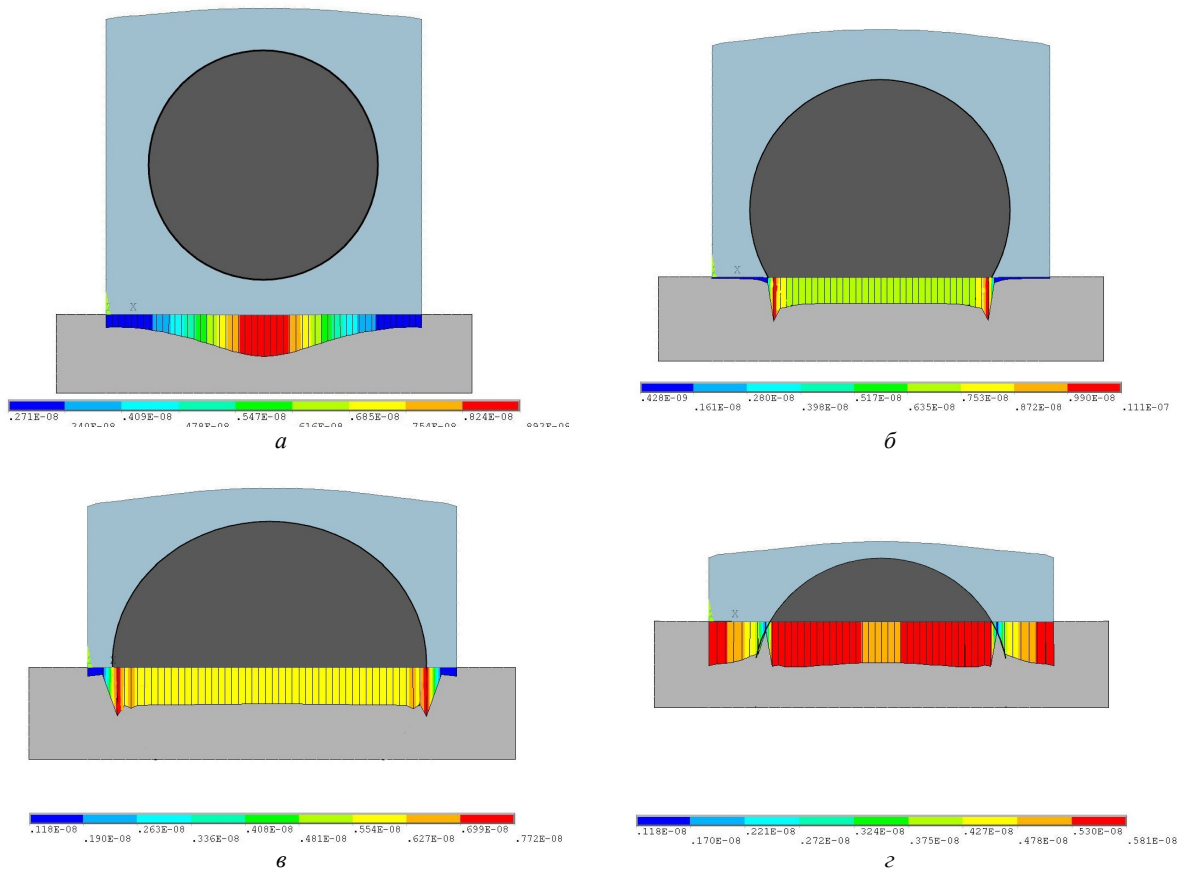


Рис. 5. Контактные напряжения (МПа) в углепластике: *а* – отсутствует; *б* – 25 %; *в* – 50 %; *г* – 75 %

Таблица 3

Результаты расчета эффективного коэффициента трения пары «сталь – композит»

Износ, %	Коэффициент трения стеклопластика		Коэффициент трения углепластика	
	МКЭ-анализ (6)	Правило смеси (7)	МКЭ-анализ (6)	Правило смеси (7)
0	0,192	0,120	0,116	0,120
25	0,246	0,427	0,165	0,140
50	0,234	0,481	0,145	0,145
75	0,207	0,427	0,103	0,140

волокна вызывает изменение структурных напряжений в зоне контакта «сталь – матрица» в 4–5 раз. При износе половины ячейки (рис. 4, в и рис. 5, в) контактные напряжения в паре «сталь – волокно» распределяются достаточно равномерно, а в зоне контакта «сталь – матрица» уровень напряжений значительно ниже. Наибольший интерес представляют распределения напряжений с износом на четверть (рис. 4, б и рис. 5, б) и на три четверти (рис. 4, г и рис. 5, г) тетрагональной ячейки периодичности, поскольку при равной длине линии контакта «сталь – волокно» или «сталь – матрица» наблюдается качественное различие форм. При износе четверти ячейки (рис. 4, б и рис. 5, б) распределение контактных напряжений подобно распределению при половинном износе (рис. 4, в и рис. 5, в), когда практически однородные наибольшие напряжения возникают в волокне, а в матрице напряжения незначительные. Износ ячейки на три четверти (рис. 4, г и рис. 5, г) – при равномерном распределении структурных контактных напряжений в зоне контакта наблюдается достаточно локальная разгрузка в окрестности точки контакта волокна и матрицы.

В табл. 3 представлены результаты расчета эффективного коэффициента трения однонаправленного стекло- и углепластика тетрагональной структуры при численном моделировании с использованием МКЭ-анализа (6) и по правилу смеси (7) для пары трения «сталь – композит». Объемная доля волокна в композите является неизменным параметром, и при расчете по формуле (7) величина износа не влияет на результат по правилу смеси. Так, для стеклопластика с объемной долей волокон 71,5 % формула (7) дает оценку коэффициента трения 0,392, для углепластика с объемной долей волокна 55 % коэффициент трения по правилу смеси (7) равен 0,137. В работе [26] рекомендуется вместо объемной доли волокна или матрицы, использовать относительную долю волокна или матрицы в зоне контакта «сталь – композит». Представленные в табл. 3 результаты расчетов для правила смеси также были выполнены с использованием относительной доли содержания волокна или матрицы в зоне контакта «сталь – композит».

Сопоставление результатов расчета эффективного коэффициента трения для пары «сталь – композит» (см. табл. 3) показывает хорошее совпадение результатов, полученных в рамках МКЭ-анализа (6) и на основе правила смеси (7) для целой ячейки при исключительно однородном контакте «сталь – матрица» и для износа половины ячейки при достаточно однородном распределении контактных напряжений по линии «сталь – волокно». Существенно отличаются аналогичные результаты расчета эффективного коэффициента трения пары «сталь – композит» при износе ячейки однонаправленного стекло- и углепластика на четверть и на три четверти. Более того, результаты по модифицированному правилу смеси не отличаются, поскольку относительные доли волокна или матрицы в зоне контакта «сталь – композит» для значений износа 25 и 75 % совпадают. Следует отметить, что наибольший эффективный коэффициент трения пары «сталь – углепластик» составил 0,165 и превысил наибольший коэффициент трения для компонентов (0,150 для пары «сталь – волокно»). С другой стороны, наименьший эффективный коэффициент трения пары «сталь – углепластик» составил 0,103 и оказался ниже меньшего коэффициента трения для компонентов (0,120 для пары «сталь – матрица»).

Заключение

В результате выполнено моделирование четырех вариантов ячеек волокнистых пластиков со степенью износа 0; 25; 50 и 75 %. Предложена и реализована методика изучения коэффициента трения для трибопары «сталь – композит» с точки зрения механики композиционных материалов. Изучено изменение эффективных коэффициентов трения композитов с разной степенью износа и получены поля распределения структурных напряжений. Основные выводы по результатам работы:

1. Трибологические свойства однонаправленных волокнистых композитов в плоскости армирования существенно зависят от величины износа материала. Правило смеси не всегда позволяет оценить изменение трибологических характеристик с достаточной для практических целей точностью.

2. Трибологические свойства определяются структурой неоднородного материала в зоне контакта и соответствующим распределением полей структурных напряжений. Правило смеси, даже

модифицированное с учетом относительной доли волокна и матрицы в зоне контакта, не позволяет учесть эту особенность.

3. Использование моделей механики композитов позволяет создать неоднородную структуру с эффективным коэффициентом трения, величина которого не может быть достигнута на уровне трибологических свойств отдельных компонентов структуры.

Библиографический список

1. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 115 с.
2. Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А. Структурно-феноменологические модели прогнозирования упругих свойств высокопористых композитов // Вестн. Сам. Гос. техн. ун-та. Серия: Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5 (21). – С. 276–279.
3. Вашуков Ю.А. Исследование напряженно-деформированного состояния соединения изделий из композиционных материалов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 3(2). – С. 414–419.
4. Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А., Бабушкин А.В. Прогнозирование физических и механических свойств порошковых и армированных высокопрочными волокнами металлических материалов // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1995. – № 2. – С. 53–57.
5. Многоуровневая расчетно-экспериментальная система для анализа прочности и жесткости элементов конструкций из короткоармированных композитов / В.А. Комаров, Е.И. Куркин, М.О. Спирина [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19, № 6. – С. 30–39.
6. Исследование механических характеристик короткоармированных композиционных материалов / В.А. Комаров, Е.И. Куркин, М.О. Спирина [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 4. – Ч. 6. – С. 1071–1076.
7. Численная модель циклической долговечности порошкового материала / В.Н. Анциферов, Ю.В. Соколкин, А.А. Чекалкин, А.В. Бабушкин // Порошк. металлургия. – 1994. – № 5–6. – С. 112–118.
8. Long-term durability of glass-fiber-reinforced composites under operation in pulp and reactant pipelines / A.A. Chekalkin, A.V. Babushkin, A.G. Kotov, S.E. Shakhleina // Mechanics of Composite Materials. – 2003. – Vol. 39, № 3. – P. 273–282.
9. Friedrich K., Reinicke R., Zhang Z. Wear of polymer composites. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J // Journal of Engineering Tribology. – 2002. – Vol. 216. – P. 415–426.
10. Методика исследования трибологических характеристик материалов на машине трения / С.Ю. Перепелкина, П.П. Коваленко, Р.В. Печенко, К.А. Нуждин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 636–640.
11. Lehua Qi, Guangzhen Pan, Yewei Fu. Effect of MoS₂ on the tribological properties of carbon fabric composites under wet conditions // Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers. Part J // Journal of Engineering Tribology. – 2017. – Vol. 232. – P. 1–10.

12. Golchin A., Simmons GF., Glavatskih S., Prakash B.. Tribological behaviour of polymeric materials in water-lubricated contacts // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J // Journal of Engineering Tribology. – 2013. – Vol. 227, № 8. – P. 1–16.

13. Du Gang, Cai Chilan, Haobin Tian. The research on the effect of SiO₂ and CF on the tensile and tribological properties of PI composite // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J // Journal of Engineering Tribology. – 2015. – Vol. 229, № 12. – P. 1–6.

14. The tribological behaviour of carbon fibre reinforced polyaryletherketones (PAEKs) through their glass transitions / Christopher J Dyson, Martin Priest, Malcolm F Fox, Bill Hopkins // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J // Journal of Engineering Tribology. – 2015. – Vol. 230, № 10. – P. 1–15.

15. Effect of friction heat on tribological behaviors of Kevlar fabric composites filled with polytetrafluoroethylene / Liu Jian, Zhang Yongzhen, Du Sanming, Lu Fei // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J // Journal of Engineering Tribology. – 2015. – Vol. 229, № 12. – P. 1–9.

16. AP Harsha, Rolf Wa'sche, Manfred Hartelt. Tribological studies on polyetherketone composite under reciprocating sliding condition against steel cylinder // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J // Journal of Engineering Tribology. – 2015. – Vol. 229, № 7. – P. 1–12.

17. Аргатов И.И., Фадин Ю.А. К расчету трибологических характеристик композиционных материалов // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 2. – С. 178–182.

18. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 336 с.

19. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1997. – 526 с.

20. Басов К.А. Ansys. Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

21. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. Ansys для инженеров: справ. пособие. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 512 с.

22. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин [и др.]; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

23. Дж. Любин. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта; под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.

24. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы / пер. с англ. / под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с. – Лондон: Эплайд Сайенс Паблишер, 1977.

25. Крагельский И.В. Коэффициенты трения: справочное пособие. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 220 с.

26. Об учете масштабных эффектов при моделировании механических и трибологических свойств двухфазных микро- и наномодифицированных полимерных покрытий / В.М. Бузник, С.А. Лурье, Д.Б. Волков-Богородский, А.Г. Князева, Ю.О. Соляев, Е.И. Попова // Вестник Перм-

ского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 36–54.

References

1. Sokolkin Iu.V., Tashkinov A.A. Mekhanika deformirovaniia i razrusheniia strukturno neodnorodnykh tel [Mechanics of Deformation and Fracture of Structurally Inhomogeneous Bodies]. Moscow: Nauka, 1984, 115 p.
2. Makarova E.Iu., Sokolkin Iu.V., Chekalkin A.A. Strukturno-fenomenologicheskie modeli prognozirovaniia uprugikh svoystv vysokoporistykh kompozitov [Structural-phenomenological models for predicting the elastic properties of highly porous composites]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*, 2010, no. 5 (21), pp. 276–279.
3. Vashukov Iu.A. Issledovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia soedineniia izdelii iz kompozitsionnykh materialov [The study of the stress-strain state of the joints of products made of composite materials]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2009, vol. 11, no. 3(2), pp. 414–419.
4. Sokolkin Iu.V., Chekalkin A.A., Babushkin A.V. Prognozirovaniie fizicheskikh i mekhanicheskikh svoystv poroshkovykh i armirovannykh vysokoprochnymi voloknami metallicheskh materialov [Prediction of physical and mechanical properties of powder and fiber-reinforced metallic materials]. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgii*, 1995, no. 2, pp. 53–57.
5. Komarov V.A., Kurkin E.I., Spirina M.O. et al. Mnogourovnevaia raschetno-eksperimental'naiia sistema dlia analiza prochnosti i zhestkosti elementov konstruktssii iz korotkoarmirovannykh kompozitov [Multilevel computational-experimental system for strength and stiffness analysis of structural elements made of short reinforced composites]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 30–39.
6. Komarov V.A., Kurkin E.I., Spirina M.O. et al. Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik korotkoarmirovannykh kompozitsionnykh materialov [Study of mechanical characteristics of short reinforced composite materials]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016, vol. 18, no. 4, part. 6, pp. 1071–1076.
7. Antsiferov V.N., Sokolkin Iu.V., Chekalkin A.A., Babushkin A.V. Chislennaia model' tsiklicheskoii dolgovechnosti poroshkovogo materiala [Numerical model of cyclic durability of powder material]. *Poroshkovaia metallurgii*, 1994, no. 5–6, pp. 112–118.
8. Chekalkin A.A., Babushkin A.V., Kotov A.G., Shakleina S.E. Long-term durability of glass-fiber-reinforced composites under operation in pulp and reactant pipelines. *Mechanics of Composite Materials*, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 273–282.
9. Friedrich K., Reinicke R., Zhang Z. Wear of polymer composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*, 2002, vol. 216, pp. 415–426.
10. Perepelkina S.Iu., Kovalenko P.P., Pechenko R.V., Nuzhdin K.A. Metodika issledovaniia tribologicheskikh kharakteristik materialov na mashine treniia [Methodology for Investigating Tribological Characteristics of Materials on a Friction Machine]. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 636–640.
11. Lehua Qi, Guangzhen Pan, Yewei Fu. Effect of MoS₂ on the tribological properties of carbon fabric composites under wet conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*, 2017, vol. 232, pp. 1–10.
12. Golchin A., Simmons GF., Glavatskih S., Prakash B. Tribological behaviour of polymeric materials in water-lubricated contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*, 2013, vol. 227, no. 8, pp. 1–16.
13. Du Gang, Cai Chilan, Haobin Tian. The research on the effect of SiO₂ and CF on the tensile and tribological properties of PI composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J. Journal of Engineering Tribology*, 2015, vol. 229, no. 12, pp. 1–6.
14. Christopher J. Dyson, Martin Priest, Malcolm F. Fox, Bill Hopkins. The tribological behaviour of carbon fibre reinforced polyaryletherketones (PAEKs) through their glass transitions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*, 2015, vol. 230, no. 10, pp. 1–15.
15. Liu Jian, Zhang Yongzhen, Du Sanming, Lu Fei. Effect of friction heat on tribological behaviors of Kevlar fabric composites filled with polytetrafluoroethene. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*, 2015, vol. 229, no. 12, pp. 1–9.
16. AP Harsha, Rolf Wa'sche, Manfred Hartelt. Tribological studies on polyetherketone composite under reciprocating sliding condition against steel cylinder. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*, 2015, Vol. 229, no. 7, pp. 1–12.
17. Argatov I.I., Fadin Iu.A. K raschetu tribologicheskikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov [To calculation of tribological characteristics of composite materials]. *Trenie i iznos*, 2007, vol. 28, no. 2, pp. 178–182.
18. Kristensen R. Vvedenie v mekhaniku kompozitov [Introduction to Mechanics of Composites]. Moscow: Mir, 1982, 336 p.
19. Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na trenie i iznos [Kombalov V.S. Fundamentals of Friction and Wear Calculations]. Moscow: Mashinostroenie, 1997, 526 p.
20. Basov K.A. Ansys. Spravochnik pol'zovatel'ia [User guide]. Moscow: DMK Press, 2005, 640 p.
21. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smaliuk A.F. Ansys dlia inzhenerov: spravochnoe posobie [Ansys for engineers]. Moscow: Mashinostroenie, no. 1, 2004, 512 p.
22. Vasil'ev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. et al. Kompozitsionnye materialy: Spravochnik [Composite materials: Handbook]. Ed. V.V. Vasil'eva, Iu.M. Tarnopol'skogo. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 512 p.
23. Dzh. Liubin. Spravochnik po kompozitsionnym materialam [Handbook on composite materials]. Ed. Dzh. Liubina. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 448 p.
24. Richardson M. Promyshlennye polimernye kompozitsionnye materialy [Industrial polymer composites].

Ed. P.G. Babaevskogo. Moscow: Khimiia, 1980, 472 p. – London: Eplaid Saiens Pabliher, 1977.

25. Kragel'skii I.V. Koeffitsienty treniia: spravochnoe posobie [Coefficients of Friction: Reference Manual]. Moscow: MASHGIZ, 1962, 220 p.

26. Buznik V.M., Lur'e S.A., Volkov-Bogorodskii D.B., Kniazeva A.G., Soliaev Iu.O., Popova E.I. Ob uchete masshtabnykh effektov pri modelirovanii mekhanicheskikh i tribologicheskikh svoistv dvukhfaznykh mikro- i nanomodifitsirovannykh polimernykh pokrytii [On accounting for scale effects when modeling mechanical and tribological properties of two-phase micro- and nanomodified polymer coatings]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2015, no. 4, pp. 36–54.

Поступила: 20.03.2022

Одобрена: 12.05.2022

Принята к публикации: 27.05.2022

Об авторах

Палкин Денис Дмитриевич (Пермь, Россия) – инженер, аспирант кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: 13denis01@mail.ru).

Чекалкин Андрей Алексеевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: a.a.chekalkin@yandex.ru).

About the authors

Denis D. Palkin (Perm, Russian Federation) – Engineer, Postgraduate at the Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: 13denis01@mail.ru).

Andrey A. Chekalkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: a.a.chekalkin@yandex.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.