

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Анализ контактного деформирования плоской антифрикционной полимерной прослойки из разных материалов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 64–75. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.08

Please cite this article in English as:

Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Analysis of flat antifriction polymer layer contact deformation a made of different material. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 2, pp. 64-75. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.08

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

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.08

УДК 539.374

А.А. Адамов¹, А.А. Каменских², Ю.О. Носов²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**АНАЛИЗ КОНТАКТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ
ПОЛИМЕРНОЙ ПРОСЛОЙКИ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В рамках работы проведен анализ напряженно-деформированного состояния антифрикционной прослойки со сферическим вырезом под смазочный материал. Представлено сравнение деформационного поведения прослойки, изготовленной из двух полимерных материалов: модифицированный фторопласт и антифрикционной композиционный материал на основе фторопласта со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена (МАК). Для описания поведения антифрикционных материалов выбрана деформационная теория упругопластичности, физико-механические свойства были получены при проведении натурных экспериментов при малых скоростях деформации: в условии одноосно напряженного состояния, одноосно деформированного состояния, определение твердости по Бринелю. Рассмотрен диапазон рабочих нагрузок, возникающий в пролетах мостовых сооружений, достигающий 90 МПа. Рассмотрены все виды состояния контактной пары «сталь – полимер»: прилипание, проскальзывание, отлипание. В рамках работы выполнен анализ сходимости численного решения задачи от степени дискретизации системы. В рамках исследования проведена серия численных экспериментов о деформировании ячейки периодичности толщиной 4, 6 и 8 мм, вырезанной из объема антифрикционного материала. Отстроены зависимости от нагрузки: интенсивность напряжений, интенсивность пластических деформаций, статусы контакта, контактное давление и контактное касательное напряжения. В прослойке из МАК при увеличении нагрузки наблюдается вырождение лунки под смазочный материал, из-за большого деформирования материала на поверхности сопряжения преобладает полное «прилипание», материал остается в состоянии проскальзывания в области вырожденной лунки, так как стремится заполнить микропустоты. Установлено, что прослойка из модифицированного фторопласта менее подвержена деформированию при всех вариантах толщины слоя скольжения.

Ключевые слова: полимер, композиционный материал, контакт, трение, деформационное поведение, смазка, слой скольжения, свойства материалов, большие деформации, толщина.

A.A. Adamov¹, A.A. Kamenskih², Yu.O. Nosov²¹Institute of Continuous Media Mechanics, Perm, Russian Federation²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF FLAT ANTIFRICTION POLYMER LAYER CONTACT DEFORMATION A MADE OF DIFFERENT MATERIALS

Stress-strain state analysis of the antifricion layer with a spherical lubricant hole was carried out as part of the work. A comparison of the deformation behavior of an interlayer made of 2 polymeric materials is presented: the modified PTFE and the antifricion composite material based on PTFE with spherical bronze inclusions and molybdenum disulfide (MAK). To describe the behavior of antifricion materials, the deformation theory of elastoplasticity was chosen, physical and mechanical properties were obtained during field experiments at low deformation rates: under the condition of uniaxial stressed state, uniaxial deformed state, determination of hardness according to Brinel. The range of working loads arising in the spans of bridge structures that reach 90 MPa is considered. All types of the state of the steel-polymer contact pair are considered: sticking, sliding, near contact. As part of the work, an analysis was made of the convergence of the numerical solution of the problem on the degree sampling of the system. A numerical experiments series on the deformation of the periodicity cell with a thickness of 4, 6 and 8 mm, cut out from the antifricion material volume, was carried out as part of the study. Dependencies from the load are tuned: stress intensity, plastic strain intensity, contact status, contact pressure and contact tangential stress. In the MAK layer, with an increase in load, there is no hole for the lubricant, due to the large deformation of the material on the mating surface, complete "sticking" prevails, the material remains in a state of slippage in the area where there is no hole, as it tends to fill micro voids. It has been established that the interlayer from modified PTFE is less susceptible to deformation for all variants of the sliding layer thickness.

Keywords: polymer, composite material, contact, friction, deformation behavior, lubricatio, sliding layer, material properties, large deformations, thickness.

Введение

В настоящее время существует большой выбор современных материалов и композитов на их основе [1–3], которые могут быть использованы как в качестве защитных [4; 5], защитно-упрочняющих [6; 7] и антифрикционных [8; 9] покрытий и прослоек в различных технических конструкциях и системах, так и для производства различных деталей. Защитные и защитно-упрочняющие покрытия и прослойки широко применяются в нефтегазовой отрасли [10], строительстве [11; 12], автостроении [13], оптоволоконной промышленности [14], авиации [15] и многих других отраслях, их основная функция – защищать элементы конструкции от внешних воздействий. Антифрикционные покрытия и прослойки встречаются в узлах трения [8; 16; 17], они позволяют снизить влияние фрикционного взаимодействия между деталями конструкции или с внешними системами. Основной целью использования в конструкциях и системах антифрикционных полимерных покрытий является увеличение срока службы [8; 18]. Материалы, применяемые в качестве защитных, защитно-упрочняющих и антифрикционных покрытий и прослоек: DeSolite DS-2015 и DeSolite 3471-1-152A [14; 19], сверхвысокомолекулярные полиэтилены и композиционные материалы на их основе [1–3]; антифрикционные материалы на основе фторопласта [1; 2; 8; 21]; модифицированные фторопласты [2; 8; 21] и т.д. Одним из актуальных направлений исследований является определение свойств полимерных и композиционных материалов [14; 21–23]. Интерес также представляет влияние конструкционных особенностей полимерных по-

крытий и прослоек: толщина [8; 24]; характер обработки поверхностей сопряжения [25; 26]; влияние технологических углублений [27] и отверстий и т.д.

Осуществлен анализ влияния толщины полимерного покрытия и технологических углублений под смазочный материал для случая отсутствия смазки в сферических лунках на напряженно-деформированное состояние узла трения. Рассматривается фрикционное контактное взаимодействие полимерного слоя из разных материалов со стальной полированной плитой.

Постановка задачи деформирования плоского слоя скольжения

В рамках работы выполнен анализ деформированного поведения относительно тонкого плоского слоя антифрикционного материала с лунками для смазки при контакте с полированной стальной плитой. В объеме материала выделена ячейка периодичности, которая включает одну лунку для смазочного материала. Рассматриваются четверть ячейки периодичности (рис. 1), отброшенные части заменяются условиями симметрии, а также неблагоприятный случай отсутствия смазки в лунке. Особый интерес представляет исследование влияния толщины слоя антифрикционного материала на деформационное поведение полимера в рамках контактного взаимодействия и интегральную жесткость плоского слоя скольжения. Рассматриваются три варианта толщины антифрикционной прослойки $h_p = 4, 6, 8$ мм. Максимальная глубина ячейки периодичности 15 мм, максимальная ширина – 18 мм, высота сферической лунки 2 мм,

диаметр сферической лунки 8 мм. Реализуется задача о деформировании ячейки периодичности жесткой стальной плитой высотой 3 мм давлением от 5 до 90 МПа с учетом фрикционных свойств антифрикционных материалов прослойки.

Расчетная схема: 1 – объем стальной плиты; 2 – объем полимерной прослойки; 3 – объем смазочного материала (исключен из расчетной схемы в рамках рассмотрения неблагоприятного случая отсутствия смазки в углублении). Решение задачи проводится в рамках общей математической постановки задачи контактного взаимодействия упругих тел с упругопластической прослойкой [27], при этом выполнен учет больших деформаций в объеме антифрикционного материала в рамках геометрических соотношений между деформациями и перемещениями (1):

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2} (\nabla u + (\nabla u)^T + \nabla u \cdot (\nabla u)^T). \quad (1)$$

На границах S_U и S_σ реализованы статические и кинематические граничные условия: на поверхность S_U запрещены вертикальные перемещения; на границе S_σ приложено постоянное давление от 5 до 90 МПа. На границах $S_1 - S_4$ заданы условия симметрии – запрет перемещений по нормали к поверхности.

В рамках работы выполнен анализ сходимости численного решения задачи от степени дискретизации системы. Была рассмотрена сходимость численного решения задачи от степени дискретизации системы по средним перемещениям по нормали Δu_n по основной поверхности контакта слоя скольжения и стальной плиты L_1 и границе углубления под смазку L_2 (рис. 2, а). Также рассмотрена сходимость численного решения по средним уровням контактного давления ΔP_K и контактного касательного напряжения $\Delta \tau_K$ по основной контактной поверхности L_1 . Рассмотрено четыре варианта дискретизации расчетной схемы: 1) 15; 2) 41; 3) 169; 4) 433 тыс. узловых неизвестных конечно-элементной модели. Сходимость численного решения задачи рассмотрена при постоянном коэффициенте трения 0,04 (данные производителя) на примере прослойки из модифицированного фторопласта с упругопластической моделью поведения материала при постоянном давлении 54 МПа.

Исходя из данных, показанных на рис. 2, решения задачи на конечно-элементных сетках с 169 и 433 тыс. узловых неизвестных имеют малые отличия. С целью экономии ресурсов вычислительной техники основной выбрана конечно-элементная сетка с градиентным сгущением элементов к области контакта с максимальным и минимальным размером элемента 0,5 и 0,125 мм соответственно (169 тыс. узловых неизвестных).

При деформировании часть поверхности лунки под смазку L_2 начинает вступать в контактное взаимодействие со стальной плитой. На рис. 3 показана зависимость средних параметров контакта на L_2 при разной степени дискретизации расчетной схемы.

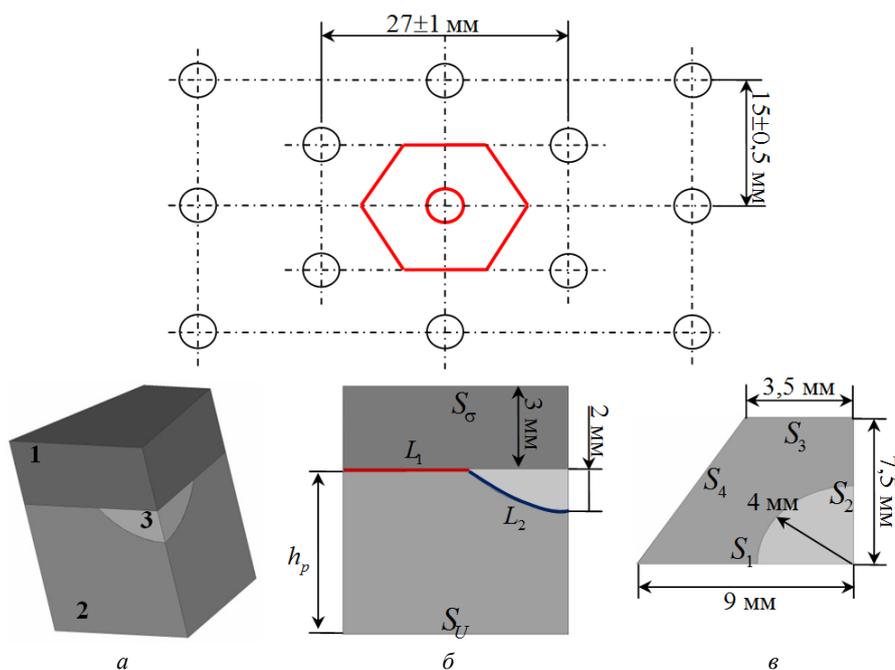


Рис. 1. Фрагмент антифрикционной прослойки с лунками для смазки: а – изометрия; б – вид спереди, в – вид сверху

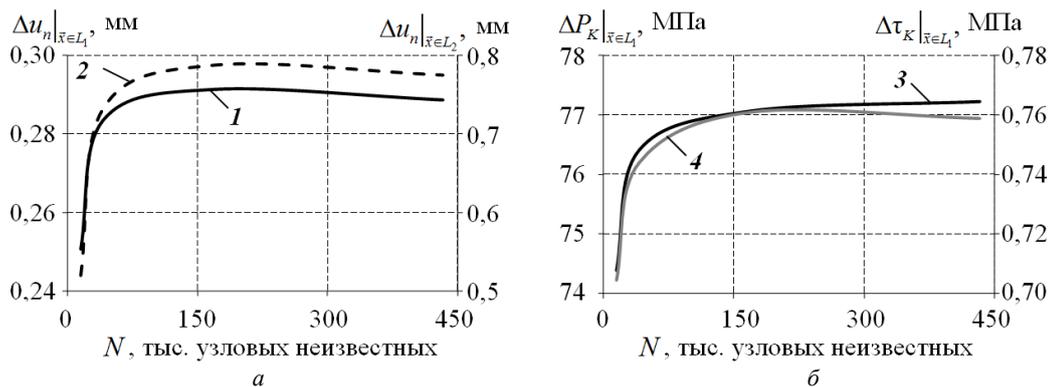


Рис. 2. Сходимость численного решения по Δu_n (а) и параметрам контакта (б):

1 – Δu_n на L_1 ; 2 – Δu_n на L_2 ; 3 – ΔP_K на L_1 ; 4 – $\Delta \tau_K$ на L_1

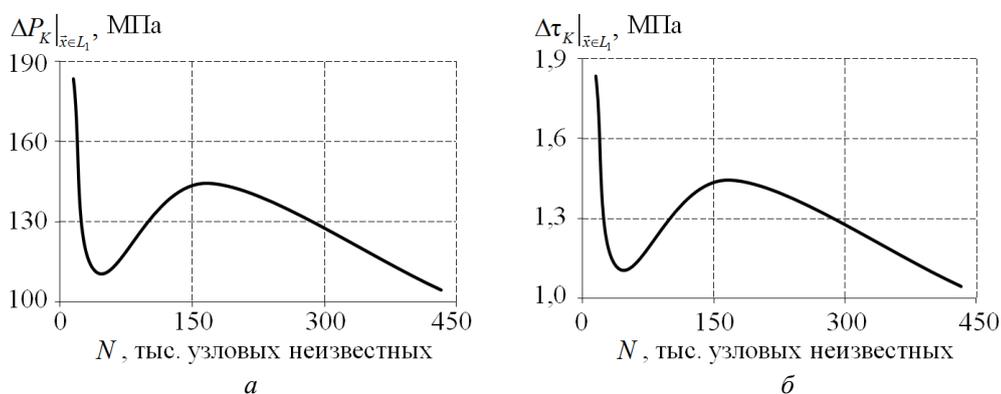


Рис. 3. Сходимость численного решения по ΔP_K (а) и $\Delta \tau_K$ (б) на L_2

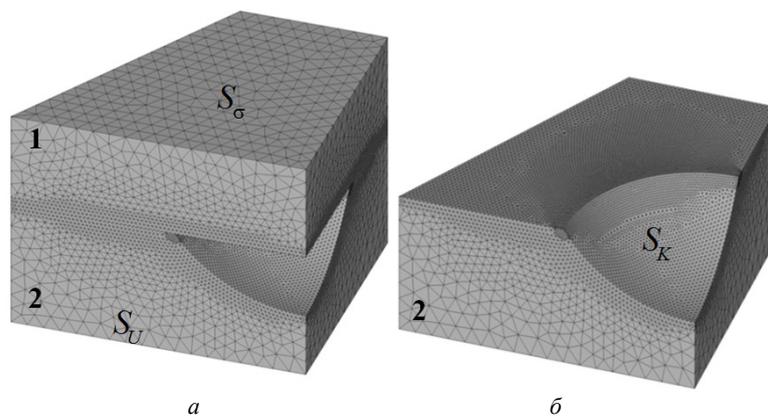


Рис. 4. Конечно-элементная модель ячейки периодичности: а – модель контактного узла; б – прослойка с лункой для смазки

Можно отметить, что конечно-элементное разбиение модели вблизи лунки под смазку требует уточнение. Для уточнения параметров контакта вблизи лунки было принято решение о сгущении сетки вблизи области сопряжения поверхностей L_1 и L_2 . Размер элемента в этой области составил 0,074 мм. В общей сложности в 4-миллиметровом слое 237 тыс. узловых неизвестных. Конечно-элементная модель контактного узла с ячейкой периодичности на примере прослойки 4 мм представлена на рис. 4.

Аналогичный вариант конечно-элементного разбиения реализуется и для слоев скольжения толщиной 6 и 8 мм, в данных случаях число узловых неизвестных составило 263 и 277 тысяч соответственно.

Материалы слоя скольжения

Для исследования механизмов деформирования слоя скольжения из полимерных материалов необходим набор физико-механических и фрикционных свойств. Исследования физико-механических свойств

материалов проводились на базе лаборатории «Нелинейной механики деформируемого твердого тела» ИМСС УрО РАН г. Пермь с использованием испытательной машины Zwick Z100SN5A. Исследования включали сложную многоступенчатую схему деформирования с разгрузками. В результате были получены данные о свойствах материалов: твердость, модуль упругого E и объемного сжатия M , коэффициент Пуассона ν . Диаграммы деформирования σ – ϵ для рассматриваемых материалов были получены экспериментально при малых скоростях деформирования цилиндрических образцов [28]. Программа натуральных испытаний включала более 30 антифрикционных полимеров и композитов на их основе. В данной работе рассматривается сравнение деформационного поведения в качестве относительно тонного слоя скольжения два материала: полимерный материал – радиомодифицированный гамма-излучением фторопласт-4; композиционный материал – фторопласт-4, наполненный сферическими микровключениями с добавкой дисульфида молибдена (МАК).

Физико-механические свойства антифрикционных материалов [21]:

– модифицированный фторопласт: твердость по Бринеллю $48,3 \pm 1,4$ Н/мм², жесткость образцов в условиях одноосного деформированного состояния (ОДС) $M(\sigma = 50$ МПа) = 4,1 ГПа, модуль упругого сжатия и коэффициент Пуассона $E = 8,638 \cdot 10^8$ Па и $\nu = 0,461$ соответственно, участок упругости находится в пределах до 2,78 МПа.

– МАК: твердость по Бринеллю – $38,9 \pm 1,6$ Н/мм², жесткость образцов в условиях ОДС $M(\sigma = 50$ МПа) = 3,41 ГПа, модуль упругого сжатия и коэффициент Пуассона $E = 8,6052 \cdot 10^8$ Па и $\nu = 0,4388$ соответственно, участок упругости находится в пределах до 2,16 МПа.

Для описания поведения антифрикционных материалов выбрана деформационная теория упругопластичности [8; 28].

По данным производителей антифрикционных материалов коэффициент трения «сталь – полимер» («сталь – композит») не превышает 0,04. При этом установлено значительное влияние трения зон сопряжения стальных элементов конструкций с антифрикционными слоями скольжения [29]. Таким образом, важным направлением исследования стала постановка и реализация натурального эксперимента по определению характера и уровня трения материалов слоя скольжения. В постановке эксперимента активное участие приняла фирма ООО «АльфаТех» (г. Пермь), использующая данные материалы в качестве слоя скольжения в опорных частях мостов. По оригинальной методике определены коэффициенты трения материалов по стальному хромированному и полированному листу без смазки и со смазкой при 5 уровнях давления в диапазоне (1,2 ÷ 60) МПа с использованием установки MTS 316 с двумя гидроприводами для проведения испытаний на сдвиг со сжатием. Исследования проводились на базе лаборатории «Центр геомеханического моделирования» ПНИПУ (г. Пермь). В результате серии экспериментов установлено сильное влияние смазки и нагрузки на коэффициент трения антифрикционных материалов. Большинство испытаний были ограничены максимальной вертикальной силой, которую может реализовать установка MTS 316. Таким образом, экспериментальные зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки были получены в пределах до 54 МПа. Для нагрузок более 54 МПа выполнена аппроксимация экспериментальных данных с использованием полинома с отрицательными степенями до -6 степени [27] (рис. 5).

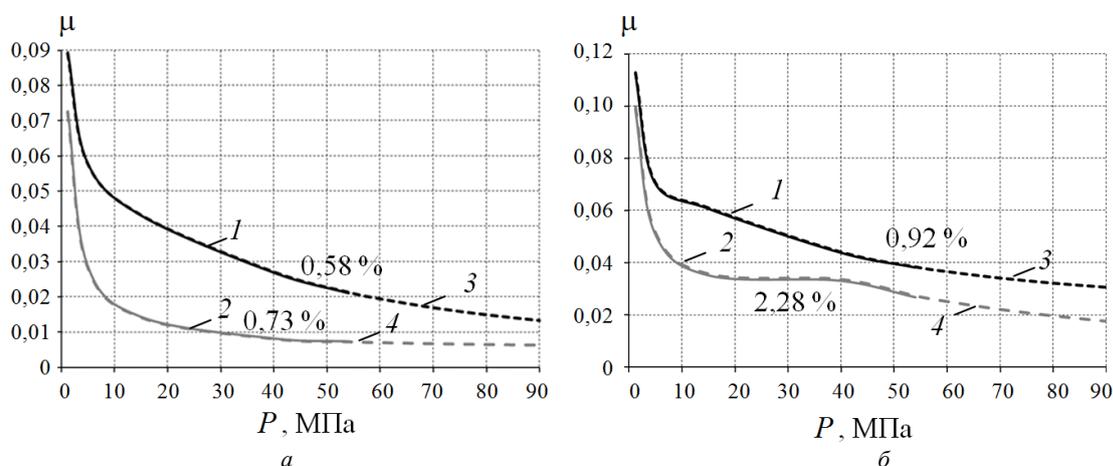


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от удельной нагрузки: а – модифицированный фторопласт; б – МАК; 1, 2 – контакт без учета смазки; 3, 4 – контакт с учетом смазки; 1, 3 – экспериментальные данные; 2, 4 – аппроксимация данных

Погрешность между данными эксперимента и аппроксимацией менее 1 % для модифицированного фторопласта и МАК при контакте без учета смазки по сопрягаемым поверхностям. При учете смазки – менее 1 % для модифицированного фторопласта, менее 2,5 % для МАК.

Сравнение напряженно-деформированного состояния слоев скольжения с углублением под смазку из разных материалов

Численные эксперименты включали: анализ деформирования слоя скольжения толщиной от 4 до 8 мм из двух антифрикционных материалов при двух вариантах трения (с учетом смазки по поверхностям сопряжения и без такового) в диапазоне удельной вертикальной нагрузки от 5 до 90 МПа. Анализ работоспособности материалов проводился для случая отсутствия смазки в сферической лунке, т.е. геометрия лунки может деформироваться под действием нагрузки. Рассматривалось влияние материала и его свойств на деформационные характеристики и параметры фрикционного контакта.

В антифрикционных прослойках из МАК углубления под смазочный материал практически не остается при нагрузке 60–70 МПа, независимо от ее толщины и фрикционных свойств, что не наблюдается у слоя скольжения из модифицированного фторопласта. При деформировании прослойки из модифицированного фторопласта самые не-

благоприятные изменения геометрической конфигурации лунки под смазочный материал наблюдаются при толщине 4 мм: остаточная высота лунки равна 20 % от начальной высоты, радиус лунки уменьшился на 46,3 %.

На рис. 6 представлен характер изменения геометрии поверхностей скольжения антифрикционного слоя при максимальной нагрузке 90 МПа для всех рассмотренных толщин прослойки.

На рис. 6 наблюдается вырождение лунки под смазочный материал в слое скольжения из МАК. Данный эффект не отмечается в прослойке из модифицированного фторопласта, объем лунки под смазочный материал деформируется, но остается даже при минимальной толщине слоя скольжения. В табл. 1 рассмотрим изменения толщины прослойки h_p при деформировании \tilde{h}_p и сравнение изменения толщин $\Delta\tilde{h}_p = \left| \tilde{h}_{p_{\text{мод. фтор.}}} - \tilde{h}_{p_{\text{МАК}}} \right|$.

Учет смазки на поверхностях сопряжения не оказывает значительного влияния на изменение толщины слоя скольжения, поэтому данные, приведенные в табл. 1, справедливы при контакте в рамках трения материалов, как с учетом, так и без учета смазки. Уменьшение толщины прослойки из модифицированного фторопласта менее значительное, наименьшее снижение толщины прослойки для всех рассмотренных материалов наблюдается у слоя скольжения толщиной 8 мм.

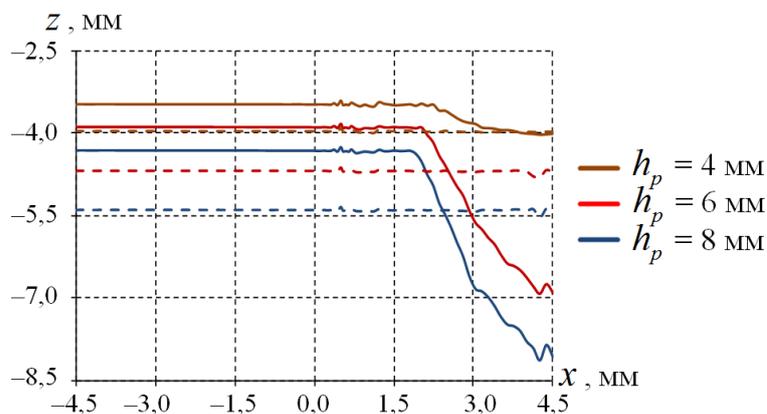


Рис. 6. Деформирование геометрической конфигурации $L_1 - L_2$ при 90 МПа: сплошная линия – модифицированный фторопласт; пунктирная линия – МАК

Таблица 1

Изменение толщины прослойки при давлении 90 МПа

h_p , мм	\tilde{h}_p , %		$\Delta\tilde{h}_p$, %
	Модифицированный фторопласт	МАК	
4	8,70	9,94	1,24
6	6,47	7,81	1,34
8	5,38	6,75	1,37

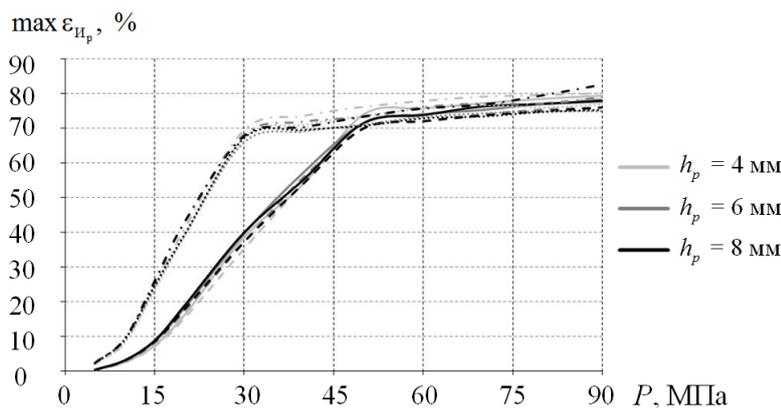


Рис. 7. Зависимость $\max \epsilon_{II_p}$ от нагрузки: сплошная линия – модифицированный фторопласт с учетом смазки; пунктирная линия – модифицированный фторопласт без учета смазки; штрих-пунктирная линия – МАК без учета смазки; круглые точки – МАК с учетом смазки

Таблица 2

Изменение интегральной жесткости слоя скольжения при давлении 90 МПа

$h_p, \text{ мм}$	$\tilde{k}_И, \%$				$\Delta \tilde{k}_И, \%$	
	мод. фторопласт		МАК		без смазки	смазка
	без смазки	смазка	без смазки	смазка		
4	53,59	61,92	66,9	73,03	13,31	11,11
6	36,57	35,19	62,62	64,47	26,04	29,28
8	1,74	1,5	33,45	32,29	31,71	30,79

Максимальная интенсивность деформаций отмечается вблизи лунки под смазочный материал. Изменение максимального уровня интенсивности пластических деформаций в модели от нагрузки представлено на рис. 7.

Интенсивность пластических деформаций слоя скольжения из МАК резко возрастает до нагрузки 30 МПа. При нагрузке более 30 МПа происходит значительное уменьшение объема лунки, за счет пластического течения материал слоя скольжения начинает заполнять объем под смазочный материал до полного вырождения лунки под смазку. В прослойке из модифицированного фторопласта значительное деформирование лунки под смазку наблюдается при нагрузках более 45 МПа, полного вырождения лунки под смазку не происходит.

Одним из деформационных характеристик, отражающих работоспособность конструкции в целом, является интегральная жесткость $k_{И}$. Максимально возможная интегральная жесткость узла трения при всех рассмотренных вариантах материала слоя скольжения составляет 864 МПа ($\max k_{И}$). В табл. 2 приведено изменение (уменьшение) интегральной жесткости $\tilde{k}_{И}$ контактного узла, %, при деформировании слоя скольжения при максимальном уровне нагрузки 90 МПа, а также сравнение интегральной жесткости прослоек из двух материалов $\Delta \tilde{k}_{И} = \left| \tilde{k}_{И, \text{мод. фтор.}} - \tilde{k}_{И, \text{МАК}} \right|$.

Интегральная жесткость прослойки толщиной 4 мм при 90 МПа, изготовленной из модифицированного фторопласта, в среднем больше на 12,4 %, чем у прослойки, изготовленной из МАК; у прослойки толщиной 6 мм – в среднем больше на 27,7 %; у прослойки толщиной 8 мм – в среднем больше на 31,3 %. Данный факт показывает, что прослойка из модифицированного фторопласта лучше воспринимает деформирование, чем слой скольжения из МАК.

Фрикционные свойства материалов оказывают значительное влияние на контактное касательное напряжение. Поэтому рассмотрим сравнение максимального уровня контактного касательного напряжения в расчетной схеме при максимальном уровне нагрузки для материалов прослойки на примере толщины слоя скольжения 8 мм (рис. 8).

Максимальное контактное касательное напряжение прослойки из модифицированного фторопласта не превышает 11 и 4 МПа без учета и с учетом смазки по поверхностям сопряжения соответственно. Максимальный уровень τ_k возрастает до нагрузки 40 МПа, с дальнейшим плавным снижением параметра при всех вариантах трения «сталь – полимер». Максимальный уровень контактного касательного напряжения прослойки из МАК значительно выше. Данный эффект особенно заметен при контактном взаимодействии с учетом

смазки по поверхностям сопряжения. Максимальный уровень τ_k возрастает до нагрузки 30 МПа, при дальнейшем увеличении нагрузки параметр то снижается, то повышается в диапазонах 11,5–15 и 8,8–9,2 МПа без учета и с учетом смазки по поверхностям сопряжения соответственно. Изменение уровня и характера распределения контактного касательного напряжения связано с характером распределения статусов контактного состояния (прилипание, проскальзывание, «неконтакт»).

На рис. 9 показана эволюция характера распределения статусов контактного состояния при увеличении нагрузки на контактный узел для случая фрикционного контакта без учета смазки по поверхностям сопряжения.

В прослойке из модифицированного фторопласта наблюдается сохранение остаточного объема углубления под смазочный материал при увеличении нагрузки. Материал слоя скольжения лунки находится в состоянии близкого «неконтакта» материалов; из-за пластического течения материала полимерного слоя на поверхности контакта преобладает проскальзывание.

В прослойке из МАК при увеличении нагрузки наблюдается вырождение лунки под смазочный материал: из-за большого деформирования материала на поверхности сопряжения преобладает полное «прилипание», материал остается в состоянии проскальзывания в области вырожденной лунки, так как стремится заполнить микропустоты.

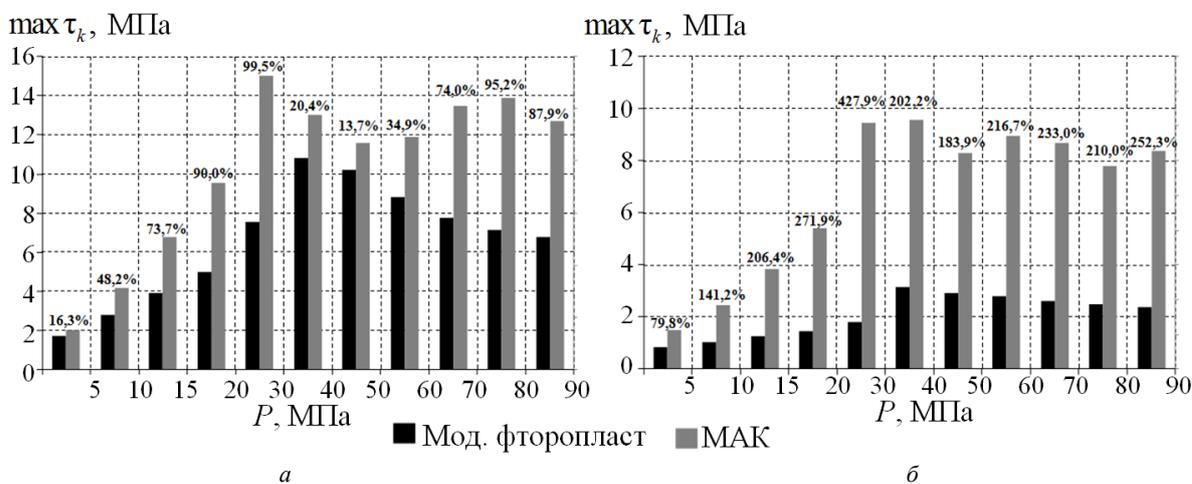


Рис. 8. Максимальное контактное касательное напряжение ($h_p = 8$ мм): а – без учета смазки; б – с учетом смазки

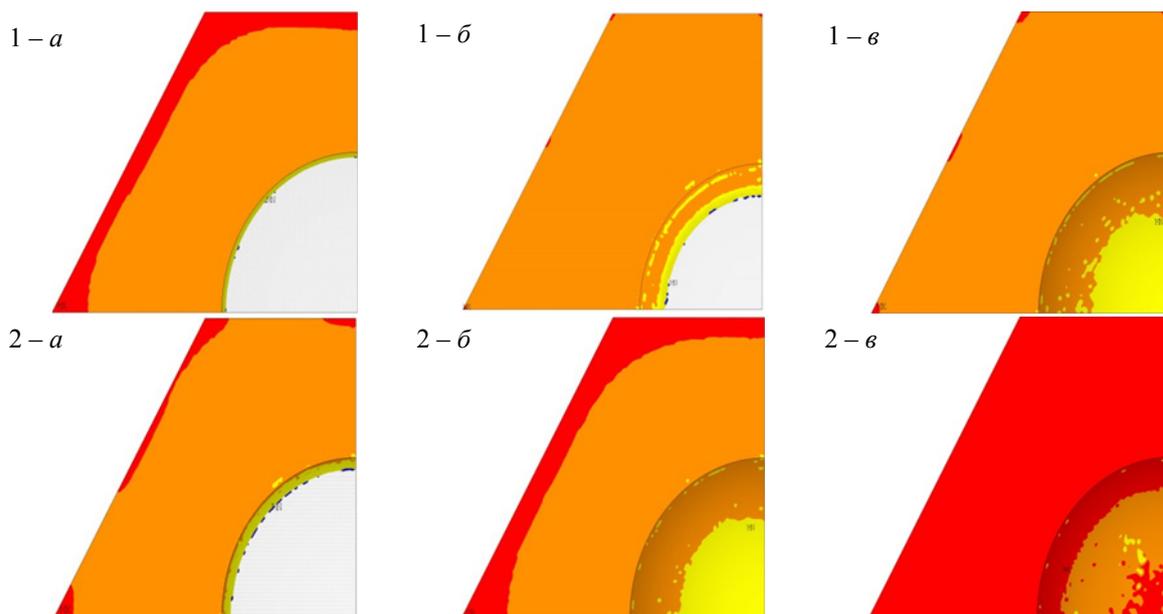


Рис. 9. Характер распределения статусов контакта: красный – прилипание; оранжевый – проскальзывание; желтый – «не контакт»; 1 – модифицированный фторопласт, 2 – МАК; а – 30, б – 60, в – 90 МПа

На основе проведенного сравнения можно сказать, что слой скольжения из модифицированного фторопласта обладает рядом преимуществ:

- уровень деформирования толщины и профиля слоя меньше, благодаря чему наблюдается меньшее влияние нагрузки на параметры контактного взаимодействия;

- обладает меньшим максимальным уровнем пластических деформаций при нагрузках меньше 40 МПа, область определения максимальной интенсивности пластических деформаций занимает минимальный объем материала слоя скольжения;

- остаточная интегральная жесткость контактного узла больше, чем при прослойке из МАК;

- толщина слоя скольжения влияет на контактное деформирование слоя с лункой под смазку только для слоя скольжения из модифицированного фторопласта, при увеличении толщины остаточный объем лунки под смазку при деформировании увеличивается.

Заключение

В рамках работы выполнена серия натуральных экспериментов по определению свойств материалов антифрикционных покрытий и прослоек. Получены зависимости коэффициента трения от давления, действующего на штамп, подобрана функция, аппроксимирующая экспериментальные данные с погрешностью до 1 % для модифицированного фторопласта и погрешностью до 2,28 % для МАК.

Построены численные конечно-элементные модели части плоского слоя скольжения с лункой под смазочный материал. Рассмотрено контактное деформирование слоя скольжения полированной стальной плитой для неблагоприятного случая отсутствия смазки в лунке. Выполнена оценка схожести численного решения задачи.

Выполнено исследование деформационного поведения слоя скольжения из одного полимерного и одного композиционного материала, полученных на основе фторопласта-4, при широком диапазоне нагрузок (от 5 до 90 МПа) с учетом трения. Фрикционные свойства оказывают влияние на качественные и количественные характеристики зоны контакта. Наиболее сильное влияние трение оказывает на контактное касательное напряжение. Выявлено, что прослойка из модифицированного фторопласта (полимерный материал) менее подвержена деформированию, что позволяет контактному узлу сохранять достаточно высокий уровень интегральной жесткости системы. При увеличении толщины слоя скольжения из модифицированного фторопласта наблюдается снижение деформирования материала, что отражает увеличение остаточ-

ного объема лунки под смазку. При деформировании слоя скольжения из МАК (композиционный материал) отмечается полное вырождение углубления под смазку, слой становится плоским.

Модифицированный фторопласт и другие полимеры и композиты, которые могут быть отнесены к антифрикционным материалам, нашли широкое применение в мостостроительных конструкциях в элементах опорных частей и температурных швов. Исследование деформационного поведения материалов в качестве относительно тонких слоев скольжения при учете взаимодействия с металлическими и неметаллическими элементами конструкций позволит расширить область применения материалов на другие отрасли промышленности и техники.

Библиографический список

1. Grellmann W., Langer B. Deformation and fracture behaviour of polymer materials. – Springer, 2017. – 533 p.
2. Yi X.-S., Du S., Zhang L. Composite Materials Engineering. – Vol. 1: Fundamentals of Composite Materials. – Springer, 2018. – 765 p.
3. Hasnain Md.S., Nayak A.M., Alkahtani S. Polymeric and natural composites: materials, manufacturing and biomedical applications. – Springer, 2022. – 463 p.
4. Булатов М.И., Шацов А.А. Разрушение кварцевых оптических волокон с различными защитными покрытиями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 47–52.
5. The effect of organosilanes on protective properties of polymer coatings for underground pipelines. Inhibition of cathodic peeling-off of polymer coatings from metal / M.A. Petrunin, L.B. Maksaeva, A.A. Rybkin, N.A. Gladkikh, T.A. Yurasova, M.A. Maleeva, A.I. Marshakov // Protection of metals and physical chemistry of surfaces. – 2019. – Vol. 55. – P. 1335–1340.
6. Сметанников О.Ю., Труфанов А.Н., Лесникова Ю.И. Исследование оптико-механических характеристик волокна в условиях термоцикла // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 6–2(86). – С. 255–260.
7. Исследование влияния отрицательных температур на оптические потери волоконного световода в защитно-упрочняющем покрытии на основе полиамидокислоты / М.И. Булатов, И.С. Азанова, А.Ф. Косолапов, А.Н. Смирнова, И.Д. Саранова // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2019. – Т. 46, № 9. – С. 9–13.
8. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Influence analysis of the antifriction layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements // *Lubricants*. – 2022. – Vol. 10, № 2. – Art. 30.
9. Friction and wear behaviours of hard-coated/ uncoated bearing steels under nano-additive oil lubrication / M.H. Sulaiman, N.H. Nordin, N.A. Sukindar, A.N. Dahnel, S. Kamaruddin // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – P. 65–68.

10. Иванова О.В., Короткова Л.Н., Халиков Р.М. Управление качеством нанесения защитных макромолекулярных покрытий на трубопроводном оборудовании нефтегазовой отрасли // *Современные материалы, техника и технологии*. – 2019. – № 3(24). – С. 43–46.

11. Полимерные защитные покрытия от биокоррозии / В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев, В.А. Бойчук, О.В. Стоянов, А.М. Мухаметова // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17, № 18. – С. 149–154.

12. Орлов В.А., Орлов Е.В., Шлычков Д.И. Защитные полимерные покрытия для трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения // *Вестник МГСУ*. – 2009. – № 4. – С. 168–172.

13. Optimization of ingredients for two-layer epoxy coating for protection of sea and river vehicles / A. Buketov, S. Yakushchenko, T. Cherniavska, D. Zhytnyk, N. Buketova, T. Ivchenko, R. Negrutsa, I. Fesenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – Vol. 1246. – P. 612–626.

14. Shardakov I.N., Trufanov A.N. Identification of the temperature dependence of the thermal expansion coefficient of polymers // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – Art. 3035. <https://doi.org/10.3390/polym13183035>

15. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Полимерное пленочное покрытие для конструкций из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. – 2017. – № 2(50). – С. 33–40.

16. Полимерные составы для защиты от контактной коррозии / В.А. Кузнецова, Л.В. Семенова, Г.Г. Шаповалов, Д.В. Чесноков // *Авиационные материалы и технологии*. – 2017. – № 4(49). – С. 70–76.

17. Янкилевич А.М. Антифрикционные твердосмазочные покрытия Modengy™ для узлов трения и крепежа оборудования морских буровых платформ // *Трубопроводная арматура и оборудование*. – 2020. – № 6 (111). – С. 54–55.

18. Коньгин А.А., Пилюшина Г.А. Повышение износостойкости зубчатых передач нанесением антифрикционных полимерных покрытий // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. – 2019. – № 29. – С. 43–47.

19. Защитные покрытия волоконной решетки Брэгга для уменьшения влияния механического воздействия на ее спектральные характеристики / А.С. Мунько, С.В. Варжель, С.В. Архипов, А.Н. Забиякин // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 241–245.

20. Гамма-модифицирование радиационно-защитного фторопластового композита авиационно-космического назначения / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, Д.Г. Тарасов, О.Д. Едаменко // *Перспективные материалы*. – 2013. – № 1. – С. 13–18.

21. Адамов А.А. Экспериментальное обеспечение и идентификация модели изотропного тела с упругой объемной сжимаемостью дисперсно-наполненных композитов на основе фторопласта и сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2013. – № 2(130). – С. 28–37.

22. Balyakin V.B., Khatipov S.A., Pilla C.K. Experimental studies of tribotechnical characteristics of radiation-modified PTFE to use in rotor supports // *Journal of Friction and Wear*. – 2015. – № 36. – P. 346–349.

23. Исследование триботехнических характеристик антифрикционных материалов и износостойких алмазо-

подобных покрытий в целях их использования в узлах трения оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования земли / Р.М. Копятевич, А.Т. Курамшин, В.Д. Митрофанов, А.А. Потапов // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2016. – № 5 (90). – С. 81–88.

24. Kudryavtsev O.A., Ignatova A.V., Olivenko N.A. The influence of thickness on residual flexural strength of composite with low-velocity impact damages: experimental study // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2021. – № 3. – P. 6–11.

25. Polymer Coatings Technology and Applications: Polymer Coating Methods / D. Sharma, M. Rawat, J. Sharma, S. Ahuja, A. Chandra, S. Barman, R. Arya // *Taylor & Francis Group*, 2021. – 42 p.

26. Ogar P., Kozhevnikov A., Elsukov V. Indentation of rigid rough surface into polymer coating layer // *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. – 2018. – Vol. 7. – P. 192–195.

27. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Deformation behavior of the flat sliding layer of the spherical bearing // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 10, № 5. – P. 99–107.

28. Kamenskikh A.A., Trufanov N.A. Regularities interaction of elements contact spherical unit with the antifrictional polymeric interlayer // *Journal of Friction and Wear*. – 2015. – Vol. 36, № 2. – P. 170–176.

29. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifriction layer made of different materials // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2020. – № 4. – P. 15–26.

References

1. Grellmann W., Langer B. Deformation and fracture behaviour of polymer materials. Springer, 2017, 533 p.

2. Yi X.-S., Du S., Zhang L. Composite Materials *Engineering*, vol. 1: *Fundamentals of Composite Materials*. Springer, 2018, 765 p.

3. Hasnain Md.S., Nayak A.M., Alkahtani S. Polymeric and natural composites: materials, manufacturing and biomedical applications. Springer, 2022, 463 p.

4. Bulatov M.I., Shatsov A.A. Razrushenie kvartsevykh opticheskikh volokon s razlichnymi zashchitnymi pokrytiami [Destruction of quartz optical fibers with different protective coatings]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 47–52.

5. Petrunin M.A., Maksaeva L.B., Rybkin A.A., Gladkikh N.A., Yurasova T.A., Maleeva M.A., Marshakov A.I. The effect of organosilanes on protective properties of polymer coatings for underground pipelines. Inhibition of cathodic peeling-off of polymer coatings from metal. *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*, 2019, vol. 55, pp. 1335–1340.

6. Smetannikov O.Iu., Trufanov A.N., Lesnikova Iu.I. Issledovanie optiko-mekhanicheskikh kharakteristik volokna v usloviiakh termotsikla [Study of optical and mechanical characteristics of fibers under thermocycle conditions]. *Izvestia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 6–2(86), pp. 255–260.

7. Bulatov M.I., Azanova I.S., Kosolapov A.F., Smirnova A.N., Saranova I.D. Issledovanie vliianiia otritsatel'nykh temperatur na opticheskie poteri volokonnoho svetovoda v zashchitno-uprochniushchem pokrytii na osnove poliamidokisloty [Study of the Effects of Negative Temperatures on Optical Loss of Fiber Optic Fiber in a Polyamide Acid-based Protective-Strengthening Coating]. *Kratkie soobshcheniia po fizike FIAN*, 2019, vol. 46, no. 9, pp. 9–13.
8. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Influence analysis of the antifriction layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements. *Lubricants*, 2022, vol. 10, no. 2, Art. 30.
9. Sulaiman M.H., Nordin N.H., Sukindar N.A., Dahnel A.N., Kamaruddin S. Friction and wear behaviours of hardcoated uncoated bearing steels under nano-additive oil lubrication. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2022, pp. 65–68.
10. Ivanova O.V., Korotkova L.N., Khalikov R.M. Upravlenie kachestvom naneseniia zashchitnykh makromolekuliarnykh pokrytii na truboprovodnom oborudovanii neftegazovoi otrasli [Quality Management of Macromolecular Protective Coatings on Pipeline Equipment for the Oil and Gas Industry]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 3(24), pp. 43–46.
11. Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Boichuk V.A., Stoianov O.V., Mukhametova A.M. Polimernye zashchitnye pokrytiia ot biokorrozii [Polymeric protective coatings against biocorrosion]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 18, pp. 149–154.
12. Orlov V.A., Orlov E.V., Shlychkov D.I. Zashchitnye polimernye pokrytiia dlia truboprovodov sistem vodosnabzheniia i vodootvedeniia [Protective polymer coatings for pipelines of water supply and drainage systems]. *Vestnik MGSU*, 2009, no. 4, pp. 168–172.
13. Buketov A., Yakushchenko S., Cherniavska T., Zhytnyk D., Buketova N., Ivchenko T., Negrutza R., Fesenko I. Optimization of ingredients for two-layer epoxy coating for protection of sea and river vehicles. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1246, pp. 612–626.
14. Shardakov I.N., Trufanov A.N. Identification of the temperature dependence of the thermal expansion coefficient of polymers. *Polymers*, 2021, vol. 13, Art. 3035. <https://doi.org/10.3390/polym13183035>
15. Raskutin A.E., Khrul'kov A.V., Iazvenko L.N. Polimernoe plenochnoe pokrytie dlia konstruksii iz PKM (obzor) [Polymer film coating for PCM structures (overview)]. *Trudy VIAM*, 2017, no. 2(50), pp. 33–40.
16. Kuznetsova V.A., Semenova L.V., Shapovalov G.G., Chesnokov D.V. Polimernye sostavy dlia zashchity ot kontakt-noi korrozii [Polymer compositions for protection against contact corrosion]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 4(49), pp. 70–76.
17. Iankilevich A.M. Antifriktsionnye tverdosmazochnye pokrytiia Modengy™ dlia uzlov treniia i krepezhna oborudovaniia morskikh burovykh platform [Modengy™ antifriction solid-lubricant coatings for friction units and fasteners of offshore drilling equipment]. *Truboprovodnaia armatura i oborudovanie*, 2020, no. 6 (111), pp. 54–55.
18. Konygin A.A., Piliushina G.A. Povyshenie iznosostoikosti zubchatykh peredach naneseniem antifriktsionnykh polimernykh pokrytii [Increasing wear resistance of gears by applying antifriction polymer coatings]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*, 2019, no. 29, pp. 43–47.
19. Mun'ko A.S., Varzhe' S.V., Arkhipov S.V., Zabiikin A.N. Zashchitnye pokrytiia volokonnoi reshetki Bregga dlia umen'sheniia vliianiia mekhanicheskogo vozdeistviia na ee spektral'nye kharakteristiki [Protective coatings of the Bragg fiber grating to reduce the effect of mechanical impact on its spectral characteristics]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 241–245.
20. Pavlenko V.I., Bondarenko G.G., Tarasov D.G., Edamenko O.D. Gamma-modifitsirovanie radiatsionno-zashchitnogo ftoroplastovogo kompozita aviatsionno-kosmi-cheskogo naznacheniiia [Gamma-modification of radiation-proof fluoroplastic composite for aerospace applications]. *Perspektivnye materialy*, 2013, no. 1, pp. 13–18.
21. Adamov A.A. Eksperimental'noe obespechenie i identifikatsiia modeli izotropnogo tela s uprugoi ob'emnoi szhimaemost'iu dispersno-napolnennykh kompozitov na osnove ftoroplasta i sverkhvysokomolekuliarnogo polietilena [Experimental support and identification of an isotropic body model with elastic volumetric compressibility of disperse-filled composites based on fluoroplastic and ultra-high molecular weight polyethylene]. *Konstruksii iz kompozitsionnykh material*, 2013, no. 2(130), pp. 28–37.
22. Balyakin V.B., Khatipov S.A., Pilla C.K. Experimental studies of tribotechnical characteristics of radiation-modified PTFE to use in rotor supports. *Journal of Friction and Wear*, 2015, no. 36, pp. 346–349.
23. Kopyatkevich R.M., Kuramshin A.T., Mitrofanov V.D., Potapov A.A. Issledovanie tribotekhnicheskikh kharakteristik antifriktsionnykh materialov i iznosostoikikh almazopodobnykh pokrytii v tseliakh ikh ispol'zovaniia v uzlakh treniia optiko-elektronnoi apparatury kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniia zemli [Study of tribotechnical characteristics of antifriction materials and wear-resistant diamond-like coatings for their use in friction units of optoelectronic equipment of spacecrafts for remote sensing]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2016, no. 5 (90), pp. 81–88.
24. Kudryavtsev O.A., Ignatova A.V., Olivenko N.A. The influence of thickness on residual flexural strength of composite with low-velocity impact damages: experimental study. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 3, pp. 6–11.
25. Sharma D., Rawat M., Sharma J., Ahuja S., Chandra A., Barman S., Arya R. Polymer Coatings Technology and Applications: Polymer Coating Methods. *Taylor and Francis Group*, 2021, 42 p.
26. Ogar P., Kozhevnikov A., Elsukov V. Indentation of rigid rough surface into polymer coating layer. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 2018, vol. 7, pp. 192–195.
27. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Deformational behavior of the flat sliding layer of the spherical bearing. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, no. 5, pp. 99–107.

28. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Regularities interaction of elements contact spherical unit with the antifrictional polymeric interlayer. *Journal of Friction and Wear*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 170-176.

29. Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifriction layer made of different materials. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 4, pp. 15–26.

Поступила: 30.03.2022

Одобрена: 12.05.2022

Принята к публикации: 27.05.2022

Об авторах

Адамов Анатолий Арсангалеевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред (Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: adamov.aa@ya.ru).

Каменских Анна Александровна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 13, e-mail: ana_kamenskih@mail.ru).

Носов Юрий Олегович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» Пермского национального исследовательского

политехнического университета (Россия, 614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 13, e-mail: ura.4132@yandex.ru).

About the authors

Anatoliy A. Adamov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Laboratory of Nonlinear Mechanics of a Deformable Solid Body ICMM (1, st. Academica Koroleva, Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: adamov.aa@ya.ru).

Anna A. Kamenskih (Perm, Russian Federation) – Ph. D. In Technical Sciences, Ass. Professor, Department of «Computational mathematics mechanics and biomechanics» (13, st. Professora Pozdeeva, Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: anna_kamenskih@mail.ru).

Yuriy O Nosov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. student of «Computational mathematics mechanics and biomechanics» (13, st. Professora Pozdeeva, Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: ura.4132@yandex.ru).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.