



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.02

УДК 539.374

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ ЧАСТИ С АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Адамов<sup>1</sup>, А.А. Каменских<sup>2</sup>, А.П. Панькова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 09 ноября 2020 г.  
Принята: 12 декабря 2020 г.  
Опубликована: 30 декабря 2020 г.

#### Ключевые слова:

свойства материалов, полимер, композиционный материал, трение, смазка, контакт, опорная часть, закономерности деформирования, эксперимент, численный эксперимент.

### АННОТАЦИЯ

В условиях урбанизации территорий России и мира возросли требования к ответственным элементам транспортно-логистических систем. К таким конструкциям относятся опорные части пролетных строений мостов, которые воспринимают вертикальные и горизонтальные нагрузки от мостового пролета, а также поглощают тепловое расширение и сжатие, усадки, сейсмические возмущения и т.д. Из-за стабильного роста парка машин и увеличения нагрузок на элементы мостовых сооружений возрастают требования к прочности, долговечности, износостойкости, безремонтным периодам работы и т.д., предъявляемые к опорным частям пролетных строений мостов. При этом на протяжении длительного времени международные и российские компании занимаются разработкой и созданием новых полимерных и композиционных материалов, которые обладают улучшенными физико-механическими, фрикционными, термомеханическими и реологическими свойствами и могут быть использованы в качестве тонких слоев скольжения опорных частей мостов. Выделен ряд задач, связанный с исследованием влияния свойств материалов и геометрической конфигурации опорных частей мостов с целью рационализации работы конструкции. В статье рассмотрено три актуальные задачи механики деформируемого твердого тела. Выявлены качественные и количественные закономерности деформационного поведения современных антифрикционных полимерных и композиционных материалов в качестве относительно тонких слоев скольжения сферических опорных частей мостов с целью формулировки научно обоснованных практических рекомендаций по подбору материала прослойки относительно работы исследуемого узла. Проведен анализ влияния физико-механических, фрикционных, термомеханических и реологических свойств материалов слоя скольжения на деформирование конструкции в целом и изменение параметров зоны контакта в частности, а также анализ влияния геометрической конфигурации слоя скольжения на работу конструкции. Установлено, что при фрикционном контакте с учетом смазки по сопрягаемым поверхностям наблюдается значительное снижение площади полного сцепления контактных поверхностей, в том числе до 0, и появление или увеличение площади расхождения контактных поверхностей. При этом, если увеличить толщину слоя скольжения, процент поверхности, на которой наблюдается расхождение контактных поверхностей, уменьшается в среднем более чем в 2 раза.

© ПНИПУ

© Адамов Анатолий Арсангалеевич – д.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: [adamov.aa@ya.ru](mailto:adamov.aa@ya.ru), [iD: 0000-0001-6800-337X](https://orcid.org/0000-0001-6800-337X)

Каменских Анна Александровна – к.т.н., доц., e-mail: [anna\\_kamenskih@mail.ru](mailto:anna_kamenskih@mail.ru), [iD: 0000-0002-3012-2418](https://orcid.org/0000-0002-3012-2418)

Панькова Анастасия Петровна – магистрант, e-mail: [anastasia\\_pankova@mail.ru](mailto:anastasia_pankova@mail.ru), [iD: 0000-0001-7426-1287](https://orcid.org/0000-0001-7426-1287)

Anatoliy A. Adamov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: [adamov.aa@ya.ru](mailto:adamov.aa@ya.ru),

[iD: 0000-0001-6800-337X](https://orcid.org/0000-0001-6800-337X).

Anna A. Kamenskikh – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [anna\\_kamenskih@mail.ru](mailto:anna_kamenskih@mail.ru), [iD: 0000-0002-3012-2418](https://orcid.org/0000-0002-3012-2418)

Anastasia P. Pankova – Master Student, e-mail: [anastasia\\_pankova@mail.ru](mailto:anastasia_pankova@mail.ru), [iD: 0000-0001-7426-1287](https://orcid.org/0000-0001-7426-1287)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)



## NUMERICAL ANALYSIS OF THE SPHERICAL BEARING GEOMETRIC CONFIGURATION WITH ANTIFRICTION LAYER MADE OF DIFFERENT MATERIALS

A.A. Adamov<sup>1</sup>, A.A. Kamenskih<sup>2</sup>, A.P. Pankova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Continuous Media Mechanics, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 09 November 2020

Accepted: 12 December 2020

Published: 30 December 2020

#### Keywords:

materials properties, polymer, composite material, friction, lubrication, contact, bearing, deformation laws, experiment, numerical experiment.

### ABSTRACT

Requirements to critical elements of transport and logistics systems have been increased due urbanization in the territories of Russia and the world. Bridge bearings, which perceive the vertical and horizontal loads from the bridge span, as well as absorb thermal expansion and contraction, shrinkage, seismic disturbances, etc. refer to such elements. Requirements to strength, durability, wear resistance, operation maintenance-free periods, etc., imposed on the bridge bearing are increasing due to a stable growth of loads on the bridge elements and increase in vehicle fleets. Recently, international and Russian companies have been engaged in development of new polymeric and composite materials, which have improved physical and mechanical, frictional, thermo-mechanical and rheological properties and can be used as a thin layer of sliding bearings bridges. A number of problems are outlined in studying material properties and geometric configuration of bridge bearings in order to rationalize the work of its structure. Three topical problems of solid mechanics are reviewed in the work. This is the identification of qualitative and quantitative patterns of the deformation behavior of modern antifriction polymer and composite materials as relatively thin sliding layers of bridge spherical bearings in order to formulate scientifically grounded recommendations for the selection of the interlayer material regarding the study unit operation. This is an analysis of the influence of the sliding layer material physical and mechanical, frictional, thermomechanical and rheological properties on the structure deformation as a whole and the change in the contact zone parameters, in particular. It is an analysis of the influence of the sliding layer geometric configuration on the structure performance. A significant decrease in the area of full adhesions of the contact surfaces, including up to 0, and the occurrence or increase in the area of the divergence of the contact surfaces (no contact) is observed during frictional contact taking into account the lubrication on the mating surfaces. The surface percentage on which the contact surfaces divergence (no contact) is observed decreases, on average by more than 2 times, if the sliding layer thickness is increased.

© PNRPU

### Введение

В 60–80 гг. XX в. наблюдалось значительное количество научных и инженерных изысканий в области мостостроения, связанных с изменением конструкций опорных частей пролетных строений мостов [1, 2]. В 1974 г. в книге «Опорные части в строительстве. Проектирование, расчет, нормы» [3] отмечено, что создание новых типов опорных частей с использованием современных материалов связано с прогрессом в сфере строительства и мостостроения. В настоящее время наблюдается значительное увеличение нагрузки на транспортно-логистические системы и их несущие элементы [4–6], что связано с постоянным ростом численности парка автомобилей по всему миру [7]. Требования, предъявляемые к прочности, надежности и долговечности элементов транспортных систем в целом и мостовых сооружений в частности, значительно возросли [6–10], что привело к увеличению числа научных и инженерных разработок, направленных на изменение транспортных систем и их элементов. Опорные части пролетных строений мостов [11, 12] относятся к ответственным элементам мостовых сооружений и воспринимают вертикальные и горизонтальные нагрузки от мостового пролета, а также поглощают тепловое рас-

ширение и сжатие, усадки, сейсмические возмущения. Одним из актуальных направлений исследований механики мостостроения является оптимизация и рационализация работы элементов транспортно-логистических систем, к которым относятся опорные части мостовых сооружений. При этом многие разработки, направленные на рационализацию работы конструкций опорных частей, связаны с использованием новых материалов с улучшенными свойствами [13, 14].

На сегодняшний день в мире существует большой набор современных полимерных материалов и композитов на их основе, которые можно использовать в качестве антифрикционных покрытий и прослоек в узлах трения [13–15]. Новые полимерные и композиционные материалы [13, 14] пригодны в той или иной мере для работы в узлах мостовых сооружений, в том числе и в опорных частях мостов, и могут обладать улучшенными физико-механическими, фрикционными, термо-механическими и реологическими свойствами. В связи с этим задачи исследования поведения полимерных материалов в различных условиях с целью определения свойств и деформационных характеристик являются актуальными. В России и мире на настоящий момент ученые занимаются исследованием свойств современных полимеров и композитов [13–19 и др.]. При этом

до сих пор отмечается недостаточность данных о фрикционных и реологических свойствах исследуемых материалов. Таким образом, многие исследования направлены на изучение фрикционных свойств: разрабатываются новые методы изучения триботехнологии [20], триботехнических свойств конструкционных материалов [21–23] и композитов [24, 25]. Широко используются экспериментальные методы исследования триботехнических свойств антифрикционных материалов [26–29], а для их качественного оценивания проводят исследования влияния приработки поверхностей на оценку фрикционных свойств материалов [30]. При этом актуальны исследования, анализирующие влияние свойств материалов элементов опорных частей мостов, в том числе фрикционных, на деформационное поведение конструкций [31–33].

Таким образом, можно выделить два масштабных направления исследования работы элементов мостовых сооружений: рационализация и оптимизация геометрической конфигурации ответственных элементов мостовых сооружений (температурные швы, опорные части и т.д.) в рамках механики деформируемого твердого тела; анализ влияния свойств материалов ответственных узлов транспортно-логистических систем на деформационное поведение конструкций.

### Постановка задачи и материалы

В работе рассмотрено три актуальные задачи механики деформируемого твердого тела: выявление качественных и количественных закономерностей деформационного поведения современных антифрикционных полимерных и композиционных материалов в качестве относительно тонких слоев скольжения сферических опорных частей мостов с целью формулировки научно обоснованных практических рекомендаций по подбору материала прослойки относительно термо-силовых условий работы исследуемого узла; анализ влияния физико-механических, фрикционных, термомеханических и реологических свойств материалов слоя скольжения на деформирование конструкции в целом и изменение параметров зоны контакта в частности; анализ влияния геометрической конфигурации слоя скольжения на работу конструкции.

Объектом исследования является конструкция сферической опорной части, воспринимающая нагрузки от мостового пролета. Расчетная схема задачи включает (рис. 1): верхнюю стальную плиту со сферическим сегментом 1, нижнюю стальную плиту со сферическим вырезом 2, упругопластическую полимерную прослойку 3. Рассмотрена модель сферической опорной части Л-100 производства ООО «АльфаТех» (г. Пермь, Россия), работающая на номинальную вертикальную нагрузку от мостового пролета 1000 кН.

В рамках анализа влияния геометрической конфигурации конструктивных элементов сферической опорной части толщина антифрикционной полимерной

прослойки  $h_p$  варьируется от 4 до 8 мм. Минимальная высота нижней плиты со сферическим вырезом варьируется в зависимости от толщины прослойки от  $h_2 = 20$  мм до  $h_2 = 16$  мм. Максимальная высота нижней плиты уменьшается на приращение толщины антифрикционной прослойки. При этом максимальная высота верхней плиты и максимальная ширина конструкции не изменяются и составляют  $h_1 = 30$  мм и  $b_k = 2b = 155$  мм соответственно.

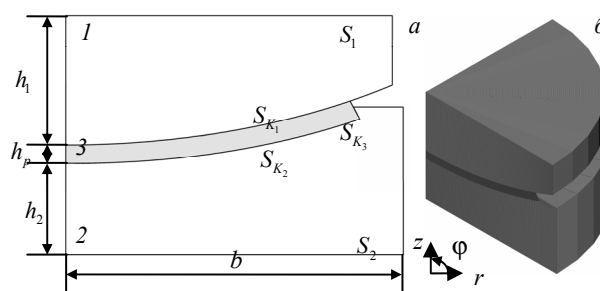


Рис. 1. Расчетная схема опорной части (а) и конечно-элементная модель (б)

Fig. 1. Calculation scheme of the bearing (a) and the finite-element model (b)

Общая математическая постановка задачи контакта элементов сферической опорной части была ранее описана в [33] и при реализации задачи дополняется учетом возможности появления больших деформаций в объеме антифрикционной прослойки. Задача рассматривается в осесимметричной постановке, для описания модели поведения материала антифрикционной прослойки выбрана деформационная теория пластичности. Математическая постановка дополняется кинематическими и статическими граничными условиями (1), (2).

На поверхности  $S_2$  реализованы граничные условия вида

$$u_z = 0, \sigma_{rz} = 0, r \in S_2. \quad (1)$$

При взаимодействии поверхности  $S_1$  с конструкцией мостового пролета изгиб поверхности в пространстве практически невозможен. Вертикальную нагрузку можно представить в виде давления, при этом интеграл по поверхности от давления  $P$  равен прикладываемой вертикальной нагрузке. Таким образом, граничные условия на поверхности  $S_1$  имеют вид:

$$\int_{S_1} P dS_1 = -Q_z, u_z(r, z_{S_1}) = U = \text{const}, \sigma_{rz} = 0, r \in S_1, \quad (2)$$

где  $Q_z$  – вертикальная сила, приложенная к  $S_1$ ;  $U$  – неизвестная величина.

Расчетная схема была реализована в программном комплексе ANSYS, методом конечных элементов (МКЭ) с использованием четырехугольной конечно-элементной сетки, с двумя степенями свободы в каждом узле. На границе контакта задавался двухузловой пло-

ский элемент, который позволяет реализовать контактное взаимодействие типа поверхность – поверхность. Моделируется фрикционное контактное взаимодействие с заранее не известным распределением статусов контакта по поверхностям скольжения. Анализ влияния конечно-элементного разбиения модели на результаты численного решения задачи был выполнен ранее [34], установлено, что для качественного решения задачи достаточно 8–16 элементов по толщине антифрикционной прослойки для стандартной толщины 4 мм, т.е. размер конечного элемента слоя скольжения 0,25–0,5 мм. При этом стальные элементы контактного узла могут быть разбиты на конечные элементы большего размера. Конечно-элементное разбиение модели опорной части выполнено с размером элемента в объеме материала антифрикционной прослойки, равным 0,25 мм.

В настоящий момент можно отметить рост числа новых материалов и композитов [13, 14], пригодных для работы в узлах мостовых сооружений и обладающих улучшенными физико-механическими, фрикционными, термомеханическими и реологическими свойствами. Поэтому ООО «АльфаТех» в рамках работ по оптимизации работы конструкций сферических опорных частей провело ряд исследований физико-механических, фрикционных и реологических свойств широкого набора полимерных материалов и композитов на их основе (более 30 материалов): сверхвысокомолекулярные полиэтилены (СВМПЭ) разных производителей; СВМПЭ с различными наполнителями; композиционные материалы на основе фторопласта с разными армирующими включениями; фторопласты, наполненные разным содержанием нанокремнезема; модифицированный фторопласт и др. В результате серии натурных экспериментов был получен набор физико-механических характеристик материалов и ряд закономерностей их деформаци-

онного поведения. По результатам экспериментов определены касательный модуль  $M$  и модуль упругости  $E$ , а остальные константы изотропного упругого тела можно вычислить по формулам [35]. При анализе экспериментальных данных в рамках первого приближения для описания модели поведения антифрикционных материалов выбрана деформационная теория упругопластичности для случая активного нагружения.

Серия испытаний материалов слоя скольжения для определения фрикционных свойств рассматривала ограниченный набор современных антифрикционных полимеров и композитов на их основе, часть материалов была исключена по ряду объективных причин: неоднородность физико-механических характеристик; малый объем производства с невозможностью наращивания производственных мощностей; влияние наполнителей композиционных материалов на их деформационные характеристики и т.д. Для анализа влияния физико-механических и фрикционных свойств материалов слоя скольжения на работу конструкции опорной части в целом и параметры зон контакта в частности выбраны три антифрикционных материала: СВМПЭ производства Германии (мат. 1); антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена (мат. 2); модифицированный фторопласт (мат. 3). На рис. 2 показаны физико-механические характеристики рассматриваемых материалов.

Можно отметить, что диаграммы сжатия материалов 1 и 3 имеют малые отличия при деформациях более 6%. При этом материал 2 достигает одного уровня деформаций с двумя другими рассматриваемыми материалами при значительно меньшем уровне напряжений – приблизительно на 10–15 МПа.

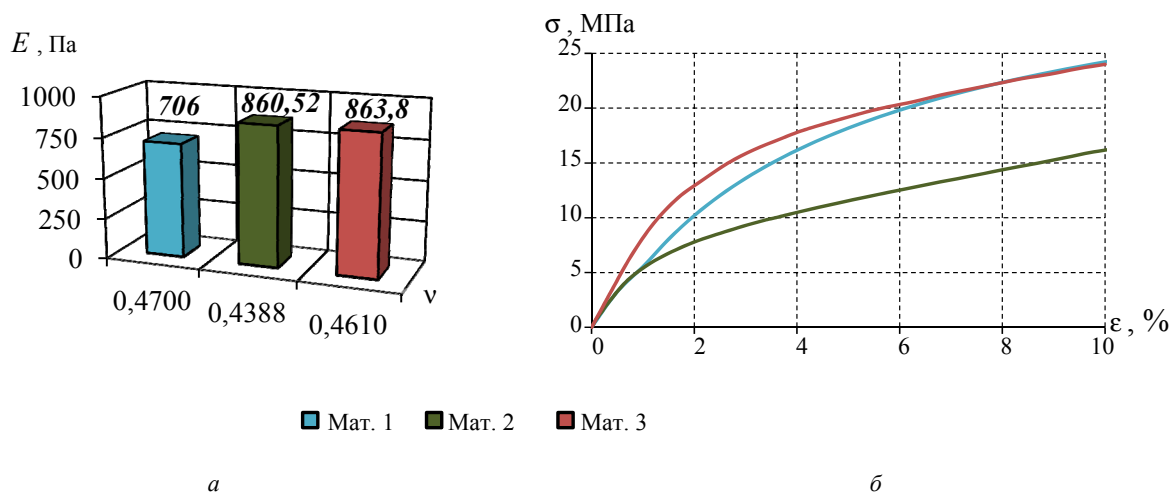


Рис. 2. Физико-механические свойства антифрикционных материалов:  $a$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона;  $b$  – диаграмма напряжения – деформации

Fig. 2. Physical and mechanical properties of antifriction materials:  $a$  – Young's modulus and Poisson's ratio;  $b$  – stress-strain diagram

Для определения фрикционных свойств исследуемых материалов разработана специальная схема эксперимента с использованием экспериментальной установки MTS-316 с двумя гидроприводами для проведения испытаний на сдвиг со сжатием лаборатории «Центр геомеханического моделирования» кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» ФГБОУ ВО ПНИПУ (г. Пермь) и оригинальной экспериментальной оснастки. В рамках серии натурных экспериментов установлены зависимости коэффициента трения  $\mu$  от давления  $P$  (до 54 МПа), действующего на образцы [36]. Также выполнена аппроксимация экспериментальных данных на диапазон рабочих давлений до 90 МПа. Максимальная погрешность аппроксимации экспериментальных данных не превышает 4 %.

Вертикальная нагрузка 1000 кН распределяется по поверхности  $S_1$  верхней стальной плиты, что соответствует давлению  $\sim 55,5$  МПа. В рамках исследования рассмотрены 3 варианта значений коэффициентов трения: табличное значение ( $\mu_1$ ); коэффициенты трения, полученные экспериментально без учета ( $\mu_2$ ) и с учетом смазки ( $\mu_3$ ) по сопрягаемым поверхностям. Значения коэффициентов трения представлены в табл. 1 и соответствуют давлению  $\sim 55,5$  МПа.

Таблица 1

Коэффициенты трения антифрикционных материалов

Table 1

Friction coefficients of antifriction materials

Номер материала	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
1	0,04	0,03218	0,0047
2		0,03798	0,02676
3		0,0207	0,00718

Можно отметить значительное снижение экспериментально полученных коэффициентов трения по сравнению с табличным значением. При этом коэффициент трения мат. 1 и 3 при учете смазки по сопрягаемым поверхностям на порядок меньше табличного значения.

### Анализ влияния фрикционных свойств материалов слоя скольжения на деформационное поведение сферической опорной части

В качестве первого этапа исследования рассмотрено влияние фрикционных свойств материалов сферического слоя скольжения опорной части на деформационные характеристики конструкции и параметры контакта. Особый интерес представляют данные, полученные на поверхностях контакта  $S_{K_1}$  (поверхность, по которой возможен поворот сферического сегмента верхней плиты).

На рис. 3 представлены контактное давление и контактное касательное напряжение для трех материалов слоя скольжения сферической опорной части с разными значениями коэффициента трения.

Максимальный уровень контактного касательного напряжения наблюдается в зоне полного сцепления контактных поверхностей, расположенной в центральной части слоя скольжения. Уровень контактного давления начинает снижаться в зоне смены контактных состояний с полного сцепления на проскальзывание. При неблагоприятном случае вблизи торца антифрикционной прослойки наблюдается расхождение контактных поверхностей, что соответствует состоянию контакта «полное отлипание». Максимальный уровень контактного давления и контактного касательного напряжения при учете фрикционных свойств с учетом и без учета смазки для большинства случаев ниже, чем при табличных значениях коэффициента трения.

Рассмотрим влияние коэффициентов трения на параметры зоны контакта (табл. 2): максимальное контактное давление  $\max P_K$ ; максимальное контактное касательное напряжение  $\max \tau_K$ ; процент площади  $S_{K_1}$ , на которой наблюдается полное сцепление контактных поверхностей  $S_{adhesion}$ ; процент площади  $S_{K_1}$ , на которой наблюдается отлипание контактных поверхностей  $S_{no\ contact}$ .

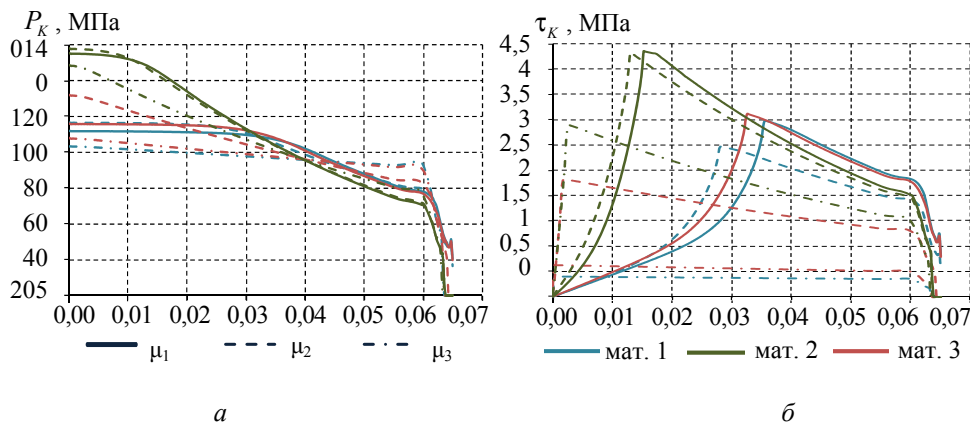


Рис. 3. Контактные давление (а) и касательное напряжение (б) на  $S_{K_1}$  при  $h_p = 4$  мм

Fig. 3. Contact pressure (a) and tangential stress (b) on the  $S_{K_1}$  at  $h_p = 4$  mm

Значения контактных параметров при разных коэффициентах трения

Values of contact parameters at different friction coefficients

Номер материала	max $P_K$ , МПа			max $\tau_K$ , МПа			$S_{adhesion}$ , %			$S_{no\ contact}$ , %		
	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
1	92,22	96,54	83,29	3,47	2,96	0,39	29,89	18,41	0,00	0,00	0,00	4,32
2	135,57	137,77	128,72	4,85	4,83	3,38	7,22	3,84	0,18	3,61	3,61	5,03
3	96,27	112,3	87,65	3,62	2,31	0,63	25,12	0,07	0,00	0,00	4,32	2,17

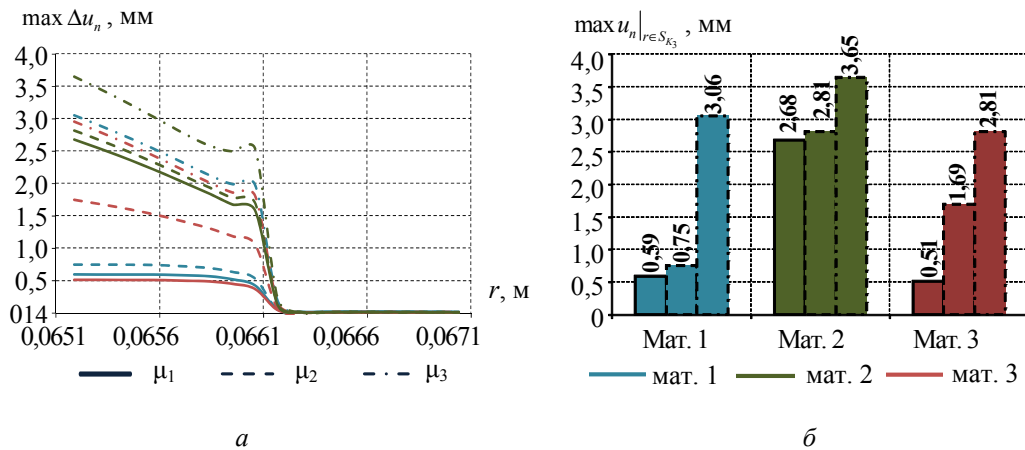


Рис. 4. Перемещения по нормали  $S_{K_3}$  (а) и максимальный уровень  $u_n$  (б) при  $h_p = 4$  мм

Fig. 4. Displacements along normal  $S_{K_3}$  (a) and maximum level  $u_n$  (b) at  $h_p = 4$  mm

При фрикционном контакте с учетом смазки уровень контактных параметров минимален, что связано с преобладанием зоны проскальзывания на 99–100 % контактной поверхности. Рост уровня контактного давления в конструкции с прослойкой из мат. 3 при толщине слоя скольжения 6 мм связан с появлением зоны расхождения контактных поверхностей на более чем 4 % площади контакта и значительным снижением зоны полного сцепления. Расхождение контактных поверхностей при всех вариантах коэффициентов трения наблюдается у конструкции с прослойкой из мат. 2, до 5 % контактной поверхности не выполняют свою функцию, что оказывает негативное влияние на деформирование опорной части. При коэффициенте трения с учетом смазки по сопрягаемым поверхностям раскрытие контакта наблюдается у опорных частей со всеми рассмотренными вариантами материалов слоя скольжения. Отлипание контактных поверхностей влияет на перемещения по нормали относительно свободного торца антифрикционной прослойки.

Особый интерес представляет характер распределения и уровень перемещений по нормали к поверхности  $S_{K_3}$  относительно свободного торца антифрикционного слоя скольжения (рис. 4).

Минимальные перемещения по нормали относительно свободного торца антифрикционной прослойки наблюдаются при отсутствии отлипания контактных поверхностей вблизи края слоя скольжения. Макси-

мальные перемещения по нормали к  $S_{K_3}$  наблюдаются у конструкции с прослойкой из мат. 3 при всех вариантах фрикционного контакта. Максимальное  $u_n$  наблюдается при фрикционном контакте с учетом смазки по сопрягаемым поверхностям и во многом связано с тем, что 2–5 % поверхности сопряжения не участвует в работе узла из-за расхождения контактных поверхностей.

Расхождение контактных поверхностей оказывает значительное влияние на осадку опорной части. На рис. 5 представлена диаграмма осадки сферической опорной части, полученная численно для всех вариантов материалов слоя скольжения и коэффициентов трения.

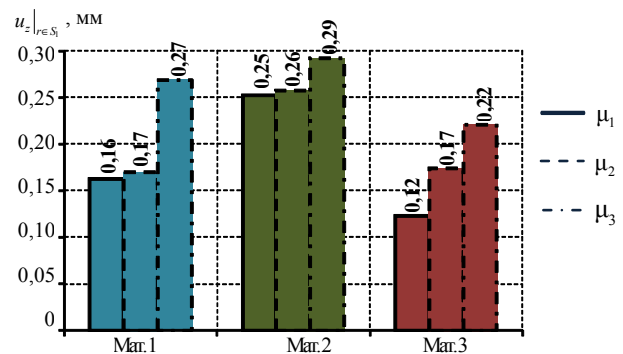


Рис. 5. Осадка сферической опорной части при  $h_p = 4$  мм

Fig. 5. Draft of the spherical bearing at  $h_p = 4$  mm



При поддержке ООО «АльфаТех» проведена серия натуральных экспериментов относительно деформирования вертикальной нагрузкой в диапазоне 500–1250 кН реальной конструкции сферической опорной части Л-100 с прослойкой из модифицированного фторопласта (мат. 3) толщиной 4 мм с использованием ранее разработанной оригинальной испытательной установки. При нагрузке 1000 кН осадка конструкции по данным натуральных экспериментов равна 0,142 мм [36]. Установлено, что осадка осесимметричной модели сферической опорной части без учета технологических углублений под смазочный материал выше приблизительно на 22 и 19 % при фрикционном контакте без учета и с учетом смазки соответственно, чем экспериментально полученные данные. Можно отметить, что при стандартной толщине прослойки 4 мм минимальный уровень осадки конструкции наблюдается у опорной части с прослойкой из мат. 3. Анализ результатов численного моделирования показал следующее: при табличном коэффициенте трения осадка опорных частей с прослойками из мат. 1 и 2 больше на 34 и 105 % соответственно, чем у конструкции со слоем скольжения из мат. 3; при трении с учетом смазки – на 21 и 32 % соответственно. При трении без учета смазки осадка конструкции с прослойкой из мат. 2 на 47 % больше, чем у опорной части со слоем скольжения из мат. 3. Максимальный уровень осадки конструкции наблюдается для случая фрикционного контактного взаимодействия с учетом смазки по сопрягаемым поверхностям, данный эффект связан с тем, что часть антифрикционной прослойки перестает выполнять свои функции из-за отлипания контактных поверхностей вблизи края слоя скольжения.

Следующим этапом исследования стал анализ влияния толщины антифрикционной прослойки на деформирование конструкции опорной части для всего набора современных антифрикционных материалов.

### Анализ толщины антифрикционной прослойки на деформационное поведение сферической опорной части

Одним из направлений исследований, связанным с рационализацией работы конструкции сферических опорных частей мостов, является изменение геометрии антифрикционной прослойки: толщины, положения сферического слоя скольжения, угла наклона торца антифрикционной прослойки и т.д. В работе на втором этапе исследования изучено влияние толщины антифрикционного слоя скольжения при всех вариантах коэффициента трения. Рассмотрено три варианта толщины – 4, 6 и 8 мм. Анализировалось влияние толщины антифрикционной прослойки на характер распределения и уровень параметров зоны контакта, на деформирование относительно свободного торца слоя скольжения, на осадку опорной части и т.д. Стандартная толщина прослойки составляет 4 мм. Выполним сравнение

параметров контактного деформационного поведения конструкции опорной части при увеличении толщины слоя скольжения по формуле

$$\Delta \max A = \left( \max A|_{h_p=4} - \max A \right) / \max A|_{h_p=4} \cdot 100 \%,$$

где  $\max A|_{h_p=4}$  – максимальный уровень параметров при толщине прослойки 4 мм,  $\max A$  – уровень параметров при других толщинах прослойки,  $A$  – параметр, по которому происходит анализ (контактное давление  $P_K$ , контактное касательное напряжение  $\tau_K$ , перемещения по нормали к поверхности  $u_n$ , осадка опорной части  $u_z$ ).

Установлено, что характер распределения контактного давления и контактного касательного напряжения при изменении толщины прослойки незначительный. При этом при увеличении толщины слоя скольжения площадь зоны полного сцепления контактных поверхностей снижается. При фрикционном контакте с учетом смазки по сопрягаемым поверхностям при увеличении толщины антифрикционной прослойки процент поверхности, на которой наблюдается расхождение контактных поверхностей, снижается и составляет приблизительно 1,5–2 % от первоначальной площади контакта. При толщине прослойки 8 мм максимальный процент поверхности контакта, на которой наблюдается статус контакта «отлипание», – у конструкции со слоем скольжения из мат. 1. С увеличением толщины антифрикционного слоя скольжения наблюдается снижение максимального уровня контактного давления (рис. 6) и контактного касательного напряжения (рис. 7).

Наибольшее снижение максимального уровня контактного давления при увеличении толщины слоя скольжения наблюдается у опорных частей с прослойкой из мат. 2 в среднем более чем на 35 МПа, что составляет 26–28 %. Минимальный уровень  $\max P_K$  наблюдается при деформировании опорных частей с антифрикционными прослойками из мат. 1 и мат. 3 при коэффициенте трения, соответствующем трению с учетом смазки. При увеличении толщины прослойки в данных случаях также наблюдается снижение уровня максимального контактного давления при толщине прослойки 8 мм на 4–6 %.

Изменение уровня контактного касательного напряжения при увеличении толщины антифрикционной прослойки аналогично контактному давлению: наблюдается снижение  $\max \tau_K$  для всех рассмотренных вариантов материалов слоя скольжения и фрикционных свойств современных антифрикционных полимерных материалов и композитов. В среднем снижение уровня контактного касательного давления составило 2–4 МПа.

Одной из важных деформационных характеристик опорной части является максимальный уровень перемещений по нормали к поверхности  $S_{K_3}$  (рис. 8).

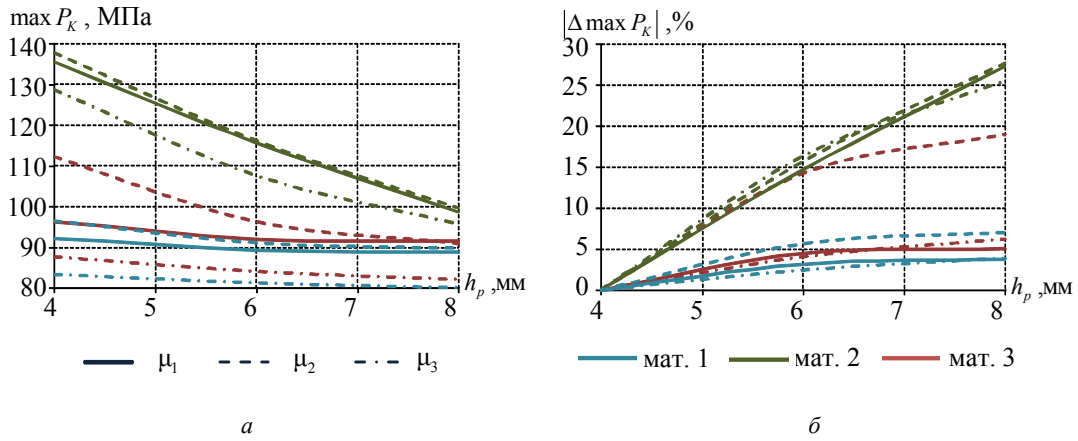


Рис. 6. Влияние толщины прослойки на контактное давление:  $a - \max P_k$ ;  $b - |\Delta \max P_k|$

Fig. 6. Influence of the interlayer thickness on the contact pressure:  $a - \max P_k$ ;  $b - |\Delta \max P_k|$

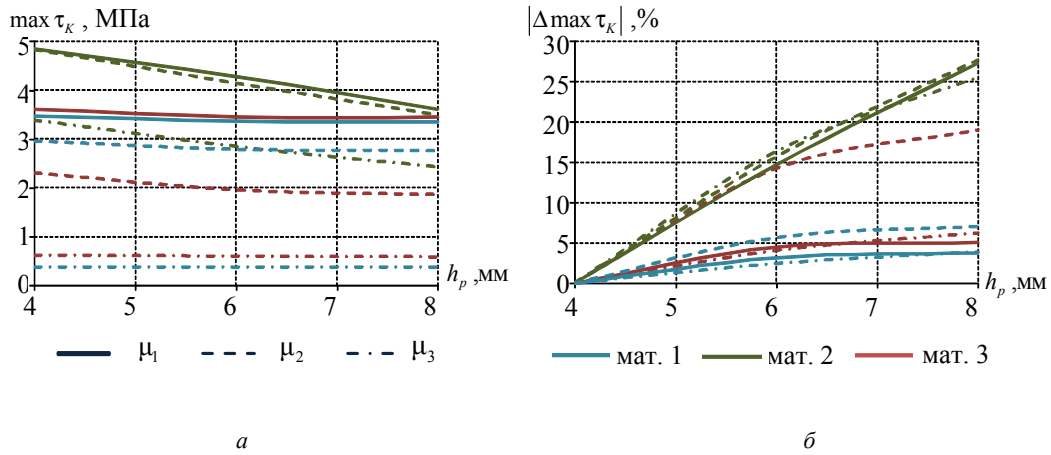


Рис. 7. Влияние толщины прослойки на контактное касательное напряжение:  $a - \max \tau_k$ ;  $b - |\Delta \max \tau_k|$

Fig. 7. Influence of the interlayer thickness on the contact tangential stress:  $a - \max \tau_k$ ;  $b - |\Delta \max \tau_k|$

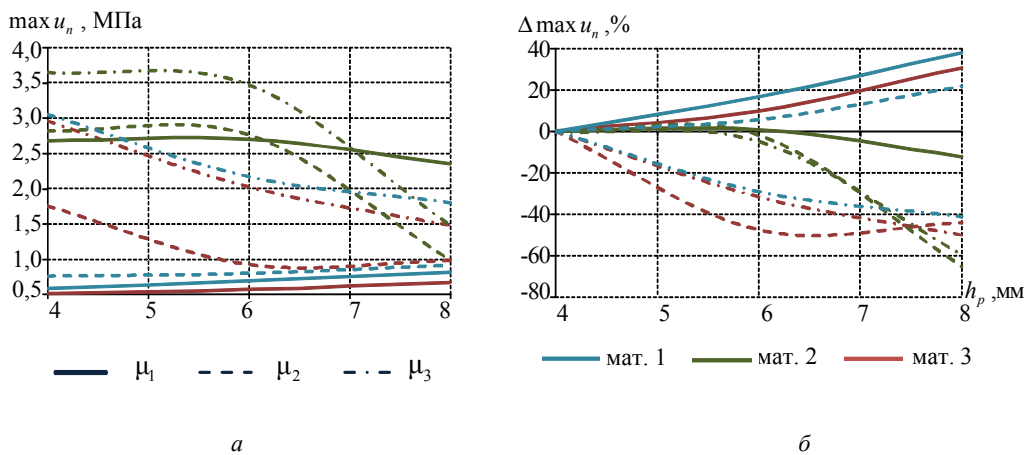


Рис. 8. Влияние толщины прослойки на перемещения по нормали  $S_{k_3}$ :  $a - \max u_n$ ;  $b - \Delta \max u_n$

Fig. 8. Influence of the interlayer thickness on the normal displacements along  $S_{k_3}$ :  $a - \max u_n$ ;  $b - \Delta \max u_n$



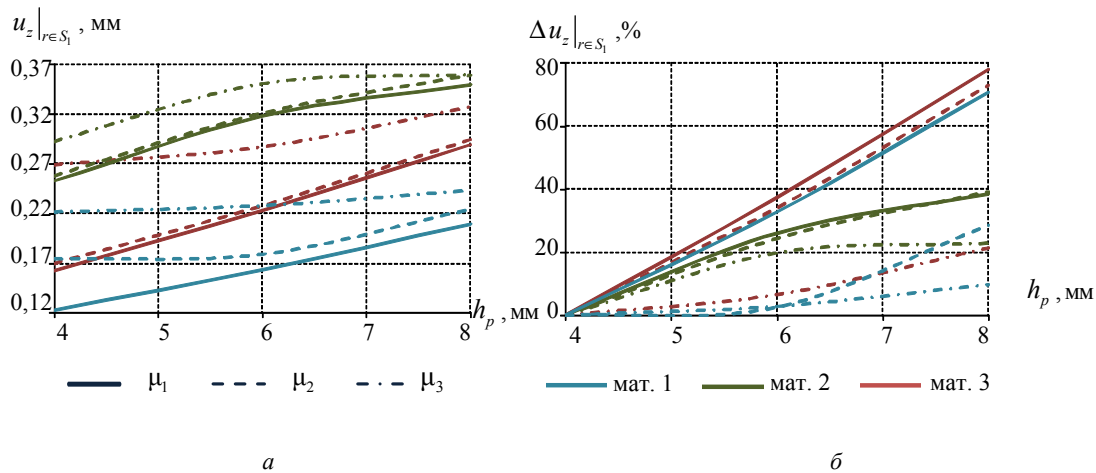


Рис. 9. Влияние толщины прослойки на осадку сферической опорной части: а –  $u_z$ ; б –  $\Delta u_z$

Fig. 9. Influence of the interlayer thickness on the spherical bearing draft: a –  $u_z$ ; b –  $\Delta u_z$

Влияние толщины антифрикционной прослойки на перемещения по нормали к поверхности  $S_{K_3}$  неоднозначно. Физико-механические и фрикционные свойства также оказывают значительное влияние на деформирование конструкции. При коэффициентах трения, близких к табличному значению (0,04), наблюдается либо незначительное снижение уровня нормальных перемещений относительно свободного торца прослойки (до 20 % – мат. 2), либо увеличение  $\max u_n$  (20–40 % – мат. 1 и 3). Максимальное снижение перемещения по нормали к  $S_{K_3}$  с увеличением толщины слоя скольжения наблюдается у конструкции с прослойкой из мат. 2 при коэффициентах трения, полученных экспериментально, и достигает 60–65 %. При прослойке толщиной 8 мм отличия  $\max u_n$  незначительны для всех рассмотренных материалов слоя скольжения. В данном случае  $\max u_n$  достигают в среднем 1 и 1,2 мм для трения с учетом и без учета смазки соответственно.

Изменение осадки опорной части при увеличении толщины слоя скольжения показано на рис. 9.

При увеличении толщины антифрикционной прослойки наблюдается увеличение осадки опорной части. Минимальное увеличение осадки опорной части наблюдается при трении с учетом смазки: около 10 % у конструкции с прослойкой из мат. 1; около 22 % – из мат. 2.

### Заключение

В рамках работы выполнена серия натурных экспериментов по определению физико-механических и фрикционных свойств современных антифрикционных материалов, пригодных в той или иной мере к использованию в качестве относительно тонких слоев скольжения сферических опорных частей мостов, воспринимающих нагрузки от мостового пролета. Проведена серия натур-

ных экспериментов по определению характера деформирования сферической опорной части Л-100 производства ООО «АльфаТех», установлена осадка конструкции при рабочем диапазоне вертикальной нагрузки от мостового пролета. Построена параметризованная численная модель сферической опорной части с возможностью изменения толщины слоя скольжения из антифрикционного материала. Выполнена серия численных экспериментов, направленная на оценку влияния фрикционных свойств материалов антифрикционной прослойки с учетом и без учета смазки по сопрягаемым поверхностям на деформационное поведение конструкции в целом и параметры зоны контакта в частности. Выполнен анализ влияния толщины слоя скольжения на деформационные и контактные характеристики исследуемого узла при всех вариантах трения. В рамках анализа результатов численного моделирования получены качественные и количественные закономерности влияния толщины прослойки и фрикционных свойств антифрикционных материалов на контактное давление, контактное касательное напряжение, распределение зон контактных состояний, нормальные перемещения торца слоя скольжения и т.д.

В рамках исследования влияния на деформирование опорной части фрикционных свойств материалов слоя скольжения при его стандартной толщине 4 мм установлено следующее:

1. Коэффициенты трения современных антифрикционных материалов, полученные экспериментально, ниже табличного значения на 5–48 % при контакте без учета смазки и на 33–88 % при контакте с учетом смазки.

2. Фрикционные свойства материалов слоя скольжения оказывают значительное влияние на уровень параметров контакта и характер распределения контактных параметров: чем меньше коэффициент трения по сравнению с табличным значением, тем меньше площадь полного сцепления контактных поверхностей, а также процент поверхности, находящейся в состоянии

«отлипание»; при фрикционном контакте с учетом смазки по сопрягаемым поверхностям наблюдается значительное снижение площади полного сцепления контактных поверхностей, в том числе до 0, и появление или увеличение площади поверхности контакта с состоянием «отлипание».

3. Фрикционные свойства антифрикционных материалов оказывают значительное влияние на контактное касательное напряжение: уменьшение коэффициента трения значительно снижает максимальный уровень контактных касательных напряжений (чего стремятся добиться производители опорных частей мостов). Но при этом возникает зона расхождения контактных поверхностей вблизи торца слоя скольжения. Процент расхождения поверхностей сопряжения минимален у конструкции опорной части с прослойкой из модифицированного фторопласта (мат. 3). Таким образом, возникает необходимость исследования влияния геометрической конфигурации торца антифрикционной прослойки.

4. Минимальные перемещения по нормали к поверхности относительно свободного торца антифрикционной прослойки наблюдаются в случаях отсутствия расхождения контактных поверхностей вблизи края слоя скольжения. Прослойки из модифицированного фторопласта (мат. 3) при всех рассмотренных коэффици-

циентах трения обладают минимальными перемещениями торца прослойки по нормали к поверхности.

5. Максимальное значение осадки опорной части наблюдается также при возникновении в конструкции зон «отлипания» контактных поверхностей.

При увеличении толщины слоя скольжения наблюдается ряд особенностей деформационного поведения опорной части: снижение уровня контактного давления и контактного касательного напряжения; уменьшение площади полного сцепления контактных поверхностей; снижение процента поверхности, находящейся в состоянии «отлипание»; увеличение уровня осадки опорной части. При прослойке 8 мм перемещения по нормали к поверхности относительно свободного торца слоя скольжения становятся незначительными и составляют 1 и 1,2 мм для трения с учетом и без учета смазки соответственно.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00903).

### Acknowledgments

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-08-00903).

### Библиографический список

1. Beyer E., Wintergerst L. New bridge storage, new pillar shape // *Der Bauingenieur*. – 1960. – № 35(6). – P. 227–230.
2. Block T., Eggert H., Kauschke W. Lager im Bauwesen. – New York: John Wiley & Sons Limited, 2015. – 646 p.
3. Eggert H., Grote J., Kauschke W. Lager im Bauwesen. – Berlin: Ernst & Sohn, 1974. – 323 p.
4. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 [Электронный ресурс] / И.И. Овчинников [и др.] // *Транспортные сооружения*. – 2018. – Т. 5, № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf>.
5. Proske D. Bridge collapse frequencies versus failure probabilities. – Switzerland: Springer, 2018. – 126 p.
6. Transportation systems: Managing performance through advanced maintenance engineering / S. Singh [et al.]. – Singapore: Springer, 2019. – 221 p.
7. Blinkin M., Koncheva E. Transport Systems of Russian Cities: Ongoing Transformations. – Switzerland: Springer, 2016. – 299 p.
8. Карапетов Э.С., Белый А.А. Эксплуатационная надежность мостовых сооружений в суровых климатических условиях // *Путевой навигатор*. – 2020. – № 43. – С. 60–69.
9. Рузов А.М. Эксплуатация мостового парка. – М.: Академия, 2007. – 176 с.
10. Овчинников И.Г. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Часть 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга [Электронный ресурс] // *Транспортные сооружения*. – 2014. – Т. 1, № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/01TS114.pdf>.
11. Eggert H., Kauschke W. Structural Bearings. – Berlin: Ernst & Sohn, 2002. – 405 p.
12. Optimal design of pile foundation in fully integral abutment bridge / J.Q. Xue [et al.] // *Developments in international bridge engineering*. – 2016. – № 9. – P. 3–16.
13. Yi X., Du S., Zhang L. Composite materials engineering, volume 1: fundamentals of composite materials. – Singapore: Springer, 2018. – 765 p.
14. Wang Q.J., Chung Y.W. Encyclopedia of tribology. – Boston: Springer, 2013. – 4139 p.
15. Effect of thermal treatment on the mechanical properties and accumulation of submicrocracks in fluoroplastics / M.A. Martynov [et al.] // *Strength of Materials*. – 1975. – Vol. 7, No. 11. – P. 1390–1393.
16. Gamma modification of radiation resistant fluoroplastic composite / V.I. Pavlenkoa [et al.] // *Inorganic materials: Applied research*. – 2013. – Vol. 4, No. 5. – P. 389–393.
17. Mechanical and tribological properties of complex modified material based on ultra high molecular weight polyethylene and CuO / A.V. Ushakov [et al.] // *Journal of Friction and Wear*. – 2014. – Vol. 35, No. 1. – P. 7–11.
18. Balyakina V.B., Khatipov S.A., Pilla C.K. Experimental studies of tribotechnical characteristics of radiation modified polytetrafluoroethylene to use in rotor supports // *Journal of Friction and Wear*. – 2015. – Vol. 36, No. 4. – P. 346–349.
19. Tribological properties of polytetrafluoroethylene modified with fullerene black in dry sliding friction / B.M. Ginzburg [et al.] // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2006. – Vol. 79, No. 9. – P. 1518–1521.
20. Долгополов К.Н., Колесников И.В., Мельников Э.Л. Применение антифрикционных полимерных самосмазывающихся материалов класса «масляниты» в узлах трения сколь-

жения // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 4. – С. 23–26.

21. Зелинский В.В., Сучилин Д.Н. Обоснование и разработка новой триботехнологии для антифрикционных материалов [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=1366>.

22. Мирзахмедов Б.Х., Зиямухамедова У.А., Джумабаев Д.А. О новом стандартном методе исследования триботехнических свойств материалов при их фрикционном взаимодействии с волокнистыми сыпучими материалами // Молодые ученые – основа будущего машиностроения и строительства: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2014. – С. 214–217.

23. Мамаев Н.М., Мамаев М.Н. Нанопузырьковая модель трения и новые пути создания антифрикционных материалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (177). – С. 40–46.

24. Ivanov V.A., Kharchenko K.A., Maslenko V.O. Tribotechnical parameters of repair compound materials // Polymer science. Series D. – 2018. – Vol. 11, No. 3. – P. 288–291.

25. Триботехнические свойства антифрикционных покрытий на основе композиционных материалов / П.С. Михеев [и др.] // Перспективные материалы. – 2015. – № 3. – С. 48–54.

26. Инновационные операции повышения ресурса и экономичности изношенной техники при ее техническом обслуживании / А.В. Дунаев [и др.] // Технический сервис машин. – 2019. – № 2 (135). – С. 47–59.

27. Триботехнические свойства композиционного материала «алюминий-углеродные нановолокна» при трении по сталям 12X1 и ШХ15 / А.Д. Бреки [и др.] // Материаловедение. – 2017. – № 11. – С. 37–42.

## References

1. Beyer E., Wintergerst L. New bridge storage, new pillar shape. Der Bauingenieur, 1960, No. 35(6), pp. 227–230.
2. Block T., Eggert H., Kauschke W. Lager im Bauwesen. New York, John Wiley & Sons Limited, 2015, 646 p.
3. Eggert H., Grote J., Kauschke W. Lager im Bauwesen. Berlin, Ernst & Sohn, 1974, 323 p.
4. Ovchinnikov, I.I., Maystrenko, I.Yu., Ovchinnikov, I.G., Usmanov, A.M.: Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. Transportnye sooruzhenija – Russian journal of transport engineering, 2018, Vol. 5, No. 1, available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf>.
5. Proske D. Bridge collapse frequencies versus failure probabilities. Switzerland, Springer, 2018, 126 p.
6. Singh S., Martinetti A., Majumdar A., Dongen L. Transportation systems: Managing performance through advanced maintenance engineering. Singapore, Springer, 2019, 221 p.
7. Blinkin M., Koncheva E. Transport systems of russian cities: Ongoing transformations. Switzerland, Springer, 2016, 299 p.
8. Karapetov Je.S., Belyj A.A. Jekspluatacionnaja nadezhnost' mostovyh sooruzhenij v surovyh klimaticeskikh uslovijah [Operational reliability of bridge structures in harsh climatic conditions]. Putevoj navigator – Travel navigator, 2020, № 43, pp. 60–69.
9. Ruzov A.M. Jekspluatacija mostovogo parka [Operation of the bridge park]. – Moscow, Akademija, 2007, 176 p.
10. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Nigmatova O.I., Mikhaldykin E.S. Prochnostnoj monitoring mostovyh sooruzhenij i osobennosti ego primenenija. Chast' 1. Mezhdunarodnyj i

28. Экспериментальные исследования композитных антифрикционных полимеров / А.А. Ищенко [и др.] // Проблемы тертя та зношування. – 2019. – № 4 (85). – С. 37–43.

29. The investigation of tribological properties of epoxy - polyether composite materials for using in the friction units of means of sea transport / M. Brailo [et al.] // Materials performance and characterization. – 2018. – Vol. 7, No. 1. – P. 275–299.

30. Селезнев М.В. Влияние приработки поверхностей трения на оценку фрикционных свойств смазочных масел // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 9 (76). – С. 38–46.

31. Фомин Д.В. Опорная часть моста и её материал // Научный журнал инженерные системы и сооружения. – 2014. – № 2 (15). – С. 80–90.

32. Design and experimental verification of a new multifunctional bridge seismic isolation bearing / C. Xing, H. Wang, A. Li, J. Wu // Journal of Zhejiang university – Science A: Applied physics & engineering. – 2012. – № 13(12). – P. 904–914.

33. 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.

34. Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряженного состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 54–61.

35. Методы прикладной вязкоупругости / А.А. Адамов [и др.]. – Екатеринбург: ИМСС УрО РАН, 2003. – 411 с.

36. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Deformation behavior numerical analysis of the flat sliding layer of the spherical bearing with the lubrication hole // Integrated Science in Digital Age. – 2020. – P. 314–325.

otechestvennyj opyt primenenija monitoringa [Trength monitoring of bridge constructions and features of its application. Part 1. International and domestic experience of monitoring application]. Transportnye sooruzhenija – Russian journal of transport engineering, 2014, Vol. 1, No. 1, available at: <https://t-s.today/PDF/01TS114.pdf>.

11. Eggert H., Kauschke W. Structural Bearings. Berlin, Ernst & Sohn, 2002, 405 p.

12. Xue J.Q., Briseghella B., Chen B.C., Zhang P.Q., Zordan T. Optimal design of pile foundation in fully integral abutment bridge. Developments in international bridge engineering, 2016, No.9, pp. 3–16.

13. Yi X., Du S., Zhang L. Composite materials engineering, volume 1: fundamentals of composite materials. Singapore, Springer, 2018, 765 p.

14. Wang Q.J., Chung Y.W. Encyclopedia of Tribology. Boston, Springer, 2013, 4139 p.

15. Martynov M.A., Gol'dman A.Ya., Il'chenko P.A., Polyakov Yu.S., Andreeva A.I. Effect of thermal treatment on the mechanical properties and accumulation of submicrocracks in fluoroplastics. Strength of Materials, 1975, Vol. 7, No. 11, pp. 1390–1393.

16. Pavlenkoa V.I., Bondarenkob G.G., Tarasova D.G., Edamenko O.D. Gamma modification of radiation resistant fluoroplastic composite. Inorganic Materials: Applied Research, 2013, Vol. 4, No. 5, pp. 389–393.

17. Ushakov A.V., Karpov I.V., Fedorov L.U., Lepeshchev A.A. Mechanical and tribological properties of complex mod-

ified material based on ultra high molecular weight polyethylene and CuO. *Journal of Friction and Wear*, 2014, Vol. 35, No. 1, pp. 7–11.

18. Balyakina V.B., Khatipov S.A., Pilla C.K. Experimental studies of tribotechnical characteristics of radiation modified polytetrafluoroethylene to use in rotor supports. *Journal of Friction and Wear*, 2015, Vol. 36, No. 4, pp. 346–349.

19. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G., Shepelevskii A.A., Leksovskii A.M., Tuichiev Sh. Tribological properties of polytetrafluoroethylene modified with fullerene black in dry sliding friction. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2006, Vol. 79, No. 9, pp. 1518-1521.

20. Dolgopolov K.N., Kolesnikov I.V., Melnikov E.L. Primenenie antifrikcionnyh polimernyh samosmazyvajushhhsja materialov klassa "masljanyti" v uzlah trenija skol'zhenija [Application of self-lubricating antifriction polymer materials of "oily" material ("maslyanit") class in sliding friction units]. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya – Repair, Reconditioning, Modernization*, 2018, No. 4, pp. 23-26.

21. Zelinskiy V.V., Suchilin D.N. Obosnovanie i razrabotka novej tribotehnologii dlja antifrikcionnyh materialov [Justification and development of new tribotechnology for antifrictional materials]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija – Modern problems of science and education*, 2014, № 3, available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13666>.

22. Mirzahmedov B.H., Zijamuhamedova U.A., Dzhuma-baev D.A. O novom standartnom metode issledovanija tribotekhnicheskikh svojstv materialov pri ih frikcionnom vzaimodejstvii s voloknistymi sypuchimi materialami [On a new standard method for studying the tribotechnical properties of materials during their frictional interaction with fibrous bulk materials]. *Molodye uchenye – osnova budushhego mashinostroenija i stroitel'stva: sbornik nauchnyh trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii (Young scientists - the basis of the future mechanical engineering and construction: collection of scientific papers of the international scientific and technical conference)*. Kursk, 2014, pp. 214-217.

23. Mamaev N.M., Mamaev M.N. Nanopuzyr'kovaja model' trenija i novye puti sozdanija antifrikcionnyh materialov [Nanobubbles model of friction find new ways of creating antifriction materials]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehniceskie nauki – University news. North-caucasian region. Technical sciences series*, 2014, No. 2 (177), pp. 40-46.

24. Ivanov V.A., Kharchenko K.A., Maslenko V.O. Tribotechnical parameters of repair compound materials. *Polymer science. Series D*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 288-291.

25. Mikheev R.S., Kobernik N.V., Kalashnikov I.E., Bolotova L.K., Kobeleva L.I. Tribotechnical properties of antifriction coatings based on composite materials. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2015, Vol. 6, № 5, pp. 493-497.

26. Dunaev A., Zernov V., Vorobiev Yu., Pustovoy I., Trishkin I. Innovacionnye operacii povyshenija resursa i jekono-

michnosti iznoshennoj tehniki pri ee tehničeskom obsluzhivanii [Innovative operations to improve resource and cost efficiency worn-out equipment during its maintenance]. *Tehničeskij servis mashin – Technical service of machines*, 2019, No. 2 (135), pp. 47-59.

27. Breki A.D., Koltsova T.S., Skvortsova A.N., Tolochko O.V., Aleksandrov S.E., Kolmakov A.G., Lisenkov A.A., Fadin Y.A., Gvozdev A.E., Provotorov D.A. Tribotechnical properties of composite material "aluminum-carbon nanofibers" under friction on steels 12KH1 and SHKH15. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, T. 9, № 4, pp. 639-643.

28. Ishchenko A.A., Radionenko A.V., Kindrachuk M.V., Tisov O.V. Jeksperimental'nye issledovanija kompozitnyh antifrikcionnyh polimerov [Experimental studies of composite antifriction polymers]. *Problemy trenija i iznosa – Problems of Friction and Wear*, 2019, No. 4 (85), pp. 37-43.

29. Brailo M., Buketov A., Yakushchenko S., Sapronov O., Vynar V., Kobelnik O. The investigation of tribological properties of epoxy-polyether composite materials for using in the friction units of means of sea transport. *Materials performance and characterization*, 2018, Vol. 7, No. 1, pp. 275-299.

30. Seleznev M.V. Vlijanie prirabotki poverhnostej trenija na ocenku frikcionnyh svojstv smazochnyh masel [The influence of running in of friction surfaces for assessment of friction properties of lubricating oils]. *Vestnik NGIJeI – Bulletin NGIEI*, 2017, No. 9 (76), pp. 38-46.

31. Fomin D.V. Opornaja chast' mosta i ejo material [Bearing of the bridge and its material]. *Nauchnyj zhurnal inženernye sistemy i sooruzhenija – Scientific journal engineering systems and structures*, 2014, No. 2 (15), pp. 80–90.

32. Xing C., Wang H., Li A., Wu J. Design and experimental verification of a new multi-functional bridge seismic isolation bearing. *Journal of Zhejiang university – Science A: Applied physics & engineering*, 2012, No. 13(12), pp. 904–914.

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

34. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Chislennyj analiz napryazhennogo sostojaniya sferičeskogo kontaktnogo uzla s proslojkoj iz antifrikcionnogo materiala [Numerical analysis of the stress state of a spherical contact system with an interlayer of antifriction material]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, Vol. 6, No. 1, P. 54-61.

35. Adamov A.A., Matveenko V.P., Trufanov N.A., Shardakov I.N. Metody prikladnoj vyazkouprugosti [Applied viscoelastic methods]. *Ekaterinburg, IMSS UrO RAN*, 2003, 411 p.

36. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Deformation behavior numerical analysis of the flat sliding layer of the spherical bearing with the lubrication hole. *Integrated Science in Digital Age*, 2020, pp. 314-325.