

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS OF STRUCTURAL ANALYSIS

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-22-1-3-15

EDN: ICIIGST

Научная статья / Research article

Анализ вязкоупругого поведения материалов антифрикционной прослойки сферической опорной части моста при термосиловом нагружении

А.А. Каменских , А.П. Богданова , Ю.О. Носов , Ю.С. Кузнецова Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
*anna_kamenskih@mail.ru

Поступила в редакцию: 18 ноября 2025 г.

Доработана: 27 января 2026 г.

Принята к публикации: 5 февраля 2026 г.

Аннотация. Термопластические полимерные материалы нашли широкое применение в качестве защитных и антифрикционных покрытий и прослоек узлов трения. Сферические опорные части включают относительно тонкие слои скольжения из антифрикционных материалов. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) широко используется в качестве материала слоев скольжения. Однако существуют современные композиционные и модифицированные материалы с улучшенными физико-механическими свойствами, которые могут применяться в качестве слоев скольжения. Антифрикционные материалы часто моделируются в рамках теории упругости или теории упругопластичности. Но установлено, что данные материалы проявляют вязкоупругие свойства. В текущей работе выполнен цикл экспериментов для определения термомеханических свойств материалов. ПТФЭ, металлокомпозит на основе ПТФЭ с бронзовыми включениями (МАК (Ф4БР40М2)) и структурно-модифицированный ПТФЭ Арфлон AR-200 были исследованы в рамках динамического механического анализа. Рассматривался диапазон изменения температур $[-40; +80]$ °С, он соответствует температурам эксплуатации мостовых сооружений. Получены температурные зависимости модуля накопления, модуля потерь и тангенса угла механических потерь. На основе экспериментальных данных построены вязкоупругие модели поведения материалов, такие как тела Максвелла, с использованием рядов Прони и температурно-временной аналогии. Вязкоупругое поведение материалов было проанализировано в рамках деформирования сферической опорной части мостовых сооружений при статической и периодической нагрузке с учетом температуры окружающей среды. Получены зависимости параметров напряженно-деформированного состояния и контакта от температуры. Рассмотрено влияние коэффициента термического расширения материалов на поведение конструкции. Установлено, что слой скольжения из МАК позволяет получить более благоприятное напряженно деформированное состояние по сравнению с конструкцией, включающей слой скольжения из ПТФЭ: максимальная интенсивность напряжений меньше ~ на 3 %; максимальная интенсивность деформаций меньше ~ на 20 %; перемещения по нормали слоя скольжения меньше ~ на 17,2 %.

Каменских Анна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29; eLIBRARY SPIN-код: 4748-1891, ORCID: 0000-0002-3012-2418; e-mail: anna_kamenskih@mail.ru

Богданова Анастасия Петровна, аспирант, научный сотрудник лаборатории цифрового инжиниринга машиностроительных процессов и производств, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29; eLIBRARY SPIN-код: 5496-7620, ORCID: 0000-0001-7426-1287; e-mail: anastasia_pankova@mail.ru

Носов Юрий Олегович, научный сотрудник лаборатории цифрового инжиниринга машиностроительных процессов и производств, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29; eLIBRARY SPIN-код: 4209-2760, ORCID: 0000-0002-5736-8645; e-mail: ura.4132@yandex.ru

Кузнецова Юлия Сергеевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29; eLIBRARY SPIN-код: 2878-0214, ORCID: 0009-0001-6608-8987; e-mail: suhodolchik@mail.ru

© Каменских А.А., Богданова А.П., Носов Ю.О., Кузнецова Ю.С., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: мостовое сооружение, опорная часть, моделирование, вязкоупругость, полимер, композит, модель Максвелла, Прони, метод конечных элементов, контакт, трение

Вклад авторов: *Каменских А.А.* — научное руководство, концепция исследования, численное моделирование, визуализация, написание текста; *Богданова А.П.* — концепция исследования, численное моделирование, визуализация, написание текста; *Носов Ю.О.* — концепция исследования, численное моделирование, визуализация, написание текста; *Кузнецова Ю.С.* — численное моделирование, визуализация, обзор, научное рецензирование и редактирование. Авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00638, <https://rscf.ru/project/25-29-00638/>.

Для цитирования: *Каменских А.А., Богданова А.П., Носов Ю.О., Кузнецова Ю.С.* Анализ вязкоупругого поведения материалов антифрикционной прослойки сферической опорной части моста при термомеханическом нагружении // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2026. Т. 22. № 1. С. 3–15. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-1-3-15> EDN: ICI GST

Analysis of Viscoelastic Behavior of Antifriction Layer Materials in Bridge Spherical Bearings under Thermomechanical Loading

Anna A. Kamenskikh , Anastasia P. Bogdanova , Yuriy O. Nosov , Yulia S. Kuznetsova 

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ anna_kamenskikh@mail.ru

Article history

Received: November 18, 2025

Revised: January 27, 2026

Accepted: February 5, 2026

Abstract. Thermoplastic polymeric materials have found wide application as protective and antifriction coatings and interlayers of friction units. Spherical bearings include relatively thin sliding layers made of antifriction materials. Polytetrafluoroethylene (PTFE) is widely used as a material for sliding layers. However, at present, there are modern composite and modified materials with improved physical and mechanical properties that can be used as sliding layers. Antifriction materials are often modeled in terms of elasticity theory or elastoplasticity theory. However, it has been established that these materials exhibit viscoelastic properties. A series of experiments to determine the thermomechanical properties of the materials is performed in the current work. PTFE, a metal composite based on PTFE with bronze inclusions (MAK (F4BR40M2)) and structurally modified Arflon AR-200 PTFE were investigated using dynamic mechanical analysis. The temperature change range $[-40; +80]$ °C was considered, it corresponds to the operating temperatures of bridge structures. Temperature dependencies of the storage modulus, loss modulus and loss tangent were obtained. Viscoelastic models of material behavior, such as Maxwell bodies using Prony series and temperature-time analogy, were constructed based on experimental data. Viscoelastic behavior of materials was analyzed in terms of deformation of a bridge spherical bearing under static and periodic loads, taking into account the ambient temperature. The relationships for the effect of temperature on the stress-strain response and contact parameters were obtained. The influence of the thermal expansion coefficient of materials on the structure behavior was considered. It was found that the sliding layer made of MAK allows for a more favorable stress-strain state compared to the structure including a sliding layer made of PTFE: the maximum stress intensity is less by ~ 3%; the maximum strain intensity is less by ~ 20%; displacements along the normal to the sliding layer are less by ~ 17.2%.

Keywords: bridge structure, bearing, modeling, viscoelasticity, polymer, composite, Maxwell's model, Prony, finite element method, contact, friction

Authors' contribution: *Kamenskikh A.A.* — supervision, conceptualization, numerical modeling, visualization, writing; *Bogdanova A.P.* — conceptualization, numerical modeling, visualization, writing; *Nosov Yu.O.* — conceptualization, numerical modeling, visualization, writing; *Kuznetsova Yu.S.* — numerical modeling, visualization, literature overview, review and editing. The authors read and approved the final version of the article.

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation No. 25-29-00638, <https://rscf.ru/project/25-29-00638/>.

For citation: Kamenskikh A.A., Bogdanova A.P., Nosov Yu.O., Kuznetsova Yu.S. Analysis of viscoelastic behavior of antifriction layer materials in bridge spherical bearings under thermomechanical loading. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026;22(1):3–15. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-1-3-15> EDN: ICI GST

1. Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) был впервые синтезирован в 1938 г. Роем Планкеттом и на настоящий момент до сих пор считается «королем пластмасс» [1]. Химическая структура ПТФЭ состоит из углеродного скелета, окруженного защитным слоем из атомов фтора [2]. Материал демонстрирует высокую степень структурной регулярности, которая может инициировать большую степень кристаллизации микроструктуры, которая усиливается при воздействии отрицательных температур. После температуры плавления 370 ± 5 °С материал не становится вязкотекучим, а превращается в аморфный с высокой вязкостью [3]. В диапазоне изменения температуры от 10 до 30 °С у материала наблюдается β -переход, связанный с переходом от застеклованного состояния в высокоэластичное [4]. Химическая инертность, гидрофобность, устойчивость к термическому, биологическому и окислительному разложению, высокая прочность и низкий коэффициент трения позволили ПТФЭ получить звание «короля пластмасс». Около 60 % мирового рынка термопластов занимает ПТФЭ [5]. Материал широко используется в качестве слоев скольжения в опорных частях, в температурных швах и поворотных механизмах мостовых сооружений [6–8]. При контакте с более твердыми телами материал проявляет пластическое течение и сильное истирание, а также вязкую природу [9; 10]. Ползучесть материала при определенных условиях деформирования также наблюдается [11]. Установлено, что даже после технологического процесса производства возможно наличие различных поверхностных микродефектов в виде пор, трещин и расколов [12]. Также отмечается плохая термическая стабильность и большой коэффициент термического расширения ПТФЭ [12]. В качестве недостатков ПТФЭ можно выделить структурную перестройку при температуре +20 °С, склонность к деформациям при постоянных температурах в ненагруженном состоянии, низкую радиационную стойкость, значительное, в некоторых случаях необратимое, расширение при нагреве [3].

Прогресс в области материаловедения позволил сформировать достаточно большой набор альтернатив «королю пластиков» [3; 13; 14]. Материалы линейки Арфлон (ООО «Научно-производственное предприятие «Арфлон», Москва, Россия) отмечаются как альтернатива чистому ПТФЭ с улучшенными физико-механическими свойствами без потери функциональности [3]. Материалы Арфлон выделяются как перспективные в качестве защитных покрытий и прослоек для условий Крайнего Севера, а также зон с сильными перепадами температуры [15]. Рассматриваются и другие отечественные и зарубежные альтернативы ПТФЭ [3]. Например, материал повышенной износостойкости Суперфлувис является композиционным материалом с матрицей из ПТФЭ (~ 83 % от общей массы) и модифицированным измельченным углеродным волокном с нанопокрывтием из фторполимера толщиной до 40 нм (17 % удельного веса) [16]. Его применение рассматривают в качестве покрытий и прослоек узлов трения, а также как материал для имплантов костной ткани [16–17]. Улучшенные прочностные и физико-механические характеристики по сравнению с чистым ПТФЭ отмечаются у большого набора современных антифрикционных полимеров и композитов [3; 13; 18–20]. Однако данные о поведении современных антифрикционных полимеров и композитов часто ограничены узким набором физико-механических и трибологических характеристик.

Недостаточность данных о термомеханических свойствах материалов отмечается рядом ученых [9; 21; 22]. Это оказывает сдерживающий фактор по оценке напряженно-деформированного состояния узлов трения, конструкций и систем, в которых они применяются в диапазоне температур эксплуатации, а также анализу возможности замены материалов на современные аналоги. Структурно-механическое моделирование поведения материалов, включая задачи контактной механики и износа, является важным для создания цифровых аналогов конструкции в рамках предиктивного анализа и представляет собой эффективный инструмент на этапах проектирования или оптимизации [9]. Построение цифровых аналогов антифрикционных материалов, с учетом температурного фактора, является актуальной задачей для прогнозирования их поведения при технологическом процессе производства, а также при работе конструкций и систем, в которых он применяется [23].

В текущей работе выполнен цикл экспериментальных исследований материалов на основе ПТФЭ, модифицированных или наполненных металлическими нановключениями, а также чистого ПТФЭ, для определения зависимости термомеханических параметров от температуры. Построены модели поведения материалов в рамках термо-вязкоупругости. Выполнен анализ поведения сферической опорной части со слоем скольжения из трех разных антифрикционных материалов в широком диапазоне температур окружающей среды при статической и периодической нагрузке.

2. Материалы и методы

Проанализировано термомеханическое поведение сферической опорной части мостового сооружения на примере конструкции Л-100 производства ООО «АльфаТех» (г. Пермь, Россия). Расчетная схема контактного узла сферической опорной части представлена на рис. 1 и включает сферический стальной балансир (1), нижнюю стальную плиту со сферическим вырезом (2), взаимодействующие через сферический полимерный/композиционный слой скольжения (3). Работа конструкции рассматривается в осесимметричной постановке, поэтому в сферическом слое скольжения не учтены углубления под смазочный материал, которые могут оформляться в виде сферических лунок или кольцевых канавок [24].

Максимальная высота конструкции составляет 54 мм, с соотношением высот сферического балансира 20 мм, высоты нижней стальной плиты 30 мм и высоты слоя скольжения 4 мм по центральному сечению опорной части. Максимальная ширина и глубина конструкции $B = 2b = 155$ мм. Стандартный угол наклона торца слоя скольжения α_p составляет 30° . Слой скольжения выступает относительно нижней стальной плиты на $h_l \approx 2$ мм для исключения случая контакта металл по металлу.

На границах сопряжения прослойки со стальными элементами конструкции $S_{K_1} - S_{K_3}$ реализован фрикционный контакт с заранее неизвестным характером распределения зон контактных состояний (прилипание, проскальзывание, не контакт) [14]. Коэффициент трения принят постоянным и составляет 0,04. Математическая постановка задачи и анализ влияния степени дискретизации системы на численное решение ранее были описаны в [25]. Слой скольжения разбивался на 16 элементов по высоте. Размер конечных элементов на поверхностях сопряжения $S_{K_1} - S_{K_3}$ соответствует разбиению слоя скольжения, по мере удаления от $S_{K_1} - S_{K_3}$ градиентно увеличивается. Характеристики конечно-элементной сетки, конечных элементов, а также особенности моделирования задачи более подробно представлены и описаны в [14].

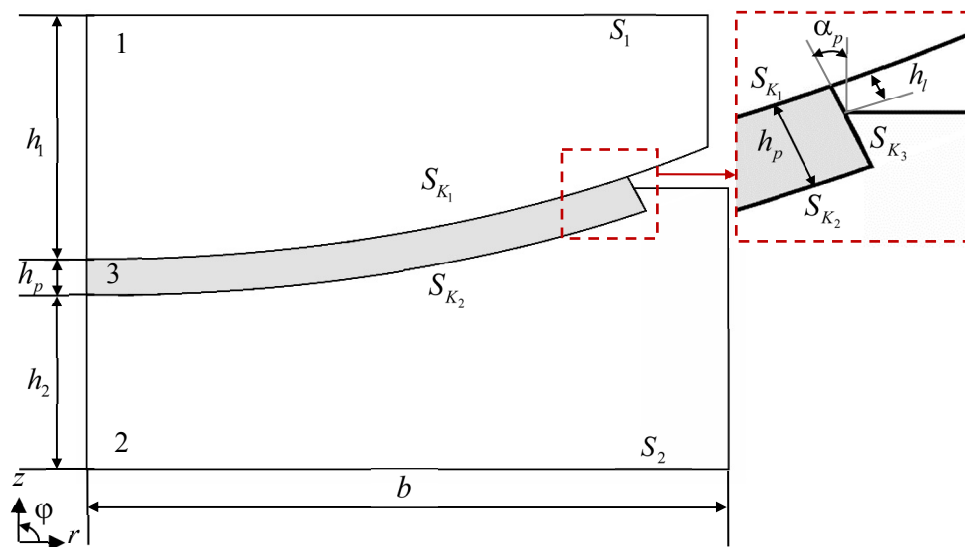


Рис. 1. Расчетная схема сферической опорной части мостового пролета

Источник: выполнено А.П. Богдановой.

Реализация задачи о термомеханическом деформировании опорной части выполнена с использованием метода конечных элементов в программном комплексе инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL 2021R2 (г. Ливерпуль, США). Процедуры построения численного аналога конструкции, конечно-элементного разбиения, температурно-силового нагружения и обработки результатов полностью автоматизированы с использованием языка параметрического программирования APDL.

Рассматриваются две схемы нагружения опорной части: статическая и периодическая нагрузка с учетом температурного поля. Статическое нагружение выполнялось при номинальной вертикальной нагрузке опорной части 1000 кН. Периодическая нагрузка моделировалась как синусоидальное изменение

нагрузки от 500 до 1000 кН с учетом и без учета выдержки в течение 60 с при 500 и 1000 кН. Рассматривалось разное количество циклов. Статическая и периодическая нагрузки прикладывались к поверхности S_1 сферического балансира. При этом конструкция находилась при постоянном действии температуры окружающей среды в диапазоне от -40 до $+80$ °С. Рассматривается неподвижная опорная часть, поэтому на поверхности S_2 нижней стальной плиты запрещены перемещения по нормали. При этом конструкция обладает податливостью в других направлениях и имеет возможность термического расширения/сжатия.

Стальные элементы конструкции выполнены из высокопрочной легированной стали и моделируются в рамках теории упругости с модулем Юнга 2×10^{11} и коэффициентом Пуассона 0,3. В качестве материалов слоя скольжения рассмотрены политетрафторэтилен (ПТФЭ); металлокомпозит на основе ПТФЭ с дендритными бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена (МАК (Ф4БР40М2)); структурно-модифицированный ПТФЭ без наполнителей AR-200 (ООО «Научно-производственное предприятие «Арфлон», Москва, Россия). Для формирования модели поведения материалов в рамках теории вязкоупругости была проведена серия эмпирических исследований с использованием динамического механического анализа (ДМА) по схеме эксперимента на трехточечный изгиб прямоугольных образцов со средними размерами $60 \times 12 \times 3$ мм из промышленно полученных полимерных заготовок слоев скольжения. Образцы были предоставлены ООО «АльфаТех». Образцы подвергались осциллирующей нагрузке с частотой воздействия 1 Гц в диапазоне изменения температур от -40 до $+80$ °С. Исследования затронули только область обычного исполнения элементов мостовых сооружений, что соответствует расчетной минимальной температуре воздуха до -40 °С включительно, согласно Национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р 59623-2021¹. Для обеспечения статической значимости результатов выполнено не менее четырех испытаний образцов для каждого типа термосилового нагружения. Более полное описание экспериментальных условий приведено в [14].

В результате серии экспериментов были получены температурные зависимости модуля накопления и модуля потерь в диапазоне изменения температур $[-40; +80]$ °С. Среднеарифметические зависимости термомеханических характеристик материалов представлены на рис. 2 и характеризуют застеклованное и высокоэластичное состояние материала при $T \in [-40; +80]$ °С.

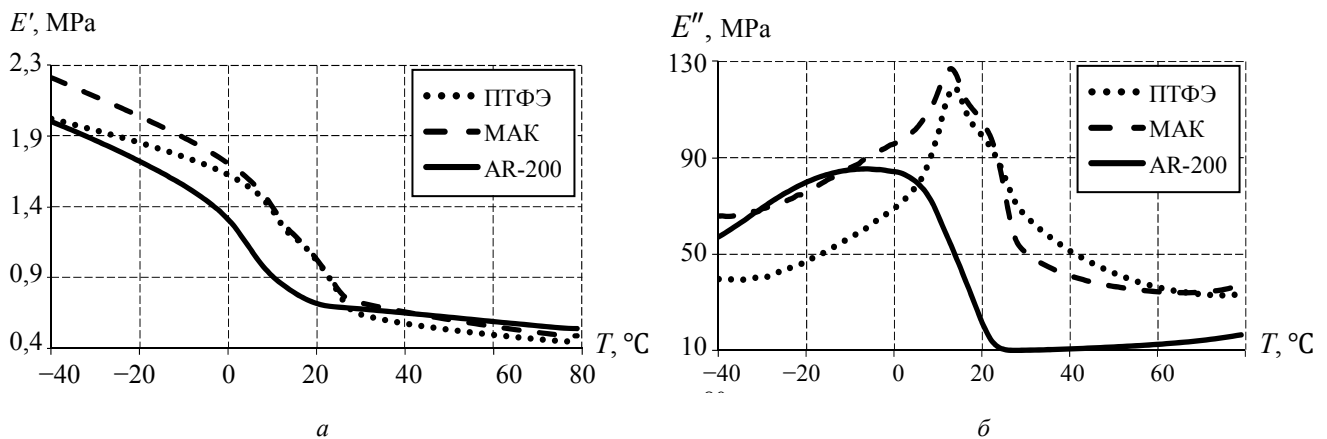


Рис. 2. Термомеханические свойства материалов антифрикционной прослойки:

a — модуль накопления; b — модуль потерь

Источники: выполнено А.П. Богдановой.

Установлена температура β -перехода материалов слоя скольжения, которая считается температурой стеклования/размягчения материала согласно Национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р 56753-2015². Температура стеклования/размягчения ПТФЭ и МАК приблизительно 14 °С, АR-200 — 8 °С. Результаты экспериментов согласуются с данными ДМА анализа ПТФЭ [4].

¹ ГОСТ Р 59623-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Проектирование стальных элементов. Москва : Российский институт стандартизации, 2022. 86 с.

² ГОСТ Р 56753-2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Москва : Стандартинформ, 2016. 9 с.

На основе данных экспериментальных исследований в первом приближении в качестве феноменологических определяющих соотношений, описывающих вязкоупругое поведение материалов, выбрана модель Максвелла. Модель построена на основе рядов Прони с учетом температурно-временной аналогии Вильямса — Ландела — Фери (WLF). Для определения параметров вектора неизвестных модели Максвелла и WLF использовалась пользовательская процедура численной идентификации на основе многопараметрического оптимизационного алгоритма Нелдера — Мида, математические выкладки и постановка задачи описаны ранее [26].

Параметры вязкоупругой модели и WLF представлены в таблице, зависимости относительных модулей сдвига от времени релаксации — на рис. 3.

Параметры температурно-временной аналогии и модели вязкоупругого поведения материалов

Material	C_1	C_2	$T_r, ^\circ\text{K}$	$E_0, \text{МПа}$	$E_\infty, \text{МПа}$
ПТФЭ	203,91	849,00	270,21	2021,39	446,32
МАК	299,10	1069,37	263,79	2313,68	489,78
AR-200	103,24	419,18	266,80	2006,57	541,68

Источники: выполнено А.П. Богдановой, Ю.О. Носовым.

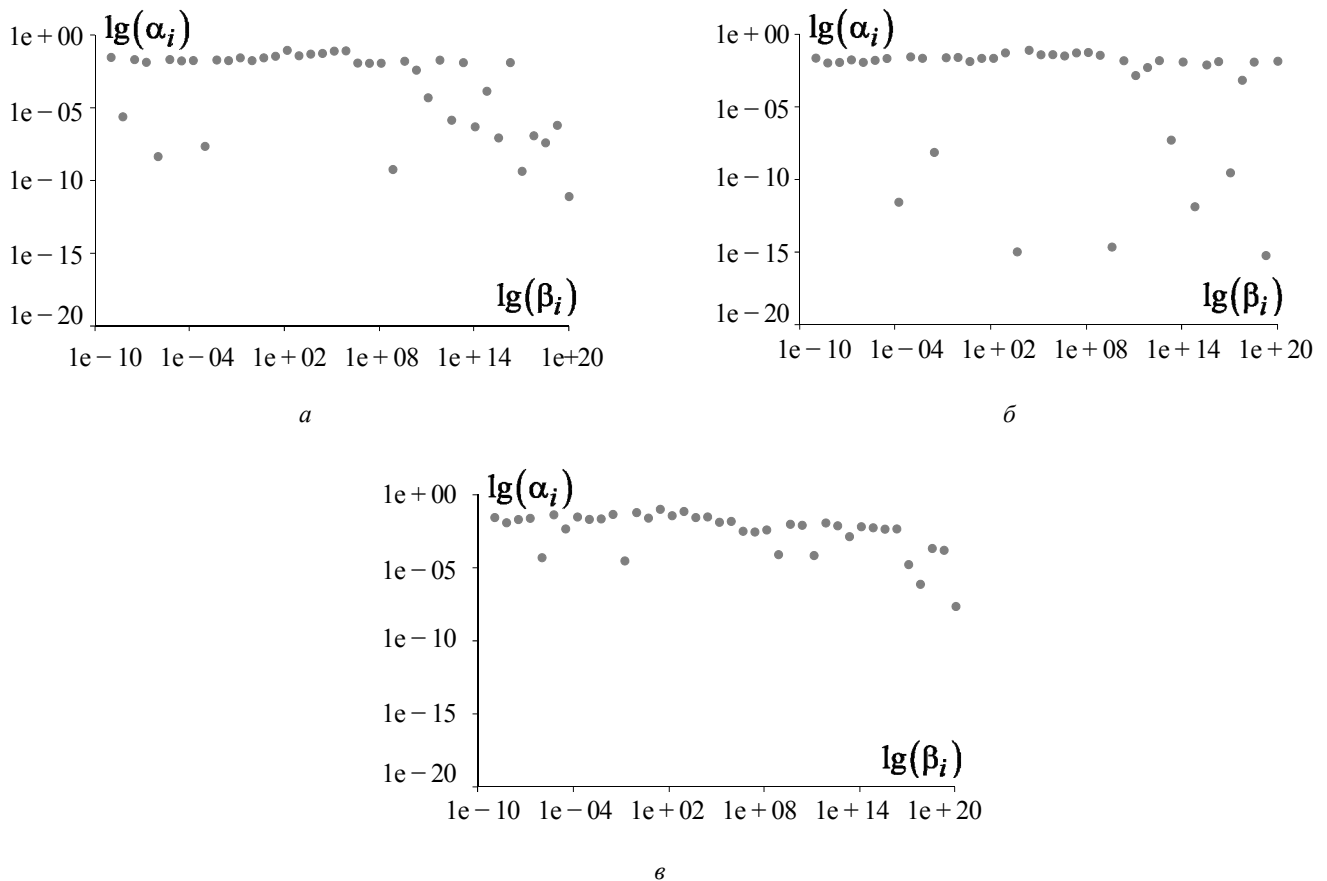


Рис. 3. Зависимость весовых коэффициентов ряда Прони от времени релаксации:
 а — ПТФЭ; б — МАК; в — AR-200

Источники: выполнено А.А. Камenskikh, А.П. Богдановой, Ю.О. Носовым.

Параметры модели получены на основе имитационного моделирования эксперимента на трехточечный изгиб с отклонением результатов численного эксперимента от экспериментальных данных менее 5%. Модели поведения материалов были имплантированы в ANSYS.

В модели учитываются коэффициенты термического расширения (КТР) материалов. Собственные исследования на определение изменения КТР материалов в зависимости от температуры не проводились. В литературных источниках отмечен диапазон изменения КТР для ПТФЭ от 8 до $30\text{--}32 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и AR-200 от 8 до $24\text{--}25 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [3; 27]. КТР материалов зависит от температуры, но для построения численной модели, учитывающей температурную зависимость параметра, необходимы данные о зависимости температурной деформации от температуры. Данных о КТР для материала МАК (Ф4БР40М2) в литературных источниках не найдено. В первом приближении принято решение рассмотреть деформирование опорной части с постоянным КТР $\alpha = 8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, одинаковым для всех рассматриваемых материалов, а также исследовать влияние изменения $\alpha(T)$ на напряженно-деформированное состояние опорной части со слоем скольжения из ПТФЭ. КТР стальных элементов также принят константой $\alpha = 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [28].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Статическая нагрузка

Получены данные о распределении параметров напряженно-деформированного состояния и параметров контакта сферических опорных частей со слоями скольжения из разных антифрикционных материалов для диапазона температур окружающей среды $[-40; +80] \text{ } ^\circ\text{C}$. Зависимости максимальных значений параметров от температуры представлены на рис. 4.

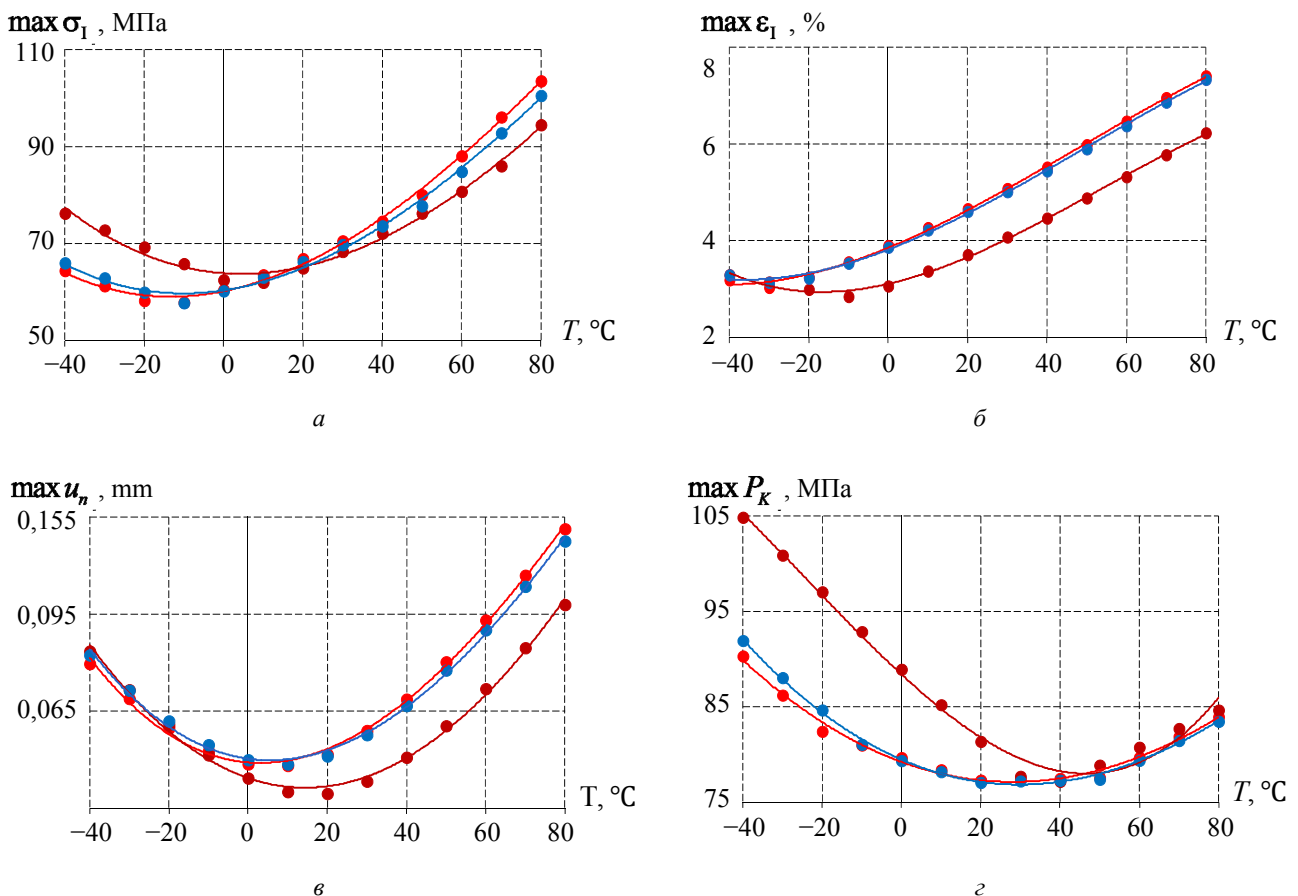


Рис. 4. Зависимость максимального уровня параметров НДС от температуры:
 а — интенсивность напряжений; б — интенсивность деформаций; в — перемещения по нормали торца;
 г — контактное давление на границе сопряжения прослойки со сферическим сегментом;
 ярко-красный — ПТФЭ; темно-красный — МАК; синий — AR-200

Источники: выполнено А.П. Богдановой.

Данные описываются полиномом третьей степени, погрешность не превышает 2 %. Максимальный уровень интенсивности напряжений снижается до температуры $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ПТФЭ, AR-200) и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (МАК) затем начинает возрастать. Максимальный уровень интенсивности деформаций мало изменяется при отрицательных температурах и возрастает в области положительных температур. Максимальные перемещения торца слоя скольжения снижаются до температуры $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ПТФЭ, AR-200) и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (МАК), затем начинают возрастать. Это связано с переходом материалов из застеклованного состояния в высокоэластичное. При этом максимальный уровень контактного давления на поверхности S_{K_1} , по которой возможен поворот сферического сегмента, снижается до температуры окружающей среды $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ с дальнейшим возрастанием параметра. В диапазоне температур от -40 до $30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ вблизи края слоя скольжения наблюдается зона отлипания, которая отсутствует при более высоких температурах. Также наблюдается перераспределение зон полного прилипания и проскальзывания. Слой скольжения из композитного материала (МАК) обладает минимальным уровнем деформаций и нормальных перемещений торца слоя скольжения. НДС опорных частей со слоем скольжения из ПТФЭ и AR-200 имеют незначительные отличия. Структурная модификация ПТФЭ радиацией в рамках технологического процесса создания AR-200 позволила незначительно снизить максимальный уровень параметров НДС и контакта при температурах выше температуры стеклования/размягчения (не более чем на 3 %). Данный эффект также связан с тем, что при температурах выше комнатной материал проявляет больший упругий отклик, чем ПТФЭ. Аналогично больший упругий отклик при $T > 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с ПТФЭ наблюдается у МАК.

Характер распределения параметров НДС вблизи края слоя скольжения показан на рис. 5 на примере конструкции с прослойкой из ПТФЭ при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, перемещения по нормали представлены с фактором увеличения деформированного состояния, чтобы отобразить изменение геометрии.

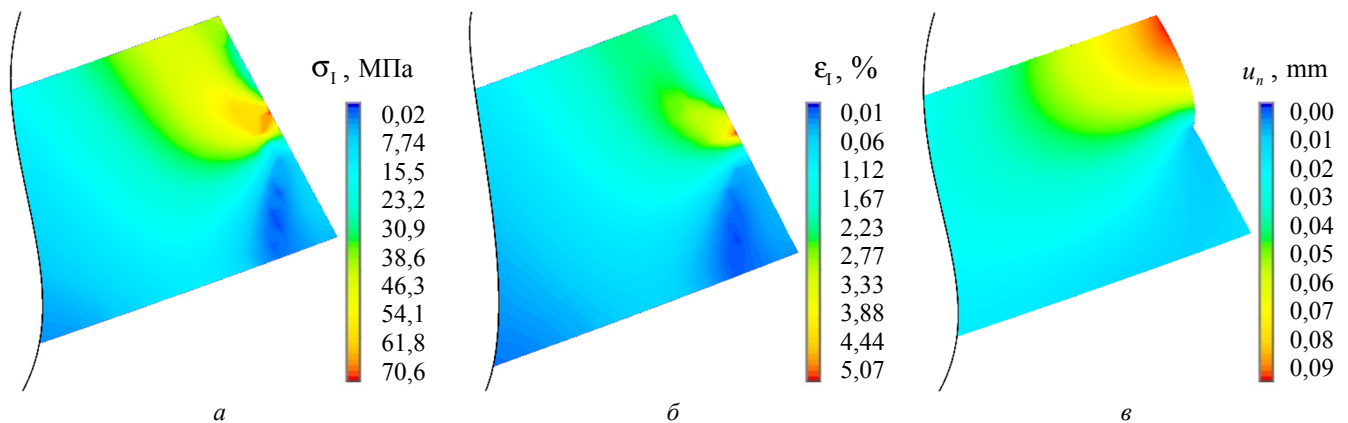


Рис. 5. Изополя параметров НДС вблизи края антифрикционной прослойки ПТФЭ:
a — интенсивность напряжений; *b* — интенсивность деформаций; *в* — перемещения по нормали торца
 Источник: выполнено А.А. Каменских.

Можно отметить, что максимальная интенсивность напряжений и деформаций наблюдается вблизи концентратора (металлический буртик нижней стальной плиты). На основном объеме слоя скольжения уровень интенсивности напряжений не превышает предел прочности материалов. Максимальный уровень интенсивности деформаций не превышает 10 % для всех рассмотренных материалов слоя скольжения и температур окружающей среды. Максимальные перемещения торца слоя скольжения наблюдаются вблизи зоны сопряжения прослойки с верхним балансиrom, для всех рассматриваемых материалов они не превышают 0,16 мм.

Анализ влияния КТР на параметры НДС на примере слоя скольжения из ПТФЭ представлен на рис. 6.

Можно отметить, что КТР материала оказывает существенное влияние на поведение слоя скольжения опорной части. Экспериментальные исследования, направленные на получение зависимости КТР от температуры для всего набора рассматриваемых материалов, требуется провести в рамках развития модели, описывающей его поведение. Зависимость параметров НДС и контакта от КТР при изменении температуры окружающей среды нелинейная. Максимальный уровень параметров НДС наблюдается при больших положительных температурах, что связано с размягчением материала и его сильным деформированием вблизи буртика нижней стальной плиты. Максимальный уровень контактного давления наблюдается при отрицательных температурах, что связано с кристаллизацией материала и большей жесткостью.

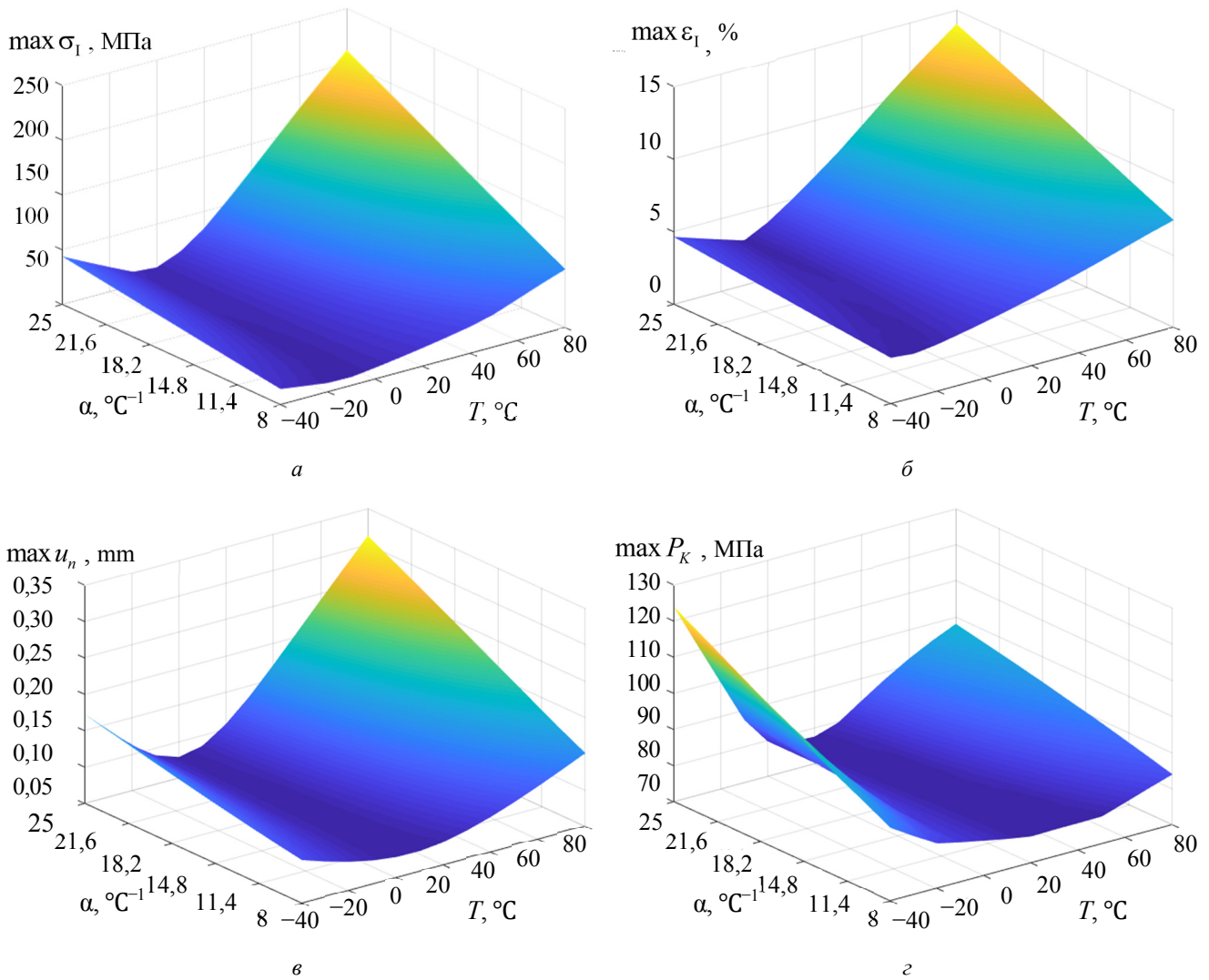


Рис. 6. Зависимость параметров НДС от температуры и КТР:

a — интенсивность напряжений; *б* — интенсивность деформаций; *в* — перемещения по нормали торца; *г* — контактное давление на границе сопряжения прослойки со сферическим сегментом

Источники: выполнено Ю.С. Кузнецовой.

Результаты численного моделирования деформирования опорной части хорошо согласуются с данными численных и полевых исследований [29; 30]. Характер распределения напряжений по объему антифрикционной прослойки и зона локализации максимальных значений согласуются с данными, полученными в [30]. Максимальный уровень напряжений и перемещений также соизмерим с данными, полученными в [29]. Температурные зависимости параметров НДС на малом диапазоне температур эксплуатации от -10 до 20 °C были получены в [30] при разном уровне нагружения опорной части; зависимости являются нелинейными, и было замечено, что параметры уменьшаются с повышением температуры. Частично результаты согласуются с текущим исследованием, но не могут быть количественно сравнены из-за геометрической конфигурации конструкций и разных производителей материалов слоя скольжения. ПТФЭ, полученные из разных порошков даже по относительно схожим технологиям формования, обладают разными механическими свойствами и реакцией на внешние температурно-силовые воздействия [31].

3.2. Периодическая нагрузка

В рамках анализа воздействия периодической нагрузкой установлено, что выдержка нагрузки не оказывает сильного влияния на параметры НДС и контакта. Это связано с тем, что время выдержки значительно меньше времени релаксации материалов.

Зависимости максимального уровня интенсивности напряжений и контактного давления на S_{K_1} для 1, 3 и 15-й итерации цикла нагружения приведены на рис. 7. Результаты представлены при максимальной нагрузке на опорную часть 1000 кН.

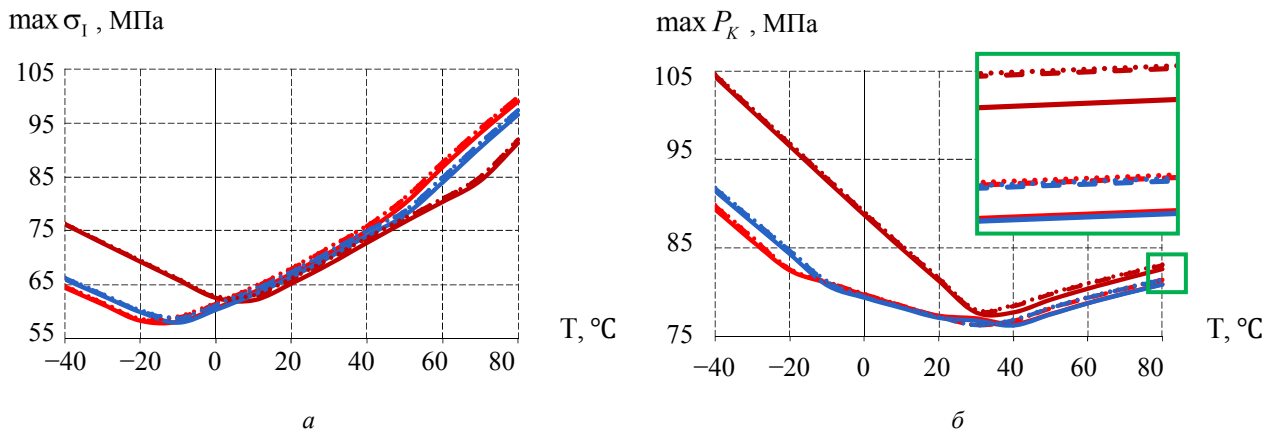


Рис. 7. Зависимость параметров НДС от T при периодической нагрузке:

a — интенсивность напряжений; b — контактное давление на S_{K_1} ; ярко-красный — ПТФЭ; темно-красный — МАК; синий — AR-200; сплошная линия — 1-й цикл нагружения; штриховая — 3-й цикл нагружения; точки — 15-й цикл нагружения

Источники: выполнено А.П. Богдановой.

Можно отметить, что наблюдается увеличение значения параметров при увеличении количества циклов периодической нагрузки. Характер изменения не зависит от количества циклов нагружения.

Двухпараметрическая зависимость $\max \sigma_{II}(T, N)$ и $\max P_K(T, N)$ представлена на рис. 8. При малом числе итераций периодической нагрузки наблюдается плавный незначительный рост параметров на всем диапазоне температур окружающей среды. Было принято решение расширить число итераций периодической нагрузки до 50 и 100 циклов. Результаты представлены на рис. 9 при температуре окружающей среды 30 °С.

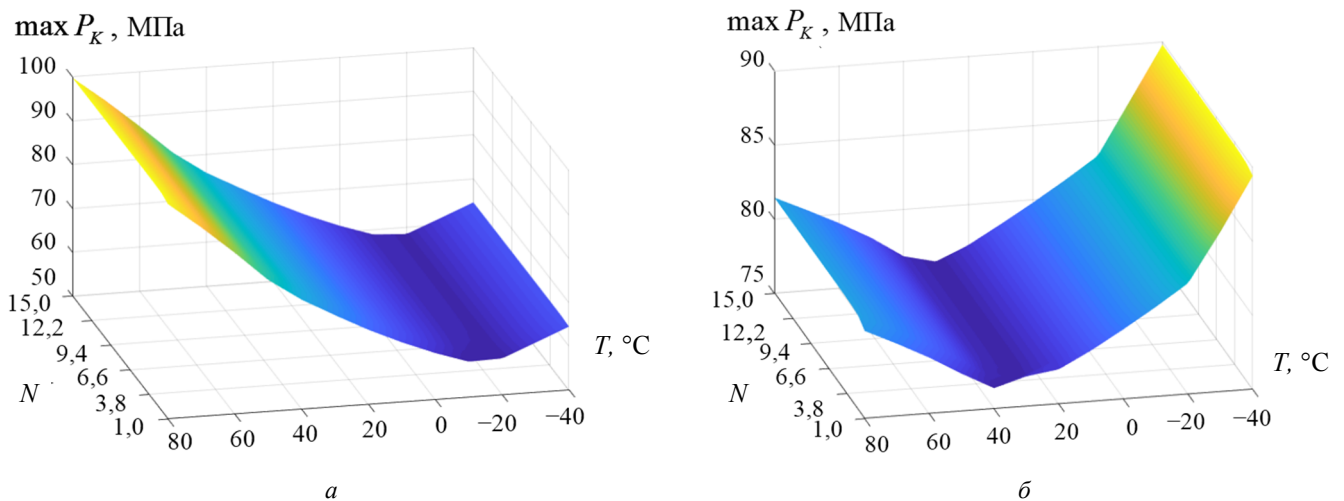


Рис. 8. Зависимость параметров НДС от температуры и номера цикла периодической нагрузки, ПТФЭ:

a — интенсивность напряжений; b — контактное давление на S_{K_1}

Источники: выполнено Ю.С. Кузнецовой.

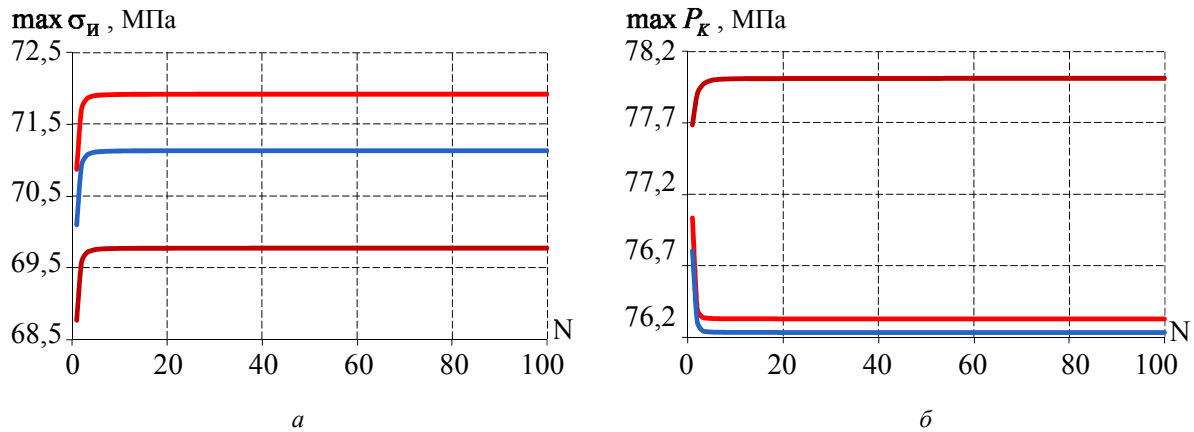


Рис. 9. Зависимость параметров НДС от итерации периодической нагрузки, при $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$:

a — интенсивность напряжений; b — контактное давление на S_{k_1} ;
 ярко-красный — ПТФЭ; темно-красный — МАК; синий — АR-200

Источники: выполнено А.П. Богдановой.

Максимальное изменение параметров наблюдается в течение 5–8 первых циклов нагружения, далее параметры изменяются медленно и выходят на асимптоту после 25 (ПТФЭ), 54 (МАК) и 46 циклов нагружения. Можно отметить, что максимальный уровень интенсивности напряжений наблюдается в конструкции опорной части с прослойкой из ПТФЭ, минимальный — с прослойкой из МАК. Зависимость максимального уровня контактного напряжения от числа циклов нагружения конструкций с прослойками из разных материалов отличается: при ПТФЭ и АR-200 на начальных циклах нагружения наблюдается снижение уровня контактного давления; при МАК, наоборот, увеличение. Максимальный уровень контактного давления наблюдается при прослойке из МАК, минимальный — из АR-200. Отличия параметров НДС и контакта конструкций с прослойкой из ПТФЭ и АR-200 незначительные, менее 1,5 %. Параметры НДС конструкции с прослойкой из МАК по сравнению с ПТФЭ: $\max \sigma_n$ меньше ~ на 3 %; $\max \epsilon_n$ меньше ~ на 20 %; $\max u_n$ меньше ~ на 17,2 %.

Зависимости параметров НДС опорной части, полученные в рамках исследования периодической нагрузки, согласуются с результатами [32]. Деформированное состояние опорной части выходит на асимптоту за определенное число циклов нагружения, которое зависит от материалов слоя скольжения, внешних нагрузок и условий окружающей среды.

4. Заключение

В рамках исследования проведен численно-экспериментальный анализ поведения трех материалов на основе ПТФЭ, которые могут в той или иной мере применяться в рамках относительно тонких слоев скольжения опорной части мостовых сооружений. Экспериментальные исследования включали динамический механический анализ в широком диапазоне температур. Численные исследования включали анализ поведения материалов, поведение которых описано в рамках теории вязкоупругости при статическом и периодическом нагружении с учетом поля температур окружающей среды от -40 до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$.

В рамках исследования получены следующие результаты.

1. Определены температурные зависимости модуля накопления, модуля потерь и тангенса угла механических потерь для набора антифрикционных материалов.
2. Модели вязкоупругого поведения материалов на широком диапазоне температур были построены в рамках модели Максвелла с использованием рядов Прони и температурно-временной аналогии на основе экспериментальных данных.
3. Исследовано напряженно-деформированное состояние слоев скольжения опорной части моста с учетом вязкоупругого поведения материалов при статических и периодических нагрузках в диапазоне температур эксплуатации. Установлено, что структурная модификация ПТФЭ незначительно влияет на поведение материала в рамках работы узла трения, при этом конструкция с прослойкой из композицион-

ного материала (МАК) обладает улучшенными характеристиками напряженно-деформированного состояния с соизмеримым увеличением параметров контакта при температурах ниже температуры стеклования/размягчения.

Для минимизации отклонения модели поведения материалов от реального объекта исследования требуется учет пластического деформирования, которое было установлено экспериментально [4; 9; 22]. Построение упруговязкопластической модели Ананд для набора антифрикционных материалов является одним из направлений развития работы, в том числе с учетом зависимостей энергии активации, начального сопротивления деформации и параметра чувствительности к скорости деформации от температуры [33].

Список литературы

1. *Liang X., Wu P., Lan L., Wang Y., Ning Y., Wang Y., Qin Y.* Effect of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Content on the Properties of Ni-Cu-P-PTFE Composite Coatings // *Materials*. 2023. Vol. 16. Article no. 1966. <https://doi.org/10.3390/ma16051966> EDN: DDKHGZ
2. *Bosq N., Guigo N., Persello J., Sbirrazzuoli N.* Crystallization of Polytetrafluoroethylene in a Wide Range of Cooling Rates: Nucleation and Diffusion in the Presence of Nanosilica Clusters. *Molecules*. 2019;24. Article no. 1797. <https://doi.org/10.3390/molecules2409179> EDN: QPHYKO
3. *Прокимов А., Джурицкий К., Смирнова Ю.* Перспективные изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей // *Компоненты и технологии*. 2017. № 2 (187). С. 105–113. EDN: XYEVGL
4. *Henri V., Dantras E., Lacabanne C., Dieudonne A., Koliatene F.* Thermal ageing of PTFE in the melted state: Influence of interdiffusion on the physicochemical structure // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 171. Article no. 109053. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.10905> EDN: RGQHYD
5. *Alaraby M., Abass D., Velázquez A., Hernández A., Marcos R.* Polytetrafluoroethylene microplastic properties, pollution, toxicity and analysis: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2025. Vol. 24. P. 27–59. <https://doi.org/10.1007/s10311-025-01885-w>
6. *Li Y., Guo W., Huang X., Chen Z., Gao Y.* Friction Characteristics and Lubrication Properties of Spherical Hinge Structure of Swivel Bridge // *Lubricants*. 2024. Vol. 12. No. 4. Article no. 130. <https://doi.org/10.3390/lubricants12040130> EDN: BHWEZL
7. *Hu Q., Pei Q., Li P.* Reducing the Friction Coefficient of Heavy-Load Spherical Bearings in Bridges Using Surface Texturing — A Numerical Study // *Lubricants*. 2025. Vol. 13. Article no. 180. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040180>
8. *Deng Y., Li A.* Structural health monitoring for suspension bridges. Singapore: Springer Publ., 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3347-7>
9. *Maculotti G., Goti E., Genta G., Mazza L., Galetto M.* Comprehensive mechanical and tribological characterization of metal-polymer PTFE+Pb/Bronze coating by in-situ electrical contact resistance measurement augmented tribo-mechanical tests // *Tribology International*. 2024. Vol. 193. Article no. 109397. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109397> EDN: WUJCPF
10. *Calaf-Chica J., Bravo-Díez P.-M., Preciado-Calzada M., García-Tárrago M.-J.* Application of the Small Punch Creep-Recovery Test (SPCRT) for the Estimation of Large-Amplitude Viscoelastic Properties of Polymers // *Materials*. 2023. Vol. 16. Article no. 1179. <https://doi.org/10.3390/ma16031179> EDN: OEQJSG
11. *Kong Y., Liu Z., Meng Y., Sui X., Chen R., Chen Y., Guo S.* Fabrication and the film-forming mechanism of thin polytetrafluoroethylene films with enhanced dielectric and mechanical properties // *Polymer*. 2023. Vol. 281. Article no. 126118. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126118> EDN: VQUPRC
12. *Liu F., Jin Y., Li J., Jiang W., Zhao W.* Improved coefficient thermal expansion and mechanical properties of PTFE composites for high-frequency communication // *Composites Science and Technology*. 2023. Vol. 241. Article no. 110142. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110142> EDN: SFBOEX
13. *Yi X., Du S., Zhang L.* Composite materials engineering, volume 1: fundamentals of composite materials. Singapore : Springer Publ.; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5696-3>
14. *Kamenskikh A.A., Bogdanova A.P., Nosov Y.O., Kuznetsova Y.S.* Influence of the Pattern of Coupling of Elements and Antifriction Interlayer Thickness of a Spherical Bearing on Structural Behavior // *Designs*. 2025. Vol. 9. Article no. 117. <https://doi.org/10.3390/designs9050117>
15. *Морозова З.В., Сальников А.В.* Разработка защитного покрытия конструкций с повышенной коррозионной стойкостью и устойчивостью к обледенению // *Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения*. 2018. № 3 (13). С. 18–30. EDN: VREWWQ
16. *Шелестова В.А., Гракович П.Н., Данченко С.Г.* Композит суперфлувис и его применение в узлах трения // *Вопросы материаловедения*. 2012. № 4 (72). С. 210–216. EDN: PLCTUH
17. *Довнар А.И., Жук И.Г., Лучко Е.В., Гракович П.Н.* Морфологические особенности остеоинтеграции имплантата из композиционного материала Суперфлувис при краниопластических операциях // *Неврология и нейрохирургия. Восточная Европа*. 2022. Т. 12. № 2. С. 176–185. <https://doi.org/10.34883/PI.2022.12.2.045>

18. *Виноградов Е.В., Валько Н.Г.* Влияние рентгеновского излучения на механические свойства фторопласта // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. 2025. Т. 15. № 2. С. 104–111. EDN: ZTLWCS
19. *Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P., Strukova V.I.* Comparative analysis of the work of bridge spherical bearing at different antifriction layer locations // *Lubricants*. 2022. Vol. 10. No. 9. Article no. 207. <https://doi.org/10.3390/lubricants10090207> EDN: XRYZSQ
20. *Wang Q.J., Chung Y.W.* Encyclopedia of tribology. Boston : Springer Publ., 2013. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5>
21. *Ahmad J., Niasar M.G.* Aging behavior of PEEK, PTFE, and PI insulation materials under thermal oxidative and humid conditions for aerospace application // *Journal of Applied Polymer Science*. 2025. Vol. 142. Article no. e56858. <https://doi.org/10.1002/app.56858>
22. *Adamov A.A., Keller I.E., Ostrer S.G., Seletkov D.V.* Evaluation of the performance of antifriction PTFE composites at a pressure over 60 MPa. I. Comparison of their hardness and deformation properties under free and constrained compression // *Mechanics of Composite Materials*. 2022. Vol. 58. No. 5. P. 673–688. <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10058-7> EDN: GWMXZY
23. *Than V.-T., Wang C.-C., Ngo T.-T., Lin C.-H.* Thermal behavior of polytetrafluoroethylene in the sintering process // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 30. Article no. 101247. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101247> EDN: NGPRIU
24. *Nosov Y.O., Kamenskikh A.A.* Influence analysis of lubricant recesses on the working capacity of the bridge span spherical bearing // *Lubricants*. 2022. Vol. 10. Article no. 283. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110283> EDN: BHIFOC
25. *Kamenskikh A.A., Trufanov N.A.* Regularities of interactions between elements of a spherical contact unit with an antifriction polymeric interlayer // *Journal of Friction and Wear*. 2015. Vol. 36. P. 170–176. <https://doi.org/10.3103/S1068366615020075> EDN: UFUXDX
26. *Kamenskikh A.A., Nosov Y.O., Bogdanova A.P.* The study influence analysis of the mathematical model choice for describing polymer behavior // *Polymers*. 2023. Vol. 15. Article no. 3630. <https://doi.org/10.3390/polym15173630> EDN: GIKSXV
27. *Барсуков В.Г., Даль Ю.М., Лубовская Р.А., Барсуков В.В.* Расчетная оценка термоупругих напряжений в окрестностях волокнистых и дисперсных наполнителей в композитах на основе фторопластов // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2015. № 2 (204). С. 6–13. EDN: YQPGR
28. *Ashmarin A.A., Betsofen S.Ya., Lozovan A.A., Lukin E.I., Gordeeva M.I., Mitrofanov A.L., Bykadorov A.N.* Thermal expansion of TRIP steels and composite coatings // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024. Vol. 2024. P. 2. P. 379–386. <https://doi.org/10.1134/S0036029524700691> EDN: FMEWNN
29. *Yan L., Gou XY., Zhang X., Jiang Y., Ran X.W., Zhang P.* Experimental and numerical investigations on the spherical steel bearing capacity of new anti-separation design // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024. Vol. 28. No. 2. P. 889–903. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1172-z> EDN: JMOPYL
30. *Deng N., He M., Gu N., Liang H.* Design and performance research of a new type of spherical force-measuring bearing of bridges based on button type microsensor // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024. Vol. 28. P. 5066–5076. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-2646-3> EDN: YDQVSO
31. *Shindalkar S.S., Humbe S.S., Joshi G.M., Kumar C.R.* Engineering properties of Teflon derived blends and composites: a review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2022. Vol. 61. No. 18. P. 1973–1987. <https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2086815> EDN: UHTTSF
32. *Kang X., Zhang M., Qin H., Zeng L., Peng L., Wang X., Deng L., Hu J., Li Zh., Shao G., Lin Q.* Experimental and numerical study on the earthquake damage of spherical bearings for chinese high-speed railway bridge // *Shock and Vibration*. 2022. Vol. 2022. Article no. 8304408. <https://doi.org/10.1155/2022/8304408> EDN: YDNQXA
33. *Nosov Y.O., Kamenskikh A.A., Bogdanova A.P.* Description of the Lubricant Behavior Based on the Theory of Elasto-Viscoplastic // *Materials*. 2025. Vol. 18. Article no. 1360. <https://doi.org/10.3390/ma18061360> EDN: OYHTVP