

DOI: [10.7242/1999-6691/2021.14.3.24](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.3.24)

УДК 539.374

О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ И КОНФИГУРАЦИИ СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ

А.А. Адамов¹, А.А. Каменских², В.И. Струкова²¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

Узел опорной части мостового сооружения состоит из верхней стальной плиты со сферическим сегментом, обеспечивающим подвижность конструкции, нижней стальной плиты, отвечающей за передачу вертикальной опорной реакции и равномерное распределение давления от сферического сегмента, и антифрикционных полимерных слоев скольжения (сферического и плоского). При изготовлении узла предусматривается разное местоположение слоев скольжения относительно стальных плит. В работе анализируется влияние места нанесения сферического слоя скольжения в опорном узле на фрикционное контактное взаимодействие элементов опорной части и на их деформационное поведение. Плоский слой скольжения в модели не учитывается. Авторами не найдены в литературе сведения о подобной оценке связи геометрии и конфигурации антифрикционных прослоек с поведением конструкции при деформировании. Рассмотрено два варианта размещения слоя скольжения: он нанесен или на сферический стальной сегмент, или заполняет сферический вырез нижней стальной плиты (классический вариант). В качестве материала слоя скольжения используется радиационно-модифицированный фторопласт Ф-4 без наполнения. Опорный узел с прослойкой, расположенной в вырезе нижней стальной плиты, соответствует модели опорной части Л-100 производства ООО «АльфаТех» (г. Пермь). Модель Л-100 рассчитана на нормативную вертикальную нагрузку 1000 кН и обладает конструктивными размерами: максимальной длиной 155 мм, максимальной высотой 54 мм, толщиной 4 мм. Опорный узел с прослойкой на сферическом сегменте имеет аналогичные модели Л-100 геометрические показатели. Стандартный угол наклона торца антифрикционной прослойки составляет 30°. Установлено, что при стандартном угле в опорной части с прослойкой на сферическом сегменте наблюдается расхождение (отлипание) поверхностей сопряжения более чем на 2% ее общей площади. Поэтому в рамках данного исследования оценивается роль наклона торца антифрикционной прослойки на деформирование опорных частей. В численных экспериментах установлен ряд преимуществ классической конструкции сферической опорной части, показавшей при моделировании большую площадь полного прилипания поверхностей сопряжения элементов, равномерное распределение параметров контакта по поверхностям, меньшее деформирование профиля торца слоя скольжения. Также установлены значения угла наклона торца слоя скольжения, при которых получается благоприятное для функционирования мостовой конструкции в зоне опорного узла распределение свойств зон контакта и характеристик деформированного состояния опорных частей при двух вариантах местоположения антифрикционной прослойки.

Ключевые слова: мостовые сооружения, сферическая опорная часть, геометрия и конфигурация, контакт, трение, полимерные материалы, натурное и численное моделирование

INFLUENCE OF GEOMETRY AND CONFIGURATION OF THE SPHERICAL SLIDING LAYER OF BRIDGE BEARINGS ON THE STRUCTURE WORKING CAPACITY

A.A. Adamov¹, A.A. Kamenskikh² and V.I. Strukova²¹Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Spherical bearing contact units consist of an upper steel plate with a spherical segment, a lower steel plate and antifriction polymer sliding layers (spherical and flat). Manufacturers produce the units with different positions of the flat and spherical sliding layer relative to the steel plates of the bearing. However, the effect of the antifriction layer position in the contact unit on the deformation behavior of the structure has not yet been evaluated. In this paper, the influence of the spherical sliding layer position relative to the steel structural elements on their frictional interaction is considered. Two variants associated with the position of the spherical antifriction layer are examined: the sliding layer is applied to the spherical steel segment, and it is located in the spherical notch of the lower steel plate. The design of the spherical bearings includes an interlayer made of radiation-modified fluoroplastic F-4 (no filling). The support unit with an interlayer located in the lower steel plate corresponds to the bearing model L-100 manufactured by AlfaTech LLC (Perm). The L-100 bearing is designed for a normative vertical load of 1000 kN. The maximum length and height of the structure are 155 and 54 mm, respectively, and the interlayer thickness is 4 mm. The support unit with an interlayer applied to the spherical segment is modeled with geometrical dimensions similar to those of the L-100. The standard angle of inclination of the antifriction layer end face is 30°. It was found that the detachment of the mating surfaces by more than 2% of the contact area occurs at a standard angle of the sliding layer end face in the case when the layer is applied to the spherical segment. Therefore, the influence of the inclination angle of the antifriction layer end face on the bearing deformation is considered within the framework of this work. The advantages of the spherical bearing classical design were established in a series of numerical experiments: a more uniform distribution of contact parameters over the mating surfaces, a large area of complete adhesion of the mating surfaces, small deformation of the end face of the sliding layer, etc. Based on the obtained results, the angles of inclination of the end face of the sliding layer were determined, which made it possible to achieve optimal distribution of the parameters of contact zones and the deformation characteristics of the bearings with two variants of the antifriction layer positions.

Key words: bridge structures, spherical bearing, geometric configuration, contact, friction, polymeric materials, full-scale and numerical modeling

1. Введение

Эффективное транспортное сообщение, связанность территорий внутри страны и с соседними государствами, создание современных функциональных транспортно-логистических систем является одним из приоритетных направлений развития стран во всем мире [1–4]. Устойчиво функционирующая

транспортная сеть включает в себя автомобильные дороги разного уровня, транспортные развязки с многоуровневыми эстакадами, мостовые сооружения и оказывает значительное влияние на экономическое развитие территорий [3, 4]. В Российской Федерации в рамках национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», обновленный паспорт которого утвержден в 2021 году, рассматривается ряд актуальных вопросов проектирования новых, а также мониторинга и восстановления ранее созданных элементов дорожной сети. Решение этих вопросов позволит сформировать современные безопасные транспортные системы в регионах страны [2, 5].

К ответственным узлам транспортных систем, требующим постоянного отслеживания технического состояния, в первую очередь относятся мостовые сооружения [2, 6, 7] и их элементы, воспринимающие нагрузки. За последние десятилетия наблюдается стабильный рост количества транспортных средств, увеличение транспортного потока через дорожные развязки и мостовые сооружения, что значительно увеличивает нагрузки на несущие элементы и определяет требования, предъявляемые к функционированию транспортных систем [8–10]. Можно отметить основные причины выхода из строя мостовых сооружений [9–12]: разрушения из-за потери устойчивости элементов мостостроительных конструкций; разрыв соединений несущих узлов конструкций; перегрузка несущих элементов, и другое. Таким образом, одним из основных факторов потери работоспособности мостостроительных конструкций является поломка ответственных несущих элементов, к которым относятся: деформационные швы [13, 14], опорные части [15–18], пролетные строения мостов [18, 19], подъемные сооружения разводных мостов [20] и другое.

Существует несколько направлений исследований, связанных с повышением прочности, надежности, долговечности элементов транспортных систем: рационализация и оптимизация конструкций ответственных элементов и мостов в целом [21, 22], новые технологии создания и реставрации дорожных объектов [22–25], внедрение новых материалов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами [26–28], изменение геометрии и конфигурации элементов опорных частей [29–33] и так далее. При этом повышенный интерес к деформационному поведению конструкций опорных частей мостов и других узлов имеет место при их работе в условиях сейсмической активности [34–36]. Важным является анализ влияния как геометрии и конфигурации опорных частей на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции [26, 34], так и материалов элементов на функциональность узлов [27, 37]. Большинство задач решается в рамках компьютерного инжиниринга, то есть на компьютерных моделях с использованием эффективных численных методов [16–18 и др.], исследования основываются на методе конечных элементов и используют для реализации задач современные прикладные пакеты. В настоящее время существует ряд инженерных и научных решений, направленных на оптимизацию и рационализацию опорных частей мостов [29–33]: толщины, формы и положения слоев скольжения из антифрикционных полимерных материалов, а также на геометрическое оформление углублений под смазочный материал в полимерных прослойках, введение в конструкцию дополнительных элементов. Таким образом, исследование влияния как геометрии, так и конфигурации элементов мостовых сооружений является актуальным, в том числе с использованием современных численных методов.

В настоящей статье представлены результаты сравнительного анализа деформационного поведения двух геометрий сферических опорных частей, отличающихся положением слоя скольжения относительно несущих стальных плит. Ранее установлено влияние угла наклона торца антифрикционной прослойки на параметры контакта и деформационные характеристики сферической опорной части. Так, при стандартном угле наклона торца 30° у конструкции со слоем скольжения, нанесенным на сферический стальной сегмент, наблюдается зона расхождения поверхностей сопряжения вблизи края прослойки. Поэтому здесь рассматривается деформирование опорных частей разной геометрии и конфигурации: угол наклона торца прослойки изменяется от 0 до 45° с шагом в 5° . Исследование направлено на выявление качественных и количественных закономерностей влияния угла наклона торца и положения сферического слоя скольжения на работоспособность конструкции.

2. Постановка задачи

Анализируется контактное взаимодействие через антифрикционную полимерную прослойку верхнего сферического элемента 1 и нижней стальной плиты 2 (Рис. 1). Рассматривается две геометрии сферической опорной части: антифрикционная прослойка 3 заполняет углубление в нижней стальной плите (классическая конструкция) — модель А (Рис. 1а); прослойка нанесена на сферический сегмент — модель Б (Рис. 1б).

Сферические опорные части при высоте $h = 54$ мм и ширине $b = 2b_k = 155$ мм рассчитаны на нормативную вертикальную нагрузку 1000 кН. Толщина прослойки постоянна и равна $h_p = 4$ мм, $l_p = 65$ мм — расстояние до крайней точки антифрикционной прослойки на поверхности S_k , по которой возможен поворот сферического сегмента. Стандартный угол наклона торца сферического слоя скольжения 30° . Полимерная прослойка впрессовывается в стальные элементы конструкции. В качестве материала относительно тонкого сферического слоя скольжения взят радиационно-модифицированный фторопласт Ф-4 без наполнения.

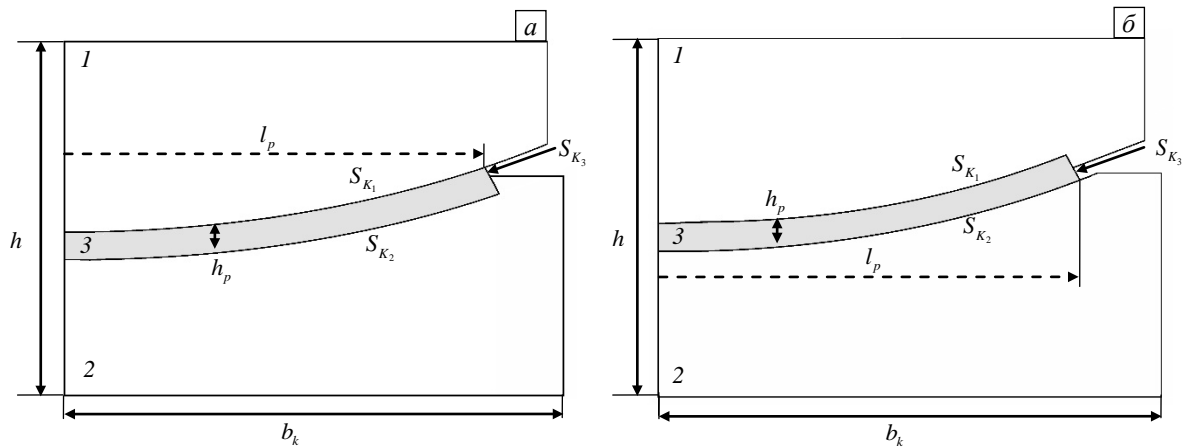


Рис. 1. Расчетные схемы сферических опорных частей: модель А (а); модель Б (б)

Конструктивное оформление сферической антифрикционной прослойки опорных частей мостов представляет большой интерес [26], так как важны толщина слоя скольжения и угол наклона его торца, положение прослойки относительно стальных элементов конструкции, форма углублений под смазочный материал и другое. Геометрия антифрикционной прослойки зависит от угла наклона торца α_p (см. Рис. 2).

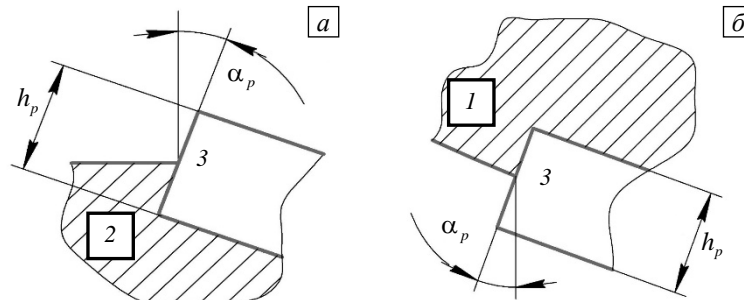


Рис. 2. Геометрия торца прослойки: модель А (а); модель Б (б)

Поскольку при сравнительном исследовании деформационного поведения двух вариантов конструкции с разным положением сферического слоя скольжения установлено, что при стандартном угле наклона торца появляются зоны полного «отлипания» поверхностей сопряжения вблизи края антифрикционной прослойки, нанесенной на сферический сегмент, было принято решение об анализе влияния угла наклона торца на НДС конструкции как в целом, так и на параметры в зонах контактного состояния элементов опорного узла. Рассмотрено 10 значений угла наклона торца антифрикционной прослойки в диапазоне от 0 до 45° для двух конфигураций антифрикционного слоя.

Свойства радиационно-модифицированного фторопласта Ф-4 без наполнения получены экспериментально, для описания его поведения выбрана модель деформационной теории пластичности [27]. Его основные физико-механические свойства следующие: модуль свободного сжатия 863,8 МПа, модуль стесненного сжатия 4235,6 МПа, коэффициент Пуассона 0,461, коэффициент трения по сопрягаемым поверхностям 0,04 (справочное значение). Математическая постановка задачи, приведенная в [16], дополняется учетом больших деформаций в объеме материала прослойки. Используемая здесь постановка отличается от постановки данной задачи другими исследователями тем, что включает описание и реализацию фрикционного контактного взаимодействия в областях сопряжения слоя скольжения со стальными элементами конструкции при условии заранее неизвестного распределения зон контактных состояний (прилипания, проскальзывания и отлипания).

Стандартным положением слоя скольжения относительно стальных элементов конструкции является сферический вырез в нижней стальной плите опорной части (модель А). Поэтому в рамках данной работы выполняется сравнение деформационного поведения конструкций сферических опорных частей с иным местоположением слоя скольжения согласно формуле:

$$\Delta X = \left(\left| X_{\text{модель А}} - X_{\text{модель Б}} \right| / X_{\text{модель А}} \right) \cdot 100\% , \quad (1)$$

где $X_{\text{модель А}}$ и $X_{\text{модель Б}}$ — соответственно значения сравниваемых параметров моделей А и Б.

Оценка влияния величины угла наклона торца прослойки α_p на деформационное поведение конструкций сферических опорных частей осуществлялась по стандартному значению $\alpha_p = 30^\circ$:

$$\delta X = \left(\left| X|_{\alpha_p=30^\circ} - X|_{\alpha_p \neq 30^\circ} \right| / X|_{\alpha_p=30^\circ} \right) \cdot 100\% , \quad (2)$$

где $X|_{\alpha_p=30^\circ}$ и $X|_{\alpha_p \neq 30^\circ}$ — значения исследуемого параметра при стандартном и нестандартном α_p .

Анализ работы конструкций сферических опорных частей мостов с разным положением слоя скольжения при всех вариантах угла наклона торца выполнен в осесимметричной постановке по параметрам контакта поверхностей сопряжения, перемещениям по нормали к торцу и интенсивности пластических деформаций прослойки. Конечно-элементное разбиение опорных частей моделей А и Б выбиралось согласно результатам ранее проделанных численных решений задачи, позволившим выявить зависимость точности реализации от степени дискретизации системы. Связь степени дискретизации с точностью достигаемых решений получена на классическом примере геометрии и конфигурации сферической опорной части [16]. При реализации задачи в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL использовались прямоугольные четырехузловые элементы с лагранжевой аппроксимацией (PLANE182), соотношение сторон близко к 1:1. Был определен оптимальный размер конечных элементов по толщине полимерной прослойки (длина стороны): 0,25 мм. Для дискретизации верхней и нижней плит использовалась сетка из элементов, размер которых был в 2 раза больше элемента прослойки — 0,5 мм. В рамках исследования также выполнена оценка устойчивости решения задачи, в том числе и с учетом больших деформаций в антифрикционной прослойке.

3. Анализ деформационного поведения элементов сферических опорных частей

Найденные численно решения задач контактного деформационного поведения сферических опорных частей позволили сравнить распределения параметров в зонах контактного состояния при разном местоположении слоя скольжения относительно стальных элементов конструкции (см. модели А и Б), а также оценить влияние угла наклона торца слоя скольжения α_p на НДС узла.

В качестве примера на рисунке 3 показано распределение контактного давления и контактного касательного напряжения исследуемых моделей опорных частей при стандартном угле наклона торца антифрикционной прослойки 30° . Представленные параметры отвечают поверхности контакта, по которой возможен поворот сферического сегмента — S_{K_1} в модели А, S_{K_2} в модели Б.

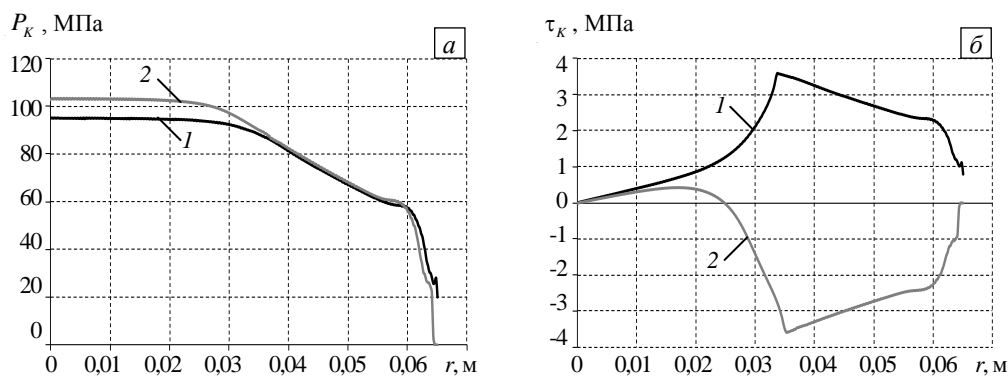


Рис. 3. Характер распределения давления P_K (а) и касательного напряжения τ_K (б) на поверхности контакта, по которой возможен поворот сферического сегмента, в модели А (кривая 1) и в модели Б (2)

У двух рассматриваемых моделей сферических опорных частей характер распределения контактного давления имеет незначительные отличия: малое изменение уровня P_K вблизи центра сферической поверхности (зона полного прилипания контактных поверхностей) со снижением контактного давления в зоне проскальзывания. Максимальный уровень P_K в модели Б на 8,4% больше, чем у модели А. При этом у модели Б вблизи края слоя скольжения наблюдается совсем другое контактное состояние — расхождение (полное отлипание) поверхности сопряжения более чем на 2% от ее общей площади. Характер распределения контактного касательного напряжения у моделей А и Б также имеют различия. Так, в зоне смены контактного состояния с прилипания на проскальзывание τ_K в модели А возрастает в зоне полного прилипания поверхностей контакта и достигает максимального уровня, затем плавно снижается в области проскальзывания; τ_K в модели Б увеличивается на 50% площади зоны полного прилипания контактных

поверхностей с последующим резким снижением уровня и плавным ростом в зоне проскальзывания. Можно отметить, что при стандартной величине угла наклона торца слоя скольжения 30° площадь зоны полного прилипания в модели Б больше, чем в модели А приблизительно на 10%. По результатам серии численных экспериментов установлено, что характер распределения контактного давления и контактного касательного напряжения обладают малыми отличиями при разных углах наклона торца. Выявлено влияние α_p на максимальный уровень контактных параметров и их значения вблизи края слоя скольжения. На рисунке 4а показаны зависимости от угла α_p величин $\max P_K$ и $\max \tau_K$ на поверхности контакта, по которой возможен поворот сферического сегмента. Функции $P_K(\alpha_p)$ и $\tau_K(\alpha_p)$ вблизи края слоя скольжения при $r = l_p$ отражены на рисунке 4б.

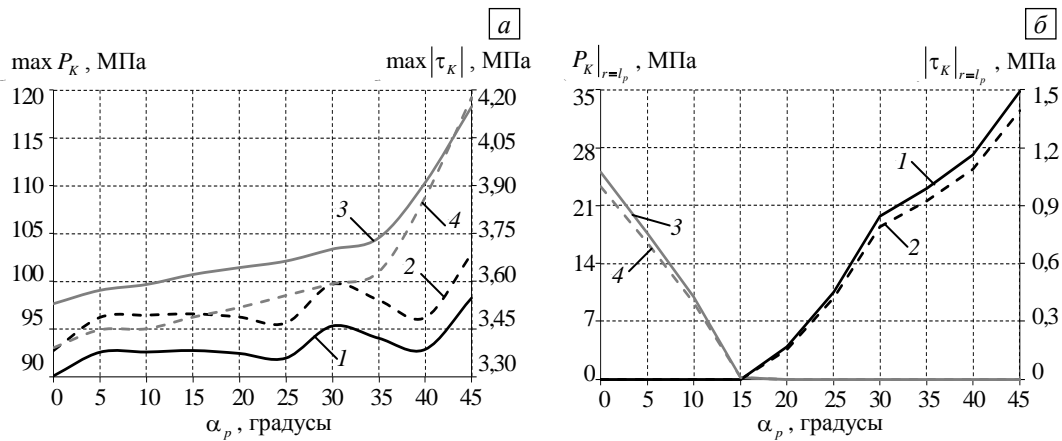


Рис. 4. Зависимость от α_p контактных параметров: максимального уровня (а); вблизи края слоя скольжения при $r = l_p$ (б); контактное давление (кривые 1, 3), контактное касательное напряжение (2, 4); модель А (1, 2) и модель Б (3, 4)

Максимальный уровень контактного давления и контактного касательного напряжения в зависимости от угла наклона торца изменяется нелинейно. Параметры $\max P_K$ и $\max \tau_K$ как функции α_p у модели Б могут быть описаны полиномами 4-го и более высокого порядка. У модели А при $\alpha_p = 25 \div 40^\circ$ наблюдаются значительные изменения в характере кривых $\max P_K$ и $\max \tau_K$, что не позволяет подобрать для их описания математическую зависимость от угла наклона торца слоя скольжения. Максимальный уровень P_K у модели Б больше, чем у модели А, в среднем на 8,7% при углах наклона торца от 0 до 30° ; при $\alpha_p > 30^\circ$ различия $\max P_K$ у моделей увеличиваются и достигают более 20% при угле наклона 45° . Контактное касательное напряжение у исследуемых моделей при углах наклона торца от 0 до 35° отличаются незначительно, не более чем на 2,5%. При углах наклона торца $\alpha_p > 30^\circ$ $\max \tau_K$ у модели Б выше, чем у модели А, самое большое на 13,3% (при $\alpha_p = 45^\circ$). Вблизи края антифрикционной прослойки при определенных α_p появляется зона отлипания контактных поверхностей: у модели А при $\alpha_p = 0 \div 15^\circ$; у модели Б при $\alpha_p = 20 \div 45^\circ$. Рисунок 4б наглядно демонстрирует расхождение поверхностей сопряжения вблизи края антифрикционной прослойки, которое появляется у обеих моделей, но при разных углах наклона торца. Можно отметить, что максимальный уровень контактного давления и контактного касательного напряжения на краю прослойки у модели А превышает на 28% эти параметры у модели Б, что соответствует их более равномерному характеру распределения.

В результате вычислительных экспериментов установлено влияние α_p на характер распределения контактных состояний на поверхностях сопряжения (особый интерес представляет поверхность контакта, по которой возможен поворот сферического сегмента). Введем обозначения: $S_{adhesion}$ — площадь, которая является контактной с полным прилипанием; $S_{no\ contact}$ — поверхность отлипания (расхождения) поверхностей сопряжения. В таблице 1 для обеих моделей сферических опорных частей представлено контактное состояние на поверхности сопряжения у различных моделей (в процентах от общей площади поверхности сопряжения).

С увеличением α_p площадь контактной поверхности, по которой возможен поворот сферического сегмента и на которой действует условие полного сцепления, в большинстве случаев уменьшается. Можно отметить, что процент площади поверхностей сопряжения, находящейся в состоянии полного прилипания, у двух моделей отличается при большинстве значений α_p . У модели А $S_{adhesion}$ больше, чем

Таблица 1. Контактное состояние на поверхности сопряжения у различных моделей

Модель	Площадь контакта или отлипания, %	α_p , градусы									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
А	$S_{adhesion}$	37,59	32,18	31,11	31,29	31,24	31,43	26,28	27,60	29,51	22,71
	$S_{no\ contact}$	2,23	1,48	1,47	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Б	$S_{adhesion}$	33,07	31,36	31,78	31,36	30,52	29,69	28,87	28,06	22,03	15,78
	$S_{no\ contact}$	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	1,49	2,23	2,97	3,71	4,61

у модели Б; максимальные отличия процентного соотношения площади полного прилипания поверхностей сопряжения наблюдаются при углах наклона более 35° и достигают 30% и более. Площадь поверхности сопряжения в состоянии полного отлипания наблюдается у модели А при $\alpha_p = 0 \div 15^\circ$ и максимально достигает около 2%, у модели Б — при $\alpha_p = 20 \div 45^\circ$ и максимально достигает более 4,5%. Появление и рост на поверхности сопряжения зоны с полным отлипанием оказывает значительное влияние на такие параметры, как перемещения поверхности S_{K_3} по нормали относительно свободного торца слоя скольжения, интенсивность пластических деформаций, а также максимальный уровень параметров зон контакта.

На рисунке 5а показан характер распределения перемещений по толщине антифрикционной прослойки, а на рисунке 5б отражена зависимость их максимального уровня от α_p .

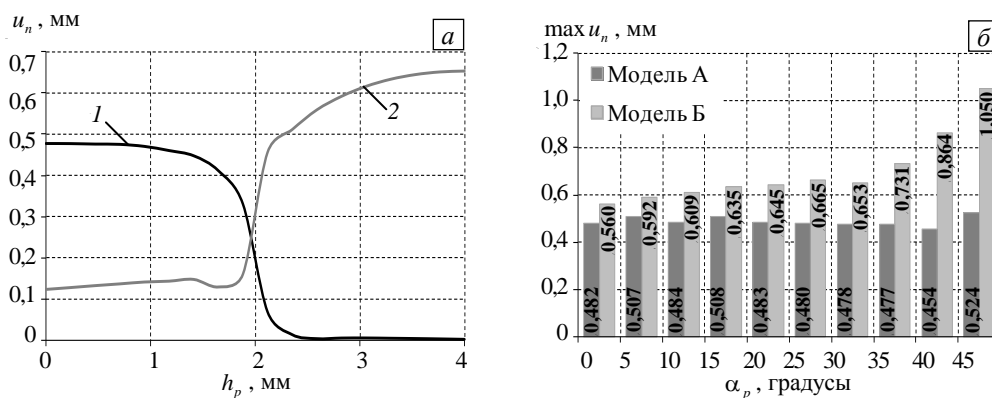


Рис. 5. Характер распределения перемещений u_n по толщине прослойки при $\alpha_p = 30^\circ$ в разных моделях: А (кривая 1); Б (2) (а); зависимость $\max u_n$ от угла α_p (б)

Максимальный уровень перемещений по нормали к поверхности антифрикционной прослойки наблюдается в ее относительно свободной части. При этом у модели А в зоне контакта со стальной плитой торца слоя скольжения u_n близки к нулевым значениям, что не присуще модели Б. В зоне контакта верхней стальной плиты с торцом антифрикционной прослойки у модели Б перемещения по нормали отличны от 0, что связано с большим уровнем деформаций и пластическим течением модифицированного фторопласта вблизи края слоя скольжения. В целом характер распределения u_n у рассматриваемых моделей в относительно свободной части торца имеет малые отличия, перемещения максимальны вблизи поверхности контакта опорной части, по которой возможен поворот сферического сегмента. В таблице 2 показаны $\Delta \max u_n$ — разность максимальных перемещений по нормали к поверхности опорных частей моделей с разным местоположением слоя скольжения и $\delta \max u_n$ — оценка влияния на максимальные перемещения S_{K_3} угла наклона торца.

Таблица 2. Влияние положения и угла наклона торца слоя скольжения на $\max u_n$

α_p , градусы	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$\Delta \max u_n$, %	16,22	16,63	25,84	25,16	33,37	38,40	36,71	53,42	90,49	100,25
Модель А										
$\delta \max u_n$, %	> 0,88	> 6,18	> 1,33	> 6,26	> 1,19	> 0,54	-	< 0,26	< 5,07	> 9,74
Модель Б										
$\delta \max u_n$, %	< 14,24	< 9,41	< 6,73	< 2,72	< 1,28	> 1,78	-	> 11,93	> 32,28	> 60,74

Анализируя данные, приведенные на рисунке 5б и в таблице 2, можно отметить, что $\max u_n$ у модели Б больше, чем у модели А на ~16–100%. Различия максимального уровня перемещений по нормали к торцу слоя скольжения у обеих рассмотренных моделей опорных частей увеличиваются с ростом α_p от 0 до 45°. В рамках исследования также выполнено сравнение $\max u_n|_{\alpha_p \neq 30^\circ}$ с $\max u_n|_{\alpha_p = 30^\circ}$, в результате которого установлено: при углах наклона торца, отличающихся от стандартного, модель А имеет отличия максимального уровня u_n , но не превышающие 10%, минимальные отличия наблюдается при углах наклона торца 0, 25 и 35° и составляют менее 1%; модель Б при $\alpha_p < 30^\circ$ характеризуется снижением $\max u_n$, при $\alpha_p > 30^\circ$ $\max u_n$ имеет значительное увеличение, наибольшее снижение максимального уровня перемещений по нормали к торцу прослойки наблюдаются при $\alpha_p = 0^\circ$ и достигает 14,24%.

Перемещения по нормали к торцу относительно свободной поверхности контакта антифрикционного слоя скольжения связаны с проявлением пластических деформаций в полимерном материале. На рисунке 6 показан характер распределения интенсивности пластических деформаций в сферическом слое скольжения для двух вариантов опорных частей со стандартным углом наклона торца, в увеличенном масштабе показана зона вблизи края антифрикционной прослойки с максимальным уровнем ε_{II_p} .

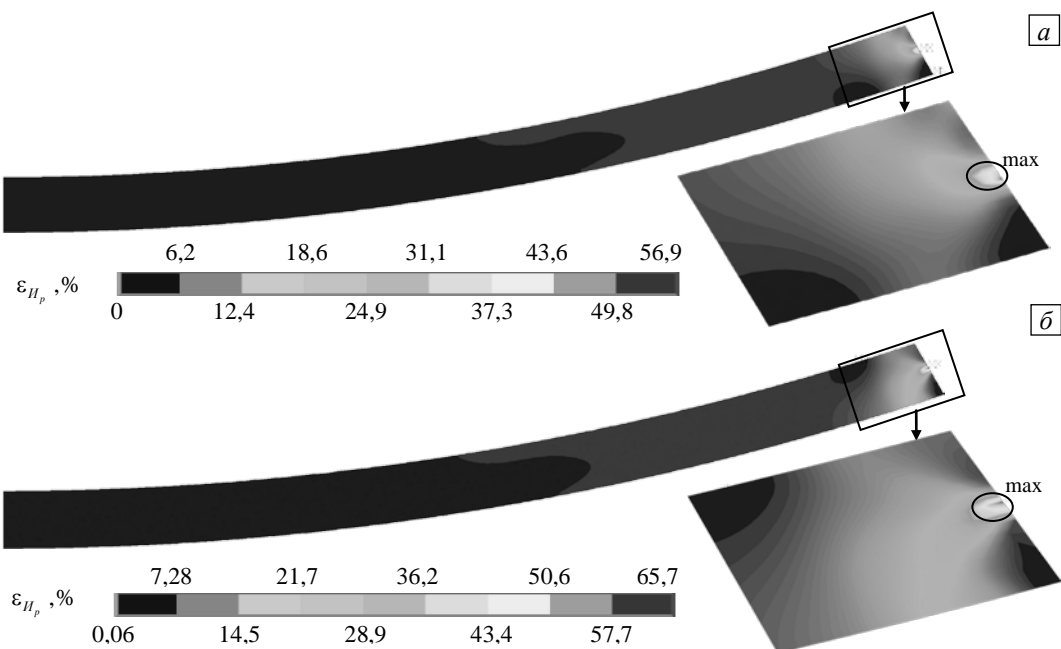


Рис. 6. Характер распределения ε_{II_p} при $\alpha_p = 30^\circ$ в разных моделях: А (а); Б (б)

Максимальная интенсивность пластических деформаций ε_{II_p} наблюдается вблизи относительно свободного торца слоя скольжения в зоне сопряжения стальной плиты с антифрикционной прослойкой. Зона концентрации напряжений и пластических деформаций имеет место вблизи начала области контактного взаимодействия стальной плиты со слоем скольжения. Установлено значительное влияние угла наклона торца слоя скольжения на максимальный уровень ε_{II_p} , характер распределения и размеры зоны $\max \varepsilon_{II_p}$. При этом на большей части антифрикционной прослойки $\varepsilon_{II_p} < 20\%$. Можно отметить, что при стандартном угле наклона торца 30° $\max \varepsilon_{II_p}$ слоя скольжения больше у модели Б приблизительно на 15%.

Рассмотрим зависимость от α_p максимального уровня пластических деформаций сферической антифрикционной прослойки для двух вариантов положения слоя скольжения относительно стальных элементов конструкции (Рис. 7). Как видно, при большинстве значений α_p максимальный уровень пластических деформаций в слое скольжения модели Б больше, чем у модели А. Незначительные отличия $\max \varepsilon_{II_p}$ наблюдаются при углах наклона торца слоя скольжения 5 и 35°. В таблице 3 показаны разности максимального уровня интенсивности деформаций опорных частей с разным положением слоя скольжения и приводится оценка влияния на $\max \varepsilon_{II_p}$ угла наклона торца относительно стандартной величины.

Максимальные различия уровня интенсивности пластических деформаций соответствуют углам наклона торца 20, 25, 40 и 45° и составляют приблизительно 50–100%. В рамках исследования также

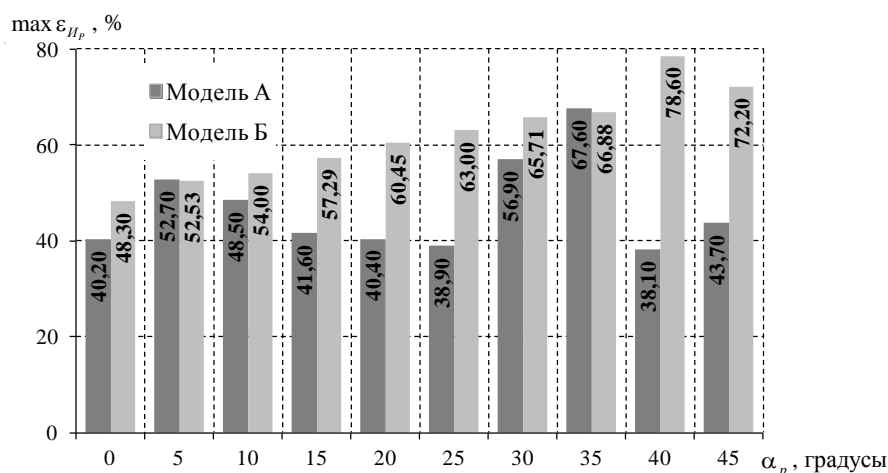


Рис. 7. Зависимость $\max \varepsilon_{IIp}$ от угла α_p

Таблица 3. Влияние положения слоя скольжения и угла наклона его торца на величину $\max \varepsilon_{IIp}$

α _p , градусы	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Δ max ε _{IIp} , %	20,15	0,33	11,34	37,73	49,62	61,95	15,49	1,06	106,30	65,22
Модель А										
δ max ε _{IIp} , %	< 29,35	< 7,38	< 14,76	< 26,89	< 29,00	< 31,63	-	> 18,80	< 33,04	< 23,20
Модель Б										
δ max ε _{IIp} , %	< 26,50	< 20,07	< 17,82	< 12,81	< 8,01	< 4,13	-	> 1,78	> 19,61	> 9,87

выполнено сравнение $\max \varepsilon_{IIp} \Big|_{\alpha_p \neq 30^\circ}$ с $\max \varepsilon_{IIp} \Big|_{\alpha_p = 30^\circ}$, в результате которого установлено, что у модели А наблюдается снижение максимального уровня пластических деформаций при углах наклона торца слоя скольжения, отличающихся от стандартного более чем на 30% при α_p , равном 25 и 40°; у модели Б при α_p меньше 30° значение $\max \varepsilon_{IIp}$ также снижается, при $\alpha_p > 30^\circ$ $\max \varepsilon_{IIp}$ увеличивается. Наибольшее снижение максимального уровня интенсивности пластических деформаций в сферическом слое скольжения соответствует $\alpha_p = 0^\circ$ и достигает 26,5%.

Выполнено сравнение по величине осадки результатов численного моделирования поведения опорной части с прослойкой, заполняющей вырез нижней стальной плиты, с данными натурных экспериментов по деформированию классической конструкции сферической опорной части. Установлено, что в осесимметричной постановке погрешность результатов численного и натурального экспериментов не превышает 15%. Экспериментальные исследования по деформированию опорной части с прослойкой, нанесенной на сферический сегмент, на настоящий момент не проводились.

4. Заключение

Осуществлен анализ влияния угла наклона торца и местоположения антифрикционной прослойки на деформационное поведение сферических опорных частей мостового сооружения. Рассмотрено два варианта размещения слоя скольжения относительно стальных плит опорной части: антифрикционная прослойка заполняет вырез в нижней стальной плите — модель А; антифрикционная прослойка нанесена на сферический сегмент — модель Б. Выполнено сравнение деформационного поведения модели Б с классической моделью опорной части (модель А). Исследовано влияние угла наклона торца слоя скольжения на фрикционный контакт элементов конструкции в сравнении с деформированием опорных частей при стандартном угле наклона торца 30°. Из численных экспериментов установлен ряд качественных и количественных закономерностей деформационного поведения опорных частей мостов разной геометрии и конфигурации.

Выявлено, что классическое положение сферического слоя скольжения (модель А) обладает рядом преимуществ: площадь поверхностей контакта в среднем больше на 5% чем у модели Б; при расхождении поверхностей сопряжения площади в состоянии полного отлипания составляют не более 2,5% их длины и появляются при углах наклона торца менее 20°; максимальный уровень контактного давления и контактного касательного напряжения ниже на 13 и 20% соответственно, чем у модели Б; перемещения

относительно свободного торца прослойки не превышают 0,55 мм. Показано, что наиболее благоприятное распределение параметров зон контакта и деформационных характеристик слоя скольжения получается при углах наклона торца 25 и 40° у модели А и 0° у модели Б.

Научная новизна результатов исследования заключается в сравнительном анализе деформационного поведения сферических опорных частей мостов при разном местоположении слоя скольжения относительно стальных плит конструкции; ранее подобные исследования не проводились.

Вычислительные эксперименты выполнены при осесимметричной постановке и деформировании опорных частей только нормативной вертикальной нагрузкой, соответствующей реальным нагрузкам, действующим на опорные части пролетных строений мостов данного типоразмера. При этом в инженерных расчетах по рационализации работы конструкции полагается, что опорная часть с прослойкой, нанесенной на сферический сегмент, позволит значительно снизить деформирование узла при введении в конструкцию дополнительных — горизонтальных — нагрузок от мостового пролета. Данное предположение требует дальнейшего изучения в трехмерной постановке с учетом разного уровня и сочетания горизонтальной и вертикальной нагрузок.

Литература

1. Janic' M. Advanced transport systems. Springer, 2014. 408 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6287-2>
2. Реутов Е.В., Полозков А.И. Автодороги России: реальность и перспективы // Транспортное дело России. 2020. № 2. С. 201-203.
3. Прядко И.П. Роль транспортных магистралей в создании биосферно-совместимого пространства городов: опыт российской столицы // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 2(26). С. 111-122. <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-26-2-111-122>
4. Singh S., Martinetti A., Majumdar A., van Dongen L.A.M. (ed.) Transportation systems: Managing performance through advanced maintenance engineering. Springer, 2019. 221 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9323-6>
5. Еремин А.В., Волокитина О.А., Волокитин В.П. Управление состоянием мостовых сооружений в рамках реализации национального проекта "Безопасные и качественные автомобильные дороги" // Высокие технологии в строительном комплексе. 2020. № 1. С. 12-17.
6. Garcia-Sanchez D., Fernandez-Navamuel A., Sánchez D.Z., Alvear D., Pardo D. Bearing assessment tool for longitudinal bridge performance // J. Civil. Struct. Health Monit. 2020. Vol. 10. P. 1023-1036. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00432-1>
7. Locke R., Redmond L., Atamturktur S. Techniques for simulating frozen bearing damage in bridge structures for the purpose of drive-by health monitoring // Dynamics of civil structures / Ed. S. Pakzad. Springer, 2021. P. 39-52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47634-2_6
8. Blinkin M., Koncheva E. (ed.) Transport systems of Russian cities: Ongoing transformations. Springer, 2016. 299 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47800-5>
9. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5, № 1. 25 с. <http://dx.doi.org/10.15862/05SATS118>
10. Proske D. Bridge collapse frequencies versus failure probabilities. Springer, 2018. 126 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73833-8>
11. Beben D. Soil-steel bridges: Design, maintenance and durability. Springer, 2020. 214 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8>
12. Ye S., Lai X., Bartoli I., Aktan A.E. Technology for condition and performance evaluation of highway bridges // J. Civil. Struct. Health Monit. 2020. Vol. 10. P. 573-594. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00403-6>
13. Deng Y., Li A. Structural health monitoring for suspension bridges: Interpretation of field measurements. Springer, 2019. 243 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3347-7>
14. Okamoto N., Kinoshita T., Futagi T. Development of new embedded expansion joint using high flexibility stone mastic asphalt // 8th RILEM International symposium on testing and characterization of sustainable and innovative bituminous materials / Ed. F. Canestrari, M. Partl. Springer, 2016. P. 837-849. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_67
15. Eggert H., Kauschke W. Structural bearings. Ernst & Sohn, 2002. 405 p.
16. Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряженного состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычисл. мех. сплош. сред. 2013. Т. 6, № 1. С. 54-61. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.1.7>
17. Jiang L., He W., Wei B., Wang Z., Li S. The shear pin strength of friction pendulum bearings (FPB) in simply supported railway bridges // Bull. Earthquake Eng. 2019. Vol. 17. P. 6109-6139. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00698-x>
18. Kuznetsov D.N., Grigorash V.V., Sventikov A.A. Work power of the support unit of the steel I-beam // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1(49). P. 19-29. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.49.1.002>
19. Лукин А.О., Суворов А.А. Пролетные строения мостов с гофрированными металлическими стенками // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 2(41). С. 45-67.
20. Позынич К.П., Клигунов Е.С. Проблема неуравновешенности пролетного строения подъёмно-переходного моста гидротехнического сооружения // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1, № 1. С. 326-330.
21. Devitofranceschi A., Paolieri E. Integral bridges: A construction method to minimize maintenance problems // Proceedings of Italian Concrete Days 2018 / Ed. M. di Prisco, M. Menegotto. Springer, 2020. P. 515-529. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23748-6_40
22. Huang W., Pei M., Liu X., Wei Y. Design and construction of super-long span bridges in China: Review and future perspectives // Front. Struct. Civ. Eng. 2020. Vol. 14. P. 803-838. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0644-1>

23. Su M., Wang J., Peng H., Cai C.S., Dai G.L. State-of-the-art review of the development and application of bridge rotation construction methods in China // *Sci. China Technol. Sci.* 2021. Vol. 64. P. 1137-1152. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1704-1>
24. Kollegger J., Reichenbach S. Balanced lift method – building bridges without formwork // *Proceedings of Italian Concrete Days 2016* / Ed. M. di Prisco, M. Menegotto. Springer, 2016. P. 200-215. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78936-1_15
25. Yu Xm., Chen Dw., Bai Zz. A new method for analysis of sliding cable structures in bridge engineering // *KSCE J. Civ. Eng.* 2018. Vol. 22. P. 4483-4489. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0151-7>
26. Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Численный анализ геометрической конфигурации сферической опорной части с антифрикционной прослойкой из разных материалов // *Вестник ПНИПУ. Механика.* 2020. № 4. С. 15-26. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.02>
27. Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // *Прикладная математика и вопросы управления.* 2019. № 4. С. 43-56.
28. Ono K. Structural materials: Metallurgy of bridges // *Metallurgical design and industry* / Ed. B. Kaufman, C. Briant. Springer, 2018. P. 193-269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93755-7_4
29. Опорная часть моста: пат. 180825 Российская Федерация / Ипанов А.С., Адамов А.А., Патраков И.М., Копытов А.В., Кочнев Н.В., Цаплина В.И. № 2017118218; заявл. 25.05.17; опубл. 26.06.18, Бюл. № 18. 9 с.
30. Сейсмоизолирующая опорная часть: пат. 193680 Российская Федерация / Копытов А.В., Балтин Д.Р., Буканова Е.В., Лапин С.Н. № 2019126353; заявл. 21.08.19; опубл. 11.11.19, Бюл. № 32. 11 с.
31. Опорная часть: пат. 194357 Российская Федерация / Шаферман И.М., Гитман Э.М., Шаферман А.И., Рогов А.Б., Копытов А.В., Буканова Е.В. № 2019119741; заявл. 25.06.19; опубл. 06.12.19, Бюл. № 34. 15 с.
32. Опорная часть строительной конструкции: пат. 167994 Российская Федерация / Шульман С.А., Слуцкая М.Н. № 2016140239; заявл. 12.10.16; опубл. 16.01.17, Бюл. № 2. 5 с.
33. Опорная часть моста: пат. 181699 Российская Федерация / Буканов В.В., Буканова Е.В., Патраков И.М. № 2017141825; заявл. 01.12.17; опубл. 26.07.18, Бюл. № 21. 7 с.
34. Khan A.K.M.T.A., Bhuiyan M.A.R., Ali S.B. Seismic responses of a bridge pier isolated by high damping rubber bearing: Effect of rheology modeling // *Int. J. Civ. Eng.* 2019. Vol. 17. P. 1767-1783. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00454-x>
35. Zhang Y., Li J., Wang L., Wu H. Study on the seismic performance of different combinations of rubber bearings for continuous beam bridges // *Adv. Civ. Eng.* 2020. Vol. 2020. 8810874. <https://doi.org/10.1155/2020/8810874>
36. Mahboubi S., Shiravand M.R. Seismic evaluation of bridge bearings based on damage index // *Bull. Earthquake Eng.* 2019. Vol. 17. P. 4269-4297. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00614-3>
37. Zhang Y., Li J. Effect of material characteristics of high damping rubber bearings on aseismic behaviors of a two-span simply supported beam bridge // *Advances in Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 2020. 9231382. <https://doi.org/10.1155/2020/9231382>

References

1. Janic' M. *Advanced transport systems.* Springer, 2014. 408 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6287-2>
2. Reutov E.V., Polozkov A.I. Russian roads: reality and prospects. *Transportnoye delo Rossii – Transport business of Russia*, 2020, no. 2, pp. 201-203.
3. Pryadko I.P. The role of highways in creating a biosphere-compatible urban space: Russian metropolitan experience. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii – Biospheric compatibility: human, region, technologies*, 2019, no. 2(26), pp. 111-122. <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-26-2-111-122>
4. Singh S., Martinetti A., Majumdar A., van Dongen L.A.M. (ed.) *Transportation systems: Managing performance through advanced maintenance engineering.* Springer, 2019. 221 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9323-6>
5. Eremin A.V., Volokitina O.A., Volokitin V.P. Management of the condition of bridge structures within the implementation of the national project "Safe and quality car roads". *Vysokiye tekhnologii v stroitel'nom komplekse – High technologies in construction complex*, 2020, no. 1, pp. 12-17.
6. Garcia-Sanchez D., Fernandez-Navamuel A., Sánchez D.Z., Alvear D., Pardo D. Bearing assessment tool for longitudinal bridge performance. *J. Civil. Struct. Health Monit.*, 2020, vol. 10, pp. 1023-1036. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00432-1>
7. Locke R., Redmond L., Atamturktur S. Techniques for simulating frozen bearing damage in bridge structures for the purpose of drive-by health monitoring. *Dynamics of civil structures*, ed. S. Pakzad. Springer, 2021. Pp. 39-52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47634-2_6
8. Blinkin M., Koncheva E. (ed.) *Transport systems of Russian cities: Ongoing transformations.* Springer, 2016. 299 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47800-5>
9. Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Yu., Ovchinnikov I.G., Usanov A.M. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. *Transportnyye sooruzheniya – Russian Journal of Transport Engineering*, 2018, vol. 5, no. 1, 25 p. <http://dx.doi.org/10.15862/05SATS118>
10. Proske D. *Bridge collapse frequencies versus failure probabilities.* Springer, 2018. 126 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73833-8>
11. Beben D. *Soil-steel bridges: Design, maintenance and durability.* Springer, 2020. 214 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8>
12. Ye S., Lai X., Bartoli I., Aktan A.E. Technology for condition and performance evaluation of highway bridges. *J. Civil. Struct. Health Monit.*, 2020, vol. 10, pp. 573-594. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00403-6>
13. Deng Y., Li A. *Structural health monitoring for suspension bridges: Interpretation of field measurements.* Springer, 2019. 243 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3347-7>

14. Okamoto N., Kinoshita T., Futagi T. Development of new embedded expansion joint using high flexibility stone mastic asphalt. *8th RILEM International symposium on testing and characterization of sustainable and innovative bituminous materials*, ed. F. Canestrari, M. Partl. Springer, 2016. Pp. 837-849. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7342-3_67
15. Eggert H., Kauschke W. *Structural bearings*. Ernst & Sohn, 2002. 405 p.
16. Kamenskikh A.A., Trufanov N.A. Numerical analysis of the stress state of a spherical contact system with an interlayer of antifricition material. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 54-61. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.1.7>
17. Jiang L., He W., Wei B., Wang Z., Li S. The shear pin strength of friction pendulum bearings (FPB) in simply supported railway bridges. *Bull. Earthquake Eng.*, 2019, vol. 17, pp. 6109-6139. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00698-x>
18. Kuznetsov D.N., Grigorash V.V., Sventikov A.A. Work power of the support unit of the steel I-beam. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2021, no. 1(49), pp. 19-29. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.49.1.002>
19. Lukin A.O., Suvorov A.A. Bridge spans with corrugated steel webs. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2016, no. 2(41), pp. 45-67.
20. Poznych K.P., Kligunov E.S. The unbalance problem of the superstructure lifting-transition bridge waterworks. *Dal'niy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 326-330.
21. Devitofranceschi A., Paolieri E. Integral bridges: A construction method to minimize maintenance problems. *Proceedings of Italian Concrete Days 2018*, ed. M. di Prisco, M. Menegotto. Springer, 2020. Pp. 515-529. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23748-6_40
22. Huang W., Pei M., Liu X., Wei Y. Design and construction of super-long span bridges in China: Review and future perspectives. *Front. Struct. Civ. Eng.*, 2020, vol. 14, pp. 803-838. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0644-1>
23. Su M., Wang J., Peng H., Cai C.S., Dai G.L. State-of-the-art review of the development and application of bridge rotation construction methods in China. *Sci. China Technol. Sci.*, 2021, vol. 64, pp. 1137-1152. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1704-1>
24. Kollegger J., Reichenbach S. Balanced lift method – building bridges without formwork. *Proceedings of Italian Concrete Days 2016*, ed. M. di Prisco, M. Menegotto. Springer, 2016. Pp. 200-215. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78936-1_15
25. Yu Xm., Chen Dw., Bai Zz. A new method for analysis of sliding cable structures in bridge engineering. *KSCE J. Civ. Eng.*, 2018, vol. 22, pp. 4483-4489. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0151-7>
26. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifricition layer made of different materials. *Vestnik PNIPU. Mekhanika – PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 4, pp. 15-26. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.02>
27. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Nosov Yu.O. Mathematical modeling of modern antifricition polymers behavior. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya – Applied Mathematics and Control Sciences*, 2019, no. 4, pp. 43-56.
28. Ono K. Structural materials: Metallurgy of bridges. *Metallurgical design and industry*, ed. B. Kaufman, C. Briant. Springer, 2018. Pp. 193-269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93755-7_4
29. Ipanov A.S., Adamov A.A., Patrakov I.M., Kopytov A.V., Kochnev N.V., Tsaplina V.I., RF Patent No. 180825, Byull. Izobret., 26 June 2018.
30. Kopytov A.V., Baltin D.R., Bukanova E.V., Lapin S.N., RF Patent No. 193680, Byull. Izobret., 11 November 2019.
31. Shaferman I.M., Gitman E.M., Shaferman A.I., Rogov A.B., Kopytov A.V., Bukanova E.V., RF Patent No. 194357, Byull. Izobret., 06 December 2019.
32. Shul'man S.A., Slutskaya M.N., RF Patent No. 167994, Byull. Izobret., 16 January 2017.
33. Bukanov V.V., Bukanova E.V., Patrakov I.M., RF Patent No. 181699, Byull. Izobret., 26 July 2018.
34. Khan A.K.M.T.A., Bhuiyan M.A.R., Ali S.B. Seismic responses of a bridge pier isolated by high damping rubber bearing: Effect of rheology modeling. *Int. J. Civ. Eng.*, 2019, vol. 17, pp. 1767-1783. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00454-x>
35. Zhang Y., Li J., Wang L., Wu H. Study on the seismic performance of different combinations of rubber bearings for continuous beam bridges. *Adv. Civ. Eng.*, 2020, vol. 2020, 8810874. <https://doi.org/10.1155/2020/8810874>
36. Mahboubi S., Shiravand M.R. Seismic evaluation of bridge bearings based on damage index. *Bull. Earthquake Eng.*, 2019, vol. 17, pp. 4269-4297. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00614-3>
37. Zhang Y., Li J. Effect of material characteristics of high damping rubber bearings on aseismic behaviors of a two-span simply supported beam bridge. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 2020, 9231382. <https://doi.org/10.1155/2020/9231382>

Поступила в редакцию 15.04.2021; после доработки 26.06.2021; принята к опубликованию 26.06.2021

Сведения об авторах

Адамов Анатолий Арсангалеевич, дфмн, проф., снс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; e-mail: adamov.aa@ua.ru

Каменских Анна Александровна, ктн, доц., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29а; e-mail: anna_kamenskikh@mail.ru

Струкова Вероника Ивановна, б/с, студент, ПНИПУ; e-mail: Velloiv_pstu@mail.ru