

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Каменских А.А., Крысина А.С., Панькова А.П. Анализ влияния характера обработки стальной поверхности сопряжения на контактное взаимодействие с защитной прослойкой // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 16–27. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.02

Please cite this article in English as:

Kamenskikh A.A., Krysin A.S., Pankova A.P. The influence analysis of steel mating surface machining on the contact interaction with the protective layer. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 4, pp. 16-27. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.02

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 25, № 4, 2023
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.02

УДК 539.374

А.А. Каменских, А.С. Крысина, А.П. Панькова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
СОПРЯЖЕНИЯ НА КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЗАЩИТНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ**

Детали механизмов подвергаются различным видам обработки в процессе их производства. Это приводит к созданию поверхностей с различными уровнями шероховатости. Как бы то ни было, уровень шероховатости влияет на долговечность и деформационные свойства контактного узла конструкции. Смазочные материалы и тонкие слои скольжения используются для уменьшения шероховатостей и продления срока службы. Изучение поведения полимерных материалов в различных условиях контактного взаимодействия, их долговечности в конструкции и того, как толщина защитного слоя скольжения влияет на напряженно-деформированное состояние при воздействии множества экстремальных внешних факторов, является важным. Интересен вопрос о влиянии характера обработки стальных поверхностей на контакт с полимерным защитным слоем. При этом возможен вариант моделирования характера сопряжения посредством настроек контактных конечных элементов без геометрического моделирования. В рамках работы рассмотрено деформирование защитного слоя из модифицированного γ -излучением фторопласта, нанесенного на стальную плиту. Моделирование включает два типа обработки стальной поверхности: «рваная резьба» и полированная поверхность. Так как часто исследователи рассматривают идеальный контакт, то для оценки работы узла с защитным слоем выполнено моделирование контакта в идеальных условиях. Установлено, что моделирование характера сопряжения посредством настроек контакта удовлетворяет физике процесса и может являться первым приближением при анализе разного характера сопряжения. Толщина слоя скольжения оказывает влияние на контакт и деформационное состояние прослойки. При фрикционном контакте (контакт с полированной поверхностью) наблюдается минимальное влияние толщины защитного слоя на поведение конструкции. При толщине прослойки 8 мм влияние характера сопряжения «полимер – сталь» на работу узла минимально.

Ключевые слова: модифицированный фторопласт, идеальный контакт, адгезия, фрикционный контакт, слой скольжения, контактное давление, контактное касательное напряжение, напряженно-деформированное состояние, полимерный материал, геометрические параметры слоя скольжения.

A.A. Kamenskih, A.S. Krygina, A.P. Pankova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation Perm, Russian Federation

THE INFLUENCE ANALYSIS OF STEEL MATING SURFACE MACHINING ON THE CONTACT INTERACTION WITH THE PROTECTIVE LAYER

Machine elements are subjected to various types of machining during their production. This results in surfaces with different roughness levels. The roughness level affects the durability and deformation properties of the contact structure. Lubricants and thin sliding layers are used to reduce roughness and extend service life. Studying the polymeric materials behavior under various contact conditions, their durability in the structure and how the sliding layer thickness affects the stress-strain state under a variety of extreme external factors is important. An interesting question is the influence of the steel surfaces machining nature on the contact with the polymer protective layer. It is possible to simulate the mating character by contact finite element settings without geometrical modeling. The paper considers the deformation of the protective layer from PTFE applied to a steel plate. The simulation includes two types of steel surface treatment: "torn thread" and polished surface. Since researchers often consider an ideal contact, a contact simulation was performed under ideal conditions to evaluate the assembly performance with a protective layer. Our results demonstrate that simulating the interface nature satisfies the process physics through contact settings. It can be a first approximation when analyzing the different interface nature. The sliding layer thickness influences the contact and its the stress-strain state. There is a minimal influence of the sliding layer thickness on the structure behavior in frictional contact (contact with a polished surface). The effect of the polymer – steel interface is minimal on the assembly operation at a layer thickness of 8 mm.

Keywords: PTFE, ideal contact, adhesion, frictional contact, sliding layer, contact pressure, contact shear stress, stress-strain state, polymer material, the sliding layer geometric parameters.

Введение

Исследование физико-механических свойств полимерных материалов и композитов на их основе является важной областью современной науки и техники. Полимерные материалы широко используются в различных отраслях промышленности, таких как автомобильная, аэрокосмическая, электротехническая и многих других [1–5], благодаря их уникальным свойствам. Они представляют собой комбинацию химических связей и физико-механических свойств, которые делают их идеальным выбором для создания сложных и многофункциональных изделий, например, таких как: защитно-упрочняющие покрытия [6–8]; в качестве антифрикционного слоя скольжения [9–12] в различных системах и конструкциях и т.д. Однако для того, чтобы использовать эти материалы в реальных условиях, необходимо иметь точное представление об их физико-механических свойствах, таких как прочность, устойчивость к износу, усталости, теплоустойчивость и др.

Одним из таких материалов, который широко применяется в промышленности, является фторопласт. Но при использовании чистого фторопласта отмечается ряд недостатков [13] его деформационного поведения в экстремальных условиях работы при большой разности температур. Поэтому чаще всего используются его различные модификации, как, например, радиационно-модифицированный фторопласт [14], углефторопласт, композиционные материалы [15] на основе фторопласта с различными бронзовыми включениями, полиэфирэфиркетона и т. д. [16]. У данных материалов отмечаются улучшенные физико-механические свойства, которые, в свою очередь, могут позволить увеличить сроки эксплуатации механизмов за счет

уменьшения фрикционного взаимодействия, деформационных характеристик.

При таком большом росте числа современных полимерных материалов отмечается недостаток информации об их нелинейном поведении в условиях контактного фрикционного взаимодействия. Многими учеными проводятся исследования материалов и их физико-механических характеристик, некоторые исследуют их поведение в различных условиях работы [17; 18], однако комплексного исследования деформационного поведения при учете многих параметров работы контактного узла не проводилось.

При изготовлении деталей механизмов их поверхности подвергаются различным видам обработок [19], в связи с чем получают поверхности с различным уровнем шероховатости [20–23]. Так или иначе, но уровень шероховатости оказывает влияние на долговечность и деформационное поведение контактного узла конструкции [24]. Для уменьшения влияния шероховатостей и увеличения срока службы используются тонкие слои скольжения, смазочные материалы [25–29]. Отмечается необходимость исследований поведения полимерных материалов в различных условиях контактного взаимодействия, их долговечности работы в конструкции, а также оценки влияния толщины защитного слоя скольжения на напряженно-деформированное состояние в целом и контактных параметров в частности при воздействии в комплексе различных экстремальных внешних факторов. При численном моделировании контактного взаимодействия поверхностей существует возможность описания характера обработки поверхностей [30] с помощью настроек контактных параметров, что позволяет проводить сравнительный анализ работы конструкции [31; 32].

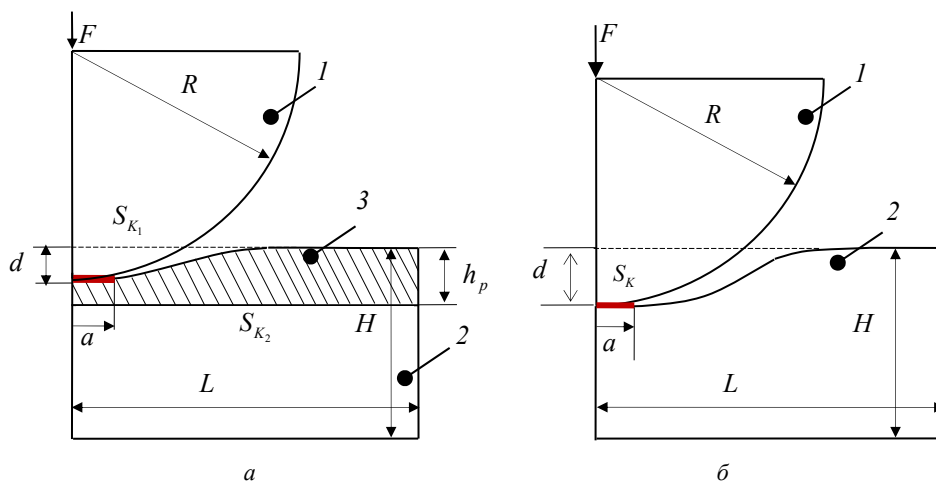


Рис. 1. Контакт полупространства со сферическим индентором: *а* – с учетом полимерного защитного слоя; *б* – полимерное полупространство

Настоящая работа направлена на проведение сравнительного анализа типа контактного взаимодействия между сопрягаемыми поверхностями на модели простой задачи о внедрении индентора в полупространство. Реализуется фрикционное контактное взаимодействие, в качестве коэффициента трения было выбрано справочное значение равное 0,04. Хотя в реальных конструкциях величина коэффициента трения в десятки раз меньше, однако он не подходит для решения данной задачи. Данный процесс связан с тем, что рассматривается не реальная конструкция, а модельная задача, в которой прикладываемая нагрузка меньше воспринимаемой реальной опорной части. Помимо вышеописанных параметров, проведено исследование влияния толщины полимерного покрытия на контактные параметры в частности и деформационное поведение материала в целом.

1. Постановка задачи

В данной работе рассмотрена задача о деформировании стального полупространства (2) с полимерной прослойкой (3) стальным сферическим индентором (1) при постоянной силе (рис. 1, *а*). Анализ качества численного решения задачи выполнен на классической задаче Герца об индентировании стального сферического индентора (1) в полимерное полупространство (2) с известным аналитическим решением (рис. 1, *б*). В качестве материала прослойки рассматривается модифицированный γ -излучением фторопласт. Он относится к антифрикционным полимерным материалам, которые используются в качестве относительно тонких антифрикционных покрытий в узлах трения [7]. Модуль свободного сжатия модифицированного фторопласта 863,8 МПа, коэффициент Пуассона 0,4610. Трение «сталь – полимер» моделируется

с учетом постоянного справочного значения, равного 0,04. Полупространство моделируется как конечный объем материала, действия отброшенных частей заменяются условиями симметрии. Основные характеристики расчетных схем: $R = 0,2$ м, $H = 0,044$ м, $L = 0,31$ м. На расчетные схемы действует постоянная сжимающая сила $F = 1000$ Н. Толщина защитного покрытия изменяется в пределах $h_p = 4 \div 12$ мм. Глубина индентирования d и радиус площадки контакта a определяются в рамках решения задачи и зависят от геометрии модели и свойств материала.

Математическая постановка задачи

Задача рассматривается в осесимметричной постановке в рамках механики контактного взаимодействия. Объем полимерного материала моделируется в упругопластической постановке для случая активного нагружения. Моделирование выполнено в прикладном пакете инженерного анализа ANSYS, настройка численного решения и параметризация моделей реализованы программным кодом на языке APDL.

В рамках классической задачи Герца проведен анализ влияния степени дискретизации системы на качество численного решения задачи. Сопряжение индентора и полимерного полупространства реализовано без трения между двумя поверхностями контакта (условные индексы 1 и 2), что соответствует проскальзыванию:

$$\bar{u}^1 \neq \bar{u}^2, \sigma_n^1 = \sigma_n^2, \sigma_{nt}^1 \neq \sigma_{nt}^2, \quad (1)$$

где \bar{u} – вектор перемещений, σ_n , σ_{nt} – нормальные и касательные напряжения, все параметры рассматриваются на границе контакта «сталь – полимер».

В задаче исследования влияния защитного покрытия на работу контактного узла рассматривается проскальзывание с трением на границе контакта S_{K_1} :

$$\vec{u}^1 \neq \vec{u}^2, \sigma_n^1 = \sigma_n^2, \sigma_{n\tau}^1 \neq \sigma_{n\tau}^2. \quad (2)$$

На границе контакта полупространства и прослойки S_{K_2} реализовано три характера сопряжения:

1. Идеальный контакт, созданный путем моделирования конечно-элементной сетки узел в узел, которая позволяет получить единые поля перемещений, напряжений и деформаций на границе тел сопряжения:

$$u_n^1 = u_n^2, u_\tau^1 = u_\tau^2, \sigma_n^1 = \sigma_n^2, \sigma_{n\tau}^1 = \sigma_{n\tau}^2, \quad (3)$$

где u_n, u_τ – нормальные и тангенсальные компоненты вектора \vec{u} .

2. Полная адгезия, которая соответствует обработке поверхности сопряжения типа рваная резьба:

$$u_n^1 = u_n^2, u_\tau^1 = u_\tau^2, \sigma_n^1 \neq \sigma_n^2, \sigma_{n\tau}^1 \neq \sigma_{n\tau}^2. \quad (4)$$

3. Фрикционный контакт, который включает в себя разные статусы с заранее неизвестным характером их распределения по поверхности: полное прилипание, проскальзывание и отлипание. Математическая постановка фрикционного контакта ранее была описана в [14]. Фрикционный контакт соответствует полированной поверхности стали в зоне сопряжения.

Исследование направлено на анализ влияния характера сопряжения S_{K_2} «покрытие – полупространство» на напряженно-деформированное состояние (НДС) контактного узла в целом и параметры зон сопряжения на двух поверхностях $S_{K_1} - S_{K_2}$ в частности.

2. Анализ качества численного решения задачи

Расчетная схема (см. рис. 1, б) обладает известным аналитическим решением. Конечно-элементная сетка реализована со сгущением размера элемента к области контакта «индентор – полупространство». На рис. 2 представлена зависимость среднеарифметической и максимальной погрешности численного решения от числа узловых неизвестных.

В целом численное решение при увеличении степени дискретизации системы сходится. Максимальная погрешность наблюдается вблизи края зоны контакта, что связано с канонической формой распределения контактного давления P_K в аналитическом решении. При этом на основной площади области контакта погрешность меньше на порядки. Максимальное число узловых неизвестных, рассмотренное в исследовании, составляет 65,68 тыс. Дальнейшее сгущение сетки нецелесообразно в связи с увеличением загрузки вычислительных ресурсов. Сравним характер распределение контактного давления на сетках с 37,32 и 65,68 тысячами узловых неизвестных (рис. 3), обладающими среднеарифметической погрешностью ~ 1,4 и 0,65 % соответственно.

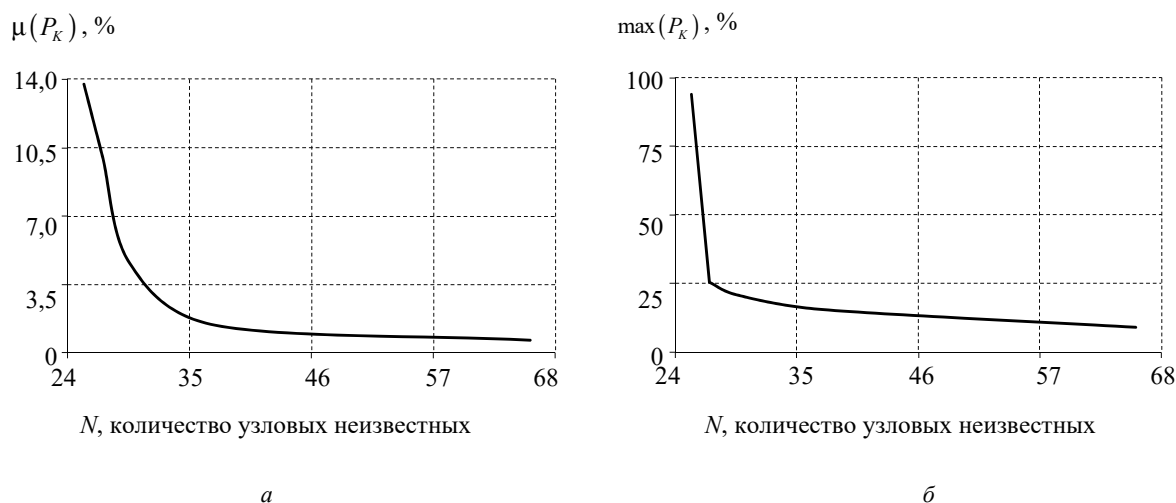


Рис. 2. Погрешность численного решения: а – среднеарифметическая по основной площади контакта; б – максимальная

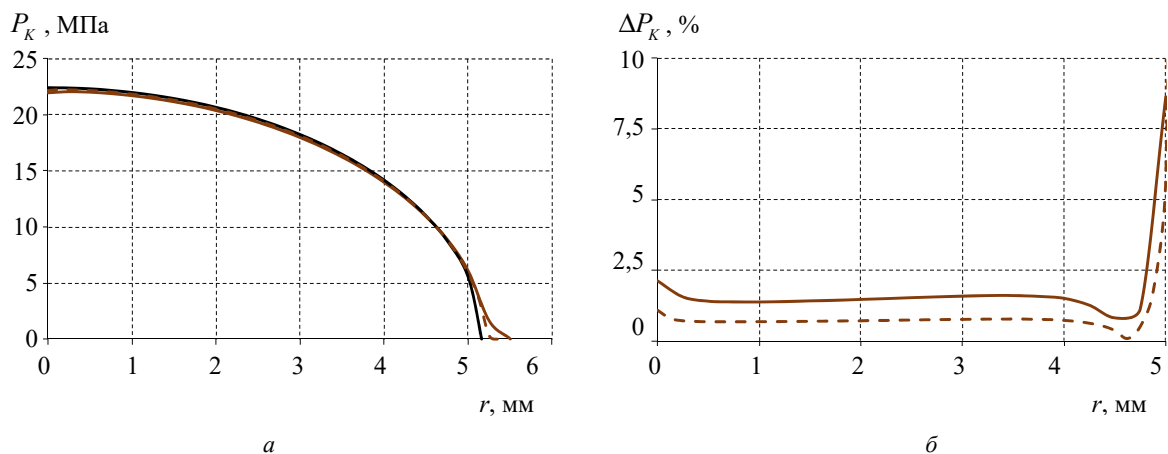


Рис. 3. Влияние степени дискретизации системы на численное решение: *a* – характер распределения; *б* – погрешность численного решения

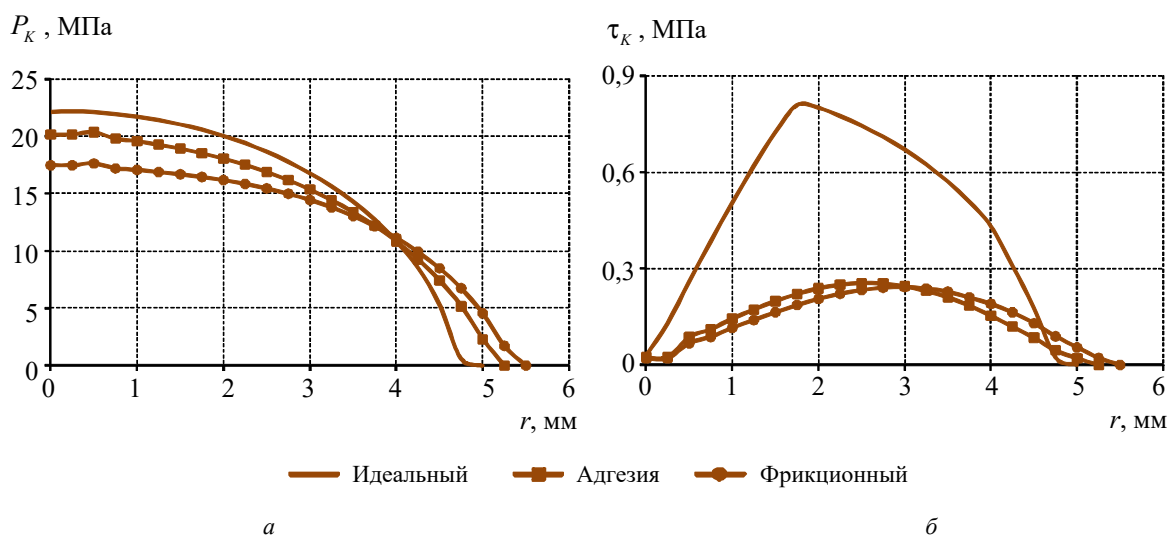


Рис. 4. Параметры контакта S_{k_1} при разном характере сопряжения S_{k_2} : *a* – контактное давление; *б* – контактное касательное напряжение

Как и ожидалось, основные отличия между численными решениями и аналитикой наблюдаются вблизи края области контакта. Можно отметить, что погрешность численного решения от аналитического на основной области контакта на порядок меньше и не превышает 2,5 %. При выборе конечно-элементной сетки руководствоваться только погрешностью нельзя, требуется учет загрузки вычислительной техники и время счета программ.

Проанализировав все аспекты и варианты развития исследований, выбрана сетка с 16 элементами на 4 мм толщины полимерного слоя вблизи области контакта «индентор – полупространство», соответствующее 37,32 тыс. узловых неизвестных.

3. Анализ влияния характера сопряжения полимерного защитного слоя со стальной плитой при разной толщине покрытия

Исследование выполнено в несколько этапов. На первом этапе при толщине защитного покрытия 4 мм рассмотрено влияние характера сопряжения на параметры напряженно-деформированного состояния и контакта. На втором этапе проанализировано влияние толщины покрытия на работу контактного узла.

Рассмотрено влияние сопряжения «покрытие – сталь» S_{k_2} на параметры контакта «индентор – покрытие» S_{k_1} (рис. 4) при толщине покрытия 4 мм.

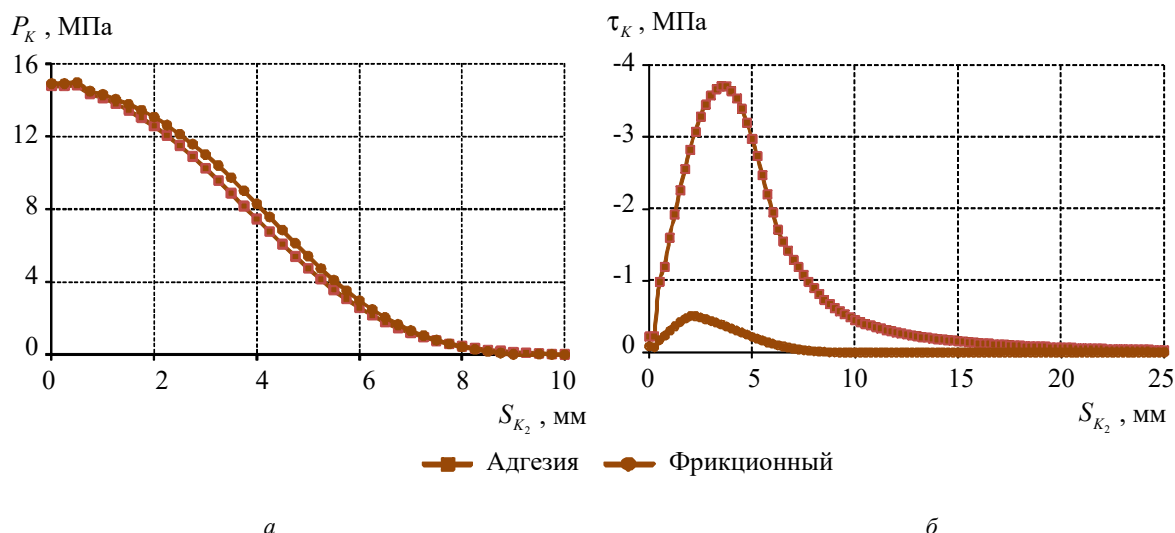


Рис. 5. Параметры контакта S_{K_2} при разном характере сопряжения S_{K_2} : a – контактное давление; b – контактное касательное напряжение

Установлено увеличение площади контактно-взаимодействия в зоне сопряжения «индентор – прослойка» при неидеальном контакте на S_{K_2} (на 5 и 10 % при полной адгезии и фрикционном контакте соответственно). Максимальные уровни контактных параметров S_{K_1} наблюдаются при идеальном контакте на S_{K_2} , что связано с совместным деформированием полимерного слоя и стальной поверхности. Моделирование полной адгезии в зоне сопряжения покрытия и стальной поверхности позволяет описать шероховатость по типу «рваная резьба». Такой механизм соответствует полному прилипанию поверхностей сопряжения посредством создания единого поля перемещений на границе контакта, при этом поле напряжений в покрытии и стали остается различным. Принцип моделирования полного прилипания поверхностей контакта позволяет снизить максимальный уровень контактного давления на S_{K_1} ~ на 2 МПа, а контактного касательного напряжения ~ в 3 раза. Фрикционный контакт позволяет моделировать сопряжение с полированной стальной плитой. При таком типе сопряжения S_{K_2} максимальный уровень контактного давления по сравнению с идеальным контактом снижается ~ на 5 МПа, а уровень контактного касательного напряжения, так же, как и при адгезии, снижается ~ в 3 раза. При этом на S_{K_2} вблизи области первоначального контакта с индентором $r = 0$ наблюдается зона проскальзывания, а при удалении наблюдаются небольшие зоны отлипания прослойки от стальной поверхности (характер расхождения поверхностей

микронный), что оказывает влияние на распределение и уровни контактных параметров S_{K_1} .

Рассмотрим влияние типа контакта S_{K_2} на распределение контактных характеристик вблизи точки первоначального сопряжения «индентор – прослойка» (рис. 5), толщина прослойки 4 мм.

Характер сопряжения «прослойка – полупространство» оказывает максимальное влияние на зону вблизи координаты $r = 0$ (точка первоначального сопряжения индентора и прослойки). При удалении от начала координат по оси r контактное давление и контактное касательное напряжение на S_{K_2} близко к 0. Наибольшее влияние характер сопряжения S_{K_2} оказывает на контактное касательное напряжение, как и следовало ожидать.

Рассмотрим влияние характера сопряжения S_{K_2} на параметры НДС системы «индентор – прослойка – полупространство» (рис. 6, 7).

Характер локализации максимумов и распределение σ_{II} зависит от условий контакта S_{K_2} . Максимальная интенсивность напряжений в модели с идеальным контактом наблюдается на поверхности сопряжения «прослойка – полупространство», что связано с разным деформированием полимера и стали при необходимости получения единого поля напряжений в системе. Максимальный уровень интенсивности напряжений в полимерном покрытии ~ 10,9 МПа. При учете в модели контакта типа полная адгезия $\max \sigma_{II}$ наблюдается в инденторе, в полимерном покрытии $\max \sigma_{II} \approx 11$ МПа. При идеальном контакте и полной адгезии характер распределения σ_{II} в полимерном покрытии имеет малые

отличия: при адгезии площадь $\max \sigma_{II}$ в прослойке больше, чем при идеальном контакте. При фрикционном контакте на S_{K_2} материал прослойки может проскальзывать относительно стали и не привязан к полям перемещений, напряжений и деформаций

в стальном полупространстве, что приводит к значительному изменению характера распределения σ_{II} в объеме полимерного материала. Максимальный уровень интенсивности напряжений наблюдается в прослойке вблизи S_{K_2} и достигает 13,1 МПа.

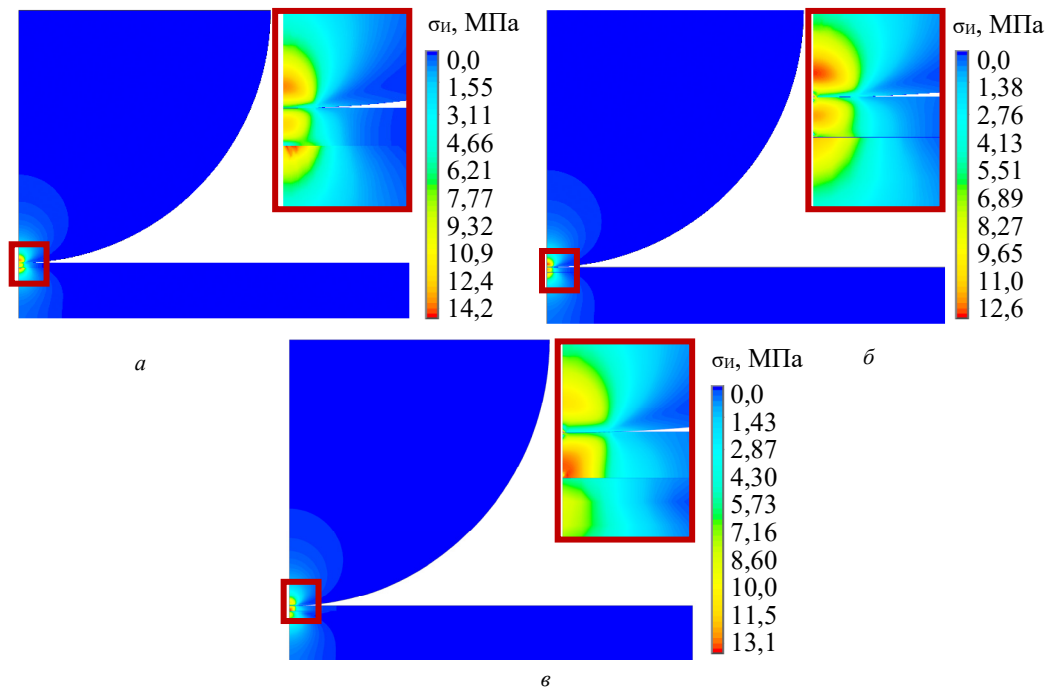


Рис. 6. Интенсивность напряжений при разном характере сопряжения S_{K_2} : а – идеальный контакт; б – полная адгезия; в – фрикционный контакт

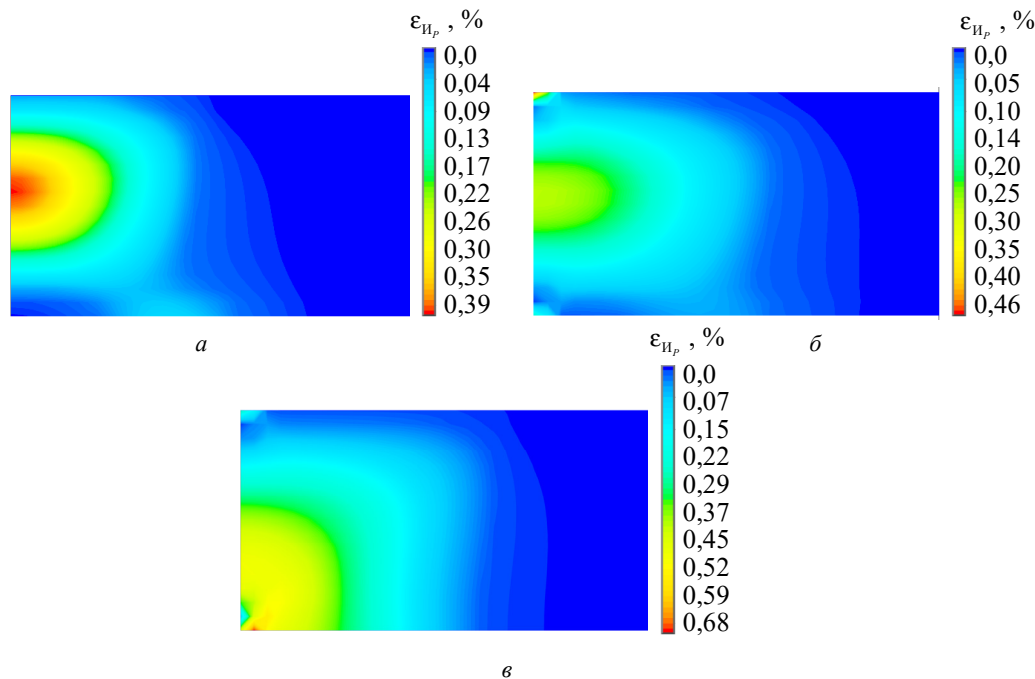


Рис. 7. ϵ_{IIp} при разном характере сопряжения S_{K_2} : а – идеальный контакт; б – полная адгезия; в – фрикционный контакт

Пластические деформации могут наблюдаться только в объеме материала прослойки, что связано с математической постановкой задачи. При достаточном удалении от координаты $r = 0$ уровень пластических деформаций прослойки нулевой. Пластические деформации наблюдаются вблизи координаты $r = 0$ (рис. 7).

Характер сопряжения S_{K_2} оказывает значительное влияние на распределение интенсивности пластических деформаций. При идеальном контакте материал слоя скольжения зажат между полупространством и индентором достаточно жестко, что приводит к образованию в центре прослойки пятна максимальных пластических деформаций $\max \epsilon_{и_p} = 0,39\%$. Уровень пластических деформаций вблизи индентора незначительный $\sim 0,09\%$, что более чем в 4 раза меньше максимального

уровня пластических деформаций. В модели с адгезией на S_{K_2} максимальный уровень интенсивности пластических деформаций смещается в область вблизи индентора и достигает $0,46\%$, что \sim в 5 раз больше, чем при идеальном контакте. При этом в центре полимерного слоя уровень пластических деформаций снизился приблизительно в 2 раза и достиг $0,2\%$. При фрикционном контакте на поверхности сопряжения S_{K_2} наблюдается зона пластического течения материала с максимальным уровнем интенсивности пластических деформаций $0,68\%$.

Рассмотрим влияние толщины полимерного защитного слоя на параметры контакта и НДС узла (рис. 8, 9). Наибольший интерес представляет анализ влияния толщины покрытия на параметры зоны сопряжения «индентор – прослойка» (см. рис. 8).

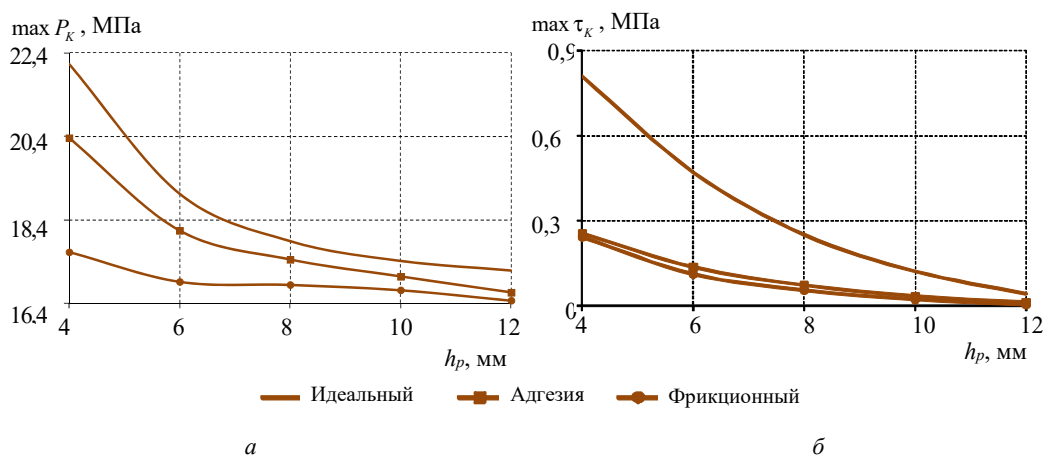


Рис. 8. Зависимость параметров контакта S_{K_1} от h_p при разном сопряжении S_{K_2} :
 а – контактное давление; б – контактное касательное напряжение

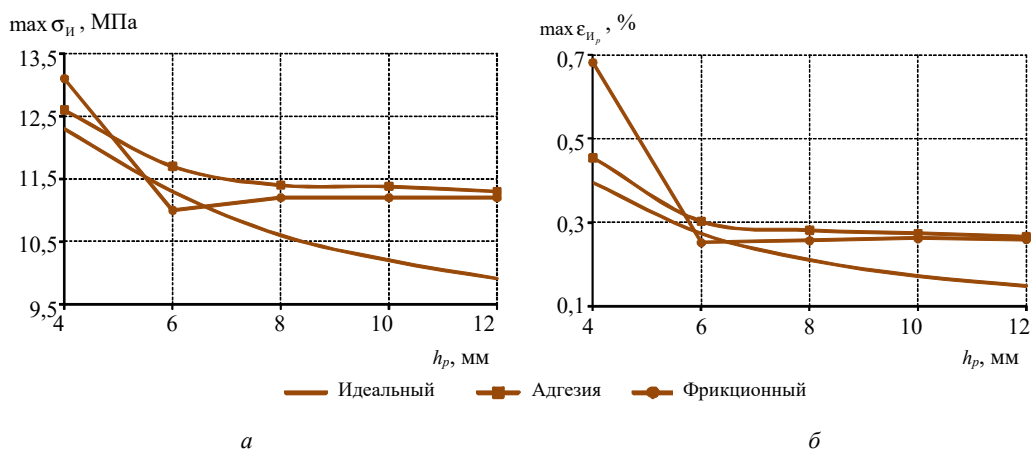


Рис. 9. Зависимость параметров НДС от h_p при разном сопряжении S_{K_2} : а – интенсивность напряжений;
 б – интенсивность пластических деформаций

Влияние толщины слоя скольжения на параметры контакта и НДС узла

Тип контакта на S_{K_2}	Толщина полимерного слоя, мм			
	6	8	10	12
Изменение максимального уровня контактного давления на S_{K_1} , %				
Идеальный	14,04	19,18	21,32	22,36
Адгезия	10,90	14,31	16,30	18,18
Фрикционный	4,03	4,45	5,17	6,57
Изменение максимального уровня контактного касательного напряжения на S_{K_1} , %				
Идеальный	41,69	69,02	85,06	94,79
Адгезия	46,48	71,70	86,84	95,39
Фрикционный	54,03	77,38	90,98	98,23
Изменение максимального уровня интенсивности напряжений, %				
Идеальный	8,13	13,82	17,07	19,43
Адгезия	7,14	9,52	9,68	10,32
Фрикционный	16,03	14,50	14,50	14,50
Изменение максимального уровня интенсивности пластических деформаций, %				
Идеальный	30,94	46,77	56,59	62,61
Адгезия	33,40	38,04	39,68	41,44
Фрикционный	63,08	62,39	61,65	61,94

При увеличении толщины прослойки при всех рассмотренных характерах сопряжения S_{K_2} наблюдается снижение параметров контакта и НДС. При этом площадь пятна контакта на S_{K_1} увеличивается. При фрикционном контакте пятно сопряжения не изменяется при прослойках более 6 мм. Характер изменения максимального уровня контактных и деформационных характеристик узла трения при увеличении толщины защитного слоя при идеальном контакте и адгезии в зоне сопряжения «прослойка – полупространство» имеет малые отличия. Для фрикционного контакта характерно значительное снижение уровня деформационных характеристик при увеличении толщины прослойки с 4 до 6 мм, при дальнейшем увеличении толщины слоя скольжения $\max \sigma_{II}$ и $\max \epsilon_{IIp}$ изменяются не значительно.

Рассмотрим влияния толщины слоя скольжения на параметры, характеризующие состояние, контактного узла по формуле:

$$\Delta X = \left(X|_{h_p=4} - X|_{h_p>4} \right) / X|_{h_p=4} \cdot 100, \% \quad (5)$$

где $X|_{h_p>4}$ – значение параметра при толщине прослойки равном 4 мм; $X|_{h_p=4}$ – значение параметра при толщине прослойки более 4 мм; X – параметры (максимальный уровень контактного давления, контактного касательного напряжения, интенсивности напряжений и интенсивности пластических деформаций). Данные, полученные по формуле (5), представлены в таблице.

Толщина прослойки оказывает максимальное влияние на контактное касательное напряжение

вне зависимости от характера сопряжения S_{K_2} .

При описании характера сопряжения поверхностей как фрикционный контакт, толщина слоя скольжения оказывает минимальное влияние на все остальные рассмотренные параметры. Различие значений составляет ~ 1 – 2,5 %, и если для контактного давления это значение показывает увеличение характеристик, то для деформационных параметров можно отметить обратную зависимость. У остальных типов контакта для данных параметров отмечается, что средняя величина изменений в зависимости от увеличения толщины антифрикционного слоя скольжения лежит в районе от ~ 5 до ~ 16 %. Также можно заметить, что при толщине слоя скольжения больше 8 мм различие между значениями параметров, полученных для разных моделей, становятся незначительными.

Заключение

Для оценки возможности моделирования разного характера сопряжения элементов настройками контакта созданы параметризованные модели: «индентор – полупространство», в том числе с учетом защитной прослойки. Выполнена верификация результатов на тестовой задаче, подобраны параметры дискретизации системы. Рассмотрено два типа обработки стальной поверхности: «рваная резба», полированная. Для сравнения смоделировано сопряжение «сталь – полимер» в условиях идеального контакта.

Реализована серия численных экспериментов по анализу влияния характера сопряжения защитной полимерной прослойки с полупространством при увеличении ее толщины.

Установлено, что:

- при увеличении толщины прослойки наблюдается снижение уровня контактного давления и контактного касательного напряжения, увеличивается радиус площадки контакта;
- снижение максимального уровня контактного давления и контактного касательного напряжения при учете в модели полной адгезии и фрикционного контакта на границе сопряжения «индентор – полупространство»;
- максимальная интенсивность напряжений и пластических деформаций при идеальном контакте при увеличении толщины прослойки снижается;
- максимальная интенсивность напряжений и пластических деформаций при полной адгезии и фрикционном контакте у большинства материалов слоя скольжения снижается при увеличении толщины прослойки с 4 до 8 мм, при дальнейшем увеличении изменения незначительные.

Библиографический список

1. Tribology and biophysics of artificial joints / L.S. Pnchuk, V.I. Nikolaev, E.A. Tsvetkova, V.A. Goldade. – Elsevier, 2006. – 350 p.
2. Argatov I. A general solution of the axisymmetric contact problem for biphasic cartilage layers // *Mechanics Research Communications*. – 2011. – № 38. – P. 29–33.
3. Тукашев Ж.Б., Адилханова Л.А. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия // *Геология, география и глобальная энергия*. – 2010. – № 2. – С. 163–166.
4. Becker T.C., Mahin S.A. Correct treatment of rotation of sliding surfaces in a kinematic model of the triple friction pendulum bearing // *Earthquake Eng Struct Dynam*. – 2013. – Vol. 42, № 2. – P. 311–317.
5. Фомин Д.В. Опорная часть моста и её материал // *Научный журнал инженерные системы и сооружения*. – 2014. – № 2 (15). – С. 80–90.
6. Исследование влияния отрицательных температур на оптические потери волоконного световода в защитно-упрочняющем покрытии на основе полиамидокислоты / М.И. Булатов, И.С. Азанова, А.Ф. Косолапов, А.Н. Смирнова, И.Д. Саранова // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. – 2019. – Т. 46, № 9. – С. 9–13.
7. Полимерные защитные покрытия от биокоррозии / В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев, В.А. Бойчук, О.В. Стоянов, А.М. Мухаметова // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17, № 18. – С. 149–154.
8. Ватульян А.О., Нестеров С.А., Юров В.О. Решение задачи градиентной термоупругости для цилиндра с термозащитным покрытием // *Вычислительная механика сплошных сред* – 2021. – Т. 3, № 14. – С. 253–263. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.3.21
9. Friction and wear behaviours of hard-coated/uncoated bearing steels under nano-additive oil lubrication / M.H. Sulaiman, N.H. Nordin, N.A. Sukindar, A.N. Dahnal, S. Kamaruddin // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2022. – P. 65–68.
10. Condition assessment of railway bridge sliding bearing using alternating vehicle longitudinal excitation / N. Han, H. Zhang, W. Zhao [et al.] // *KSCE J Civ Eng* – 2022 – № 26, – P. 4737–4745. DOI: 10.1007/s12205-022-0318-8
11. Explicit finite element analysis and experimental verification of a sliding lead rubber bearing / Yi. Wu, H. Wang, Ai. Li, D. Feng, B. Sha, Yu. Zhang // *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. – 2017. – Vol. 18, № 5. – P. 363–376.
12. Rakowski W.A., Zimowski S. Polyesterimide composites as a sensor material for sliding bearings // *Composites: Part B engineering*. – 2006. – Vol. 37. – P. 81–88.
13. Dhanumalayan E., Joshi G.M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review // *Advanced composites and hybrid materials*. – 2018. – Vol. 1. – P. 247–268.
14. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Regularities interaction of elements contact spherical unit with the antifrictional polymeric interlayer // *Journal of Friction and Wear*. – 2015. – Vol. 36, № 2. – P. 170–176.
15. Yi X., Du S., Zhang L. Composite materials engineering, volume 1: fundamentals of composite materials. – Singapore: Springer, 2018. – 765 p.
16. Effect of irradiation on interfacial interaction and structure formation in filled PTFE composites / N.V. Sadvovskaya, A.Y. Obvintsev, R.S. Khatipov [et al.] // *J. Surf. Investig.* – 2016. – № 10, – P. 917–924. DOI: 10.1134/S1027451016050128
17. Erratum to: evaluation of rheological and thermal properties of a new fluorocarbon surfactant–polymer system for EOR applications in high-temperature and high-salinity oil reservoirs / Muhammad Shahzad Kamal, Abdullah Saad Sultan, Usamah A. Al-Mubaiyedh, Ibnelwaleed A. Hussein, Pabon M. // *J. Surfact Deterg.* – 2014. – № 17. – P. 985–993.
18. Seismic performance of bridges with novel SMA cable-restrained high damping rubber bearings against near-fault ground motions / F. Cheng, L. Dong, Y. Zheng, L. Shiyuan // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. – 2021. – № 51. – P. 44–65. DOI: 10.1002/eqe.3555
19. Макаров В.Ф., Муратов К.Р. Анализ оборудования для финишной абразивной обработки плоских поверхностей // *Машиностроение, материаловедение*. – 2017. – Т. 19, № 1. – С. 170–187. DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.11
20. Анিকেев А.Н., Абляз Т.Р. Влияние напряжения и скорости смотки электрода-проволоки на формирование шероховатости обработанной поверхности при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке // *Машиностроение, материаловедение*. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 175–188. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.12
21. Study on roughness parameters screening and characterizing surface contact performance based on sensitivity analysis / Y. Duo, T. Jinyuan, Z. Wei, W. Yuqin // *ASME. J. Tribol.* – 2022. – № 144(4). DOI: 10.1115/1.4051733
22. Investigation on size effect of surface roughness and establishment of prediction model in micro-forming process / G. Wang, J. Han, Y. Lin, W. Zheng // *Materials Today Communications*. – 2021. – Vol. 27. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102279.

23. Influence of metal forming parameters on surface roughness and establishment of surface roughness prediction model / J. Han, J. Zhu, W. Zheng, G. Wang // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 163. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105093.

24. Nikitin O.F. Sherokhovatost' poverkhnosti i germetichnost' kontaknykh uplotnitel'nykh ustroystv [Surface roughness and tightness of contact sealing devices]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*, 2013, no. 5, pp. 101–106.

25. Zhang J., Meng Y. Boundary lubrication by adsorption film. *Friction*, 2015, no. 3, pp. 115–147. DOI: 10.1007/s40544-015-0084-4

26. Experimental and analytical investigations on tribological properties of PTFE / H. Wang, A. Sun, X. Qi, Y. Dong, B. Fan // *AP Composites. Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – № 24. – P. 4295. DOI: 10.3390/polym13244295

27. Козицына М.В., Труфанова Н.М., Рябкова Н.А. Численно-экспериментальное определение реологических характеристик полимеров // *Машиностроение, материаловедение*. – 2017. – Т. 19, № 1. – С. 155–167. DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.10

28. A review on tribology of polymer composite coatings / Y. Ren, L. Zhang, G. Xie [et al.] // *Friction*. – 2021. – № 9. – P. 429–470. DOI: 10.1007/s40544-020-0446-4

29. Liang H., Zhang Y., Wang W. Influence of the cage on the migration and distribution of lubricating oil inside a ball bearing. // *Friction*. – 2022. – № 10. – P. 1035–1045. DOI: 10.1007/s40544-021-0510-8

30. Сакало В.И., Ольшевский А.А. Использование конечно-элементных моделей для решения контактных задач с учетом шероховатости поверхностей тел // *Транспортное машиностроение*. – 2018. – № 11 (72). – С. 45–56.

31. Study on temperature rise distribution of contact surface under cyclic load / L. Li, H. Tian, Q. Yun, W. Chu // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. – 2021. – № 235(1) – P. 138–148. DOI: 10.1177/1350650120919877

32. Мурашов М.В., Панин С.Д. Особенности численного решения задачи контактного деформирования шероховатых тел в ANSYS // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. – 2016. – № 1. – С. 129–142. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-1-129-142

References

1. Pnchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V.A. Tribology and biophysics of artificial joints. *Elsevier*, 2006, 350 p.

2. Argatov I. A general solution of the axisymmetric contact problem for biphasic cartilage layers. *Mechanics Research Communications*, 2011, no. 38, pp. 29–33.

3. Tukashev Zh.B., Adilkhanova L.A. Issledovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia dorozhnogo pokrytiia [Investigation of stress-strain state of road pavement]. *Geologiya, geografiia i global'naia energeia*, 2010, no. 2, pp. 163–166.

4. Becker T.C., Mahin S.A. Correct treatment of rotation of sliding surfaces in a kinematic model of the triple friction pendulum bearing. *Earthquake Eng Struct Dynam*, 2013, vol. 42, no. 2, pp. 311–317.

5. Fomin D.V. Opornaia chast' mosta i ee material. *Nauchnyi zhurnal inzhenernye sistemy i sooruzheniia*, 2014, no. 2 (15), pp. 80–90.

6. Bulatov M.I., Azanova I.S., Kosolapov A.F., Smirnova A.N., Saranova I.D. Issledovanie vliianiia otritsatel'nykh temperatur na opticheskie poteri volokonogo svetovoda v zashchitno-uprochniaushchem pokrytii na osnove poliamidokislota [Investigation of the influence of negative temperatures on the optical losses of fiber light-guide in the protective-strengthening coating based on polyamidoacid acidlota]. *Kratkie soobshcheniia po fizike FIAN*, 2019, vol. 46, no. 9, pp. 9–13.

7. Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Boichuk V.A., Stoianov O.V., Mukhametova A.M. Polimernye zashchitnye pokrytiia ot biokorrozii [Polymer protective coatings against biocorrosion]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 18, pp. 149–154.

8. Vatul'ian A.O., Nesterov S.A., Iurov V.O. Reshenie zadachi gradientnoi termouprugosti dlia tsilindra s termozashchitnym pokrytiem [Solution of the gradient thermoelasticity problem for cilindr with thermo-protective coating]. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2021, vol. 3, no. 14, pp. 253–263. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.3.21

9. Sulaiman M.H., Nordin N.H., Sukindar N.A., Dahnel A.N., Kamaruddin S. Friction and wear behaviours of hard-coated/uncoated bearing steels under nano-additive oil lubrication. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2022, pp. 65–68.

10. Han N., Zhang H., Zhao W. et al. Condition assessment of railway bridge sliding bearing using alternating vehicle longitudinal excitation. *KSCE Journal Civ. Eng.*, 2022, no. 26, pp. 4737–4745. DOI: 10.1007/s12205-022-0318-8

11. Wu Yi., Wang H., Li Ai., Feng D., Sha B., Zhang Yu. Explicit finite element analysis and experimental verification of a sliding lead rubber bearing. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A.*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 363–376.

12. Rakowski W.A., Zimowski S. Polyesterimide composites as a sensor material for sliding bearings. *Composites: Part B engineering*, 2006, vol. 37, pp. 81–88.

13. Dhanumalayan E., Joshi G.M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review. *Advanced composites and hybrid materials*, 2018, vol. 1, pp. 247–268.

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

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

16. Sadovskaya N.V., Obvintsev A.Y., Khatipov R.S. et al. Effect of irradiation on interfacial interaction and structure formation in filled PTFE composites. *Journal Surf. Investig.*, 2016, no. 10, pp. 917–924. DOI: 10.1134/S1027451016050128

17. Muhammad Shahzad Kamal, Abdullah Saad Sultan, Usamah A. Al-Mubaiyedh, Ibelwaleed A. Hussein, Pabon M. Erratum to: evaluation of rheological and thermal properties of a new fluorocarbon surfactant–polymer system for EOR applications in high-temperature and high-salinity oil reservoirs. *Journal Surfact Deterg.*, 2014, no. 17, pp. 985–993.

18. Cheng F., Dong L., Zheng Y., Shiyuan L. Seismic performance of bridges with novel SMA cable-restrained

high damping rubber bearings against near-fault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2021, no. 51, pp. 44–65. DOI: 10.1002/eqe.3555

19. Makarov V.F., Muratov K.R. Analiz oborudovaniia dlia finishnoi abrazivnoi obrabotki ploskikh poverkhnostei [Analysis of equipment for finishing blasting of flat surfaces]. *Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 170–187. DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.11

20. Anikeev A.N., Abliaz T.R. Vliianie napriazheniia i skorosti smotki elektroda-provoloki na formirovanie sherohovatosi obrabotanoi poverkhnosti pri provolochno-vyreznoi elektroerozionnoi obrabotke [Influence of voltage and speed of the electrode-wire winding on the formation of roughness of the machined surface during wire-cut electrical discharge machining]. *Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 175–188. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.12

21. Duo Y., Jinyuan T., Wei Z., Yuqin W. Study on roughness parameters screening and characterizing surface contact performance based on sensitivity analysis. *ASME. Journal Tribol.*, 2022, no. 144(4). DOI: 10.1115/1.4051733

22. Wang G., Han J., Lin Y., Zheng W. Investigation on size effect of surface roughness and establishment of prediction model in microforming process. *Materials Today Communications*, 2021, vol. 27. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102279.

23. Han J., Zhu J., Zheng W., Wang G. Influence of metal forming parameters on surface roughness and establishment of surface roughness prediction model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, vol. 163. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105093.

24. Nikitin O.F. Sherokhovatos' poverkhnosti i gemitichnost' kontaktnykh uplotnitel'nykh ustroystv [Surface roughness and tightness of contact sealing devices]. *Mashinostroenie i komp'iuternye tekhnologii*, 2013, no. 5, pp. 101–106.

25. Zhang J., Meng Y. Boundary lubrication by adsorption film. *Friction*, 2015, no. 3, pp. 115–147. DOI: 10.1007/s40544-015-0084-4

26. Wang H., Sun A., Qi X., Dong Y., Fan B. Experimental and analytical investigations on tribological properties of PTFE. *AP Composites. Polymers*, 2021, vol. 13, no. 24, p. 4295. DOI: 10.3390/polym13244295

27. Kozitsyna M.V., Trufanova N.M., Riabkova N.A. Chislenno-eksperimental'noe opredelenie reologi-cheskikh kharakteristik polimerov [Numerical-experimental determination of rheological characteristics of polymers]. *Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 155–167. DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.10

28. Ren Y., Zhang L., Xie G. [et al.] A review on tribology of polymer composite coatings. *Friction*, 2021, no. 9, pp. 429–470. DOI: 10.1007/s40544-020-0446-4

29. Liang H., Zhang Y., Wang W. Influence of the cage on the migration and distribution of lubricating oil inside a ball bearing. *Friction*, 2022, no. 10, pp. 1035–1045. DOI: 10.1007/s40544-021-0510-8

30. Sakalo V.I., Ol'shevskii A.A. Ispol'zovanie konechno-elementnykh modelei dlia resheniia kontaktnykh zadach s uchetom sherokhovatosi poverkhnostei tel [Use of finite element models for solving contact problems taking into account roughness of body surfaces]. *Transportnoe mashinostroenie*, 2018, no. 11 (72), pp. 45–56.

31. Li L., Tian H., Yun Q., Chu W. Study on temperature rise distribution of contact surface under cyclic load. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 2021, no. 235(1), pp. 138–148. DOI: 10.1177/1350650120919877

32. Murashov M.V., Panin S.D. Osobennosti chislenno-go resheniia zadachi kontaktnogo deformirovaniia sherokhovatykh tel v ANSYS [Peculiarities of numerical solution of the problem of contact deformation of rough bodies in ANSYS]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie*, 2016, no. 1, pp. 129–142. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-1-129-142

Поступила: 09.06.2023

Одобрена: 04.09.2023

Принята к публикации: 27.10.2023

Об авторах

Каменских Анна Александровна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» ФГАОУ ВО ПНИПУ (Российская Федерация, 614013, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: anna_kamenskih@mail.ru).

Крысинина Анастасия Сергеевна (Пермь, Российская Федерация) – студент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» ФГАОУ ВО ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nastia.krysinina@mail.ru).

Панькова Анастасия Петровна (Пермь, Российская Федерация) – младший научный сотрудник, аспирант кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» ФГАОУ ВО ПНИПУ (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: anastasia_pankova@mail.ru).

About the authors

Anna A. Kamenskih (Perm, Russian Federation) – candidate of technical science, docent of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics PNRPU (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: anna_kamenskih@mail.ru).

Anastasia S. Krysinina (Perm, Russian Federation) – student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics PNRPU (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: nastia.krysinina@mail.ru).

Anastasia P. Pankova (Perm, Russian Federation) – junior researcher, postgraduate student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics PNRPU (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: anastasia_pankova@mail.ru).

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.