

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.098.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ  
МЕХАНИКИ ИМЕНИ А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ  
ЦУКАНОВА ИВАНА ЮРЬЕВИЧА  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело N \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета  
от 28 марта 2024 года, протокол № 1

О присуждении Цуканову Ивану Юрьевичу,  
гражданину Российской Федерации ученой  
степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Контактные задачи для упругих тел с регулярным рельефом поверхностей» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела принята к защите 14 декабря 2023 года, протокол № 7 диссертационным советом 24.1.098.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1, приказ о создании диссертационного совета № 225/нк от 14.02.2023)

Соискатель Цуканов Иван Юрьевич, 17 декабря 1987 года рождения, в 2010 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» по специальности «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств». В 2013 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный индустриальный университет», работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) в лаборатории трибологии в должности старшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в лаборатории трибологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

**Научный консультант** – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН Горячева Ирина Георгиевна. Работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук в должности главного научного сотрудника.

**Официальные оппоненты:**

**Пожарский Дмитрий Александрович**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» (ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет»), **отсутствует по уважительной причине;**

**Соляев Юрий Олегович**, д.ф.-м.н., с.н.с., в.н.с. (избран по конкурсу) лаборатории неклассических моделей композитных материалов и конструкций (ФГБУН «Институт прикладной механики РАН»);

**Галыбин Александр Николаевич**, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. лаборатории геомеханики (ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН»);

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук. В своем положительном заключении, подписанном руководителем лаборатории математических методов механики материалов Института проблем машиноведения РАН, д.ф.-м.н., Фрейдиным А.Б., указала, что диссертационная работа Цуканова И.Ю. представляет собой актуальное научное исследование, важное как с точки зрения фундаментальной науки, так и инженерных приложений. В настоящее время одним из способов обеспечения требуемых контактных и фрикционных характеристик неподвижных и подвижных сопряжений является управление геометрическими параметрами рельефа поверхностей контактирующих тел. Жесткость, контактная прочность, сцепные свойства, тепло- и электропроводность контактов существенно зависят от размера и конфигурации областей контакта и распределения контактных давлений, которые, в свою очередь, существенно зависят от вида, формы и размеров неровностей рельефа. В связи с развитием аддитивных технологий и прецизионных методов обработки поверхностей существуют возможности получения регулярных текстур с заданной формой и размерами выступов/впадин, что позволяет управлять контактными характеристиками в зависимости от геометрии сопряжения, физико-механических свойств материалов и условий нагружения.

Соискатель имеет 28 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 14 научных работ, изданных в периодических научных изданиях, сборниках материалов и тезисах докладов международных и всероссийских конференций, в том числе 14 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций и удовлетворяет критериям, изложенным в рекомендациях ВАК РФ от 26 октября 2022 г. В частности 11 публикаций входят в категорию К 1.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Tsukanov I. Y. An extended asymptotic analysis for elastic contact of three-dimensional wavy surfaces // *Tribology Letters*. 2019. V. 67, no. 4. P. 107
2. Tsukanov I. Y. Effects of shape and scale in mechanics of elastic interaction of regular wavy surfaces // *Proc. Inst. Mech. Eng. J: J. Eng. Tribol.* 2016. V. 231 no. 3, P. 332-340.
3. Tsukanov I. Y. Partial contact of a rigid multisinusoidal wavy surface with an elastic half-plane // *Advances in Tribology*. 2018. V. 2018. Article ID 8431467.
4. Цуканов И.Ю. Периодическая контактная задача для поверхности с двухуровневой волнистостью // *ПММ*. 2018. Т. 82. Вып. 3. С. 372-380.
5. Цуканов И.Ю. К вопросу о контакте волнистого цилиндра и упругой полуплоскости // *ПММ*. 2022. Т. 86. Вып. 5. С. 685-694.
6. Lyubicheva A. N., Tsukanov I. Y. The influence of 2D periodic surface texture on the partial slip problem for elastic bodies // *Eur J Mech A Solids*. 2022. V. 91. 104405.
7. Goryacheva I. G., Tsukanov I. Y. Analysis of elastic normal contact of surfaces with regular microgeometry based on the localization principle // *Front. Mech. Eng.* 2020. 6:45.
8. Горячева И.Г., Цуканов И.Ю. Развитие механики дискретного контакта с приложениями к исследованию фрикционного взаимодействия деформируемых тел (Обзор) // *ПММ*. 2020. Т. 84. Вып. 6. С. 757-789.
9. Goryacheva I. G., Tsukanov I. Y. Modeling of normal contact of elastic bodies with surface relief taken into account // *J. Phys.: Conf. Ser.* 991 012028.
10. Tsukanov I. Y. Pressure concentration in 2D elastic regular rough contacts: The effect of asperity interaction // *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advanced Problem in Mechanics II. APM 2020*. P. 314-319.
11. Цуканов И.Ю. Геометрические соотношения в упругом контакте поверхностей с регулярной шероховатостью // *Проблемы машиностроения и автоматизации* 2016. № 2 . С. 40-44.
12. Горячева И. Г., Цуканов И. Ю. Моделирование упругого контакта тел с регулярным микрорельефом // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018. № 11. С. 81–87.
13. Цуканов И.Ю., Албагачиев А.Ю., Данилов В.Д. Влияние геометрии

неровностей при упругом контакте поверхностей с регулярным микрорельефом // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 51-56.

14. Цуканов И.Ю. Упругий контакт симметричных криволинейных и волнистых поверхностей произвольной формы. Обобщенный подход // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 3-13.

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке научных задач, их решении, анализе результатов и подготовке публикаций [1–14]. Им лично были поставлены и аналитически решены все задачи, вошедшие в диссертацию. В работе [1] предложен подход к построению асимптотических решений контактной задачи о внедрении двумерной волнистой поверхности в упругое полупространство. В работах [2–4, 10 - 14] развит подход к построению аналитических решений плоской периодической контактной задачи с неизвестными границами областей контакта и решен ряд задач для поверхностей с регулярным рельефом, в том числе с многоуровневой структурой и с параметрически заданной формой выступов/впадин, проведен анализ влияния геометрии рельефа на распределение контактных давлений, величину максимального давления, размеры областей фактического контакта и относительное смещение поверхностей взаимодействующих тел. В работе [5] развит подход к решению контактной задачи при наличии одной и двух зон контакта и произвольной функции начального зазора и исследовано влияние геометрии волнистого цилиндра на размер фактической области контакта при его взаимодействии с упругой полуплоскостью при односвязной и двухсвязной областях контакта. В работе [6] в рамках теории Каттанео-Миндлина рассмотрено контактное взаимодействие упругих тел, одно из которых имеет рельеф с параметрически заданной формой выступов и впадин, в условиях частичного проскальзывания и плоской деформации. Были получены аналитические выражения для расчета размеров области контакта, зон сцепления и проскальзывания, а также соотношения для нормальной и тангенциальной нагрузок. В работе [7] предложены постановки периодических контактных задач для упругой полуплоскости и упругого полупространства, взаимодействующих с твердым телом с регулярным рельефом, и метод их приближенного решения, основанный на принципе локализации. Получены соотношения, связывающие контактные характеристики с формой выступов и расстоянием между ними.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:

- д.ф.-м.н., руководителя лаборатории математических методов механики материалов Института проблем машиноведения РАН, Фрейдина А.Б., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В главе 3 рассмотрен рельеф, представляющий собой двумерную волнистость с одинаковыми периодами вдоль осей координат  $x$  и  $y$ . Не ясно, в какой степени можно использовать эти

результаты для оценки контактных взаимодействий, если равенство периодов нарушается вследствие погрешностей технологии или других причин. 2. Периодический рельеф можно рассматривать как идеальный предельный случай. Другим предельным случаем, имеющим практическое значение, является случайный профиль шероховатости. Можно ли дать оценки контактного взаимодействия в случае случайного поля шероховатости по результатам, полученным для двумерной периодической волнистости? 3. Одним из практических приложений, указанных в диссертации, является управление контактными характеристиками сопряжений упругих тел за счет создания рельефа определенной геометрии при заданных параметрах нагружения и модулей упругости контактирующих тел. Можно ли на основе полученных в работе выражений найти геометрические характеристики рельефа, обеспечивающие заданные контактные характеристики? 4. В разделе 2.2.1 главы 2 рассмотрено построение асимптотического решения с применением метода локализации для случаев малых и умеренных нагрузок. Получены формулы для расчета распределения контактного давления и размера области контакта, однако почему то не представлена асимптотическая зависимость для функции дополнительного смещения, как например, в разделе 2.2.3 для случаев больших нагрузок или в главе 3 для пространственного случая. 5. В разделе 5.3 главы 5 рассмотрены задачи при приложении нормальных и касательных нагрузок при условии близости величин модулей упругости материалов контактирующих тел. Однако, согласно тексту диссертации, рассмотренные задачи предполагается использовать и в сопряжениях, в которых модуль Юнга одного из тел существенно превышает модуль Юнга другого тела. В связи с этим возникает вопрос об ограничениях применимости полученных решений для контактирующих тел с различными упругими свойствами. 6. В работе исследованы поля напряжений, возникающих в контактирующих телах. Было бы уместным дать комментарии относительно того, как рельеф поверхности и порождаемые им напряжения соотносятся с приповерхностным разрушением и характеристиками фрикционного взаимодействия.

- Д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет Пожарского Д.А., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В список литературы диссертации включены только 6 работ автора диссертации ([41-43,69,73,93]). Автореферат содержит 28 работ автора диссертации. Описание личного вклада автора

диссертации на стр. 13 диссертации по номерам публикаций соответствует автореферату, но не диссертации. 2. На стр. 43 в заголовке подраздела 1.5 не ясен термин «рельеф характеристики». 3. В главе 3 при решении пространственной задачи предполагается равенство периодов волнистой поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Останется ли применимым подход, развитый в диссертации, если периоды в направлениях двух осей существенно различны? Следовало сослаться на работу: Александров В.М. Двойкопериодические контактные задачи для упругого слоя // ПММ. 2002. Т. 66. Вып. 2. С. 307- 315., где развит подход для произвольных (не совпадающих) периодов. 4. На стр. 152 сказано, что формулы (5.7) и (5.10) не применимы при  $m \gg 1$ . Хотелось бы уточнить более конкретно диапазон применимости этих формул по параметру  $t$ . 5. На стр. 167 в соответствии с теорией Каттанео-Миндлина упругие характеристики тел предполагаются одинаковыми, что ведет к упрощениям уравнений. Останется ли эффективным подход, развитый в диссертации, в случае разных упругих материалов тел или он должен быть модифицирован?

- Д.ф.-м.н., профессора, г.н.с. лаборатории геомеханики ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН». Галыбина А.Н., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: Математической основой данной диссертационной работы является теория сингулярных интегральных уравнений (СИУ) для плоской периодической задачи теории упругости. В контактных задачах, как и в механике трещин, такие задачи сводятся к простейшему СИУ с ядром Коши, чем автор широко пользуется во всех главах, включая третью, где рассмотрена периодическая задача для полупространства, которая сведена к одномерному СИЕ, родственному СИУ для плоских задач. Поскольку математические постановки для контактных задач и задач механики трещин практически эквивалентны (чем и пользуется автор для построения асимптотического решения при больших нагрузках), то было бы полезно включить в обзор анализ некоторых подходов, используемых для решения СИУ в периодических задачах для трещин. Это, вероятно, помогло бы избежать некоторые недочеты, указанные ниже. 1. При построении решений СИУ, ограниченных на концах отрезков, таких как (2.4), (2.11), (2.53), (4.3). (4.17) и других аналогичных, необходимо указывать, ЛЖО приведенные резольвенты верны только при выполнении не которых условий, которые должны быть наложены на функции в правой части СИЕ. Для одной зоны контакта, достаточно одно

условие четности нормальных смещений, которое всегда выполняется. Однако для задач в главе 4, т.е. для двух контактных зон, требуется (в общем случае) удовлетворить 2 дополнительных условия типа (4.21) для того, чтобы определить координаты концов контактных зон. Из текста главы 4 осталось неясным какое второе условие налагалось для определения ограниченных решений на концах контактных зон. 2. В главе 1 в интегральных уравнениях (1.35) и (1.38) не указана область интегрирования, а также область, в которой эти уравнения выполняются. 3. В начале Главы 2 и других глав, где вводятся разложения Фурье для профиля, описание размерностей приведено с ошибками. Так утверждается, что параметры  $L$  и  $k_i$  имеют размерность длины. В этом случае профиль имеет размерность квадрата длины, а не длины, как ожидается. 4. Из уравнений (2.12) - (2.15) следует, что  $P$  константа, однако в (2.17)-(2.19) входят производные  $P$  по координате. Означает ли это, что  $P$  зависит от параметра  $a$  (или  $a$ )? 5. Размерности  $p$  и  $p$  с чертой в формулах (2.21) и тех, что ниже не согласуются. 6. Не объяснено откуда взялась формула (2.57). 7. В (2.67) не может быть нулем. 8. В Главе 3 введено ограничение, что период одинаков в разных направлениях. Это предположение существенно обедняет задачу. Существует ли подход, позволяющий снять это ограничение? 9. Был ли реализован алгоритм, описанный в 3.2.4? 10. Какое условие должно быть наложено на минимальное давление для того, чтобы двухуровневая волнистая поверхность (рис 4.1) была бы в полном контакте с полуплоскостью..

- Д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника ФГБУН «Институт прикладной механики РАН» Соляева Ю.О., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В диссертации рассматриваются задачи в линейно упругой постановке, при этом основной акцент делается на определении контактных давлений и размеров зон контакта. Для большинства рассмотренных задач не представлен анализ реализующихся полей деформаций и напряжений с соответствующей оценкой допустимых нагрузок, при которых возможно использование рассматриваемой геометрически и физически линейной теории. 2. Несколько неясной представляется терминология, касающаяся малых/умеренных/больших нагрузок в рамках линейной теории. В диссертации эти уровни нагрузок соответствуют возникновению малых/средних/протяженных зон контакта, соответственно. Было бы полезно дать соответствующие конкретные оценки размеров зон контакта (в процентах от максимальной возможной площади контакта). Также возникает вопрос, могут ли быть реализованы режимы высоких нагрузок

(в используемом смысле) без перехода в нелинейные режимы деформаций? Для каких классов материалов, или при каких ограничениях на размеры параметра рельефа это возможно? 3. В разделе 2.1 представлено обобщение решения Вестергаарда для задачи о контакте жесткого тела, обладающего произвольной симметричной формой рельефа, с упругим полупространством. Самое по себе решение является ценным. Однако, не представлено вариантов задач, в которых бы применялось это решение, и был бы дан детальный анализ сходимости полученных представлений в рядах. 4. В разделе 2.2.2 дается сравнение точных решений и решений, полученных с использованием метода локализации, для нескольких относительно простых задач (для синусоидального рельефа, для клиновидного рельефа). Возникает вопрос, если известно точное решение, то зачем использовать приближенные оценки? Для проверки справедливости приложенного метода? Это не совсем ясно из текста диссертации. 5. В задаче сравнения точного решения и решения, полученного по методу локализации, для клиновидного рельефа в разделе 2.2.2 в вершине клина реализуются бесконечные напряжения. Не создает ли это сложностей при использовании метода локализации при вычислении (интегрировании) среднего давления, действующего вне рассматриваемой зоны с единичным выступом? Возникают ли в связи с этим дополнительные ограничения, накладываемые на угол раскрытия клиновидного рельефа? 6. В разделе 3.1.1 утверждается, что функция вида  $\cos(nx)\cos(ny)$  соответствует геометрически изотропному рельефу, однако, с формальной точки зрения такой тип геометрии, скорее относится к кубической симметрии. 7. На стр. 82 утверждается, что «область контакта неровности, изображенной на рис. 3.3. и упругого полупространства не всегда является круговой, вследствие отсутствия осевой симметрии у штампа (неровности)». По-видимому, эта область никогда не является круговой, но только приближенно может считаться таковой для малых нагрузок. 8. В разделе 3.1 вводится радиус эффективной круговой зоны, внутри которой определяются параметры контакта. Было бы интересно оценить точность такого подхода на основе сопоставления реализующихся характерных размеров зоны контакта и ее отклонения от круговой формы. 9. Насколько достоверным можно считать сопоставление с экспериментальными данными, в которых использовался рельефным цилиндр из податливого материала, а подложка была жесткой, с решением для жесткого цилиндра и упругого полупространства? 10. На стр. 122 получены простые аналитические



оценки для критических параметров рельефа, при которых возможно обеспечение плотного контакта. Решения представляются интересными и важными с практической точки зрения, например, с точки зрения нормирования шероховатости материалов контактных пар и т.п. Была ли проведена проверка этих решений на основе численного моделирования?

- Д.т.н., академика РАН, профессора, заведующего кафедрой «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» Колесникова В.И. и д.ф.-м.н., профессора кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» Беляк О.А., которые наряду с положительным отзывом сделали следующие замечания: 1. В контактной задаче для двухуровневой волнистой поверхности и упругой полуплоскости было бы интересно привести исследования подповерхностных напряжений при увеличении плотности контакта. 2. В периодической контактной задаче в условиях частичного проскальзывания, рассмотренной в рамках теории Каттанео-Миндлина, интегральные уравнения в системе для определения нормальных и касательных усилий независимы. Можно ли в случае материалов с различными упругими постоянными получить аналитические выражения для длины области контакта и области сцепления?
- Д.т.н., члена-корреспондента РАН, профессора, главного научного сотрудника ИМАШ РАН Махутова Н.А. Отзыв положительный, без замечаний. Отмечено, что выполненные в диссертации исследования являются важной базой для последующего анализа микроразрушения в зоне контакта, фреттинг-усталости и кинетических характеристик износа в изотермической и неизотермической постановке.
- Д.ф.-м.н., зав. лабораторией функционально-градиентных и композиционных материалов научно-образовательного центра «Материалы» ДГТУ Айзиковича С.М., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. «Получены точные и асимптотические решения не рассмотренных ранее контактных задач теории упругости в плоской постановке с неизвестными границами зон контакта, позволяющие рассчитать контактные характеристики поверхностей, в том числе с двухуровневой периодической системой неровностей, имеющих форму, описываемую четной функцией координаты». Не совсем понятно, зачем нужны асимптотические решения, если получены точные. 2. Работу существенно бы усилило

сравнение результатов с результатами моделирования микронеровностей нерегулярной формы и с моделями, использующими другие подходы для моделирования микронеровностей. 3. В автореферате подчеркивается, что модели справедливы «в широком диапазоне нагрузок», в том числе для «больших нагрузок». Насколько правомерно моделирование деформирования микронеровностей при больших нагрузках в рамках чисто упругих моделей? 4. Работу также усилило бы проведение экспериментальных исследований реальной микрогеометрии поверхности различных материалов и анализ того, для каких материалов правомерно использование регулярной формы при моделировании микронеровностей.

- Д.т.н., академика НАН Беларуси, зав. отделом «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов» Государственного научного учреждения «Института механики металлополимерных систем им. Н.А. Белого» Мышкина Н.К., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В тексте автореферата встречаются орфографические ошибки, например, «... локализации (пропущен союз «и») асимптотического решения... » (стр. 19); «... численного модулирования (вместо моделирования)... » (стр. 26), «... неосисимметричного плоского штампа ... (стр. 27). 2. Имеются терминологические неточности в словосочетаниях, например, «... натуральных поверхностей», «... искусственно» (вместо «специально») .. .», «... можно рассматривать изолированно (вместо «независимо» ... (стр. 20), «равновысокой системы» (вместо «системы равновысоких выступов» (стр. 24).

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у официальных оппонентов и представителя ведущей организации публикаций по теме работы соискателя:**

1. Gomez D., Nazarov SA & Perez-Martinez M.E. Asymptotics for Spectral Problems with Rapidly Alternating Boundary Conditions on a Strainer Winkler Foundation // J Elast 2020. V. 142, P. 89-120. DOI 10.1007/s10659-020-09791-8.

2. Elastodynamics of a coated half-space under a sliding contact / V. Bratov, J. Kaplunov, D. A. Prikazchikov, S. N. Lapatsin // Mathematics and Mechanics of Solids. 2022. Vol. 27, No. 8. P. 1480-1493. DOI 10.1177/10812865221094425.

3. A Generalized Mathematical Model of External Sliding Friction in Solids / A. D. Breki. S. G. Chulkin, A E. Gvozdev, A. G. Kolmakov // Inorganic Materials:

Applied Research. 2022. - Vol. 13, No. 4. P. 967-971. DOI 10.1134/s2075113322040062.

4. Седакова, Е.Б. Влияние теплопроводности сталей на предельные нагрузки при трении по полиамиду / Е.Б. Седакова, Ю. П. Козырев // Трение и износ. 2021. Т. 42, № С. 469477. DOI 10.32864/02024977-2021424469477.

5. Эмпирическая математическая модель изменения фактической площади контакта металлов в зависимости от пути трения / А.Д. Бреки, В.А Яхимович, С.Г. Чулкин и пр. // Чебышевский сборник. 2022. Т. 23, № 5(86). С. 188- 197. DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-5-188-197.3.

6. Petrov, Y.V. Instability of critical characteristics of crack propagation / Y.V. Petrov, A.V. Cherkasov, N.A Kazarinov// Acta Mechanics 2020. DOI 10.1007/s00707-020- 02852-y.

7. Эмпирическая математическая модель кинетики изнашивания пористых газотермических покрытий / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, А.Е. Гвоздев и др. // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 7. С. 36-40. - DOI 10.31044/18144632-2020-7-3640.

8. Lapin, R L. Rough contacting surfaces with elevated contact areas / R. L. Lapin, V. A. Kuzkin, M. Kachanov // International Journal of Engineering Science. 2019. Vol. 145.— P. 103171.-DOI 10.1016/j.engfracmech.2019.103171.

9. Bratov, V. Analysis of energy required for initiation of inclined crack under uniaxial compression and mixed loading / V. Bratov, A. Krivtsov // Engineering Fracture Mechanics. - 2019. Vol. 216. P. 106518. DOI 10.1016/j.engfracmech. 2019.106518.

10. Назаров С.А. Асимптотика собственных чисел задачи теории упругости со спектральными условиями Винклера-Стеклова на малых участках границы, Краевые задачи математической физики и смежные вопросы теории функций.// Зап. научи, сем. ПОМИ. 2022. Т. 519.С. 152— 187.

9. Золотов Н.Б., Пожарский Д.А. Двойкопериодические контактные задачи для слоя с неизвестной зоной контакта // Прикладная математика и механика. 2023. Т. 87. № 1. с. 53-62.

10. Пожарская Е.Д., Пожарский Д.А., Соболев Б.В. Периодические контактные задачи для клина с учетом сил трения// Изв. РАН. Механика твердого тела. 2023. № 5. С. 170-179.

11. Золотов Н.Б., Пожарский Д.А. Периодические контактные задачи для полупространства с частично закрепленной границей // Прикладная математика и механика. 2022. Т. 86. № 3. С. 394-403.
12. Пожарский Д.А., Золотов Н.Б. Контактные задачи для трансверсально изотропного слоя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. № 2. С. 105-113.
13. Пожарский Д.А., Золотов Н.Б. Периодические контактные задачи для трансверсально-изотропного слоя// Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63. № 6. С. 182 -190.
14. Pozharskii D.A., Sobol V.V., Vasiliev P.V. Periodic crack problems for an elastic layer // Mech. Adv. Mater. Struct. 2022. V. 29, № 3. P. 440-448.
15. Пожарский Д.А. Периодические контактные и смешанные задачи теории упругости (обзор) // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Серия: естественные науки. 2021. № 2. С. 22-33.
16. Пожарский Д.А., Пожарская Е.Д. Контактные задачи для неоднородного упругого клика с переменным коэффициентом Пуассона// Вестник ПНИПУ. Механика. 2021. № 1. С. 63- 71.
17. Артамонова Е.А., Пожарский Д.А. Плоские трещины в трансверсально изотропном слое //ПММ. 2020. т. 84, № 4. с. 500-510.
18. Pozharskii D.A., Sobol V.V., Vasiliev P.V. Periodic crack system in a layered elastic wedge // Mech. Adv. Mater. Struct. 2020. V. 27, № 4. P. 318-324.
19. Пожарский Д.А. Периодические системы трещин в трансверсально изотропном теле// Изв. РАН. МТТ. 2019. № 3. С. 54-63.
20. Пожарский Д.А., Золотов Н.Б. Контактные задачи для полых -цилиндров из неоднородного материала//ПМТФ. 2019. Т. 60, № 6. С. 130- 138.
21. Пожарский Д.А. Контактная задача для неоднородного цилиндра с переменным коэффициентом Пуассона// ПММ. 2019. Т. 83, № 2. с. 323-330.
22. Пожарский Д.А. К одной задаче Я.С. Уфлянда // ПММ. 2019. Т. 83, № 4. С. 643-652.
23. Пожарский Д.А., Бедоидзе М.В., Пожарская Е.Д. Периодические контактные задачи для слоя// Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Серия: естественные науки. 2019. № 1. С. 30-32.

24. Solyaev, Y. (2022). Effective Length Scale Parameters of the Fiber-Reinforced Composites. Lobachevskii Journal Mathematics, 43(7), 1993-2002.
25. Solyaev, Y. (2022). Self-consistent assessments for the effective properties of two-phase composites \ within strain gradient elasticity. Mechanics of Materials. 169. 104321.
26. Solyaev Y., Lurie S., Altenbach H., Dell' Isola F. (2022). On the elastic wedge problem within simplified and incomplete strain gradient elasticity theories. International Journal / of Solids and Structures, 239-240, 111433.
27. Solyaev Y. (2023). Semi-analytical solution for the Lamb's problem in second gradient elastodynamics. Wave Motion, 120, 103145.
28. Solyaev Y. (2023). Self-consistent homogenization approach for polycrystals within second gradient elasticity. Mechanics Research Communications, 132, 104162.
29. Solyaev Y.O., Ustenko A.D., Babaytsev A.V, & Dobryanskiy V.N. (2023). Improved mechanical performance of quasi - cubic lattice metamaterials with asymmetric joints. Scientific Reports, 13,
30. Solyaev Y. (2023). Complete general solutions for equilibrium equations of isotropic strain gradient elasticity. Journal of Elasticity.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**получены** аналитические решения периодической контактной задачи теории упругости в плоской постановке с неизвестными границами зон контакта для произвольной четной функции начального зазора между поверхностями при приложении нормальной силы и построены асимптотики полученных решений в различных диапазонах нагружения;

**исследовано** совместное влияние формы выступов/впадин регулярного рельефа, плотности зон контакта и величины номинального давления на распределение контактного давления, размеры областей контакта и величину зазора между поверхностями контактирующих тел;

**получены** асимптотические решения пространственной контактной задачи о внедрении поверхности с волнистым рельефом в упругое полупространство в области малых и больших нагрузок и изучено влияние параметров рельефа на площадь контакта, величину зазора и форму области контакта;

**получены** аналитические решения контактных задач в плоской

постановке для поверхности с двухуровневой волнистостью и волнистого цилиндра, внедряющихся в упругую полуплоскость;

**проанализировано** влияние параметров неровностей первого и второго уровня на распределение контактных давлений, размер области фактического контакта, относительное сближение контактирующих поверхностей и переход от односвязной области фактического контакта к многосвязной;

**построены** аналитические решения плоских контактных задач для упругой полуплоскости и упругого тела с поверхностным рельефом различной формы при приложении нормальной и касательной сил;

**исследованы** зависимости распределения нормальных и касательных контактных напряжений, размеров областей контакта и зон сцепления/проскальзывания от изменения соотношения касательной и нормальной силы и формы выступов/впадин рельефа.

**Теоретическая значимость обоснована тем, что:**

**развиты** методы решения плоских и пространственных контактных задач для упругих тел с регулярным рельефом поверхностей, позволяющие получить аналитические выражения, связывающие геометрические параметры поверхностного рельефа с контактными характеристиками взаимодействующих тел, что можно трактовать как достижение в области механики контактного взаимодействия.

**получена** совокупность аналитических решений плоских периодических контактных задач теории упругости с неизвестными границами зон контакта, которые обобщают известные результаты, построенные для случаев рельефа с синусоидальной или параболической формой выступов/впадин;

**построены** новые асимптотические решения плоской и пространственной периодической контактной задачи с неизвестными границами зон контакта, позволяющие рассматривать влияние различной формы выступов/впадин рельефа в случаях малых и больших зазоров между поверхностями;

**выявлены** новые механические эффекты, связанные с изменением формы и размеров областей контакта и контактных напряжений при изменении формы и размеров выступов/впадин рельефа, а также их взаимного расположения;

**оценено** влияние размеров, формы выступов/впадин, расстояния между ними и внешних нагрузок на распределение нормальных и касательных контактных напряжений в условиях полного и частичного проскальзывания.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для**

**практики подтверждается тем, что:**

полученный комплекс математических моделей позволяет с достаточной степенью точности учесть геометрию регулярного поверхностного рельефа в расчетах контактной жесткости и прочности, контактной электропроводности, сцепных свойств и герметичности сопряжений;

построенные точные решения контактных задач и их асимптотики позволяют решать задачу определения геометрии поверхностного рельефа, обеспечивающей требуемые контактные характеристики сопряжения, при заданных упругих свойствах контактирующих тел и параметрах нагружения;

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:**

решения всех сформулированных контактных задач получены на основе строгих постановок с использованием математического аппарата механики деформируемого твердого тела и механики разрушения, их достоверность подтверждается совпадением с известными аналитическими решениями в предельных случаях, результатами численного моделирования и для некоторых решений – с результатами экспериментов;

**Личный вклад соискателя состоит в:**

самостоятельной постановке и аналитическом решении совокупности всех рассмотренных контактных задач, проведении численного моделирования и постановке экспериментов (для отдельных задач); вклад автора в основные публикации по результатам исследования составляет приблизительно 85-90%.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания и заданы следующие вопросы: вопрос о порядке числовых значений давлений и перемещений в исследуемых задачах; вопрос о применимости разработанных подходов для поверхностей со случайными неровностями; вопрос о применимости полученных решений к рельефу, функция формы которого имеет разрывы в производной; вопросы о применимости линейной теории упругости и линейно-упругой механики разрушения в задачах о множественном контакте при малых зазорах между поверхностями; вопрос об актуальности аналитических подходов к решению данного класса задач в стране и за рубежом; вопрос об ограничениях применимости полученных результатов по свойствам материалов контактирующих тел.

Соискатель Цуканов И.Ю. ответил по существу на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, дал пояснения о порядках величин нагрузок и деформаций в исследуемых задачах, дал пояснение об активно работающих

научных школах по аналитическому решению контактных задач в России и за рубежом; ответил на вопросы, связанные с применимостью сделанных в работе допущений на геометрические параметры рельефа и свойства материалов контактирующих тел при исследовании практических задач.

На заседании 28.03.2024 Диссертационный совет принял решение за полученный комплекс взаимосвязанных точных и асимптотических решений контактных задач теории упругости, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы механики деформируемого твердого тела, имеющей важное значения для управления контактной жесткостью и трибологическими характеристиками различных сопряжений, присудить Цуканову Ивану Юрьевичу учёную степень доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – 2.

Председатель диссертационного совета  
24.1.098.01 при ИПМех РАН,  
академик РАН



Климов Д.М.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.1.098.01 при ИПМех РАН,  
к.ф.-м.н.  
29 марта 2024 г.

Сысоева Е.Я.