

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)**



В.О., Большой пр-т, д. 61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: +7 (812) 321-47-78, факс: +7 (812) 321-47-71;
<https://ipme.ru>, e-mail: ipmash@ipme.ru
ОКПО 04850273 ОГРН 1037800003560 ИНН 7801037069 КПП 780101001



**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
на диссертацию Цуканова Ивана Юрьевича**

**«Контактные задачи для упругих тел с регулярным рельефом поверхностей»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности**

1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

1. Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Цуканова Ивана Юрьевича 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.

Для обеспечения возможности прогнозирования контактных характеристик сопряжений упругих тел, имеющих регулярный поверхностный рельеф, необходимы математические модели, позволяющие решать как прямую задачу нахождения контактных характеристик сопряжения при известных параметрах рельефа, так и обратную - определения геометрических параметров рельефа, необходимых для достижения требуемых контактных характеристик. Аналитические методы, применяемые для построения моделей, развитие которых применительно к взаимодействию упругих тел с регулярным рельефом поверхностей, приведено в диссертационной работе, обладают возможностью непосредственной оценки контактных характеристик при линейно упругом поведении материалов и могут служить основой для верификации численных моделей при наличии различных нелинейных эффектов.

2. Структура и содержание работы

Диссертационная работа Цуканова И.Ю. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 190 страницах, включая 67 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 139 наименований.

В первой главе представлен анализ состояния исследований в области механики контактного взаимодействия тел с поверхностным рельефом и ее применению к расчету контактных характеристик деформируемых тел.

Во второй главе излагаются развитые автором методы решения плоских периодических контактных задач для поверхностей с регулярным рельефом при неизвестных границах областей контакта и нормальной нагрузке. Приведены точные и асимптотические решения для некоторых типов периодического рельефа поверхности. Показано, что основным фактором, оказывающим влияние на характеристики контактного взаимодействия поверхности с регулярным рельефом и упругой полуплоскости при односвязной области контакта, является производная функции формы профиля, особенно в области больших приложенных нагрузок (малых зазоров).

В третьей главе развиты асимптотические методы решения контактных задач для рельефа, представляющего собой двумерную волнистость, и упругого полупространства. Получены аналитические выражения для расчета площади фактического контакта, зазора в сопряжении, максимального давления и формы области контакта в различных диапазонах нагружения. Установлено, что площадь фактического контакта и средний зазор в сопряжении при увеличении нагрузки в основном зависят от геометрии осесимметричной составляющей функции формы двумерной волнистой поверхности.

В четвертой главе получены решения плоских контактных задач для поверхности с двухуровневой волнистостью и волнистого цилиндра, внедряющихся в упругую полуплоскость. Проведен анализ влияния параметров волнистости на конфигурацию и

размеры областей контакта, а также распределение контактных давлений. Установлен осциллирующий характер поведения контактных характеристик взаимодействующих тел при односвязной области контакта и исследованы критерии перехода к многосвязной области, состоящей из дискретных зон контакта.

В пятой главе получены решения периодических контактных задач для упругих тел при приложении нормальных и касательных сил к поверхности, имеющей рельеф с формой выступов/впадин, заданной параметрически. Рассмотрены случаи с заданной и неизвестной областью контакта, возникающие при наличии угловых точек выступов рельефа или их отсутствии. Сравнением с моделированием методом конечных элементов показано ограничение использования аналитических решений для различных форм выступов рельефа. Проведено исследование роста подобласти проскальзывания с увеличением касательной силы в различных диапазонах нормальной нагрузки с изменением формы рельефа.

3. Научная значимость и новизна результатов диссертации

Полученные автором диссертации научные результаты вносят существенный вклад в развитие математических методов исследования контактных взаимодействий. В диссертации получен комплекс точных и асимптотических решений контактных задач теории упругости для различных типов регулярного рельефа поверхностей, позволяющий оценивать контактные характеристики сопряжений в широком диапазоне варьирования формы выступов/впадин и параметров нагружения.

К наиболее существенным и оригинальным следует отнести следующие результаты.

- 1) Впервые получено точное решение плоской периодической контактной задачи при неизвестных границах области контакта для произвольной четной функции, описывающей форму выступа/впадины рельефа в квадратурах и рядах, включая выражение для определения среднего зазора между нагруженными поверхностями.
- 2) Получены уточненные асимптотические решения контактной задачи для двумерной волнистости и упругого полупространства, обладающие хорошим совпадением с известными результатами численного моделирования. На основе найденных решений выявлены новые эффекты, связанные с влиянием геометрии регулярного рельефа, на размер и конфигурацию областей контакта, изменение зазора в сопряжении, величину максимального давления.
- 3) В результате решения задачи о контакте волнистой поверхности с двумя масштабными уровнями неровностей и упругой полуплоскости получены аналитические выражения, позволившие исследовать влияние двухмасштабной геометрии неровностей на контактные характеристики взаимодействующих поверхностей.

4) Получены точные решения плоских периодических контактных задач при последовательном приложении к поверхности, имеющей регулярный рельеф, нормальной и тангенциальной силы в условиях трения покоя, позволяющие оценить степень влияния геометрических параметров рельефа на распределения нормальных и касательных усилий, размеры области контакта и подобластей сцепления/проскальзывания.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов связана с решением поставленных задач с использованием строгих математических методов механики деформируемого твердого тела. Большая часть выводов работы следует из полученных аналитических решений. В диссертации используется сравнение (где это возможно) полученных результатов с известными решениями других авторов, результатами численного моделирования. Имеется сравнение ряда полученных результатов с экспериментальными данными (в главе 4) и результатами численного моделирования (в главе 5), полученными автором диссертационной работы.

5. Практическая значимость и рекомендации по применению работы

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов к анализу влияния различных типов технологического рельефа поверхностей материалов на контактную жесткость, тепло- и электропроводность, а также герметичность сопряжений упругих тел. Также результаты диссертационной работы представляют практический интерес для создания текстур поверхностей деталей неподвижных сопряжений с заданными контактными характеристиками при нормальном и тангенциальном нагружении.

Результаты могут быть также использованы в научно-исследовательской деятельности таких научных учреждений, как Институт проблем машиноведения РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, а также в научно-образовательной деятельности таких вузов, как Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский государственный университет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Новосибирский государственный университет, Южный федеральный университет и других.

6. Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе.

Основное содержание диссертационной работы, ее главные результаты в полной мере опубликованы в 14 публикациях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и

изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

7. Замечания и вопросы по работе

По работе имеются следующие замечания и вопросы.

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 не почему-то 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.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования.

8. Заключение по диссертации

Диссертационная работа Цуканова Ивана Юрьевича «Контактные задачи для упругих тел с регулярным рельефом поверхностей», представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. На основании выполненных автором исследований сформулированы теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в развитии механики контактного взаимодействия деформируемых тел. Диссертация «Контактные задачи для упругих тел с регулярным рельефом поверхностей» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, соответствует паспорту специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела, соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013, № 842, а ее автор, Цуканов Иван Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Материалы докторской диссертации Цуканова И.Ю. «Контактные задачи для упругих тел с регулярным рельефом поверхностей» заслушаны и получили одобрение на семинаре по механике ИПМаш РАН, основанном Д.А. Индейцевым, 19.02. 2024 г протокол № 2/24.

Отзыв на диссертацию Цуканова И.Ю. заслушан, обсужден и одобрен на заседании лаборатории математических методов механики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, протокол № 04/03/24 от 04.03.2024 года.

Руководитель лаборатории математических методов механики материалов
ИПМаш РАН, д.ф.м..н.

Фрейдин Александр Борисович



Фрейдин

Фрейдина А.Б.
Помощник Директора

Файл Индреева С.И.
на 2 024г.