

Отзыв
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.

Диссертация посвящена исследованию контактного взаимодействия упругих тел с поверхностным регулярным рельефом, имеющим различную форму, и развитию методов решения соответствующих контактных задач.

Одним из способов управления контактными, адгезионными и фрикционными свойствами сопряжений упругих тел, применяемых в различных областях техники, является нанесение поверхностного рельефа (текстуры). Выбор рациональной формы и размеров элементов микрорельефа можно осуществить на основе моделирования методами механики контактного взаимодействия, поэтому развитие методов решения контактных задач с регулярным рельефом поверхности является **актуальной проблемой** механики деформируемого твердого тела.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору публикаций, связанных с темой исследования. Приводятся классические постановки и решения плоских и пространственных контактных задач для ограниченной и периодической системы штампов на упругой полуплоскости (полупространстве) при нормальном нагружении, а также задачи с учетом сил трения и адгезии в контакте поверхностей.

Вторая глава содержит общую постановку и метод решения периодической контактной задачи для упругой полуплоскости и тела с поверхностным рельефом при произвольной гладкой четной функции, описывающей его профиль, и нормальном нагружении. Получены аналитические выражения для определения распределения контактного давления, дополнительного смещения полуплоскости за счет выступов рельефа и зависимости номинального давления от размера области контакта в квадратурах и рядах. Также во второй главе развиты асимптотические методы решения контактных задач для различных диапазонов нагружения (от начального контакта до полного внедрения выступов профиля) на основе решений для единичного штампа (фиктивной трещины) и моделировании действия соседних областей контакта с помощью подгруздки равномерным давлением по некоторой заданной области. Показано сравнение точных и асимптотических решений для конкретных примеров поверхностного рельефа.

В третьей главе рассмотрено построение асимптотических решений периодической контактной задачи для упругого полупространства и тела с пространственным волнистым рельефом на примере двумерной

синусоидальной волнистой поверхности. С помощью представления функции, определяющей форму рельефа, в виде разложения в ряд Фурье в цилиндрических координатах получены зависимости для интегральных характеристик - площади фактического контакта и среднего зазора как функций приложенного номинального давления на основе двух моделей - не полностью осесимметричного штампа с круговой областью контакта и круговой фиктивной трещины, сжимаемой неосесимметричным давлением. Сравнением с численным анализом, проведенным другими авторами методом граничных элементов, в частности показана слабая зависимость интегральных контактных характеристик от ненулевых членов разложения функции формы рельефа в ряд Фурье.

В четвертой главе рассмотрено моделирование и анализ влияния неровностей второго масштабного уровня с малой амплитудой на контактные характеристики при внедрении периодического рельефа в упругую полуплоскость в рамках односвязной области контакта. Получены зависимости для расчета контактных характеристик - распределения контактного давления, размеров областей фактического контакта и дополнительного смещения полуплоскости за счет неровностей первого и второго уровня от приложенного номинального давления и геометрических параметров неровностей. Приведено качественное сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными автором.

В пятой главе изучено влияние геометрических параметров периодического рельефа поверхности упругого тела - размеров и формы выступов (впадин), на размеры области контакта, подобластей сцепления и проскальзывания в контакте с упругой полуплоскостью при последовательном приложении нормальной и касательной силы в условиях трения покоя. Предложены параметрические функции для моделирования регулярного рельефа с параметрически заданной формой и получены аналитические выражения для определения контактных характеристик. Установлены закономерности, связывающие геометрические параметры регулярного рельефа и контактные характеристики при различных диапазонах нагрузок в условиях частичного проскальзывания.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается корректной постановкой задач, применением классических методов механики деформируемого твердого тела, теории упругости. Достоверность решений контактных задач обеспечивается, сравнением с известными аналитическими решениями в предельных случаях и результатами численного моделирования, полученными другими авторами.

Новыми результатами, полученными соискателем, следует считать:

- решение плоской периодической контактной задачи для упругой полуплоскости и поверхности с регулярным рельефом при произвольной четной функции формы выступа и неизвестных границах областей контакта в форме, не содержащей сингулярного интеграла типа Коши;

- аналитические выражения для расчета распределения контактных давлений, размера областей контакта и функции дополнительного смещения при внедрении поверхности с регулярным рельефом, форма которого задана четным тригонометрическим многочленом;

- асимптотические решения плоской и пространственной контактной задач для упругих тел с регулярным рельефом в области малых и больших приложенных нагрузок.

- решения контактных задач для упругой полуплоскости и поверхности с регулярным рельефом различной формы, в том числе заданной параметрически, при нормальном и тангенциальном нагружении.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что ее результаты могут быть использованы, в частности:

- для расчета контактной жесткости, теплового и электрического сопротивления поверхностей с регулярной текстурой (волнистость шероховатость) и поверхностью упругого тела с низким значением модуля упругости при различной форме, размерах и пространственном расположении выступов рельефа;

- для определения оптимальных геометрических характеристик регулярного поверхностного рельефа, обеспечивающего требуемое сочетание жесткости и площади фактического контакта, а также размера зон проскальзывания в зависимости от величины начального зазора и приложенных нагрузок;

- для определения диапазона масштабных уровней неровностей регулярной текстуры поверхности, оказывающих существенное влияние на процессы, происходящие в контакте упругих тел.

Замечания по работе:

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, что приведенные резольвенты верны только при выполнении некоторых 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 Δ и ki 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 α (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) j 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.

Указанные выше замечания не снижают ценность работы, которая выполнена на высоком математическом уровне.

Результаты выполненных исследований опубликованы в 28 печатных работах, из них 14 работ опубликованы в международных рецензируемых изданиях и журналах, рекомендованных ВАК РФ. Результаты диссертации докладывались более чем на 20 всероссийских и международных конференциях и научных семинарах.

В целом результаты диссертационной работы представляют собой законченное исследование, посвященное решению крупной научной проблемы, имеющей важное прикладное значение. Работа выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее автор, Цуканов Иван

Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Г.н.с. лаборатории геомеханики ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН», д.ф.-м.н.



Галыбин Александр Николаевич

ИФЗ РАН, 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-10-82, e-mail: a.n.galybin@gmail.com

Подпись Галыбина Александра Николаевича заверяю!

Зав. канцелярии Т. Мухоморова

