

Российская академия наук
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Научный совет по машиностроению РАН
Российский национальный комитет по теории машин и механизмов
Межведомственный научный совет по трибологии

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

VIII Международной научной конференции
«Фундаментальные исследования и
инновационные технологии
в машиностроении»

Москва
2024

УДК 621.9
ББК 34.5

Редакционная коллегия:

академик Ганиев Р.Ф., д.т.н., проф. Глазунов В.А., д.т.н., проф. Албагачиев А.Ю., д.т.н.

Научные труды VIII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”. – М.: ИМАШ РАН. – 2024. – 266 с.

В сборник включены статьи, написанные по материалам докладов, представленных на VIII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”, проходившей с 19 по 20 ноября 2024 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. На конференции были представлены результаты работ по следующим шести научным направлениям:

1. Робототехника и автоматизация технологических процессов.
2. Волновые технологии в машиностроении.
3. Инновационные, цифровые и аддитивные технологии в машиностроении.
4. Трибология, триботехнологии и сварка трением.
5. Перспективные конструкционные и трибологические материалы, наноматериалы и покрытия.
6. Искусственный интеллект, цифровые двойники изделий и модели накопления повреждений при обработке

Организаторы конференции – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Российская академия наук; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Научный совет по машиностроению РАН, Российский национальный комитет по теории машин и механизмов; Межведомственный научный совет по трибологии; Российский союз научных и инженерных объединений (обществ); Ассоциация технологов–машиностроителей; Ассоциация инженеров–трибологов России.

Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

ISBN 978-5-904282-22-6

© ФГБУН Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН, 2024

РОЛЬ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ

И.Г. Горячева¹, А.А. Яковенко²

¹Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; goryache@ipmnet.ru

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Аннотация Представлен метод решения задач контакта деформируемых тел с учетом их поверхностной шероховатости. Построены решения контактных задач для шероховатого штампа и полупространства (упругого, вязкоупругого, двухслойного). Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными результатами, полученными во фрикционных испытаниях по схеме шарик – стальной диск с покрытием на основе MoS₂.

Введение

Наличие на поверхности тел микрорельефа различной природы приводит к несплошности области контактного взаимодействия. Дискретность контакта очень важна при исследовании таких процессов, как адгезия и когезия, фрикционный разогрев, массоперенос, износ, усталостное разрушение и др. Поэтому в последнее время большое внимание уделяется построению моделей контактного взаимодействия шероховатых деформируемых тел с целью исследования влияния параметров шероховатости тел на характеристики контактного взаимодействия и процессы, сопутствующие этому взаимодействию.

Для построения модели контакта шероховатых тел предлагается использовать двухуровневый подход [1], согласно которому выделяется два характерных масштаба длины: макро, соответствующий размерам номинальной области контакта, и микро, соответствующий характерному размеру неровностей и расстоянию между ними. На микромасштабе решение контактной задачи позволяет определить фактические характеристики контакта, а также дополнительную податливость тел, которая затем используется при решении контактной задачи на макромасштабе. Использование концепции дополнительной податливости для определения номинальных контактных характеристик на макроуровне впервые было предложено Штаерманом [2].

Постановка задачи

Рассматривается внедрение шероховатого штампа, макроформа которого описывается функцией $F(x, y)$, в деформируемое основание (рис. 1). Следуя концепции дополнительной податливости, интегральное уравнение для определения номинальных контактных давлений $p(x, y)$ и номинальной площади контакта Ω записывается в следующем виде:

$$\iint_{\Omega} K(x, y, x', y') p(x', y') dx' dy' + C[p(x, y)] = D - F(x, y), \quad (1)$$

где $C[p]$ – функция дополнительной податливости, $K(x, y, x', y')$ – ядро интегрального оператора, зависящее от выбранной модели деформируемого тела, а D – глубина внедрения штампа.

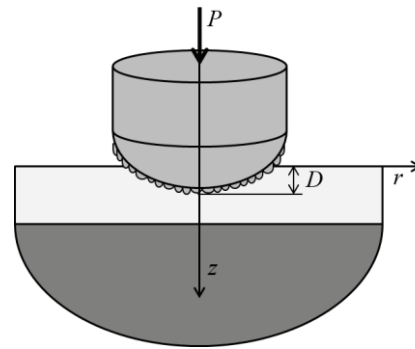


Рис. 1. Схема контакта шероховатого штампа с деформируемым телом

Функция дополнительной податливости $C[p]$ зависит от параметров микрогеометрии тел и определяется либо экспериментально, либо на основе решения контактной задачи на микроуровне.

Расчет контактных характеристик на микроуровне

Чтобы решить контактную задачу на микромасштабе прежде всего необходимо описать поверхностную шероховатость. Для этого существуют различные подходы, выбор которых зависит от характера микрорельефа, определяемого видом обработки поверхности. Так, в случае случайного характера микрорельефа применяется статистический подход. Одна из самых популярных контактных моделей в рамках такого подхода является модель Гринвуда-Вильямсона [3]. С использованием этой модели, а также принципа локализации [4] строится решение задачи о контакте полупространств с шероховатой и гладкой поверхностями с учетом взаимного влияния неровностей.

В случае периодического микрорельефа использование принципа локализации и расширенного принципа соответствия [5] позволяет построить решения контактных задач для периодической системы неровностей, внедряемой как в упругое, так и в вязкоупругое полупространство.

С использованием принципа локализации получено следующее выражение для фактических контактных давлений на пятне контакта радиуса a , которое справедливо как в случае статистического, так и периодического характера распределения неровностей по поверхности внедряемого тела [1]:

$$p(r) = \frac{2E'}{\pi R} \sqrt{a^2 - r^2} + \frac{2\bar{p}}{\pi} \arctan \left(\sqrt{\frac{a^2 - r^2}{A^2 - a^2}} \right), \quad (2)$$

где $\bar{P}$ – номинальное давление, $E' = E/(1-\nu^2)$ (E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона полупространства), R – радиус кривизны неровности, а A – радиус области, вне которой действует номинальное давление, моделирующие взаимное влияние пятен контакта. Дополнительное смещение d , определяемое как глубина внедрения неровности относительно границы полупространства, всюду нагруженного номинальным давлением, рассчитывается по следующей формуле:

$$d = \frac{a^2}{R} - \frac{2\bar{P}}{E'} \sqrt{A^2 - a^2}. \quad (3)$$

Анализ влияния микрогеометрии тел на контактную жесткость и номинальные характеристики

Полученная при решении контактной задачи на микромасштабе при заданных параметрах микрогеометрии зависимость дополнительной податливости от номинального давления $C[p]$ с использованием формулы (3) позволяет построить интегральное уравнение вида (1) контактной задачи на макромасштабном уровне. Такой подход может быть применен для решения контактных задач для различных макроформ и механических свойств контактирующих тел, а также при разных способах описания их поверхностной микрогеометрии.

Построенное таким образом интегральное уравнение (1) позволяет определить распределение номинальных давлений, например, с использованием метода последовательных приближений. На конкретных примерах было получено, что учет поверхностной шероховатости тел вносит не только количественные, но и качественные изменения в распределение номинальных контактных давлений. В частности, увеличивается глубина внедрения и область номинального контакта.

Отметим также, что по найденным номинальным контактным характеристикам, затем можно определить значения фактических давлений (2), а также рассчитать поле внутренних напряжений вблизи пятен контакта. В частности, получено, что рост плотности контакта, что характеризуется уменьшением расстояния между неровностями, приводит к возникновению на некоторой глубине напряженного подповерхностного слоя, в котором могут развиваться пластические деформации и зарождаться микротрещины.

Сравнение с результатами экспериментов

Полученные теоретические результаты и оценки были сравнены с результатами экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории трибологии

ИПМех РАН и направленных на исследование процесса скольжения стальных шариков с различной поверхностной шероховатостью по мягким покрытиям на основе дисульфида молибдена, нанесенным на стальную подложку.

Результаты эксперимента показали, что коэффициент трения и скорость изнашивания этих покрытий в значительной степени зависят от шероховатости контртела. Также получено, что увеличение шероховатости (среднеквадратичного отклонения высот неровностей) контртел ведет к росту ширины дорожки трения и более интенсивному износу покрытий. Это коррелирует с численными результатами, полученными с использованием разработанной модели.

Выводы

Представлен двухуровневый подход к решению задач контакта шероховатых деформируемых тел. Данный подход позволяет определить как номинальные, так и фактические контактные характеристики, а также поле внутренних напряжений вблизи пятен контакта.

Анализ конкретных примеров показал, что контактная жесткость сопряжения существенно зависит от параметров микрогеометрии, а также механических характеристик взаимодействующих тел и свойств поверхностного слоя. Изменение параметров микрогеометрии поверхности существенно влияет на распределение подповерхностных напряжений, т.е. на характер изнашивания поверхностей контактирующих тел в условиях фрикционного взаимодействия.

Таким образом, за счет подбора параметров микрогеометрии сопрягаемых поверхностей можно управлять процессами износа и разрушения, а также изменять (повышать/понижать) контактную жесткость сопряжений.

Работа выполнена при поддержке госбюджетного финансирования в НИИ механики МГУ, номер проекта ЦИТИС АААА-А19-119012990120-9.

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 478 с.
2. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. М.-Л.: Гостехиздат. 1949. 270 с.
3. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // Proceedings of the Royal Society of London A. 1966. V. 295. № 1442. P. 300–319.
4. Горячева И.Г. Периодическая контактная задача для упругого полупространства // Прикладная математика и механика. 1998. Т. 62. № 6. С. 1036–1044.
5. Graham G.A.C. The correspondence principle of linear viscoelasticity theory for mixed boundary value problems involving time-dependent boundary regions // Quarterly of Applied Mathematics. 1968. V. 26. № 2. P. 167–174.