

## ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫМ КОМПЬЮТЕРНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

*Рачишкин А.А.*

*Тверской государственной технической университет, г.Тверь*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, технические поверхности, микротопография поверхностей, контактное взаимодействие, фрикционное взаимодействие, термическое сопротивление.

**Аннотация.** В статье описываются принципы прогнозирования функциональных свойств трибосопряжений с помощью дискретно-событийного компьютерного моделирования и предлагается алгоритм программного средства для численных исследований физических процессов, протекающих при контактном взаимодействии технических поверхностей. Программа позволяет моделировать контактное взаимодействие и оценивать фрикционные параметры узлов трения, прогнозировать термическое сопротивление шероховатых стыков.

## PRINCIPLES FOR PREDICTING THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF TRIBOLOGICAL CONJUNCTION BY DISCRETE-EVENT COMPUTER SIMULATION

*Rachishkin A.A.*

*Tver State Technical University, Tver*

**Keywords:** computer simulation, roughness, topography, contact interaction, frictional interaction, thermal resistance.

**Abstract.** This article describes the principles of predicting the functional properties of tribological conjugations by discrete-event computer simulation. The algorithm for numerical studies of the physical processes occurring during the contact interaction of technical surfaces is proposed. The software allows us to simulate contact interaction, evaluate the frictional parameters of friction units and predict the thermal resistance of rough joints.

**Введение.** Оптимизация надёжности механических систем является одной из актуальных проблем современного машиностроения. Как показывает практика эксплуатации машин и механизмов, более чем в 70% случаев аварийных ситуаций их причиной является износ входящих в них трибосопряжений. Поэтому необходимо ещё на стадии проектирования оптимизировать функциональные свойства механических систем по критериям снижения износа и потерь на трение.

Моделирование микрогеометрии технических поверхностей и их контактного взаимодействия является одним из эффективных подходов в трибологии [1-4]. Объединение теоретических методов, базирующихся на данном подходе, и их адаптация для взаимодействия друг с другом позволяет спроектировать систему дискретно-событийного компьютерного моделирования для виртуальных исследований и проектных расчётов трибосопряжений различного назначения. Данный подход позволяет спроектировать программное средство для численных исследований физических процессов, протекающих при контактном взаимодействии технических поверхностей на основе принципов дискретно-событийного компьютерного моделирования.

Разработка модульной системы моделирования морфологии технических поверхностей с учётом наличия покрытий и их анизотропии, расчёт характеристик контактного и фрикционного взаимодействия, термического сопротивления стыков позволяет охватить широкий спектр задач инженерной практики.

**Общий принцип построения программного средства.** Разработка программного средства для компьютерного моделирования взаимодействий микронеровностей технических поверхностей должна объединить существующие подходы к прогнозированию эксплуатационных характеристик контакта шероховатых поверхностей и современные компьютерные технологии [5]. Для его реализации на первом этапе следует выделить в моделируемой системе два фундаментальных уровня: моделирование морфологии технических поверхностей и моделирование физических процессов, происходящих на микроконтактах. Затем, необходимо определить в исследуемых процессах ряд условно автономных и спроектировать для них программные модули. Это позволяет добавлять, изменять и отлаживать их, не нарушая общей структуры программного средства. Применение единой логики даёт возможность расширения компьютерной модели и модернизации имеющихся компонентов

Система ввода данных функционалом помощи пользователю для контроля адекватности параметров. Это настраиваемый инструмент, выявляющий ошибки, связанные с человеческим фактором, он выявляет создание логически не возможных ситуаций. Такой подход упрощает взаимодействие оператора с программным средством. Микрогеометрические и физико-механические параметры, получаемые в результате экспериментальных исследований технических поверхностей, вводятся в массиве исходных данных. При изменении одного из входных параметров перерасчёт всей системы не требуется, достаточно провести корректировочное моделирование зависимых от данного параметра модулей.

Далее предоставляется возможность проводить моделирование контактного взаимодействия и физических процессов, протекающих на микроконтактах. Происходит циклическая проверка всех сгенерированных микронеровностей, локальных физико-механических свойств моделируемых поверхностей.

При отсутствии механического контакта микронеровность исключается из процесса моделирования на данном шаге приращения внедрения. При контактном взаимодействии анализируется наличие и толщина функциональных покрытий, и характер возникающих деформаций. Математическая модель строится с учётом каждой из возможных алгоритмических ситуаций. Когда обработаны все контактирующие микронеровности, производится приведение к результирующему параметру по всей поверхности на данном шаге приращения внедрения. Затем система рассчитывает следующий шаг внедрения, доводя его до значения, соответствующего заданной нагрузке. При достижении конечного значения выводятся общие результаты процесса моделирования в заданном формате.

### **Структура программного средства**

**Модуль генерации морфологии технической поверхности.** Морфология технических поверхностей определяется их топографией, физико-механическими свойствами, наличием плёнок и функциональных покрытий.

Создание модели трёхмерной шероховатой поверхности позволяет описать топографию технических поверхностей с высокой точностью. При создании модели следует учитывать, что для большинства задач контактного взаимодействия нужно рассматривать только часть слоя, состоящую из выступов шероховатой поверхности [1,2]. При создании математического аппарата принимается, что микронеровности шероховатой поверхности моделируются одинаково ориентированными сегментами эллипсоидов вращения. Для адекватного распределения их на номинальной плоскости разработан алгоритм, учитывающий экспериментально полученные стандартные параметры микрогеометрии. Высоты и радиусы микронеровностей изменяются по случайному закону распределения в задаваемом диапазоне. Модель микронеровности в виде сегмента эллипсоида вращения учитывает анизотропию контактирующих поверхностей, а её частным случаем является модель в виде сферического сегмента, широко применяемая в исследованиях контактного взаимодействия [1-4]. Количество сгенерированных сегментов достаточно для статистического определения моделируемой поверхности. Каждый сегмент эллипсоида вращения, моделирующий микронеровность, имеет собственные геометрические параметры и координаты центра основания, при этом пересечений оснований соседних сегментов не происходит.

Локальные физико-механические свойства поверхности, наличие и толщину функциональных покрытий можно изменять по случайным законам распределения, либо задавать постоянными.

**Модуль контактного взаимодействия.** Сгенерированная трёхмерная модель шероховатой поверхности является основой для моделирования контактного взаимодействия. В математической модели анализируются варианты контактного взаимодействия с упругим полупространством, имеющим упругопластическое покрытие, и с упругопластическим полупространством без покрытия. Возникающие деформации проходят проверку и рассчитываются либо как упругие, либо как упругопластические. Таким образом, расчёт нагрузки для всех неровностей, находящихся в контакте, можно записать в виде:

$$N = \sum_{i=1}^j N_{1ie} + \sum_{i=1}^k N_{1iep} + \sum_{i=1}^l N_{2ie} + \sum_{i=1}^q N_{2iep}, \quad (1)$$

где  $N$  – нормальная нагрузка, приложенная к шероховатой поверхности,  $N_{1ie}$  – нагрузки на сегменты, контактирующие с покрытием при его упругой деформации и упругой деформации основания,  $N_{1iep}$  – нагрузки на сегменты контактирующие с покрытием при его упругопластической деформации и упругой деформации основания,  $N_{2ie}$  – нагрузки на сегменты, контактирующие с основанием при его упругой деформации,  $N_{2iep}$  – нагрузки на сегменты контактирующие с основанием при его упругопластической деформации,  $j$  – количество сегментов, контактирующих с покрытием при его упругой деформации и упругой деформации основания,  $k$  – количество сегментов, контактирующих с покрытием при его упругопластической деформации и упругой деформации основания,  $l$  – количество сегментов, контактирующих с основанием при его упругой деформации,  $q$  – количество сегментов, контактирующих с основанием при его упругопластической деформации. Данную задачу можно решить численным методом [6] при пошаговом приращении внедрения.

Результаты тестирования модуля показали хорошую сходимость с экспериментами. На рис. 1 приведены результаты компьютерного моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, имеющих функциональные покрытия и соответствующие им экспериментальные данные [7,8]. Точки соответствуют экспериментальным данным, линии – результатам компьютерного моделирования.

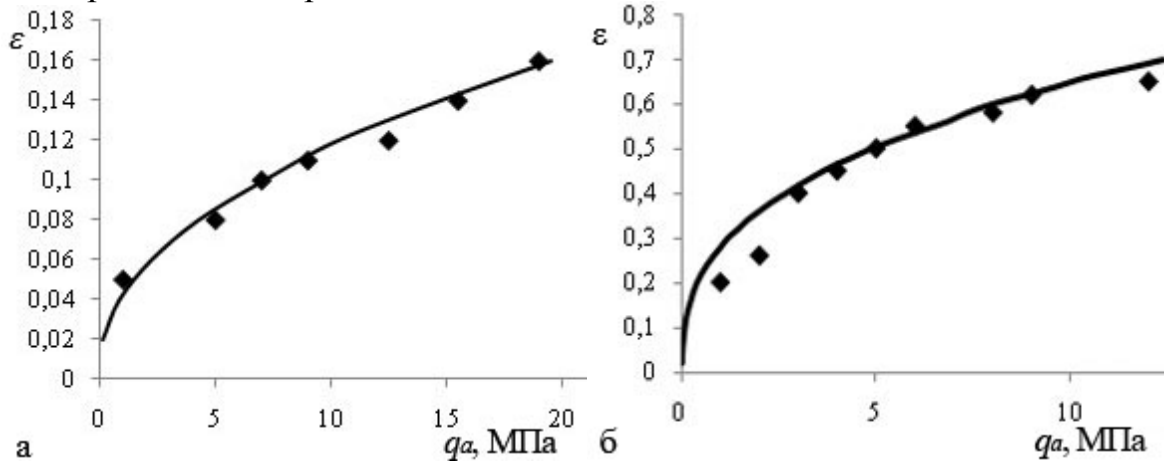


Рис. 1. Относительное сближение стальных образцов, имеющих функциональные покрытия: а) золото  $\delta = 16$  мкм; б) ФБФ74-Д  $\delta = 20$  мкм

**Модуль фрикционного взаимодействия.** Модуль является подключаемым и наследует предыдущие этапы моделирования [9].

Результирующую силу трения для сегментов, находящихся в контакте, можно рассчитать, как:

$$F = \sum_{i=1}^j F_{1ie} + \sum_{i=1}^t F_{1iep} + \sum_{i=1}^l F_{2ie} + \sum_{i=1}^q F_{2iep}, \quad (2)$$

где  $F$  – суммарная сила трения,  $F_{1ie}$  – силы трения на сегментах, контактирующих с покрытием при его упругой деформации,  $F_{1iep}$  – силы трения на сегментах, контактирующих с покрытием при его упругопластической деформации,  $F_{2ie}$  – силы трения на сегментах, контактирующих с основанием при его упругой деформации,  $F_{2iep}$  – силы трения на сегментах, контактирующих с основанием при его упругопластической деформации,  $j$  – количество сегментов, контактирующих с покрытием при его упругой деформации,  $t$  – количество сегментов, контактирующих с покрытием при его упругопластической деформации,  $l$  – количество сегментов, контактирующих с полупространством при его упругой деформации,  $q$  – количество сегментов контактирующих с полупространством при его упругопластической деформации.

Основные входные параметры принимаются из общего интерфейса программы, поэтому параметры микрогеометрии, физико-механические свойства исследуемых материалов и покрытий, а также законы их статистического распределения уже присутствуют на данном этапе моделирования.

Тестирование модуля проводилось с использованием экспериментальных данных [8] (рис. 2). При исследовании использовались образцы с твёрдосмазочными покрытиями ВНИИНП-230 толщиной 0,03мм (маркеры - ромбы), ВНИИНП-212 толщиной 0,03мм (маркеры - квадраты) и ВНИИНП-212 толщиной 0,005 мм (маркеры - треугольники). Представленные экспериментальные данные удовлетворительно соответствуют результатам компьютерного моделирования (контурные маркеры).

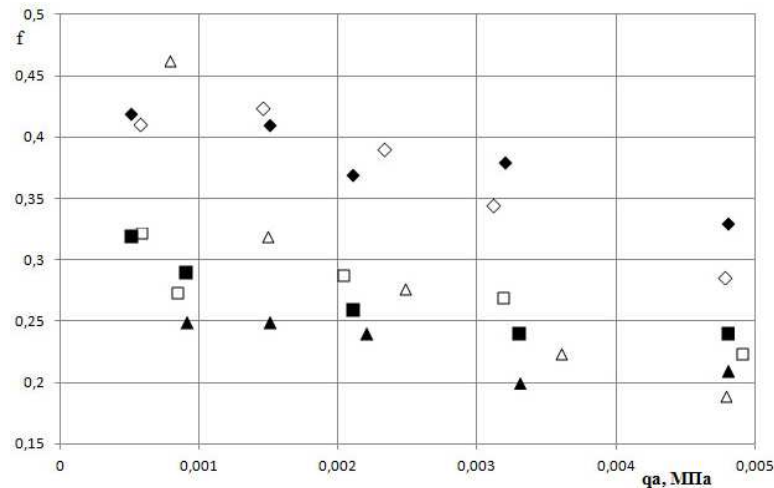


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных значений коэффициента трения для твёрдосмазочных покрытий с результатами компьютерного моделирования

**Модуль термического сопротивления.** Модуль является подключаемым и также наследует этапы моделирования морфологии технических поверхностей и их контактного взаимодействия. Входными данными для расчёта являются теплофизические свойства контактирующих материалов и покрытий.

Термическое сопротивление дискретного контакта можно представить как совокупность параллельных термических сопротивлений единичных пятен контакта, сформировавшихся под действием внешней нагрузки. Следовательно, для теплонагруженного шероховатого контакта термическое сопротивление  $R_{um}$  можно определить как:

$$1/R_{um} = \sum_{i=1}^{n_r} (1/R_{nmi}), \quad (3)$$

где  $n_r$  – число микронеровностей, вступивших в контакт с покрытием,  $R_{nmi}$  – термическое сопротивление единичного пятна контакта с покрытием.

В качестве математической модели для расчёта термического сопротивления единичного контакта использовались результаты, полученные в работе [10].

Тестирование программного средства проводилось сопоставлением с экспериментальными данными работы [11] (рис. 3). Контурными маркерами показаны результаты компьютерного моделирования, чёрными – экспериментальные данные.

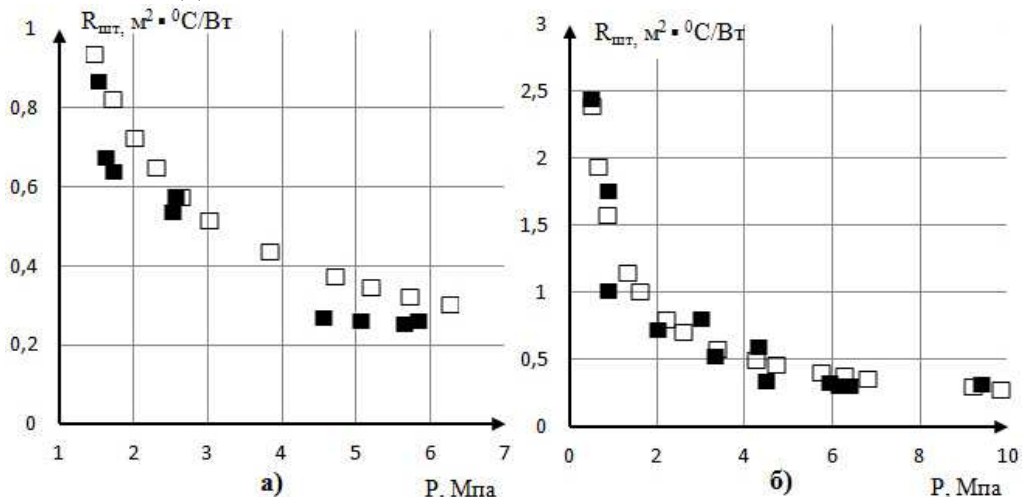


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных с моделируемыми для нерж. стали: а) чистовое шлифование; б) предварительное шлифование

Приведённые данные показывают сходимость экспериментальных и моделируемых результатов.

**Заключение.** Сформулированы принципы прогнозирования функциональных свойств трибосопряжений на основе дискретно-событийного компьютерного моделирования и разработано программное средство позволяющее проводить вычислительные эксперименты для трибосопряжений различного назначения. Оптимизация обработки данных и ориентация на объектную структуру позволяют адекватно описывать морфологию технических поверхностей и выполнять моделирование различных физико-механических процессов, протекающих на пятнах фактического контакта. Возможность изменять входные параметры моделирования в широких диапазонах позволяет оптимизировать функциональные свойства трибосопряжений на стадии их проектирования.

### Список литературы

1. Greenwood J.A. Contact of nominally flat surfaces/ J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson // Proc. Roy. Soc., Ser.A, vol. 295, № 1442, 1966, p. 300-319.
2. Дёмкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Дёмкин, Э.В. Рыжов. – М. Машиностроение, 1981. – 224 с.
3. Goryacheva I.G. Mechanics of discrete contact // Tribology International. 2006, vol.39, p. 381-386.
4. Bhushan B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact // Tribology letters. 1998. №4. P. 1-35.
5. Шилдт Г. Полное руководство С# 4.0. – М.: Изд-во «Вильямс», 2011. – 1056 с.
6. Сутягин О.В. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей / О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, А.А. Рачишкин // Трение и износ // Научно-теоретический журнал. Минск: «Наука и техника». 2015. Т. 36, №5. С. 536-545.
7. Алексеев Н.М. Металлические покрытия опор скольжения. – М. Наука, 1973. – 75 с.
8. Сутягин О.В. Контакт шероховатых тел с твёрдосмазочными покрытиями./ О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, М.В. Васильев. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2014. – 124с.
9. Сутягин О.В. Компьютерное моделирование фрикционного взаимодействия шероховатых поверхностей / О.В. Сутягин, А.А. Рачишкин, А.Н. Болотов, Г.Б. Бурдо // Трение и износ: Научно-теоретический журнал. Минск: «Наука и техника». 2016. Т. 37, №4. С. 427-435.
10. Коротков М.А. К вопросу о влиянии покрытия на электрическое и термическое сопротивления плоского единичного контакта для двухслойного полупространства / М.А. Коротков, О.В. Сутягин, Э.А. Деменков // Инженерно-физический журнал: Минск. 1994. Т. 67, №1-2. С. 154-161.
11. Thomas T.R. Correlations for thermal contact conductance in vacuum / T.R. Thomas, S.D. Probert // Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 94C. 1972, p. 176-180.

### Сведения об авторе:

*Рачишкин Андрей Александрович* – к.т.н, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов», ТвГТУ, г.Тверь.