

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>
Выпуск 6 (25) 2014 ноябрь – декабрь <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-6-14>
URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf>
DOI: 10.15862/10TVN614 (<http://dx.doi.org/10.15862/10TVN614>)

УДК 531.43: 519.876.5

Измайлов Владимир Васильевич

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»
Россия, Тверь¹
Профессор
Доктор технических наук
E-mail: iz2v@tvcom.ru

Чаплыгин Сергей Андреевич

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»
Россия, Тверь
Аспирант
E-mail: chaplygin-sergey@mail.ru

Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин

¹ 170002, Тверь, пр. Чайковского 31, 73

Аннотация. Разработана числовая модель дискретного контакта реальных технических поверхностей, имеющих отклонения от идеальной геометрической формы, основанная на расчете параметров взаимодействия всех неровностей поверхности (микрошероховатость, наношероховатость) в отдельности. Выступы поверхности моделируются сферическими сегментами, размеры которых – высота и радиус закругления вершины – являются случайными числами, распределенными по некоторому статистическому закону. В качестве наиболее гибкого и универсального было выбрано двухпараметрическое бета-распределение. Также был проведен обзор некоторых существующих моделей, описывающих контактное взаимодействие, обсуждены их преимущества и недостатки. Приведены теоретические соотношения, на которые опирались авторы в своей работе. Адекватность разработанной числовой модели проверена путем сопоставления в частных случаях результатов моделирования с расчетами по известным аналитическим зависимостям. Таким образом, были сопоставлены деформационные опорные кривые, а также деформация и фактическая площадь дискретного контакта в зависимости от нормальной нагрузки. Полученные данные показали хорошую сходимость двух приведенных подходов к моделированию, даже при том, что использованные авторами аналитические модели построены в предположении постоянства радиусов закругления вершин выступов. Результаты работы подтверждают правомерность такого предположения.

Проанализировано влияние наномасштабных неровностей на так называемую физическую площадь контакта с помощью разработанной числовой модели. Результаты моделирования говорят о том, что для дискретного контакта поверхностей, полученных технологическими методами обработки, обеспечивающими неровности шероховатости малой высоты (12 класс шероховатости и выше) с большими радиусами закругления вершин, влияние наношероховатости (субшероховатости) может быть заметным.

Ключевые слова: числовая модель; контактная механика; шероховатость; наношероховатость; бета-распределение; деформационная опорная кривая; контактная деформация; фактическая площадь дискретного контакта; физическая площадь контакта.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Измайлов В.В., Чаплыгин С.А. Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6 <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10TVN614

Введение

Дискретный характер контакта деталей самых разнообразных по конструкции и назначению технических устройств обусловлен отклонениями контактирующих поверхностей от идеальной геометрической формы и наличием неровностей широкого размерного диапазона: начиная от макромасштабного и кончая наномасштабным уровнем. Дискретность контакта проявляется в пониженной контактной жесткости по сравнению с объемной, дополнительными, по сравнению с объемными, электрическим и термическим сопротивлениями контактов, утечкой среды через контактные уплотнения и т.д. На площадках контакта отдельных неровностей контактирующих поверхностей происходят процессы адгезионного и фрикционного взаимодействия, локального разрушения поверхностей (изнашивания).

Контактное взаимодействие поверхностей составляет предмет контактной механики [1-5]. При описании процессов контактирования используются как аналитические, так и числовые модели. Примером аналитических моделей являются модель Н.Б. Демкина [1] и модель Дж. Гринвуда и Дж. Вильямсона [6], не потерявшие своей актуальности и в настоящее время, хотя они, безусловно, уточнялись и развивались [7]. Числовые модели [8, 9] по сравнению с аналитическими позволяют учесть дополнительные факторы и уточнить описание процессов контактного взаимодействия. Это уточнение связано, например, с учетом распределения размеров и формы отдельных неровностей контактирующих поверхностей, механизма деформации материала поверхностного слоя (упругая или упругопластическая), наличия покрытий и т.п. Для описания деформации отдельных неровностей в числовых моделях часто используется метод конечных элементов [10,11].

Каждый из упомянутых подходов – аналитический и числовой – следует рассматривать не как антагонистические, а как дополняющие друг друга способы описания сложных комплексных процессов контактного взаимодействия, совместное использование которых повышает достоверность разрабатываемых моделей дискретного контакта.

Целью настоящей работы является сравнение числового и аналитического моделирования дискретного контакта для описания некоторых его характеристик, демонстрация возможностей и предсказание некоторых новых результатов на базе предлагаемых моделей.

1. Исходные предпосылки числовой модели дискретного контакта

Большинство числовых моделей дискретного контакта построены на сходных в принципиальных чертах алгоритмах [12]. Разрабатываемая авторами модель не является в этом смысле исключением. Отдельные неровности поверхности (микрошероховатость, наношероховатость) моделируются сферическими сегментами, размеры которых - высота и радиус закругления вершины – являются случайными числами, распределенными по некоторому статистическому закону. В качестве наиболее гибкого и универсального нами выбрано двухпараметрическое бета-распределение [13]. Плотность вероятности случайной величины x , подчиняющейся бета-распределению, описывается функцией

$$f(x) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1}(1-x)^{b-1},$$

где a и b – параметры бета-распределения, Γ - символ гамма-функции. Случайная величина x , в соответствии с принятыми предпосылками, представляет собой либо высоту единичной неровности, либо радиус закругления ее вершины. Поскольку функции распределения для этих величин не обязательно совпадают, впоследствии будем обозначать

параметры бета-распределения как, a и b для высоты единичной неровности, v и w для радиуса закругления ее вершины.

Для единичного контакта (рис. 1) рассчитывается ряд характеристик, например, нормальная нагрузка, воспринимаемая выступом, площадь единичного контакта, проводимость единичного контакта и т.п. Затем рассчитываются аддитивные характеристики всего ансамбля контактирующих неровностей, например, воспринимаемая контактом нормальная нагрузка, площадь фактического контакта, проводимость контакта. Результаты приводятся в виде зависимости некоторой эксплуатационной характеристики контакта от приложенной к контакту нормальной нагрузки или, предпочтительнее, от номинального контактного давления.

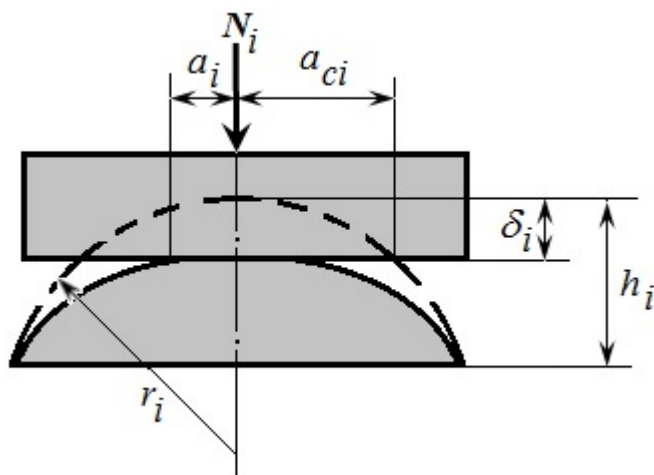


Рис. 1. Схема единичного контакта сферической неровности с гладкой плоской поверхностью. a_i - радиус площадки единичного контакта отдельной неровности, a_{ci} - радиус геометрического сечения единичной неровности.

В основу модели положены следующие теоретические соотношения.

Деформация единичной неровности δ_i под действием нормальной силы N_i :

- при упругом контакте [5]

$$\delta_i = \left(\frac{9}{16} \cdot \frac{N_i^2}{r_i E^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где r_i - радиус закругления вершины неровности, E^* - эквивалентный модуль Юнга, $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$, $E_{1,2}$ и $\mu_{1,2}$ - модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих поверхностей соответственно;

- при упругопластическом контакте [5]

$$\delta_i = \delta_{i\text{кр}} \left(0,5 \frac{N_i}{N_{i\text{кр}}} + 0,5 \sqrt{\frac{N_i}{N_{i\text{кр}}}} \right), \quad (2)$$

где $\delta_{i\text{кр}}$ и $N_{i\text{кр}}$ - критические деформация и нагрузка, соответствующие переходу от упругого контактирования к упругопластическому. Вычисляются эти величины по формулам:

$$\delta_{i\text{кр}} = 5 \frac{H^2 r_i}{E^{*2}}; N_{i\text{кр}} = 14 \frac{H^3 r_i^2}{E^{*2}}, \quad (3)$$

где H - твердость менее твердого материала контактирующих деталей;

Радиус единичной площадки контакта рассчитывается по формуле:

$$a_i = \sqrt{2\alpha r_i \delta_i}, \quad (4)$$

где α – коэффициент, учитывающий отличие площади контакта от геометрической площади сечения неровности из-за упругой деформации (осадки) выступа (рис. 1). Рассчитывается данный коэффициент по формуле

$$\alpha = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{N_{i\text{кр}}}{N_i}}}. \quad (5)$$

При $N = N_{\text{кр}}$ (упругий контакт) $\alpha = 0,5$ и формула (4) переходит в формулу для упругого контакта $a_i = \sqrt{r_i \delta_i}$. При $N_i \gg N_{\text{кр}}$ (пластический контакт) $\alpha = 1$ и площадь контакта совпадает с геометрической площадью сечения неровности.

2. Результаты числового моделирования и их сравнение с аналитическими расчетами

Для числового моделирования дискретного контакта были выбраны две условные поверхности, параметры шероховатости которых следующие: 1) «гладкая» поверхность (соответствует 8 классу шероховатости): $R_p = 1$ мкм, $r_{\text{max}} = 200$ мкм, $tm = 0,5$; 2) «грубая» поверхность (соответствует 5 классу шероховатости): $R_p = 10$ мкм, остальные параметры те же. Здесь R_p – наибольшая высота неровностей над средней линией, т.е. расстояние от средней линии профиля до линии выступов, r_{max} – наибольший радиус закругления вершин неровностей, tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии [1,5]. Материал контактирующих деталей – сталь, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, твердость (точнее, микротвердость) в первом случае 2000 МПа, во втором – 1000 МПа. Остальные параметры приводятся при обсуждении конкретных результатов.

2.1. Деформационная опорная кривая

Одной из важнейших топографических характеристик микрогеометрии поверхности является так называемая кривая опорной поверхности, она же опорная кривая, она же кривая Аббота [14]. Она характеризует распределение материала шероховатой поверхности по высоте шероховатого слоя, точнее зависимость суммарной площади сечения неровностей A_s от вертикальной координаты y , которую отсчитывают иногда от линии выступов, иногда от линии впадин, иногда от средней линии. Н.Б. Демкиным [1] предложена аналитическая зависимость, описывающая начальную часть опорной кривой (выше средней линии):

$$\eta_s = t_m \varepsilon^\nu, \quad (6)$$

где $\eta_s = A_s/A_n$ – относительная площадь сечения неровностей шероховатого слоя, равная отношению суммарной площади сечения на некотором уровне A_s к номинальной площади контакта A_n , которая определяется геометрическими размерами детали, $\varepsilon = y/R_p$ – относительный уровень сечения, равный отношению вертикальной координаты y , отсчитанной от линии выступов, к величине R_p , ν – эмпирический показатель степени опорной кривой.

Необходимо уточнить, что выражение (6) описывает так называемую *геометрическую* опорную кривую, которая представляет собой чисто топографическую характеристику поверхности. Ее не следует отождествлять с *деформационной* опорной кривой, описывающей зависимость отношения суммарной площади контакта неровностей A_r (так называемая фактическая площадь контакта) к номинальной площади A_n от деформации контакта δ . Причина несовпадения геометрической и деформационной опорных кривых – упругая деформация неровностей (рис.1). Деформационная опорная кривая может быть описана выражением, аналогичным (6):

$$\eta_r = \alpha t_m \varepsilon^\nu, \quad (7)$$

где $\eta_r = A_r/A_n$ – относительная фактическая площадь контакта, $\varepsilon = \delta/Rp$ – относительная деформация контакта. Коэффициент $\alpha = 0,5$ для полностью упругого контакта, $\alpha = 1$ для полностью пластического контакта и $0,5 < \alpha < 1$ для упругопластического контакта.

На рис.2 показана деформационная опорная кривая для «грубой» поверхности. Видим, что при малых деформациях контакт преимущественно упругий и $\alpha = 0,5$ (точки лежат вплотную к линии для упругого контакта). При больших деформациях контакт становится преимущественно пластическим и $\alpha = 1$ (точки лежат вплотную к линии для пластического контакта). Аналитически учесть изменение коэффициента α от 0,5 до 1 по мере деформации было бы затруднительно, в числовой модели контакта это не составляет никакого труда и происходит, можно сказать, автоматически.

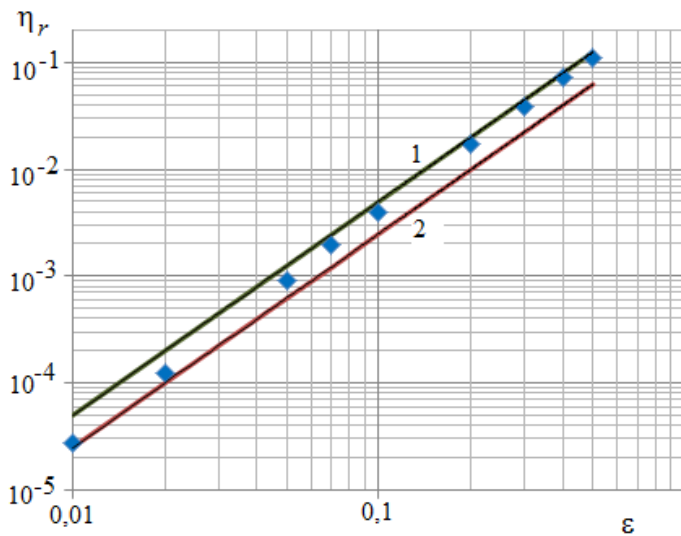


Рис.2. Деформационная опорная кривая для «грубой» поверхности. Параметры бета-распределения $a=b=v=w=1$, что соответствует $v = 2$. Линия 1 построена по уравнению (7) для полностью пластического контакта при $\alpha = 1$, $t_m = 0,5$ и $v = 2$, линия 2 – по тому же уравнению для полностью упругого контакта при $\alpha = 0,5$, $t_m = 0,5$ и $v = 2$. Точки – результаты моделирования.

Влияние параметров функции плотности распределения высот и радиусов неровностей иллюстрируется таблицей 1. Уравнения деформационной опорной кривой в последней колонке таблицы получены аппроксимацией результатов моделирования по методу наименьших квадратов.

Таблица 1

Влияние параметров бета-распределения высот и радиусов выступов на форму кривой опорной поверхности

Модельная поверхность	Параметры бета-распределения	Уравнения кривых опорных поверхностей
«Гладкая»	$a=b=v=w=2$	$\eta_r = 0,387\varepsilon^{2,94}$
	$a=b=v=w=3$	$\eta_r = 0,571\varepsilon^{3,74}$
«Грубая»	$a=b=v=w=1$ (равномерное распределение)	$\eta_r = 0,513\varepsilon^{2,12}$
	$a=b=v=w=2$	$\eta_r = 0,362\varepsilon^{2,88}$
	$a=b=v=w=3$	$\eta_r = 0,457\varepsilon^{3,60}$

Из таблицы 1 видно, что чем дальше распределение высот и радиусов неровностей от равномерного (параметры a и b увеличиваются), тем больше показатель степени опорной кривой, тем меньше жесткость контакта таких поверхностей.

2.2. Деформация и фактическая площадь дискретного контакта в зависимости от нормальной нагрузки

Важнейшими эксплуатационными характеристиками дискретного контакта являются его деформация и фактическая площадь контакта [1, 5]. На рис. 3 показаны эти зависимости для модельных поверхностей.

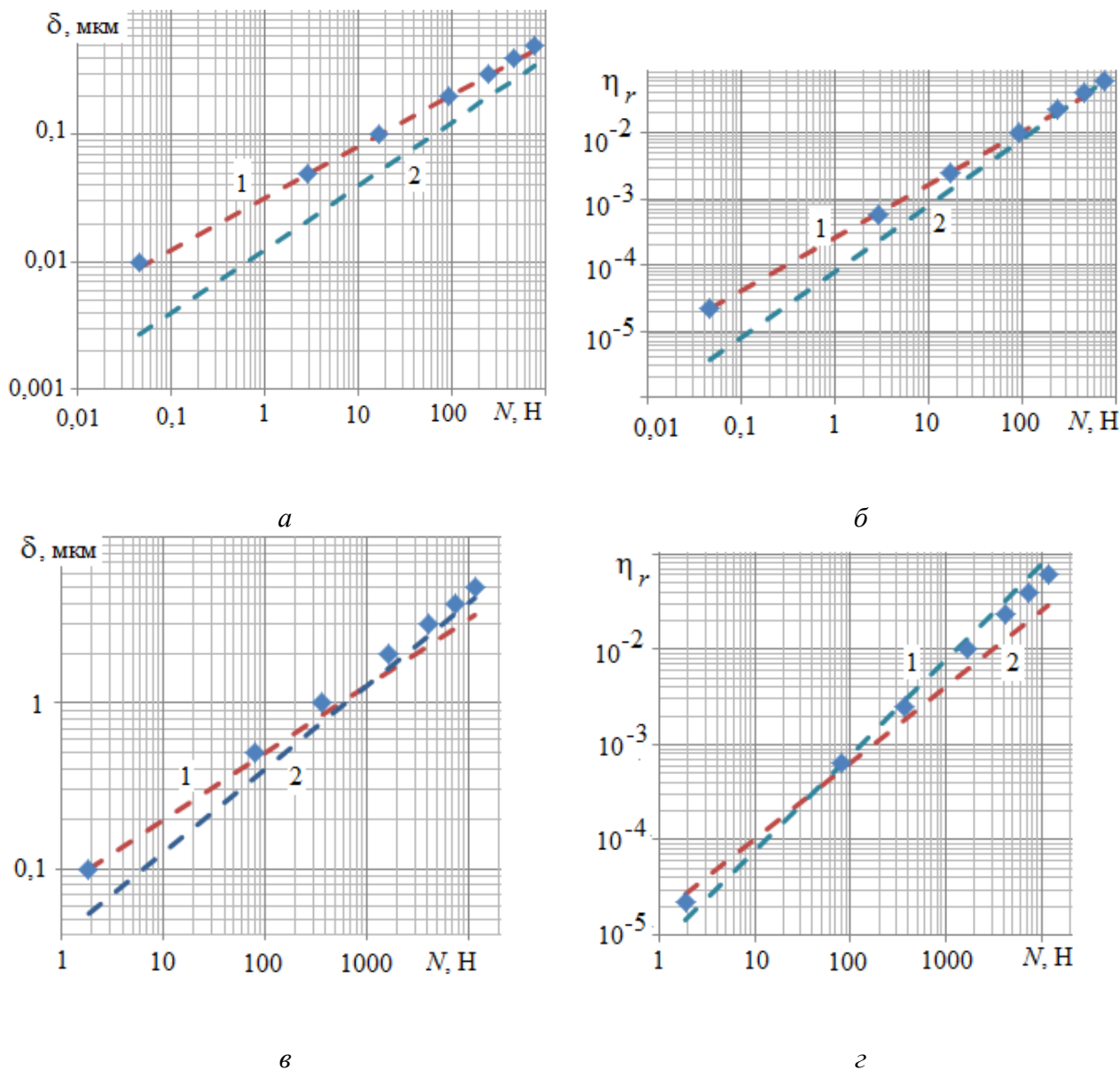


Рис.3. Зависимости деформации контакта δ (а, в) и относительной площади фактического контакта η_r (б, г) от нормальной нагрузки на контакт N . а и б – «гладкая» поверхность, в и г – «грубая» поверхность. Номинальная площадь контакта $A_n = 6,4 \text{ мм}^2$ и $A_n = 64 \text{ мм}^2$ для «гладкой» и «грубой» поверхностей соответственно. Линия 1 – расчет по известным теоретическим зависимостям [1] для упругого контакта, линия 2 – то же для пластического контакта. Точки – результаты моделирования. Распределение высот и радиусов выступов равномерное.

Представленные на рис.3 результаты численного моделирования прежде всего демонстрируют хорошую сходимость с результатами теоретического расчета характеристик контакта по существующим аналитическим моделям [1]. Это при том, что использованные

нами аналитические модели построены в предположении постоянства радиусов закругления вершин выступов. Выполненное нами числовое моделирование дискретного контакта подтверждает правомерность такого предположения. Обратим внимание на рис. 3 в и г. На них видно, как зависимости характеристик контакта от приложенной нагрузки, полученные на числовой модели контакта, с ростом нагрузки плавно переходят от аналитической зависимости, соответствующей упругому контактированию, к аналитической зависимости, соответствующей пластическому контактированию. В аналитической модели такой плавный переход описать затруднительно. Для «гладкой» поверхности в представленном диапазоне нагрузок контактирование носит практически полностью упругий характер, так как доля пластически деформированных выступов мала.

2.3. О фактической и физической площадях контакта

В аналитической модели дискретного контакта Н.Б. Демкина [1] очень плодотворной оказалась концепция трех площадей контакта: номинальной, контурной и фактической. Первая определяется геометрическими размерами контактирующих деталей и задается конструктором на чертеже. Это первый, макромасштабный уровень. Вторая обусловлена контактированием неровностей, образующих волнистость поверхности. Это второй, миллиметровый масштабный уровень. Третья образована контактированием отдельных неровностей шероховатости. Это третий, микрометровый масштабный уровень. К моменту разработки модели дискретного контакта Н.Б. Демкина не было достаточно надежных и доступных метрологических средств измерения параметров неровностей поверхности наномасштабного уровня. После создания атомного силового микроскопа (АСМ) такие возможности появились. Соответственно, возникает задача учесть следующий, наномасштабный уровень контактирования в расчетах характеристик контакта, в первую очередь площадей контакта.

С помощью разработанной числовой модели дискретного контакта мы проанализировали влияние наномасштабных неровностей на так называемую физическую площадь контакта. Термин «физическая площадь контакта» использован авторами работы [15], будем и мы его придерживаться. Применяя концепцию площадей контакта различного масштабного уровня Н.Б. Демкина, будем считать фактическую площадь контакта по установившейся терминологии площадью контакта первого масштабного уровня (аналог контурной или номинальной площади), а физическую площадь контакта – площадью контакта второго масштабного уровня (аналог фактической площади контакта). Соответственно реальное (фактическое) контактное давление $p_r = N/A_r$ для шероховатости будет выступать в качестве номинального (контурного) давления для наношероховатости.

Моделирование показало следующее. Даже для «гладкой» поверхности 8 класса шероховатости (см. выше), соответствующей таким технологическим способам обработки поверхности, как полирование или поверхностное пластическое деформирование [16], влияние наношероховатости, или субшероховатости (термин, также используемый авторами работы [15]) несущественно. Поэтому были приняты в качестве модельных новые условные поверхности, характеристики которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики модельных поверхностей

Шероховатость				Субшероховатость		
Обработка	Rp , мкм	r_{max} , мкм	t_m	Rp , нм	r_{max} , нм	t_m
Полирование	0,5	1500	0,5	10	200	0,55
Доводка	0,1	1000	0,5			

Параметры шероховатости приняты в соответствии с работой [16], в качестве параметров субшероховатости приняты параметры реальной поверхности, а именно - рабочей поверхности концевой меры длины (т.н. плитка Иогансона), измеренные с помощью атомного силового микроскопа. Материал контактирующих поверхностей – сталь, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, твердость $H = 8$ ГПа.

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Они свидетельствуют о том, что для поверхностей с неровностями шероховатости очень малой высоты (12 класс шероховатости и выше) и большими радиусами закругления вершин неровностей шероховатости фактическая площадь контакта может на порядок и более превосходить физическую площадь контакта. Это различие площадей контакта может сказаться, например, на электрической или термической проводимости контакта и других процессах, протекание которых происходит в точках непосредственного атомарного взаимодействия контактирующих поверхностей.

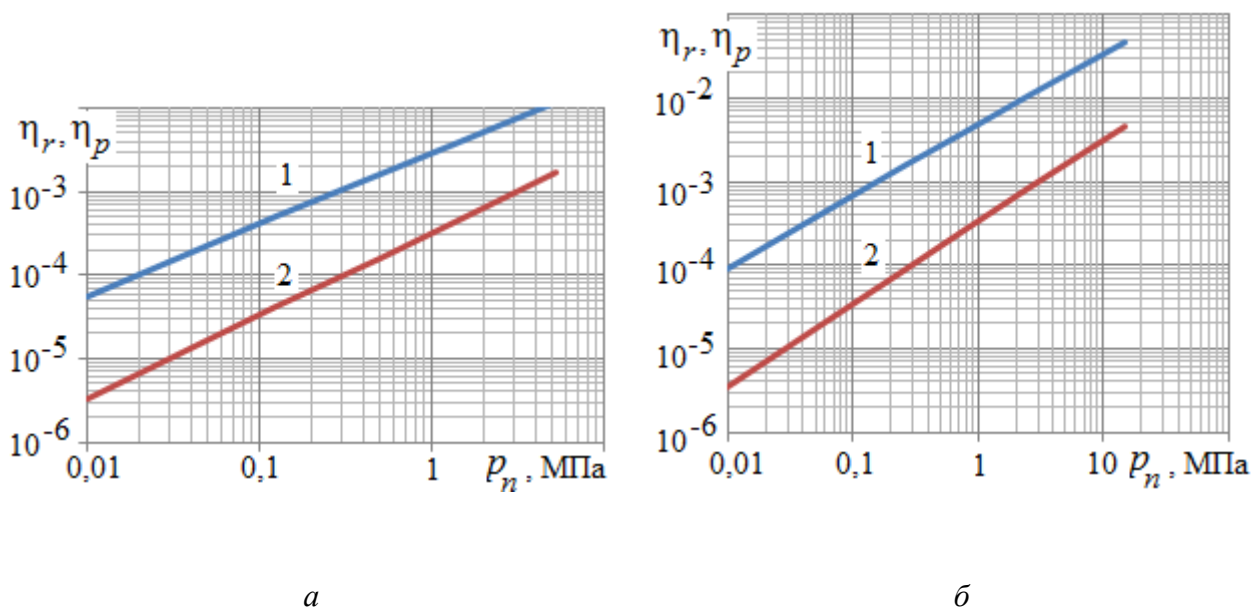


Рис. 4. Зависимость относительных фактической η_r (линия 1) и физической η_p (линия 2) площадей контакта от номинального контактного давления p_n . а – обработка поверхности полированием, б – обработка поверхности доводкой (табл. 2).

Выводы

1. Аналитические и числовые модели дискретного контакта технических поверхностей показывают хорошую сходимость результатов в сходных условиях нагружения контакта. Это обстоятельство следует рассматривать как свидетельство адекватности как одного, так и другого подхода. Вместе с тем, числовое моделирование позволяет учесть дополнительные особенности процессов контактного взаимодействия, которые не учитываются в аналитических моделях.
2. Применение числового моделирования контактного взаимодействия к расчету характеристик контакта на микро- и наномасштабном уровнях показало, что для дискретного контакта поверхностей, полученных технологическими методами обработки, обеспечивающими неровности шероховатости малой высоты (12 класс шероховатости и выше) с большими радиусами закругления вершин, влияние наношероховатости (субшероховатости) может быть заметным. Оно проявляется в том, что физическая площадь контакта, образованная контактированием неровностей наномасштабного уровня, на порядок и более отличается в меньшую сторону от фактической площади контакта, образованной контактированием неровностей микромасштабного уровня. Этот результат необходимо учитывать в расчетах эксплуатационных характеристик дискретного контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение. — 1981. — 244 с.
2. Джонсон К. Л. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир. — 1989. — 510 с.
3. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 352 с.
4. Barber J.R., Ciavarella M. Contact mechanics. // International Journal of Solids and Structures. — 2000, v.37, Issues 1–2. PP. 29 – 43.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость. — Тверь: ТвГТУ, 2010. — 112 с.
6. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // Proc.Roy.Soc. 1966. v. A295. № 1442. P. 300-319.
7. Тигетов Д. Г. Разработка и исследование вероятностных моделей взаимодействия шероховатых поверхностей в процессе трения: Дис. ... канд. техн. наук. — М. — 2010. — 267 с.
8. Демкин Н. Б., Измайлов В. В. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей // Трение и износ. — 2010 т.31, № 1, с. 68—77.
9. Ильин А.В., Плохов И.В., Козырева О.И. Моделирование процессов электрофрикционного взаимодействия в узлах скользящего токосъема // Научно-технический вестник Поволжья - 2013, №4 с. 166 – 173.
10. Kogut L., Etsion I. A Finite Element Based Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces. // Tribology Transactions. — 2003. - v.46, No3. - PP.383-390.
11. Болотов А.Н., Сутягин О.В., Васильев М.В. Исследование упругопластических контактных деформаций металлов применительно к процессам фрикционного взаимодействия. // Известия Самарского научн. центра Российской академии наук, 2011 . – т.13, №4(3), с. 977 – 981.
12. Левыкин Д.А. Математическая модель электрического контакта шероховатых поверхностей. Программные продукты и системы. — 2011, №4. — С. 178 – 180.
13. Измайлов В.В., Курова М.С. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта шероховатых тел // Трение и износ. 1983. Т. IV. № 6. С. 983-990.
14. Abbot E.J., Firestone F.A. Specifying surface quality // Mech. Eng. 1933. V. 55. № 9. P. 569-572.
15. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск: Навука і тэхніка, 1990. 272 с.
16. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. — Киев: Наукова думка. — 1984. — 272 с.

Рецензент: Заместитель проректора по научной работе Тверского государственного технического университета, д.х.н., профессор М.Г. Сульман.

Izmailov Vladimir Vasilievich
Tver State Technical University (TSTU)
Russia, Tver
E-mail: iz2v@tvcom.ru

Chaplygin Sergey Andreevich
Tver State Technical University (TSTU)
Russia, Tver
E-mail: chaplygin-sergey@mail.ru

Numerical and analytical simulation of machine parts discrete contact

Abstract. The numerical model of a discrete contact of real engineering surfaces has been developed. This model is based on the calculation of surface irregularities (microroughness, nanoroughness) interaction and takes into account the surface perfect form deviations. Surface irregularities are simulated by spherical segments. Their heights and tip radii of curvature are considered as a random numbers being distributed in accordance with some statistical law. The two-parameter beta-distribution was preferred as a most adaptable and versatile.

Certain contact interaction models have been reviewed, their advantages and disadvantages are discussed. Theoretical backgrounds of developed model are discussed too.

The developed numerical model validity was estimated by means of comparison of modelling results with analytical calculations in particular cases. In this way the deformation bearing curve were compared as well as the contact deformation and the real contact area as the functions of normal load. The comparison shows a good matching of the above two approaches to the contact interaction characterization even in the assumption of constant tip radii of asperities in analytical models of a discrete contact. Thus, the author results validate this assumption.

The influence of nanoscale surface irregularities on a so called physical contact area was estimated by means of the developed numerical model of a discrete contact. The modelling revealed that nanoscale roughness (subroughness) may strongly influence on discrete contact of smooth surfaces (12 surface finish class and higher) with great asperities tip radii.

Keywords: numerical model; contact mechanics; roughness; nanoroughness; beta-distribution; deformation bearing curve; contact deformation; real area of the discrete contact; physical contact area.

REFERENCES

1. Demkin N. B., Ryzhov E. V. Kachestvo poverkhnosti i kontakt detaley mashin. — M.: Mashinostroenie. — 1981. — 244 s.
2. Dzhonson K. L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya. — M.: Mir. — 1989. — 510 s.
3. Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseniya. — M.: FIZMATLIT, 2013. — 352 s.
4. Barber J.R., Ciavarella M. Contact mechanics. // International Journal of Solids and Structures. — 2000, v.37, Issues 1–2. PP. 29 – 43.
5. Izmaylov V.V., Novoselova M.V. Kontakt tverdykh tel i ego provodimost'. — Tver': TvGTU, 2010. — 112 s.
6. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // Proc.Roy.Soc. 1966. v. A295. № 1442. R. 300-319.
7. Tigetov D. G. Razrabotka i issledovanie veroyatnostnykh modeley vzaimodeystviya sherokhovatykh poverkhnostey v protsesse treniya: Dis. ... kand. tekhn. nauk. — M. — 2010. — 267 s.
8. Demkin N. B., Izmaylov V. V. Zavisimost' ekspluatatsionnykh svoystv friktsionnogo kontakta ot mikrogeometrii kontaktiruyushchikh poverkhnostey // Trenie i iznos. — 2010 t.31, № 1, s. 68—77.
9. Il'in A.V., Plokhov I.V., Kozyreva O.I. Modelirovanie protsessov elektrofriktsionnogo vzaimodeystviya v uzlakh skol'zyashchego tokos"ema // Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya - 2013, №4 s. 166 – 173.
10. Kogut L., Etsion I. A Finite Element Based Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces. // Tribology Transactions. — 2003. - v.46, No3. - PP.383-390.
11. Bolotov A.N., Sutyagin O.V., Vasil'ev M.V. Issledovanie uprugoplasticheskikh kontaktnykh deformatsiy metallov primenitel'no k protsessam friktsionnogo vzaimodeystviya. // Izvestiya Samarskogo nauchn. tsentra Rossiyskoy akademii nauk, 2011. — t.13, №4(3), s. 977 – 981.
12. Levykin D.A. Matematicheskaya model' elektricheskogo kontakta sherokhovatykh poverkhnostey. Programmnye produkty i sistemy. — 2011, №4. — S. 178 – 180.
13. Izmaylov V.V., Kurova M.S. Primenenie beta-raspredeleniya dlya rascheta kharakteristik kontakta sherokhovatykh tel // Trenie i iznos. 1983. T. IV. № 6. S. 983-990.
14. Abbot E.J., Firestone F.A. Specifying surface quality // Mech. Eng. 1933. V. 55. № 9. P. 569-572.
15. Sviridenok A.I., Chizhik S.A., Petrokovets M.I. Mekhanika diskretnogo friktsionnogo kontakta. Minsk: Navuka i tekhnika, 1990. 272 s.
16. Ryzhov E. V. Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostoykosti detaley mashin. — Kiev: Naukova dumka. — 1984. — 272 s.