

УДК 537.311.4

ВЛИЯНИЕ НАНОТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22

iz2v@tvcom.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.210

Аннотация: Рассмотрено влияние отклонения реальных поверхностей технических устройств от идеальной формы на микро- и наномасштабном уровне на электрическое сопротивление дискретного контакта твердых тел. Показано, что влияние наношероховатости на величину контактного электрического сопротивления незначительно как в контакте номинально плоских поверхностей, так и в локальном контакте шар – плоскость.

Ключевые слова: поверхность, микрошероховатость, наношероховатость, контакт, контактное электросопротивление.

1. Введение

Данная работа продолжает предыдущую публикацию авторов [1], в которой рассматривалось влияние нанотопографии на реальную площадь контакта технических поверхностей. Дискретный характер контакта реальных технических поверхностей проявляется, в частности, в том, что перенос носителей тепловой и электрической энергии через контакт происходит не по всей номинальной (геометрической) площади контакта, а лишь через малую ее часть, образованную контактированием неровностей поверхностей различного масштабного уровня. В миниатюрных и микроминиатюрных технических устройствах, которые получают все большее распространение, основную роль играют неровности микромасштабного и наномасштабного уровня – микрошероховатость и наношероховатость (иногда ее называют субшероховатость). Остальные отклонения от идеальной формы поверхности не играют существенной роли из-за больших характерных размеров по сравнению с размерами области контакта.

Дискретность контакта технических поверхностей является причиной дополнительного сопротивления (электрического, термического), которое называют контактным и которое зависит, в том числе, от топографии поверхности.

Целью данной работы является оценка влияния микро- и нанотопографии поверхности на контактное электрическое сопротивление.

Сразу оговоримся, что в работе не рассматривается влияние различного рода поверхностных пленок, которые практически всегда присутствуют на поверхности и вносят порой значительный вклад в

электрическое сопротивление контакта. Такое допущение оправдано тем, что во многих ответственных электрических и электромеханических устройствах применяются детали или покрытия из золота, которое наименее склонно к образованию оксидных и других поверхностных пленок.

2. Параметры модельных контактных соединений

Расчеты электрического сопротивления контакта поверхностей с неровностями двух масштабных уровней (микро- и наношероховатости) проводили на модели дискретного контакта [2]. Материал контактирующих деталей – золото. Параметры микро- и наношероховатости модельных поверхностей приведены в Таблице 1, физико-механические характеристики материалов контактирующих деталей – в Таблице 2.

Таблица 1. Параметры микро- и нанотопографии контактирующих поверхностей

Микрошероховатость		Наношероховатость	
R_p , мкм	r_{max} , мкм	R_p , нм	r_{max} , нм
1	1000	15	500

Таблица 2. Физико-механические свойства материалов контактирующих деталей

E , ГПа	H_μ , МПа	H_n , МПа	ρ , мкОм·м
77	470	2500	0,023

В Таблицах 1, 2 использованы следующие обозначения: R_p – максимальная высота неровностей над уровнем средней плоскости шероховатости, r_{max} – максимальный радиус закругления вершин неровностей, E – модуль Юнга, H_μ – микротвердость, H_n – твердость на наномасштабном уровне, ρ – удельное электросопротивление. Величины E, H_μ, ρ взяты из справочной литературы [3]. Параметры микрошероховатости соответствуют типичным значениям для поверхностей, полученных, например, полированием. Величина H_n и параметры наношероховатости определены нами с помощью атомного силового микроскопа SOLVER P47-PRO с наносклерометрической приставкой (НИЦ «Инженерия поверхности», ТвГТУ, Тверь) на реальных деталях.

3. Контакт номинально плоских поверхностей

Эквивалентная схема замещения контактного сопротивления в одном из контактирующих тел представлена на рис. 1.

незначительно увеличивает контактное электросопротивление по сравнению с микрошероховатостью, несмотря на то, что так называемая физическая площадь контакта, образованная совокупностью контактирующих неровностей наношероховатости, на порядок меньше т.н. фактической площади контакта, образованной всеми контактирующими неровностями микрошероховатости. Такой несколько неожиданный результат объясняется тем, что сопротивление множественного дискретного контакта определяется не суммарной площадью контакта, а, можно сказать, его суммарным периметром Π . Действительно, сопротивление контакта n неровностей со средним радиусом площадки единичного контакта a_m можно рассчитать по формуле

$$R = \rho / (2na_m) = \rho \pi / \Pi. \quad (2)$$

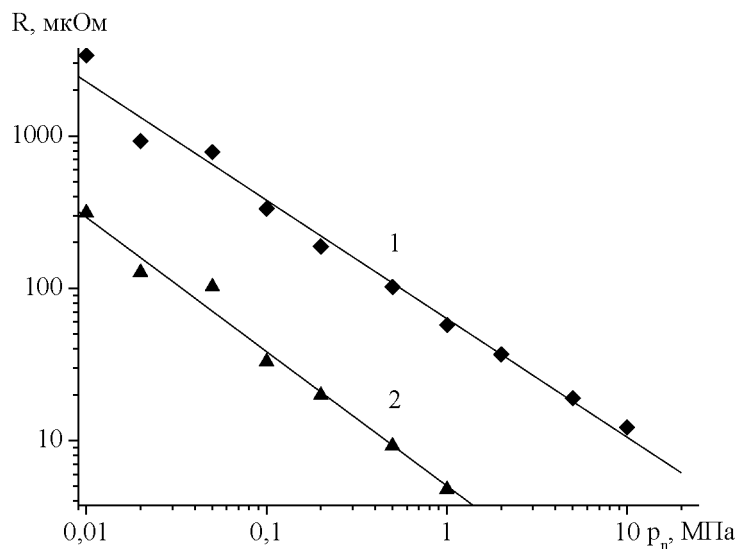


Рис. 2. Зависимость сопротивления контакта R от номинального контактного давления p_n : 1 – сопротивление, обусловленное микрошероховатостью; 2 – сопротивление, обусловленное наношероховатостью. Номинальная площадь контакта 1 мм^2 . Точки – результат моделирования; линии – аппроксимирующие зависимости.

Гораздо меньший средний радиус площадок контакта неровностей наношероховатости по сравнению с микрошероховатостью компенсируется непропорционально бóльшим числом контактирующих неровностей, в результате чего, как следует из формулы (3), сопротивление слоя наношероховатости оказывается меньше, чем микрошероховатости.

4. Локальный контакт шар-плоскость

Как отмечалось в работе [1], во многих случаях контактирующие поверхности деталей механизмов и приборов имеют сферическую или цилиндрическую формы. Контурная площадка контакта в этих случаях имеет круговую или эллиптическую форму. Стягивание линий тока к этой

площадке является причиной одной из составляющих сопротивления контакта. Вторая составляющая обусловлена дискретностью контакта в пределах контурной площадки из-за присутствия нанощероховатости на поверхности контактирующих тел. Из-за малых размеров контурной площадки (диаметр ее порядка нескольких микрон) микрошероховатость в данном случае не играет роли и может быть проигнорирована [1].

Эквивалентная схема замещения контактного сопротивления в контакте шар – плоскость представлена на рис. 3.

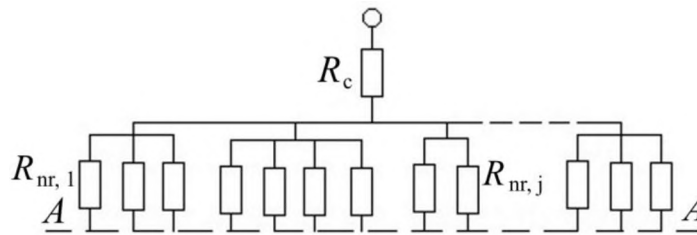


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения сопротивления контакта шар – плоскость для одного из двух контактирующих тел. R_c – сопротивление стягивания линий тока к контурной площадке контакта. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

Для иллюстрации влияния нанотопографии поверхности контактирующих тел на электросопротивление контакта рассмотрим локальный контакт шар плоскость на вышеупомянутой модели контакта. Радиус шарового индентора 0,5 мм, параметры нанотопографии те же, что в предыдущем разделе для плоских поверхностей. Нагрузка на шаровой индентор меняется в диапазоне 0,5÷10 мН. Материал контактирующих деталей – золото. Так как радиус контурной площадки контакта $a_c \approx (3 \div 5)$ мкм, то есть гораздо больше длины свободного пробега электронов, сопротивление стягивания R_c рассчитывали по формуле (1) с заменой a_i на a_c . Размеры контурной площадки контакта рассчитывали с учетом влияния нанотопографии поверхностей по методике, описанной в работе [1]. Сопротивление единичных площадок контакта неровностей нанотопографии рассчитывали по формуле (2). Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Для сравнения на рис. 4 представлены результаты расчета сопротивления контакта гладких шара и плоскости. В этом случае сопротивление контакта совпадает с сопротивлением стягивания к контурной площадке контакта R_c , а расчет радиуса контактной площадки a_c выполняли по известной формуле Г. Герца [1].

Из полученных результатов следует, что значения сопротивления контакта, рассчитанные с учетом присутствия нанотопографии на

поверхностях контактирующих деталей практически совпадают с расчетом сопротивления контакта гладких тел (линии 1 и 2). То есть нанощероховатость, как и в предыдущем случае, слабо влияет на величину контактного электросопротивления. Правда, объяснение этому несколько иное, и состоит оно в следующем.

Присутствие нанощероховатости на поверхности контактирующих тел увеличивает размеры контурной площадки контакта шар – плоскость [1], уменьшая тем самым величину сопротивления стягивания R_c по сравнению с контактом гладких тел (поэтому линия 3 расположена ниже линии 2). Но та же нанощероховатость приводит к дискретному характеру контакта, что создает дополнительное сопротивление (линия 4), которое, суммируясь с сопротивлением R_c , компенсирует уменьшение последнего из-за увеличения размеров контурной площадки контакта. Небольшое расхождение величин контактного сопротивления, рассчитанных с учетом и без учета нанощероховатости, наблюдается лишь при малых контактных нагрузках (см. рис. 4).

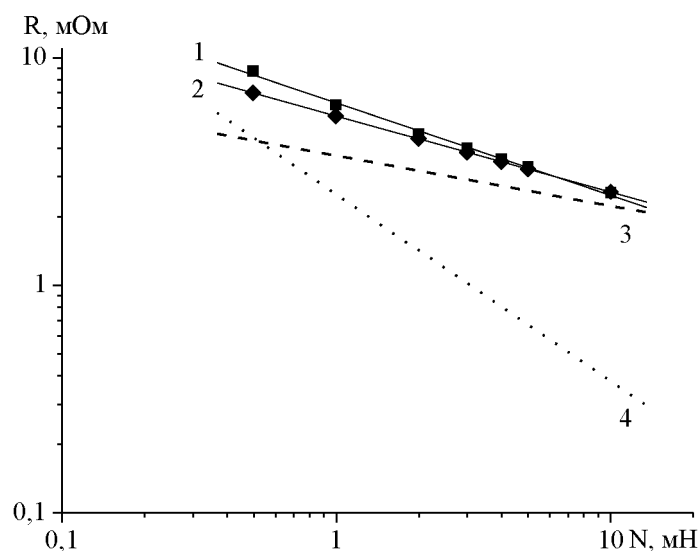


Рис. 4. Зависимость сопротивления контакта R от нагрузки на контакт N : 1 – сопротивление, рассчитанное с учетом нанощероховатости; 2 – сопротивление, рассчитанное для гладких тел; 3 – сопротивление стягивания к контурной площадке контакта; 4 – результирующее сопротивление единичных контактов неровностей нанотопографии. Точки – результат моделирования; линии – аппроксимирующие зависимости.

5. Заключение

Наличие на поверхности реальных твердых тел наряду с микрошероховатостью неровностей наномасштабного уровня (нанощероховатости), казалось бы, должно влиять на такие характеристики контакта, как контактная проводимость или контактное

сопротивление, что необходимо учитывать при расчетах. Однако результаты моделирования дискретного контакта твердых тел, приведенные в данной статье, показывают, что наличие наношероховатости вносит незначительный вклад в расчетные значения контактного сопротивления как в контакте номинально плоских тел, так и в локальном контакте шар – плоскость. Поэтому с достаточной для практических целей точностью расчет контактного электрического сопротивления можно проводить без учета влияния наношероховатости. Объяснение этого несколько неожиданного результата приводится в статье.

Отметим, что приведенное выше утверждение относится только к величине сопротивления (проводимости) контакта. При расчете других характеристик контакта, например, реальной площади контакта или силы трения, влияние наношероховатости необходимо учитывать [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-08-00614).

Библиографический список:

1. **Измайлов, В.В.** Влияние нанотопографии поверхностей на характеристики дискретного контакта твердых тел / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. – Вып. 8. – С. 139-144.
2. **Измайлов, В.В.** Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин / В.В. Измайлов, С.А. Чаплыгин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2014. – № 6 (25). – 13 с. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf>. – Загл. с экрана. doi: 10.15862/10TVN614.
3. Физические величины: Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
4. **Мышкин, Н.К.** Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. – 560 с.
5. **Nikolić, B.** Electron transport through a circular constriction / B. Nikolić, P.B. Allen // Physical Review B. – 1999. – V. 60. – I. 6. – P. 3963-3969.