01;05

Эффект скачкообразного изменения площади контакта между поверхностями со случайными шероховатостями

© А.Э. Филиппов, В.Л. Попов

Донецкий физико-технический институт, Украина
Берлинский технический университет, Германия

Поступило в Редакцию 28 апреля 2005 г.

Рассмотрена численная модель контакта двух упругих тел со статистически случайной шероховатостью. При их приближении площадь реального контакта сначала возрастает линейно с нормальной силой. Коэффициент пропорциональности зависит от спектральной плотности профиля поверхности. При дальнейшем увеличении сдавливающей силы площадь контакта испытывает два последовательных скачка. Это поведение универсально и проявляется при различном выборе спектральной плотности случайной поверхности как в двумерном, так и в трехмерном случае. Обсуждается физическая причина наблюдаемых особенностей, а также их роль в контактной механике мягких материалов (например, резина, биологические системы). Описанный эффект может быть использован для создания принципиально новых адгезивных систем, проявляющих сильную адгезию при приложении критической сжимающей силы.

Введение. Поверхностная шероховатость играет большую роль во многих технических приложениях, связанных с трением, износом, адгезией, уплотнениями, самоклеящимися слоями, электрическими и тепловыми контактами [1]. При приведении тел с шероховатыми поверхностями в контакт „реальная площадь“ контакта обычно намного меньше „номинальной площади“. Величина реальной площади контакта определяет электрическое и термическое сопротивление между телами. Величина микроконтактов и механичечких напряжений в микроконтактах в конечном счете определяет величину частиц износа, а тем самым износоустойчивость материала. Величина реальной площади контакта играет определяющую роль также и в процессах трения. В качестве микроскопического механизма трения можно представлять себе разрушение микроскопических связей между контактирующими поверхностями. Прочность этих связей, а тем самым и сила трения, согласно этим представлениям, должны быть примерно пропорциональными реальной площади контакта.

Зависимость реальной площади контакта от нормальной силы изучалась многими авторами. В простейшей модели шероховатая поверхность представляет собой регулярный ряд сферических выступов. Полная сила в этом случае сводится к сумме одинаковых сил, каждая из которых может быть вычислена на основании теории Герца [2]. Площадь каждого микроконтакта, а тем самым и полная площадь контакта (получаемая просто умножением на постоянное в этом случае число контактов) в этом случае $A \sim F^{2/3}$. Эта зависимость противоречит как прямым экспериментам, так и закону Амонтона, согласно которому сила трения примерно пропорциональна нормальной силе. Это противоречие впервые было разрешено Гринвудом и Вильямсоном [3], которые учли, что реальные поверхности имеют не регулярную, а случайную шероховатость. Они показали, что даже при одинаковом радиусе кривизны учет распределения высот микроконтактов по высоте приводит к почти линейному (с логарифмическими поправками) соотношению между площадью контакта и нормальной силой.

Перссон [1] показал, что поверхность контакта шероховатых поверхностей со случайным распределением как по высотам, так и по радиусам кривизны микроконтактов пропорциональна сдавливающей силе. Предпосылкой, однако, является малость реальной плотности контакта по сравнению с номинальной. В настоящей работе мы выходим за пределы этого приближения и исследуем зависимость площади контакта от нормальной силы во всм интервале нормальных сил вплоть до момента, когда поверхности приходят в контакт во всех точках.

Модель. В настоящей работе мы рассматриваем упрощенную дискретную модель упругих тел. Она представляет собой ряд эквидистантно расположенных материальных точек, упруго связанных с жесткой поверхностью, имеющей заданный профиль. Профиль поверхности генерируется таким образом, чтобы как спектральная плотность, так и распределение шероховатостей по высоте соответствовало типичным данным, измеряемым в эксперименте [1]. Поверхность генерировалась путем случайного „набрасывания“ гауссианов со случайной высотой и шириной пика. Типичные спектральная плотность и распределение высот $z(x, y)$ (сплошная черная линия) и локальных пиков показаны на

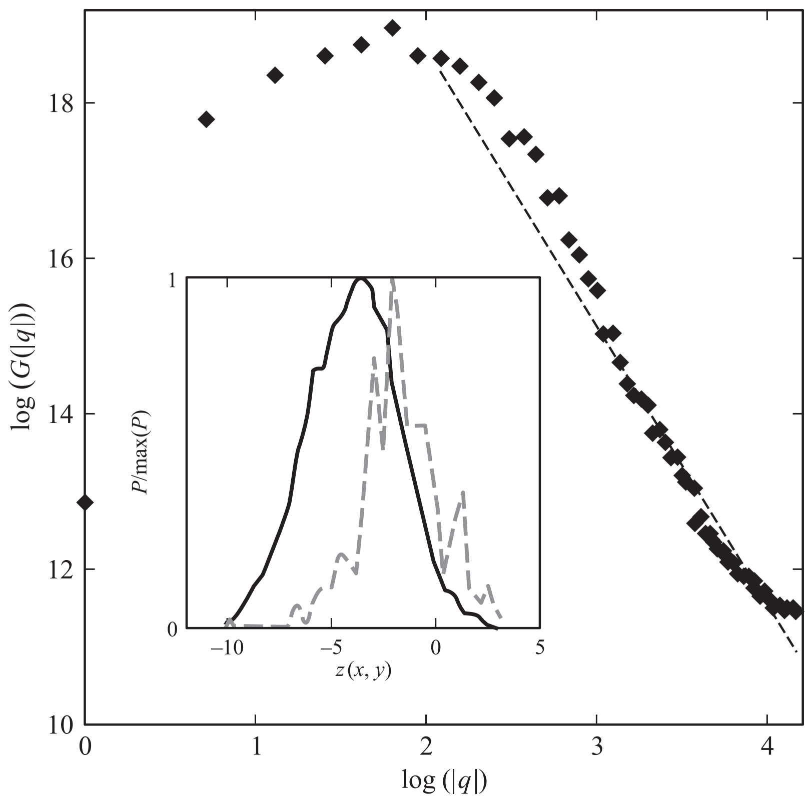

Рис. 1. Спектральная плотность для поверхности, полученной процедурой случайного набрасывания, описанной в тексте. Штриховая линия на фрагменте имеет наклон, соответствующий спектральной плотности большинства реальных поверхностей, имеющих фрактальную размерность D_f 2.2. На вставке показаны распределение высот $z(x, y)$ (сплошная черная линия) и локальных пиков для той же поверхности.

рис. 1. Асимметрия распределения $P = P(z)$ соответствует асимметрии пиков и впадин реальных поверхностей [1], которая была воспроизведена заданием различных (в среднем) положительных и отрицательных амплитуд случайно разбрасываемых гауссиан.

Динамические уравнения для сформулированной выше модели имеют вид

$$\partial z_1/\partial t = K_z(w_1(x,y) - z_1(x,y)) - F_{repulsion};$$

$$\partial z_2/\partial t = K_z(w_2(x,y) - z_2(x,y)) + F_{repulsion} - P_{external}. \quad (1)$$

Здесь K_z — постоянная упругости для связи между подвижными элементами („материальными точками“) верхней и нижней поверхностей, расположенными в позициях с координатами $z_{2,1}(x,y)$ соответственно, и фиксированными затравочными формами тех же поверхностей $w_{2,1}(x,y)$. Внешнее давление $P_{external}$ приложено только к верхней (второй плате).

Влияние внутренних (объемных) слоев системы на подвижные поверхностные элементы $z_{2,1}(x,y)$ учтено посредством введения экспоненциально нарастающей в глубь образца „мягкой“ стенки $F_{repulsion} = C\exp((z_1(x,y) - z_2(x,y))/\lambda)$ с амплитудой C и характерной шириной нарастания взаимодействия λ соответственно.

Поскольку в данной работе мы интересуемся лишь квазистатическими трансформациями поверхностей под нагрузкой, а их инерция несущественна, то можно ограничиться упрощенными (передемпфированными) вариантами уравнений движения (1).

Зависимость площади контакта от сдавливающей силы. Нами были исследованы как двумерная, так и трехмерная модель. В двумерной модели роль „площади“ играет длина контакта. Зависимость длины контакта от приложенной нормальной силы для двумерной модели изображена на рис. 2.

При малых силах длина контакта имеет асимптотику, пропорциональную силе. При дальнейшем росте нормальной силы площадь контакта при некотором критическом значении силы испытывает скачок. Еще большее увличение силы ведет к дальнейшему плавному увеличению площади вплоть до второго скачка, когда площадь контакта становится практически равной номинальной, полной площади. Описанные скачки являются типичной особенностью зависимости площади контакта от силы и наблюдаются независимо от выбранной спектральной плотности поверхности.

Аналогичная картина наблюдается и в трехмерном случае. На рис. 3 представлена зависимость площади контакта от нормальной силы для трехмерной модели. Основные особенности: линейная асимптотика при

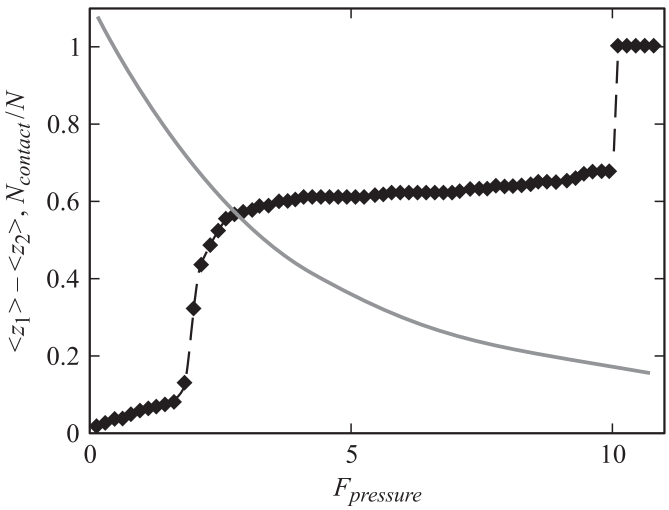

Рис. 2. Зависимость длины контакта и среднего расстояния между поверхностями (серая сплошная линия) от приложенной нормальной силы $F_{pressure}$ в двумерной модели.

малых силах и последующие два скачка имеют место и в этом случае. Это явление ранее не было описано в литературе.

Физическая причина скачков состоит в следующем. Когда нагрузка невелика и поверхности трансформированы незначительно, их контакт (в соответствии с известной теорией [1]) имеет место лишь в крайне незначительной части точек. При увеличении нагрузки их число медленно нарастает. Комбинированный эффект трансформации поверхностей в окрестности контактирующих локальных максимумов и появление новых, меньших по величине, максимумов, вступающих в контакт, приводит к практически линейной зависимости суммарной площади контакта от приложенной силы. Однако распределение поверхности по высоте имеет четко выраженный максимум. Когда давление достаточно велико, поверхность трансформируется настолько сильно, что в контакт включается большая масса точек из области максимума распределения. Нарастание площади контакта становится нелинейным и определяется уже не статистикой разброса отдельных особенностей, а структурой

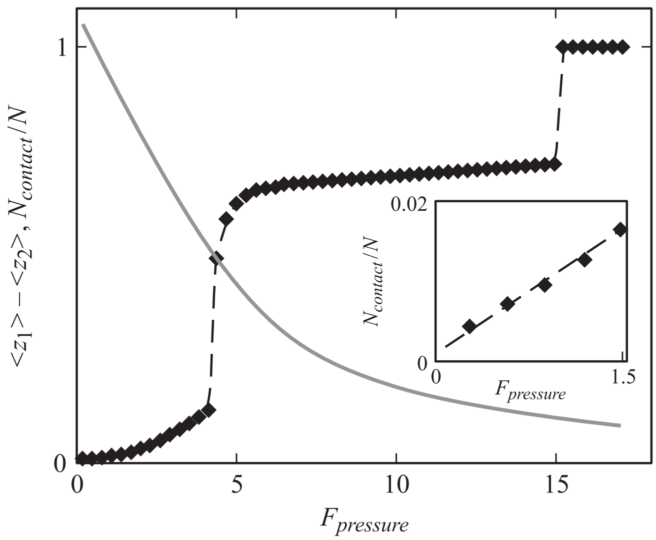

Рис. 3. Зависимость длины контакта от приложенной нормальной силы $F_{pressure}$ в трехмерной модели. На вставке показана линейная асимптотика при малой приложенной силе.

распределения поверхности по высоте в области максимума распределения.

Явление быстрого (нелинейного, или практически скачкообразного) изменения площади контакта имеет значение для систем, для которых полный контакт в упругой области реально достижим. К ним относятся такие материалы, как резина или биологические ткани [4,5]. Скачкообразное изменение площади контакта должно приводить к скачкообразному увеличению адгезии при достижении критической силы сдавливания и к скачкообразному увеличению силы трения. После второго скачка площадь контакта оказывается практически равной полной площади поверхности. Этот эффект важен для уплотнений: оптимальное уплотнение достигается при достижении вполне определенной критической силы. Оба эффекта могут быть использованы для создания адгезивных материалов с дискретно регулируемой силой адгезии и для расчета и дизайна уплотнений.

Авторы благодарны Deutsche Forschungsgemeinschaft за финансовую поддержку.

Список литературы

[1] *Persson B.N.J., Albohr O., Tartaglino U., Volokitin A.I., Tosatti E.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. V. 17. R1–R62.
[2] *Ландау, Лифшиц.* Теория упругости. М.: Наука, 1987. §9.
[3] *Greenwood J.A., Williamson J.B.P.* // Proc. R. Soc. 1966. V. A295. P. 300.
[4] *Persson B.N.J., Gorb S.* // J. Chem. Phys. 2004. V. 119. P. 11437.
[5] *Geim A.K., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Novoselov K.S., Zhukov A.A., Shapoval S.Yu.* // Nature (London). 2003. V. 2. P. 461.