

УДК 531.7:539.6:539.21.211

ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ И АТТРАКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙА. Я. ГРИГОРЬЕВ*, А. М. ДУБРАВИН, А. В. КОВАЛЕВ, И. Н. КОВАЛЕВА, О. Ю. КОМКОВ,
Н. К. МЫШКИН

С помощью контактного адгезиометра, выполненного в виде чувствительных электромагнитных весов с отрицательной обратной связью исследованы силы адгезии между образцами из стали, кремния, окиси титана и пробным телом в виде кремниевой сферы. Контролируемый подвод образца к пробному телу позволил определить зависимость действующих между телами сил от расстояния между ними. Результаты измерений работы адгезии, межфазной энергии и влияния шероховатости на силу адгезии хорошо согласуются с известными экспериментальным данным и теоретическим оценками.

Ключевые слова: адгезия, аттракционные поверхностные силы, молекулярное взаимодействие, технические поверхности.

Введение. Приграничные слои соприкасающихся или разделенных малым зазором тел находятся в поле действия поверхностных сил, обусловленных различными электрическими, физико-химическими и механическими явлениями [1–3]. Являясь равнодействующей сил притяжения и отталкивания, результирующее взаимодействие сложным образом зависит от расстояния между телами, их геометрии и свойств поверхностных слоев.

Измерение аттракционного взаимодействия реальных объектов является одной из наиболее сложных экспериментальных задач. Малые значения сил и расстояний, на которых они проявляются, выдвигают целый ряд специфических требований к измерительной аппаратуре. Первые успешные измерения, инициированные развитием теории молекулярного взаимодействия твердых тел, были проведены в середине 50-х гг. [4, 5]. Поскольку основной целью этих экспериментов являлась проверка теории, то после ее верификации интерес к соответствующим методикам значительно снизился, возобновившись вновь лишь в связи с произошедшим в последнее десятилетие развитием прецизионной техники, микромеханики и нанотехнологий.

Известно, что многие проблемы связанные с неработоспособностью MEMS (micro-electro-mechanical system) обусловлены адгезионным взаимодействием их деталей — как в процессе сборки, так и при эксплуатации [6]. Снижение возникающих сил притяжения с помощью мономолекулярных самоорганизующихся пленок, как аналога граничной смазки, также требует оценки эффективности их применения [7]. Большинство соответствующих экспериментов в этой области проводятся с помощью атомно-силовой микроскопии (atomic-force microscopy — AFM) и аппаратов измерения поверхностных сил (surface force apparatus — SFA) [8].

Аналитические возможности этих приборов ориентированы на измерение молекулярной компоненты аттракционного взаимодействия в диапазоне от нескольких нН до сотен мН на расстояниях от долей нм до нескольких мкм. К сожалению, вследствие конструктивных особенностей, оба прибора имеют ограничения по выбору материалов пробного тела (кремний, слюда) и позволяют интерпретировать результаты измерений только в рамках модели единичного контакта. К образцам предъявляются особые требования по чистоте и шероховатости поверхности, соответствующие максимальному приближению к понятию молекулярно-гладкой однородной фазы. На

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ. Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

* Автор, с которым следует вести переписку.

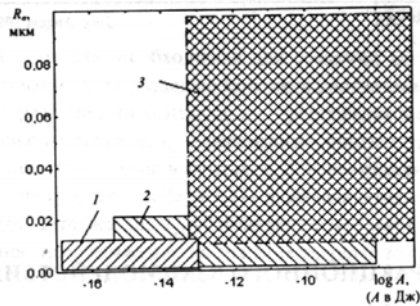


Рис. 1. Соотношение рабочих характеристик приборов для исследования аттракционного взаимодействия с топографическими свойствами исследуемых поверхностей: 1 — AFM; 2 — SFA; 3 — диапазон шероховатости и ожидаемых значений работы адгезии для технических поверхностей

рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая соотношение рабочих характеристик AFM и SFA со свойствами исследуемых поверхностей.

Представление о технических поверхностях как о молекулярно-гладкой однородной фазе далеки от действительности — они шероховаты, негомогенны, на них всегда присутствуют пленки различной природы, электрические заряды, участки с остаточной намагниченностью. Поэтому можно ожидать, что значение работы адгезии для таких поверхностей будут существенно выше, чем для ювенильных. В этой связи, задача распространения результатов измерений, проведенных с помощью AFM и SFA на анализ контактных явлений, для технических поверхностей требует принятия существенных допущений.

Анализ данных, представленных на рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что известные методы (AFM, SFA) не удовлетворяют требованиям, необходимым для проведения исследований технических поверхностей и задача разработки соответствующей аппаратуры актуальна как для теоретических, так и практических приложений контактной механики и трибологии.

В данной работе рассматривается конструкция прибора для проведения прямых измерений поверхностных сил технических поверхностей, и приводятся экспериментальные результаты, полученные при исследовании ряда тестовых образцов. Поскольку при исследовании технических объектов практически невозможно выделить отдельные компоненты адгезионного взаимодействия, последнее определялось как результат действия «обширной группы аттракционных взаимодействий: от схватывания чистых твердых поверхностей до разнообразных явлений их соединения с помощью промежуточного слоя третьего вещества» [1].

Схема контактного адгезиометра. Первые эксперименты по измерению притяжения реальных объектов были осуществлены с помощью динамометра с силоизмерителем на основе емкостного датчика [4]. Метод заключался в определении минимального расстояния устойчивого равновесия между силой притяжения двух твердых тел и упругим сопротивлением плоских пружин известной жесткости, на которых они были закреплены. Однако, как отмечается в работе [2], авторам не удалось получить хорошо воспроизводимые результаты. Позже данная схема была усовершенствована — сначала использованием частотного датчика деформации пружины, а затем заменой плоской пружины вертикальным торсионом.

Результаты, полученные Дерягиным с сотрудниками, основывались на использовании горизонтальных весов с отрицательной обратной связью [5]. В дальнейшем этот подход с различными вариациями использовался многими исследователями. Предложенные позже методы, были основаны на измерении наведенных колебаний исследуемого тела от осциллирующего пробного образца [2].

В настоящее время большинство экспериментальных исследований по изучению поверхностных сил проводятся с помощью AFM и SFA. Измерения с помощью AFM проводятся по схеме, идентичной предложенной Овербеком и Спарнаем [4]. Сила взаимодействия измеряется между образцом и иглой с радиусом закругления, составляющим несколько десятков нм, закрепленной на упругой консоли с известной жесткостью. Анализ формы кривых повода — отвода позволяет определить силу адгезии в системе «игла—поверхность» и упругие свойства материала.

Разработанный Израелашвили и Тэйбором поверхностно-силовой прибор SFA [8], в свою очередь, является развитием схемы весов с обратной связью, предложенных Абрикосовой и Дерягиным [5]. Измерения поверхностных сил производятся между двумя перекрещивающимися нитями (цилиндрическими поверхностями из слюды), находящимися на контролируемом друг от друга расстоянии. Область использования прибора — исследования тонких пленок и коллоидов.

Для проведения измерений адгезионного взаимодействия нами была выбрана схема верти-

ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ И АТТРАКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

кальных торсионных весов с отрицательной обратной связью, позволяющая устранить проблемы балансировки и избежать погрешностей, вызванных трением в опоре весов.

Измерительная часть контактного адгезиометра представляет собой вертикально расположенную рамку 1 (рис. 2), подвешенную на струне 2. На одном плече рамки расположен держатель пробного тела 3. На втором плече расположена подвижная катушка 4 измерительного электромагнита, подключенная к высокостабильному источнику тока. К рамке крепится зеркало 5, отражающее пучок излучения лазера 6 через расширитель оптической базы 7 на фотодетектор 8. При силовом взаимодействии на пробное тело, рамка 1 с зеркалом 5 поворачивается, изменяя количество света, падающего на фотодетектор 8. Сигнал с фотодетектора формирует сигнал обратной связи, изменяющий ток в катушке 9 до значения, обеспечивающего обратный поворот рамки в исходное положение. Таким образом, любое изменение действующих между образцами сил компенсируется соответствующим изменением тока, обеспечивая неизменное положение рамки в процессе измерений. Ток в катушке 9 прокалиброван, что, в конечном итоге, позволяет измерить действующие силы между образцом 10 и шариком.

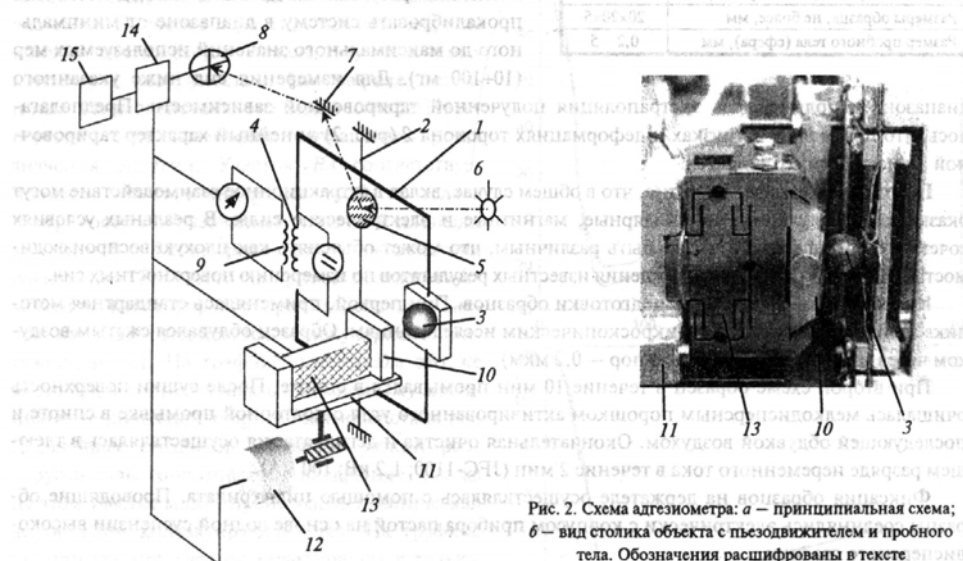


Рис. 2. Схема адгезиометра: а — принципиальная схема; б — вид столика объекта с пьезодвижителем и пробного тела. Обозначения расшифрованы в тексте

Исследуемый образец 10 размещается на столике 11, имеющем систему грубого подвода с приводом от шагового двигателя 12 и точного — с приводом от пьезодвижителя 13.

В исходном положении образец и шарик находятся на расстоянии, исключающем их взаимное влияние друг на друга. Пьезодвижитель 13 растянут и в этом положении ток, протекающий в измерительном электромагните 9, соответствует нулевой силе взаимодействия образцов. Далее образец 10 с помощью шагового двигателя 11 подводится к пробному телу до достижения заданной по условиям эксперимента начальной контактной нагрузки. В зависимости от целей эксперимента, измерительный цикл может быть начат сразу, по достижении требуемой нагрузки, либо после заданного времени выдержки.

Измерение силового взаимодействия производится при отводе образца 10 с помощью пьезодвижителя 13 и построения зависимости действующей между образцами силы от расстояния между ними. В процессе отвода сила взаимодействия образцов меняется, что соответствующим образом компенсируется током в катушке 9, обеспечивающим неизменное положение рамки в процессе измерений. По достижении заданного расстояния отвода, измерения производятся в обратной последовательности — при подводе образца. Результатом эксперимента являются две зависимости, характеризующие силовое взаимодействие при отводе и подводе образца к шарик.

Для защиты от вибраций и термостатирования, прибор размещался на платформе, подвешенной на пружинах в деревянном корпусе с шумоизоляционным слоем пенополистирола и антистатическим экраном из металлизированной полиэтиленовой пленки, расположенном на столе с магнитожидкостным демпфированием.

Непосредственное управление процессом измерений осуществляется программируемым аналогово-цифровым сигнальным процессором 14. Представление результатов эксперимента и задание режимов работы осуществляется программой, связанной с сигнальным процессором через параллельный порт компьютера 15. Основные характеристики прибора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Рабочие характеристики контактного адгезиометра

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых сил, мкН	$10^1 + 10^4$
Диапазон перемещений образца, нм	$10^1 + 10^4$
Размеры образца, не более, мм	20×20×5
Размер пробного тела (сфера), мм	0,2 + 5

Калибровка прибора осуществлялась с помощью эталонных мер весов. Рамка 1 (рис. 2) располагалась горизонтально, на ее плечо помещались разновесы, и измерялся выходной сигнал с электромагнитной катушки. Полученные данные аппроксимировались линейной регрессией. Данный подход позволил прокалибровать систему в диапазоне от минимального до максимального значений используемых мер (10÷100 мг). Для измерения сил ниже указанного

диапазона использовалась экстраполяция полученной тарировочной зависимости. Предполагалось, что при малых нагрузках и деформациях торсиона 2 (рис. 2) линейный характер тарировочной зависимости сохраняется.

Подготовка образцов. Известно, что в общем случае, вклад в аттракционное взаимодействие могут оказывать молекулярные, капиллярные, магнитные и электрические силы. В реальных условиях сочетание этих факторов может быть различным, что может объяснять как плохую воспроизводимость, так и значительные расхождения известных результатов по измерению поверхностных сил.

Использовались две схемы подготовки образцов. При первой, применялась стандартная методика подготовки объектов к микроскопическим исследованиям. Образец обдувался сжатым воздухом через микрофильтр (диаметр пор — 0,2 мкм).

При второй схеме образец в течение 10 мин промывался в спирте. После сушки поверхность очищалась мелкодисперсным порошком активированного угля с повторной промывке в спирте и последующей обдувкой воздухом. Окончательная очистка и дегидратация осуществлялась в тлеющем разряде переменного тока в течение 2 мин (JFC-1100; 1,2 кВ; 100 мА).

Фиксация образцов на держателе осуществлялась с помощью цианкрилата. Проводящие образцы соединялись электрически с корпусом прибора пастой на основе водной суспензии высокодисперсного графита.

Все исследования проводились при НУ: $T = 18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $p \approx 10^5 \text{ Па}$, относительная влажность — 60÷70%. Основные характеристики исследованных образцов, приведены в табл. 2. В качестве пробного тела во всех случаях использовался кремниевый шарик диаметром 1 мм.

Таблица 2. Основные характеристики исследованных образцов

Материал	Описание	Схема подготовки	Шероховатость R_a , мкм
1. Кремний	Подложка для производства микросхем. Кристаллографическая ориентация 111	2	0,005
2. Сталь	Образец шероховатости поверхностей сравнения ГОСТ 9378–93	2	1,25
3. Окись титана на кремнии	Пленка, толщиной 20 нм на кремниевой пластине	1	0,003

Результаты эксперимента. На рис. 3 показан общий вид кривых подвода и отвода пробного тела к поверхности. На этих кривых можно выделить несколько характерных участков.

При движении пробного тела к поверхности (рис. 3, 1) на достаточно больших расстояниях до т. С не происходит какого-либо силового взаимодействия. При дальнейшем сближении образцов вследствие перекрытия силовых поверхностных полей происходит монотонное увеличение аттракционного взаимодействия (участок СВ). В т. В рост силового аттракционного взаимодействия

ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ И АТТРАКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

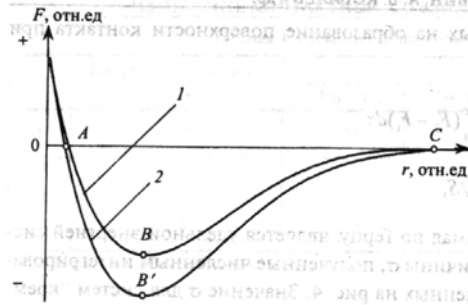


Рис. 3. Характерные зависимости сила-расстояние адгезионного взаимодействия образцов при их подводе (1) и отводе (2)

прекращается, достигая своего максимального значения. Наиболее вероятно, что это место на кривой соответствует начальному точечному контакту с поверхностью. На графике потенциала взаимодействия это место соответствует перегибу, или изменению направления роста значения энергии. Участок *ВА* соответствует процессу упругого внедрения пробного тела в поверхность с образованием конечной площади контакта. В т. *А* суммарная сила взаимодействия равна нулю. Это место на кривой соответствует моменту, когда упругое противодействие внедрению уравновешивается молекулярным притяжением тел. На графике потенциала это же место будет соответствовать наименьшему значению потенциальной энергии взаимодействия тел. Дальнейшее внедрение вызывает резкий рост упругой силы сопротивления внедрению. Так же на этом участке может происходить пластическая деформация контактирующих тел. На графике потенциала этот участок характеризуется резким увеличением энергии взаимодействия.

Кривая отвода (рис. 3, 2) в общем случае не совпадает с соответствующей зависимостью, полученной при подводе образцов. Данное явление многократно обсуждалось в литературе и объясняется гистерезисными потерями [9].

При разделении тел кривые до т. *А* обычно практически совпадают. Различие в наклоне кривых на этом участке может быть объяснено наличием остаточных пластических деформаций в контакте. Участок *АВ'* соответствует процессу упругой разгрузки с уменьшением площади реального контакта до точечного контакта (т. *В'*). Поскольку сила взаимодействия в т. *В'* больше чем в т. *В* на кривой подвода то, очевидно, что для разрушения реального контакта затрачивается энергия большая, чем на его образование.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости силового взаимодействия для образцов, описание которых представлено в табл. 2.

Известно, что в условиях упругого контакта наиболее значимой причиной гистерезиса сил взаимодействия образцов при отводе и подводе является энергия, затрачиваемая на образование адгезионного соединения в контакте. Работу, необходимую на создание адгезионной связи, можно

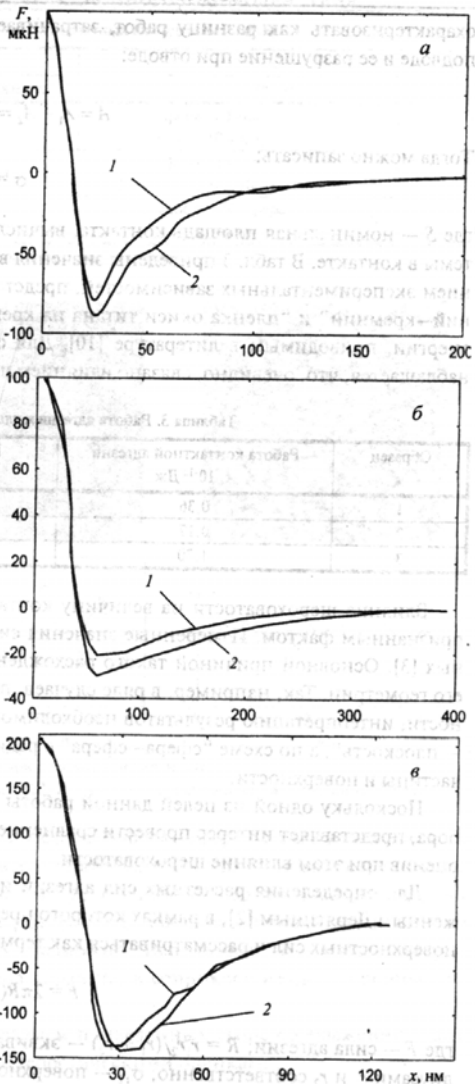


Рис. 4. Экспериментальные кривые сила-расстояние взаимодействия кремниевого шарика с образцами: а - кремний; б - сталь; а - окись титана на кремнии; 1 - подвод образцов; 2 - отвод образцов

охарактеризовать как разницу работ, затрачиваемых на образование поверхности контакта при подводе и ее разрушение при отводе:

$$A = A_1 - A_2 = \int_{x_A}^c (F_2 - F_1) dx.$$

Тогда можно записать:

$$\sigma = A/S,$$

где S — номинальная площадь контакта, вычисляемая по Герцу, является удельной энергией системы в контакте. В табл. 3 приведены значения величины σ , полученные численным интегрированием экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 4. Значение σ для систем “кремний—кремний” и “пленка окиси титана на кремнии—кремний” близка к значениям межфазной энергии, приводимым в литературе [10]. Для системы “сталь—кремний” такого совпадения не наблюдается, что, очевидно, связано влиянием шероховатости.

Таблица 3. Работа адгезии и удельная энергия системы в контакте

Образец	Работа контактной адгезии $A, 10^{-12}$ Дж	Площадь контакта $S, 10^{-12}$ м ²	Удельная энергия системы в контакте $\sigma, \text{Дж/м}^2$
1	0,36	2,6	0,14
2	0,17	2,4	0,07
3	1,70	2,6	0,65

Влияние шероховатости на величину контактной адгезии в настоящее время является общепризнанным фактом. Измеренные значения сил адгезии обычно на 2—3 порядка меньше расчетных [3]. Основной причиной такого расхождения считается дискретность контакта и изменение его геометрии. Так, например, в ряде случаев, при оценке адгезии шероховатых частицы и поверхности, интерпретацию результатов необходимо производить не по схеме “сфера, радиуса частицы — плоскость”, а по схеме “сфера—сфера” с радиусами соответствующих неровностей шероховатых частицы и поверхности.

Поскольку одной из целей данной работы являлась проверка правильности калибровки прибора, представляет интерес провести сравнение результатов измерений с расчетными значениями, оценив при этом влияние шероховатости.

Для определения расчетных сил адгезии использовался термодинамический подход, предложенным Дерягиным [2], в рамках которого предполагается, что адгезия происходит под действием поверхностных сил и рассматриваться как термодинамически равновесный процесс:

$$F = 2\pi R(\sigma_{13} + \sigma_{23} - \sigma_{12}),$$

где F — сила адгезии; $R = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$ — эквивалентный радиус выпуклых поверхностей 1 и 2 с радиусами r_1 и r_2 соответственно; σ_{12} — поверхностное натяжение на границе твердых фаз 1 и 2; σ_{13} , σ_{23} — поверхностное натяжение на границе твердых тел и фазы 3, окружающей их.

Как видно из ф-лы, возникновение адгезионного взаимодействия связывается с изменением поверхностной энергии твердых фаз в контакте. Главным преимуществом такого подхода является отсутствие необходимости введения каких-либо предположений о законе молекулярного притяжения макротел. К недостаткам следует отнести трудности определения значений σ_{12} (или σ_{11} в случае контакта тождественных материалов). Обычно при расчетах этой величины пренебрегают, считая ее достаточно малой. Очевидно, что при таком допущении, значения, получаемые по ф-ле 3, необходимо считать верхней оценкой возможных сил адгезионного взаимодействия.

В табл. 4. приведены теоретические и экспериментальные значения сил адгезионного взаимодействия. Согласно представленным данным, экспериментальные результаты на два порядка меньше расчетных, что хорошо согласуется с известными литературными данными. Для оценки влияния шероховатости на результаты измерения было проведено исследование микрогеометрии поверхностей объектов, используемых в эксперименте. На рис. 5 представлены их AFM-изображения и профилограммы. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что реализуются три типа контактного взаимодействия.

ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ И АТТРАКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Таблица 4. Сравнение экспериментальных и расчетных сил адгезии F , мкН

№	Поверхностная энергия, Дж/м ²	I		II	
		Расчет	Эксперимент	Расчет	
1	1,23	7728	88,4	сфера—сфера ($r_1, r_2 \approx 10$ мкм)	77,3
2	1,5	9425	32,4	сфера—сфера ($r_1 \approx 2$ мкм, $r_2 \approx 10$ мкм)	29,2
3	1,4	8262	145,6	плоскость—N-сфера ($r \approx 40$ мкм)	0,6—330,5

Примечание. I — без учета геометрии контакта; II — с учетом геометрии контакта.

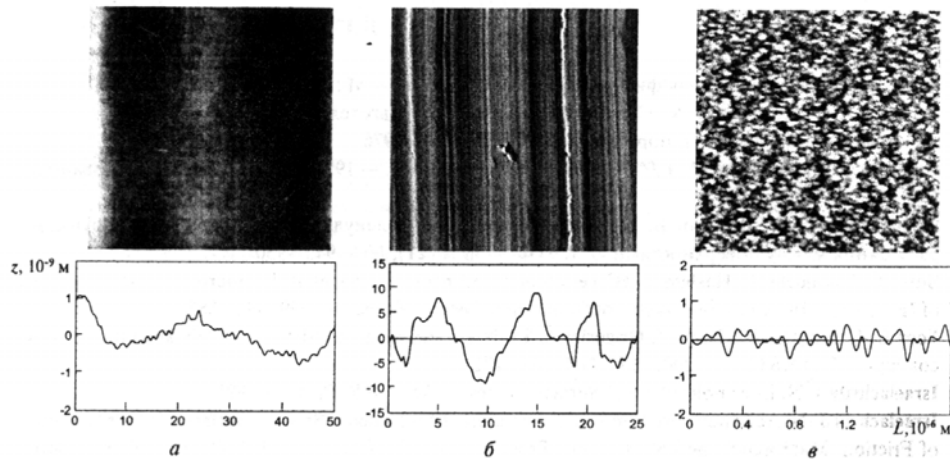


Рис. 5. АСМ-изображения и профилограммы поверхностей:

a — кремниевая пластина (50×50 мкм); b — стальной образец (27×27 мкм); $в$ — окись титана на кремнии (2×2 мкм)

В первом случае (рис. 5, a) контакт соответствует схеме “сфера—сфера” с радиусами ≈ 10 мкм. Контакт стальной поверхности (рис. 5, b), скорее всего, происходит по одной неровности с размером ≈ 2 мкм. Для поверхности, представленной на рис. 5, $в$, наиболее вероятен множественный контакт неровностей размером ≈ 80 нм. При этом радиус этих неровностей значительно меньше неровностей на кремниевом шарике, поэтому возможно использование схемы “сфера—плоскость”. Как показывает оценка диаметра пятна контакта, в соприкосновение с пробным телом может вступить до 500 таких неровностей.

Результаты расчетов, проведенных с использованием приведенных выше соображений, представлены в табл. 4 и достаточно хорошо совпадают с теоретическими оценками.

Выводы. Представлены результаты измерений сил адгезии и аттракционного взаимодействия шероховатых поверхностей стали, кремния и оксида титана с кремниевым сферическим пробным телом. Исследования проводились на разработанном в ИММС НАНБ контактном адгезиометре, представляющем собой высокочувствительные электромагнитные торсионные весы с обратной связью. Реализованный в приборе контроль величины зазора между образцами позволяет определять зависимость действующих между телами сил от расстояния между ними.

Результаты определения сил контактной адгезии достаточно хорошо совпадают с известными экспериментальными данными. Проведенная оценка влияния на результаты измерений шероховатости показала, что при учете реальной геометрии контакта экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетными.

При определении зависимости сил от расстояния между образцами, проводимого в цикле под-вод—отвод, наблюдались значительные гистерезисные явления адгезионного взаимодействия. Расчет энергии гистерезисных потерь показал, что они достаточно близки к известным значениям энергии межфазного взаимодействия исследованных образцов.

Обозначения

A — работа, необходимая для создания адгезионной связи; A_1, A_2 — работа, затрачиваемая на образование и разрушения контакта соответственно; F_1, F_2 — силы, действующие при формировании и разрушении контакта; x_d — расстояние между образцами, соответствующее их силовому равновесию в контакте; x_c — расстояние, соответствующее отсутствию взаимодействия тел; σ — удельная энергия системы в контакте; S — номинальная площадь контакта, вычисляемая по Герцу; F — сила адгезии; $R = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$ — эквивалентный радиус выпуклых поверхностей 1 и 2 с радиусами r_1 и r_2 соответственно; σ_{12} — поверхностное натяжение на границе твердых фаз 1 и 2; σ_{13}, σ_{23} — поверхностное натяжение на границе твердых тел и фазы 3, окружающей их.

Литература

1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз. — 1963
2. Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. — М.: Наука. — 1973
3. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. — М.: Химия. — 1976
4. Overbeek J. T., Sparnaay M. J. // Proc. Ned. Acad. Wetensch. — 1951 (54), 387—396 (цитировано по [1])
5. Абрикосова И. И., Дерягин Б. В. Прямое измерение молекулярного притяжения в функции расстояния между поверхностями // ЖЭТФ. — 1951 (21), № 8, 945—950
6. Sitti M., Horiguchi S., Hashimoto H. Tele-touch feed-back of surfaces at the micro/nano scale // Proc. of IEEE / RSI Int. Conf. on Intelligent Robots and System, Korea. — 1999, 882—888
7. Yoon E.-S., Yang S.-H., Kong H., Grigoriev A. Ya. Nano adhesion and friction DDPO₄ and ODPO₄ SAM coatings // J. of KSTLE. — 2002 (18), N 4, 267—272
8. Israelachvili J. N. Intermolecular and Surface Forces. — Acad. NY: Press. — 1991
9. Israelachvili J. N. Adhesion, Friction and Lubrication of Molecularly Smooth Surfaces // Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Process / ed. I. L. Singer, H. M. Pollock. — Pub: London: Kluwer Acad. — 1991, 351—385
10. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1977

Поступила в редакцию 11.09.03.

Grigoriev A. Ya., Dubravin A. M., Kovalev A. V., Kovaleva I. N., Komkov O. Yu., and Myshkin N. K. Measurement of contact adhesion and attraction between engineering surfaces.

A contact adhesion meter devised with a sensitive electromagnetic scale with negative feedback served to investigate the forces of adhesion between the specimens from steel, silicon and titanium oxide shaped as a silicon sphere. Controllable feed of the specimens to the test body has enabled to determine the relation between the forces affecting the bodies and the spacing between them. The results of measurement of the work of adhesion, interphase energy and the effect roughness on the force of adhesion correlate well with the known experimental data and theoretical assessments.