

УДК 534.32:531

Локальная трибометрия на основе сканирующего зондового микроскопа

А. М. Дубравин, О. Ю. Комков*, Н. К. Мышкин. Институт механики металлополимерных систем им. В.А.Белого Национальной Академии Наук Беларуси (ИММС НАНБ). Беларусь 246050, г.Гомель, ул.Кирова, 32а

Приведено описание аппаратно-программного обеспечения для проведения циклических испытаний тонких покрытий с помощью сканирующего зондового микроскопа. Приведен сравнительный анализ трибологических характеристик тонких покрытий, используемых в технологии МЭМС. Исследовано влияние температуры и других факторов на величину сил трения и адгезии.

Ключевые слова: сканирующий зондовый микроскоп, нанотрибология, микротрибометр, зонд, сила трения, коэффициент трения, адгезия, тонкие пленки, самоорганизующиеся мономолекулярные покрытия, МЭМС, адсорбированный слой, граничное трение.

Введение. Благодаря своей универсальности, метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) нашел широкое применение в различных областях науки и, в том числе, трибологии [1]. Среди объектов исследования методами нанотрибологии, можно выделить тонкие покрытия, используемые в технологии микроэлектромеханических (МЭМС) и наноэлектромеханических систем, поверхности дисковых накопителей информации, биологические образцы.

Актуальность проведения трибологических испытаний с помощью СЗМ при сверхнизких нагрузках (порядка $10^{-9} - 10^{-5}$ Н) и использовании индентора с характерным радиусом закругления 10 – 100нм, обусловлена миниатюризацией узлов трения, условия работы которых являются весьма специфичными [2], и во многих случаях не могут быть воссозданы при использовании макротрибометров. Так, существенно возрастает роль электростатических, электромагнитных и капиллярных сил [3], как правило, не учитываемых при больших нагрузках. При радиусе закругления зонда, сравнимом с шагом микронеровностей, величина силы трения существенно зависит от микрогеометрии контакта [4, 5, 6, 7]. На величину силы трения и адгезии оказывает влияние неоднородность свойств поверхности [8] (что позволяет использовать термин локальная трибометрия применительно к комплексу СЗМ методик в трибологии).

Сопоставление результатов исследования ряда покрытий свидетельствует о том, что полученные зависимости силы трения от температуры, влажности, скорости движения индентора, длины трека и других параметров, существенно отличаются в случае использования для проведения испытаний СЗМ и микротрибометров. Таким образом, авторами делается вывод о том, что данные методы не являются взаимозаменяемыми при разработке микро- и наноустройств [5, 9].

Среди проблем, возникающих при проведении испытаний с помощью СЗМ, наиболее существенной является сложность расчета реальных сил, действующих на зонд. Во-первых, значительным является разброс геометрических и механических параметров используемых зондов, жесткость которых может отличаться более чем в шесть для одной и той же модели в различных партиях. Недостаточно точными являются, приводимые производителем, значения длины консоли, длины и радиуса закругления острия зондов, что связано со сложностью технологического процесса их изготовления. Аналитическое описание поведения зонда СЗМ в большинстве случаев является упрощенным, не учитывающим многослойную структуру консоли. Во-вторых, для СЗМ, использующих лазерную лучевую схему детектирования изгиба и кручения зонда, требуется проведение дополнительных процедур калибровки используемого оборудования каждый раз после смены зонда. И если в настоящее время разработан ряд методик, позволяющих измерять нормальную нагрузку с точностью 5-15% [10-11], то вопрос калибровки системы зонд-фотоприемник при измерении силы трения, остается предметом исследований и дискуссий [12-17].

Цели, задачи, оборудование. Основной целью данной работы является реализация циклического тестирования поверхности образцов с помощью СЗМ. Как правило, величина коэффициента трения при проведении испытаний с помощью СЗМ, производится путем анализа единичного цикла движения зонда вдоль поверхности образца. В то же время известно, что во время циклических испытаний, величина коэффициента трения может существенно измениться. Это связано с тем, что фрикционное взаимодействие индентора с поверхностью сопровождается рядом

механических и физико-химических процессов, вследствие которых поверхностные слои подвергаются существенной модификации вплоть до разрушения.

Режим многоциклового тестирования реализован на базе модифицированного СЗМ “Нанотоп-205”, разработанного в ИММС НАНБ. Испытания образцов проводились с помощью зонда NSC14/Ti-Pt с платиновым покрытием фирмы MicroMash (средняя жесткость 5Н/м; радиус закругления острия до 40нм, собственная оценка геометрических параметров зонда не производилась). Задача заключалась в создании дополнительного программного модуля для управления тестированием и сбора данных, а также разработке методики калибровки лучевой схемы при регистрации изгиба и кручения консоли зонда для определения реальных сил, регистрируемых системой. При реализации программного обеспечения использовались алгоритмы, ранее разработанные для микротрибометра возвратно – поступательного типа [18]. Аппаратная модификация состояла в оснащении СЗМ системой обратной связи перемещения образца с использованием емкостных датчиков для исключения влияния гистерезиса пьезокерамических преобразователей перемещения на результаты измерений. Во время реверсивного движения образца, одновременно регистрировались сигналы, соответствующие изгибу и кручению зонда. Величина изгиба поддерживалась постоянной с помощью обратной связи, обеспечивая неизменной величину нормальной нагрузки.

Для исследования зависимости силы трения от температуры, СЗМ был оснащен термостолком на базе элемента Пельтье, позволяющего производить как нагревание, так и охлаждение образцов.

Одним из существенных ограничений применения большинства существующих СЗМ при моделировании многоциклового трения в МЭМС является относительно низкая скорость сканирования. Эта проблема является технически разрешимой при конструктивном разделении сканера и держателя зонда, а также замене трубчатых сканеров высокоскоростными устройствами позиционирования с использованием многослойных пьезокерамических преобразователей перемещений [19]. Собственная резонансная частота сканера СЗМ “Нанотоп-205” достигает нескольких сотен герц, и максимальная скорость тестирования определяется возможностями системы управления, что также не является принципиальным ограничением метода. Увеличение негативного влияния вибрации на результаты измерений при высоких скоростях тестирования является общей для СЗМ и трибометров возвратно – поступательного типа.

Материалы. Демонстрация возможностей локальной СЗМ трибометрии произведена с использованием тонких гидрофобных покрытий, используемых для уменьшения сил трения и адгезии в узлах МЭМС [20]. Покрытия наносились на поверхность кремниевой подложки Si(100) поверх окисного слоя SiO₂ толщиной несколько нанометров, образующегося под действием кислорода воздуха. Формирование покрытий производилось согласно методикам, описанным в литературе, после очистки поверхности подложки с помощью изопропилового спирта, промывки деионизированной водой и сушки в среде азота.

Алмазоподобное покрытие (АПП) получено путем дугового вакуумного распыления графита [21] в течение 15 минут при давлении в камере $7 \cdot 10^{-3}$ Па и температуре около 200⁰ С.

Самоорганизующееся мономолекулярное покрытие (СМП) на базе октадецил-трихлоросилана (ОТС; CH₃(CH₂)₁₇SiCl₃) получено при химическом взаимодействии жидкого реагента с поверхностью оксида кремния [22] в течение двух часов при комнатной температуре. Перед нанесением покрытия подложка дополнительно была обработана в растворе H₂SO₄: H₂O₂. Аналогичным путем получено покрытие на основе децил-трихлоросилана (ДТС; CH₃(CH₂)₂₁SiCl₃).

Покрытие на основе октадецил-триметоксисилана (ОТМС; CH₃(CH₂)₁₇Si(OCH₃)₃) нанесено методом химического осаждения в среде паров реагента при температуре 120⁰С [23].

Программное обеспечение. Разработанный дополнительный программный модуль (Рис.1) встроен в управляющую программу СЗМ и для осуществления тестирования использует имеющиеся в СЗМ функции. В отличие от стандартных режимов сканирования большинства коммерческих СЗМ, была организована синхронная передача четырех величин: пройденного пути; вертикального положения зонда; изгиба консоли зонда, пропорциональной нормальной нагрузке; кручения зонда, пропорциональной силе трения.

Положение и длина дорожки трения *l* выбирается в пределах выбранной области сканирования 2. Перед началом тестирования может быть загружено изображение отсканированного участка поверхности. В этом случае дорожка трения может находиться в пределах зон, имеющих различные особенности и выявляемых с помощью изображений фазового контраста [21]. Такими зонами могут быть области выхода дислокаций, границы зерен,

неоднородности нанесенных покрытий и т.д. Таким образом может производиться исследование локальных характеристик отдельных участков одного и того же образца, считающегося однородным при макро- и микротрибологических исследованиях.

На панели 3 находятся элементы управления процессом тестирования. В пределах каждого цикла испытаний, отображаются величины смещения 4 острия зонда при кручении консоли под действием силы трения во время движения образца в прямом (Ax_{1i}) и обратном (Ax_{2i}) направлениях. Поступающие сигналы усредняются в пределах области 6, ограниченной оператором:

$$Ax_1 = \frac{1}{(n_2 - n_1)} \sum_{i=n_1}^{n_2} Ax_{1i}; \quad Ax_2 = \frac{1}{(n_2 - n_1)} \sum_{i=n_1}^{n_2} Ax_{2i}, \quad (1)$$

где Ax_1 и Ax_2 — усредненные величины смещения острия зонда, полученные при движении зонда в прямом и обратном направлениях в пределах единичного цикла; F_i — текущее значение силы трения; $n_2 - n_1$ — количество поступивших данных за время усреднения. Таким образом отсекаются данные, собираемые на начальных участках при изменении направления движения образца.

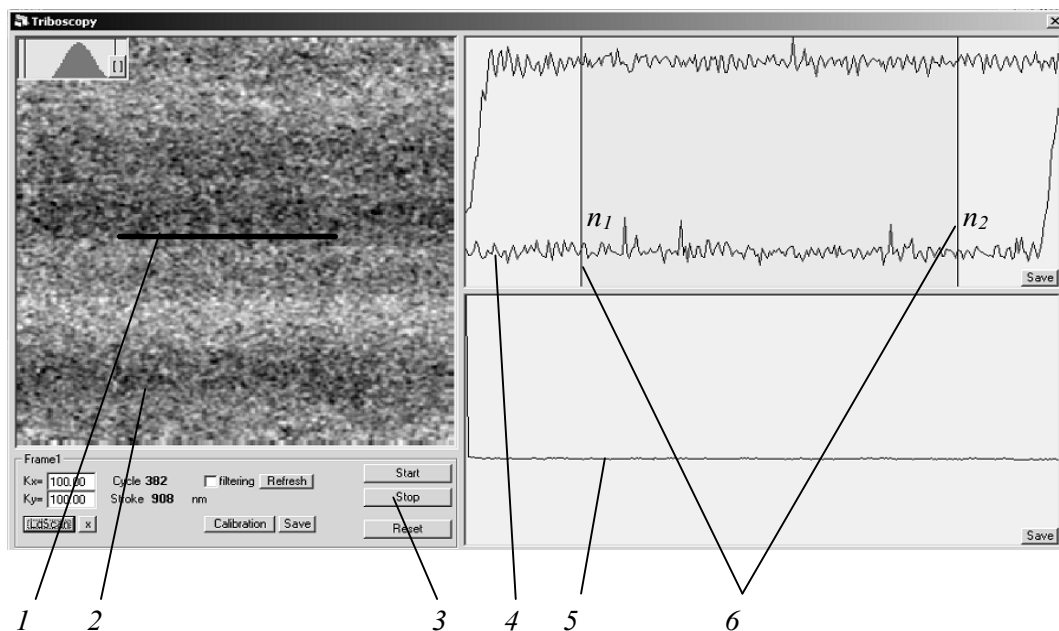


Рис. 1. Программный модуль. Обозначения расшифрованы в тексте

Результирующая сила трения P_f пропорциональна среднему значению смещения острия зонда

$$Ax' = \frac{|Ax_2 - Ax_1|}{2}. \quad (2)$$

Зависимость Ax' от пройденного пути отображается в отдельном окне (5). По окончании тестирования данные могут быть записаны в файл для дальнейшей обработки. Имеется возможность сохранения результатов в пределах единичного цикла с комментариями оператора о режимах проведения испытаний.

Калибровка АСМ при определении изгиба и кручения зонда. Определение реальных величин изгиба консоли зонда под действием нормальной нагрузки и смещения острия зонда под действием силы трения производилось следующим образом.

Величина коэффициента k_z в выражении $A_z = U_z \cdot k_z$, связывающем величину вертикального смещения острия зонда A_z с регистрируемым на выходе фотоприемника сигналом U_z получена при

построении кривой подвода-отвода (силовая спектроскопия) для достаточно твердых образцов (в нашем случае кремниевая подложка): $A_z=z$ (Рис.2, а), где z – изменение расстояния зонд – поверхность под действием пьезокерамического преобразователя.

Определение величины коэффициента k_x в выражении $A_x = U_x \cdot k_x$, связывающем величину латерального смещения острия зонда A_x с регистрируемым на выходе фотоприемника сигналом U_x производилось при рассмотрении начального участка движения образца, в пределах которого острие сохраняет свое положение под действием силы трения покоя (Рис.2, б). В данном случае принимаем $A_x=x$, где x – перемещение образца в момент перехода к трению скольжения [24].

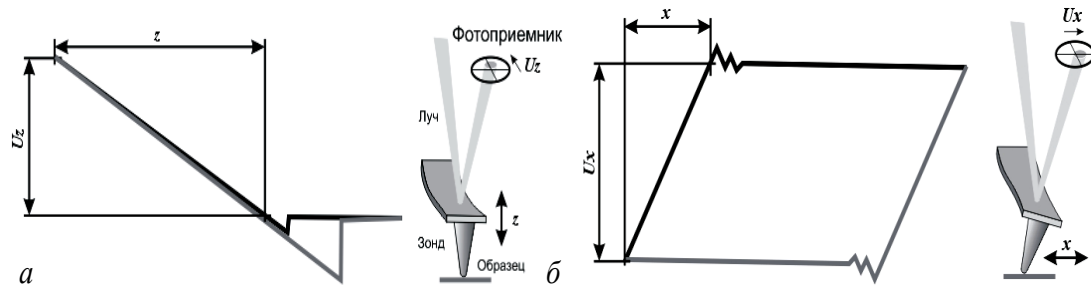


Рис. 2. Изгиб а и кручение зонда б

Силы, действующие на зонд. Определение коэффициента трения. Величина нормальной нагрузки P_n при взаимодействии зонда с поверхностью образца в контактном режиме сканирования, зависит от жесткости консоли k и смещения острия в вертикальном направлении A_z :

$$P_n = -kA_z \quad (3)$$

Жесткость консольно закрепленной балки прямоугольного сечения

$$k = \frac{E}{4} \cdot \frac{BH^3}{L^3}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала балки, B – ширина; H – толщина и L – длина консоли [17].

Возникающая при движении зонда сила трения, вызывает кручение консоли. Угол поворота острия (в радианах) равен

$$\varphi = \frac{ML}{GJ_k}, \quad (5)$$

где G – модуль сдвига материала зонда; J_k – полярный момент инерции балки:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad (6)$$

$$J_k = \beta H^3 B, \quad (7)$$

Где ν – коэффициент Пуассона; β – константа, зависящая от соотношения $\frac{H}{B}$ и для всех

производимых в настоящее время зондов с консолью прямоугольного сечения, может быть принята равной 0,333 [25].

Крутящий момент равен $M = P_f l$, где l – длина острия зонда, и сила трения определяется как

$$P_f = \frac{\varphi GJ_k}{Ll} \quad (8)$$

Принимая для малых углов поворота $\varphi = \sin \varphi = \frac{A_x}{l}$ (Рис.3), получаем

$$P_f = \frac{A_x GJ_k}{Ll^2} \quad (9)$$

Исходя из полученных соотношений, коэффициент трения μ , равный отношению величины силы трения к нормальной нагрузке, определяется как

$$\mu = \frac{2\beta}{(1+\nu)} \cdot \frac{A_x}{A_z} \cdot \frac{L^2}{l^2} \quad (10)$$

Таким образом, вычисление коэффициента трения сводится к определению вертикального смещения острия зонда A_z под действием нормальной нагрузки, латерального смещения острия зонда A_x под действием силы трения, а также геометрических параметров зонда: длины консоли L и острия l .

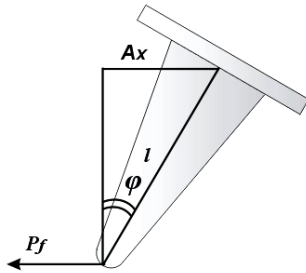


Рис. 3. Смещение острия зонда под

В случае малых нагрузок и наличия на поверхности образцов адсорбированной из воздуха влаги, следует учитывать влияние сил адгезии (уточненный закон Амонтона-Кулона [5]):

$$P_f = \mu(P_n + P_a) \quad (11)$$

На практике величина P_a , являющаяся суперпозицией Ван-Дер Ваальсовых, электростатических, капиллярных и других сил, может быть получена при анализе кривой подвода – отвода. В данном случае сила адгезии пропорциональна величине изгиба зонда при его отрыве от поверхности.

Следует заметить, что при определении коэффициента трения согласно (10), рассматривается упрощенная модель зонда, в которой не учитывается влияние слоя металлизации на механические свойства консоли. Соответственно, в вычислениях используется значение коэффициента Пуассона материала подложки, на базе которой изготовлен зонд (от 0.24 для Si_3N_4 зондов [26] до 0.42 для кремниевых зондов [27]). Более точное определение параметров зондов, имеющих многослойную структуру, представляет собой достаточно сложную задачу [28]. Поскольку расчетное значение коэффициента трения зависит от квадрата отношения длин консоли и острия, требуется определение этих параметров с высокой точностью. Как правило, измерение длины консоли, высоты острия и радиуса закругления зонда, производится с помощью электронного микроскопа. Оценка геометрических параметров зондов с помощью конфокального микроскопа “Nanofocus” показала, что длина консоли и высота острия могут существенно отличаться от данных, приводимых производителем. В связи с этим, сравнительный анализ исследуемых покрытий произведен на основании измеренных величин изгиба и кручения консоли зонда.

Экспериментальные данные. Представленные на Рис.4 а данные соответствуют результатам первого цикла тестирования во время реверсивного движения зонда для различных покрытий. На Рис.4 б приведены зависимости изменения кручения консоли зонда под действием силы трения в пределах нескольких сотен циклов тестирования. Испытания производились при величине изгиба зонда 1360 нм, что соответствует нагрузке 6,8 мкН (при жесткости зонда 5 Н/м согласно данным производителя). Температура подложки 22⁰ С; относительная влажность воздуха 32%.

Влияние температуры на поведение СМП во время испытаний показано на примере ОТС. На Рис.5 а приведены зависимости изгиба зонда под действием поверхностных сил при его отводе от поверхности при различных температурах. Зависимость полученных значений силы отрыва от температуры приведена на Рис.5 б. Измерение усредненной величины кручения зонда во время нескольких десятков циклов производилось при нормальной нагрузке 3 мкН. Участок поверхности для проведения испытаний выбирался при условии отсутствия неоднородностей покрытия на основании изображения фазового контраста.

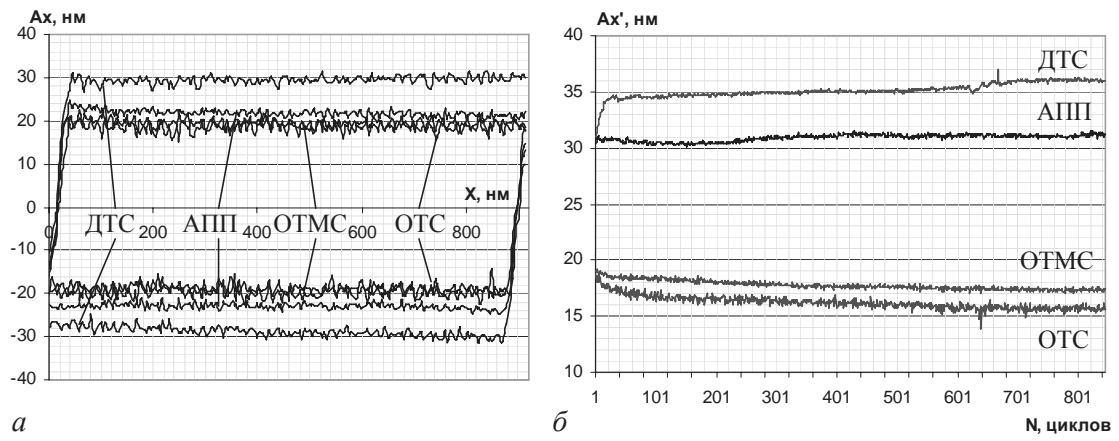


Рис. 4. Единичный цикл трения *a* и динамика изменения величины кручения зонда *б*. Длина дорожки трения 948 нм.

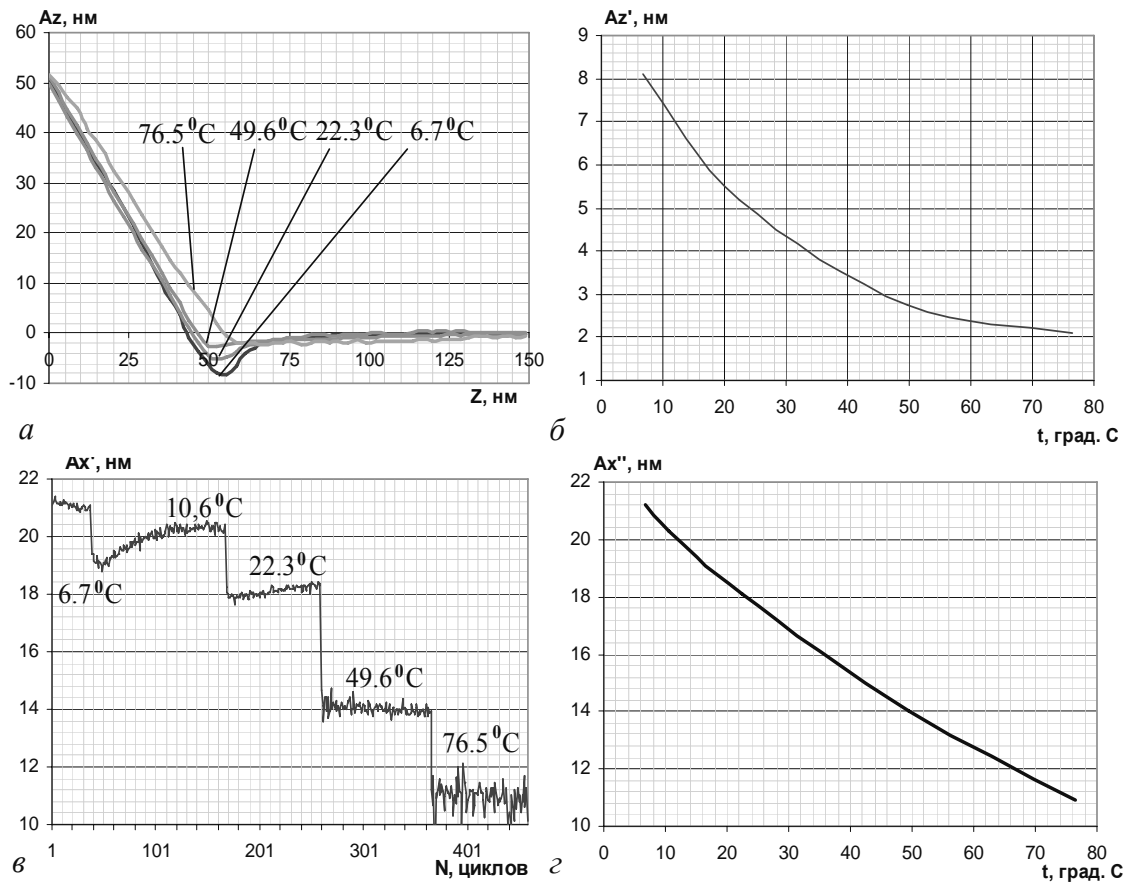


Рис. 5. Кривая расстояние-сила при отводе зонда от поверхности *а*; зависимость величины изгиба зонда во время отрыва от температуры *б*; зависимость изменения величины кручения зонда от температуры *в*. Покрытие ОТС.

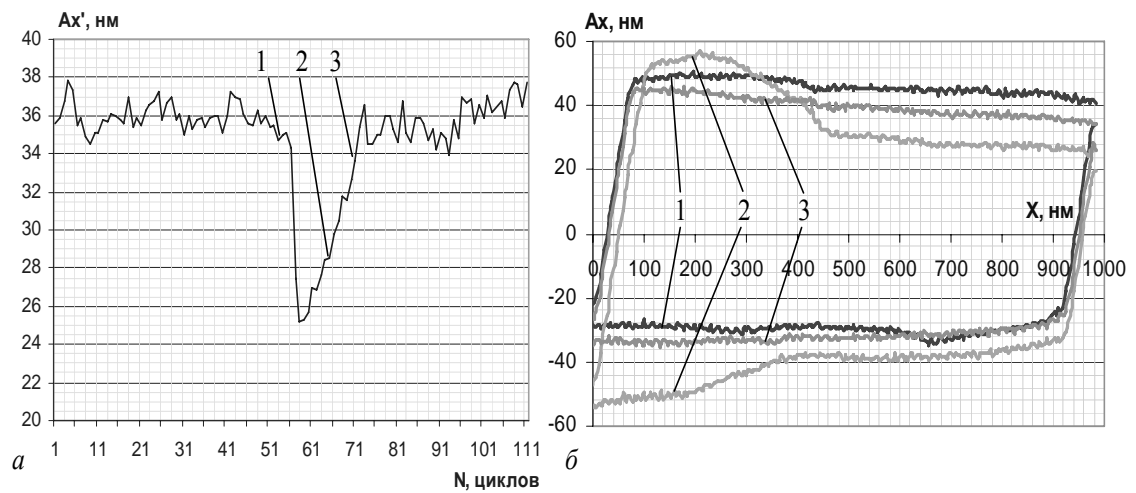


Рис. 6. Изменение усредненной величины кручения зонда *а* и результаты единичного цикла тестирования *б*: до момента остановки 1; непосредственно после страгивания 2 и через 6 циклов после страгивания 3. Покрытие ДТС.

Влияние остановки испытаний на величину и характер силы трения исследовалось с использованием ДТС (Рис.6). Перед началом тестирования образец был нагрет до температуры 53⁰С с целью уменьшения толщины адсорбированного слоя жидкости. Пауза составляла 3 минуты, испытания проводились при нормальной нагрузке 6,8 мкН.

Обсуждение результатов. В соответствии с данными циклических испытаний (Рис.4, б), величина силы трения может существенно измениться в процессе фрикционного взаимодействия зонд – поверхность. С увеличением количества циклов скольжения, наблюдается стабилизация силы трения. Для различных покрытий стабилизация процесса трения наступает как при уменьшении, так и при увеличении силы трения до определенного значения. Сила адгезии в нашем случае составляла при различных температурах 0,1 – 0,4 мкН, или 0,2 – 0,6 % от величины нормальной нагрузки, и может не учитываться при определении коэффициента трения.

Изменение температуры существенно влияет на величину силы трения и адгезии. Предположительно, данное явление преимущественно связано не с изменением свойств исследуемых покрытий, а с процессами адсорбции – десорбции водяных паров на поверхности образца из воздуха [29]. Уменьшение силы трения с увеличением температуры можно объяснить уменьшением толщины жидкостного слоя и, как следствие, снижении гидродинамического сопротивления. Приведенная на Рис.6 б зависимость 2 может свидетельствовать о конденсации влаги на острие зонда во время паузы в испытаниях. Предположительно, участок, на котором возрастает сила трения, соответствует прохождению зонда через слой адсорбированной влаги с увеличением гидродинамического сопротивления вязкой среды.

Уменьшения величины силы трения в пределах нескольких десятков циклов скольжения после возобновления тестирования, предположительно, связано с тем, что жидкостной слой выступает в роли граничной смазки]. В течение нескольких циклов скольжения, при достаточно высокой нормальной нагрузке, основной объем жидкости вытесняется за пределы дорожки трения, и в дальнейшем величина силы трения возвращается к исходному уровню. Согласно Рис.5.в, время стабилизации величины силы трения сокращается с увеличением температуры. Так, при температуре образца 10,6 ⁰С, процесс трения стабилизировался в течение 70 циклов после возобновления тестирования; при температуре 76.5 ⁰С - в течение 2 циклов. С повышением температуры наблюдается увеличение разброса значений величины силы трения, что косвенно подтверждает переход к граничному трению, и далее, при десорбции жидкости, к сухому трению, при котором зонд непосредственно взаимодействует с микронеровностями поверхности [30].

Возникающая при наличии слоя адсорбированной жидкости капиллярная сила, определяется как $P_m = 2\pi R\gamma(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$, где R – радиус закругления острия зонда; γ – поверхностное натяжение на границе жидкость – воздух (для воды 73 мН/м); θ_1 и θ_2 – контактные углы смачивания материалов исследуемого образца и зонда [31]. Исследуемые покрытия являются гидрофобными и не способствуют проникновению жидкости в зазор между покрытием и индентором с образованием жидкостного мениска. Характерной особенностью таких материалов является низкая чувствительность к изменению параметров внешней среды. Угол смачивания СМП превышает 100⁰, и практически не изменяется при температурах до 200⁰С [32]. Материал зонда СЗМ, напротив, обладает способностью удерживать молекулы воды. Вероятно, именно это обстоятельство во многом определяет зависимость силы трения от влажности, скорости скольжения и температуры.

Выводы. Анализ приведенных данных, свидетельствует о том, что характер изменения силы трения может существенно отличаться для различных покрытий при циклических испытаниях. Полученные в результате единичного цикла данные, способствуют более полному описанию процессов, протекающих в зоне контакта зонда с поверхностью.

Калибровка системы зонд – фотоприемник не требует проведения дополнительных процедур. Калибровочные коэффициенты могут быть получены при анализе кривой сила – расстояние – для нормальной нагрузки, и единичного цикла тестирования - для силы трения.

СЗМ регистрирует вертикальное и латеральное смещение острия зонда. Для определения силы трения требуется измерение геометрии консоли зонда с высокой точностью.

При проведении циклических испытаний тонких покрытий, установлено влияние температуры и временной остановки на величину силы трения и скорость ее стабилизации. Одними из существенных факторов, влияющих на поведение пар трения при сверхнизких нагрузках, можно считать процессы адсорбции – десорбции жидкости на поверхности острия зонда.

Повышение температуры во время проведения трибоиспытаний может способствовать уменьшению влияния внешних факторов при определении коэффициента трения различных материалов. В то же время, поведение покрытий при различных значениях температуры и влажности, отражает реальные процессы, характерные для работы узлов МЭМС или пары магнитный диск – головка.

Обозначения

Ax_{1i}, Ax_{2i} – смещение острия зонда под действием силы трения во время движения образца в прямом и обратном направлениях; Ax_1, Ax_2 — усредненные величины смещения острия зонда, полученные при движении зонда в прямом и обратном направлениях в пределах единичного цикла; F_i — текущее значение силы трения; n_1, n_2 — показания счетчика при дискретном определении величины силы трения; Ax' - среднее значение смещения острия зонда за период; k_z, k_x – калибровочные коэффициенты, связывающие величины вертикального и латерального смещения острия зонда с величинами сигнала на выходах фотоприемника; A_z, A_x - вертикальное и латеральное смещение острия зонда; U_z, U_x – сигналы на выходе фотоприемника, соответствующие вертикальному и латеральному смещению острия зонда; z – изменение расстояния зонд - поверхность под действием пьезокерамического преобразователя; x – перемещение образца в момент перехода к трению скольжения; A_z' - вертикальное смещение острия зонда под действием сил адгезии; P_n - величина нормальной нагрузки; k – жесткость консоли зонда; E – модуль упругости материала зонда, B – ширина, H – толщина, L – длина консоли зонда; φ – угол поворота острия зонда под действием силы трения; G – модуль сдвига материала зонда; J_k - полярный момент инерции консоли; ν - коэффициент Пуассона; β – константа, зависящая от отношения толщины и ширины консоли; l – длина острия зонда; M – крутящий момент силы трения; P_f - величина силы трения; μ - коэффициент трения; P_a – сила адгезии; Ax'' - усредненная величина кручения зонда за несколько циклов тестирования; P_m – капиллярная сила; R – радиус закругления острия зонда; γ – поверхностное натяжение жидкости; θ_1 и θ_2 – контактные углы смачивания материалов исследуемого образца и зонда.

Литература

1. **Robert W. Carpick**. Scratching the Surface: Fundamental Investigations of Tribology with Atomic Force Microscopy // Chem. Rev. - 1997 (97), 1163-1194
2. **E.Liu, B. Blanpain, J. –P. Celis, J. R. Roos**. Comparative study between macrotribology and nanotribology // J. Appl. Phys. -1998 84 (9), 4859-4865
3. **K. Komvopoulos**. Surface engineering and microtribology for microelectromechanical systems // Wear -1996 (200), 305-327
4. **Bharat Bhushan**. Nanoscale tribophysics and tribomechanics // Wear -1999 (225-229), 465-492
5. **Nikhil S Tambe, Bharat Bhushan**. Scale dependence of micro/nano-friction and adhesion of MEMS/NEMS materials, coatings and lubricants // Nanotechnology -2004 (15), 1561-1570
6. **In-Ha Sung, Hyung-Suk Lee, Dae-Eun Kim**. Effect of surface topography on the frictional behavior at the micro/nano-scale // Wear -2003 (254), 1019-1031
7. **Vilas N. Koinkar, Bharat Bhushan**. Effect of scan size and surface roughness on microscale friction measurements // J. Appl. Phys. -1997 81 (6), 2472 - 2479
8. **Reiz Kaneko, Takanori Miyamoto**. Friction and adhesion forces on magnetic disk surfaces // Transactions on magnetics -1998 24 (6), 2641-2643
9. **N.K. Myshkin, A.Ya. Grigoriev, A.M. Dubravin, O.Yu. Komkov et al.**. Instruments for adhesion and friction measurements at micro/nanoscale // 1st Int. Conf. Micro- and Nano-Technology, Vienna, Austria, 2005
10. **R. Levy, M. Maaloum**. Measuring the spring constant of atomic-force microscope cantilevers: thermal fluctuations and other methods // Nanotechnology -2002 (13), 33-37
11. **N. A. Burnham, X. Chen, C. S. Hodges, G. A. Matei, E. J. Thoreson, C. J. Roberts, M. C. Davies, S. J. B. Tendler**. Comparison of calibration methods for atomic - force microscopy cantilevers // Nanotechnology. -2003 (14), 1-6
12. **D. F. Ogletree, R. W. Carpick, M. Salmeron**. Calibration of frictional forces in atomic force microscopy // Rev. Sci. Instr. -1996 67 (9), 3298-3306

13. **M. Varenberg, I. Etsion, G. Halperin.** An improved wedge calibration method for lateral force in atomic force microscopy // *Rev. Sci. Instr.* -2003 74 (7), 3362-3367
14. **E. Liu, B. Blanpain, J. P. Celis.** Calibration procedures for frictional measurements with a lateral force microscope // *Wear* -1996 (192), 141-150
15. **A. Feiler, P. Attard, I. Larson.** Calibration of the torsional spring constant and the lateral photodiode response of frictional force microscopes // *Rev. Sci. Instr.* -2000 71 (7), 2746-2750
16. **Sangmin Jeon, Yehuda Braiman.** Torsional spring constant obtained for an atomic force microscope cantilever // *Appl. Phys. Lett.* -2004 84 (10), 1795-1797
17. **G. Bogdanovic, A. Meurk, M. W. Rutland.** Tip friction-torsional spring constant determination // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* -2000 (19), 397-405
18. **Комков О.Ю.** Микротрибометр возвратно-поступательного типа, работающий в области малых нагрузок: конструктивные особенности и методика испытания образцов // *Трение и износ.* – 2003 (24), N 6, 642 – 648
19. <http://www.physikinstrumente.de>
20. **Roya Maboudian, W. Robert Ashurst, Carlo Carraro.** Self-assembled monolayers as anti-stiction coatings for MEMS: characteristics and recent developments // *Sensors and Actuators.* -2000 (82), 219–223
21. **H-S Ahn, S. A. Chizhik, A. M. Dubravin, V. P. Kazachenko et al.** Application of phase contrast imaging atomic force microscopy to tribofilms on DLC coatings // *Wear* -2001 (249), 617-625
22. **Susannah C. Clear and Paul F. Nealey.** Lateral Force Microscopy Study of the Frictional Behavior of Self-Assembled Monolayers of Octadecyltrichlorosilane on Silicon/Silicon Dioxide Immersed in n-Alcohols // *Langmuir.* -2001 (17), 720-732
23. **W. Robert Ashurst, C. Carraro, R. Maboudian, W. Frey.** Wafer level anti-stiction coatings for MEMS // *Sensors and Actuators* -2003 (104), 213–221
24. **Satoru Fujisawa, Eigo Kishi, Yasuhiro Sugawara, Seizo Morita.** Lateral force curve for atomic force / lateral force microscope calibration // *Appl. Phys. Lett.* -1995 66 (4), 526 - 528
25. **Феодосьев В. И.** Сопротивление материалов. — М.: Наука. — 1970
26. **Christopher P. Green, Hadi Lioe, Jason P. Cleveland, Roger Proksch et al.** Normal and torsional spring constants of atomic force microscope cantilevers // *Rev. Sci. Instr.* -2004 75 (6), 1988 – 1996
27. **Christopher T. Gibson, Gregory S. Watson, Sverre Myhra.** Lateral force microscopy – a quantitative approach // *Wear* -1997 (213), 72-79
28. **John L. Hazel, Vladimir V. Tsukruk.** Spring constants of composite ceramic/gold cantilevers for scanning probe microscopy // *Thin Solid Films.* -1999 (339), 249 - 257
29. **M. Binggeli, C. M. Mate.** Influence of capillary condensation of water on nanotribology studied by force microscopy // *Appl. Phys. Lett.* -1994, 65 (4), 415 – 417
30. **M. Scherge, X. Li, J. A. Schaefer.** The effect of water on friction of MEMS // *Tribology Letters,* -1999, 6 (3-4), 215-220
31. **Xuefeng Tian, Bharat Bhushan.** The micro-meniscus effect of thin liquid film on the static friction of rough surface contact // *J. Phys. D: Appl. Phys* -1996 (29), 163-178
32. **W. Robert Ashurst, Christina Yau, Carlo Carraro, Christina Lee, et al.** Alkene based films as anti-stiction coatings for polysilicon MEMS // *Sensors and Actuators,* -2001, A 91, 239-248

A. M. Dubravin, O. Ju. Komkov*, N. K. Myshkin. **The local SPM tribometry.**

The description of a firmware for realization of cyclic tests of thin coatings with the help scanning probe microscope is given. The comparative analysis of tribological characteristics of thin coatings used in MEMS technology is given. The influence of temperature and other factors on value of friction and adhesion forces is investigated.