

УДК 539.375.6

## МИКРОТРИБОМЕТР ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА, РАБОТАЮЩИЙ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ НАГРУЗОК: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ

О. Ю. КОМКОВ

Описана конструкция микротрибометра возвратно-поступательного типа. Применение бесконтактного линейного электромагнитного привода с обратной связью и системы контроля нормальной нагрузки, а также использование методики автоматизированного тестирования, позволили проводить испытания тонких покрытий в области малых нагрузок.

**Ключевые слова:** микротрибометр, электромагнитный привод, тонкие пленки.

**Введение.** В настоящее время триботехнические испытания мономолекулярных самоорганизующихся полимерных Self Assembled Monolayers (SAM) и других тонких покрытий, используемых в технологии микроэлектронномеханических систем (МЭМС), чаще всего проводятся с помощью трибометров на макроуровне, а также с использованием методов сканирующей зондовой микроскопии — Scanning Probe Microscope (SPM), Lateral Force Microscope (LFM) на субмикроровне.

Исследования, проводимые с помощью SPM, дают представление о локальном взаимодействии зонда с различными участками поверхности образца [1]. Использование макротрибометров позволяют получить интегральные характеристики процессов трения. Ограничением применимости методов SPM является сложность процедуры определения реальной жесткости консоли и радиуса закругления иглы зонда.

Данные, получаемые с использованием макротрибометров, являются наиболее достоверными, однако испытания производятся, как правило, при скоростях скольжения и нормальных нагрузках, не соответствующих реальным условиям работы узлов МЭМС.

Для исследования процессов трения при малых нагрузках и контролируемой геометрии пятен контакта созданы приборы для измерения поверхностных сил, получивших названия Friction Force Apparatus (FFA), Lateral Force Apparatus (LFA) и Surface Force Apparatus (SFA) [2]. Эти приборы заняли промежуточное положение между сканирующими зондовыми микроскопами и макротрибометрами, и в настоящее время наиболее точно воссоздают контактные нагрузки и скорости скольжения, возникающие в узлах МЭМС. Кроме того, появление большого количества оригинальных методик SFA для определения локальных микромеханических свойств материалов, визуализации и измерения размеров пятен контакта, измерения толщины покрытий в процессе трибоиспытаний, делают эти приборы все более популярными среди исследователей.

Характерными особенностями приборов, обусловленными переходом в область низких нагрузок, являются использование пьезоэлектрического привода и направляющих изгиба для приведения в движение образца, а также датчиков перемещения с субмикронным разрешением для измерения нормальной нагрузки и силы трения.

В ИММС НАНБ была разработана серия приборов [3, 4], согласно диапазону скоростей, перемещений и нагрузок, занимающих промежуточное положение между SPM и макротрибометрами и получивших название микротрибометр.

**Цель работы** — описание конструктивных особенностей базовой модели устройства, используемого для испытания тонких покрытий, применяемых в технологии ММС и обсуждение методики проведения испытаний образцов при малых величинах нормальной нагрузки.

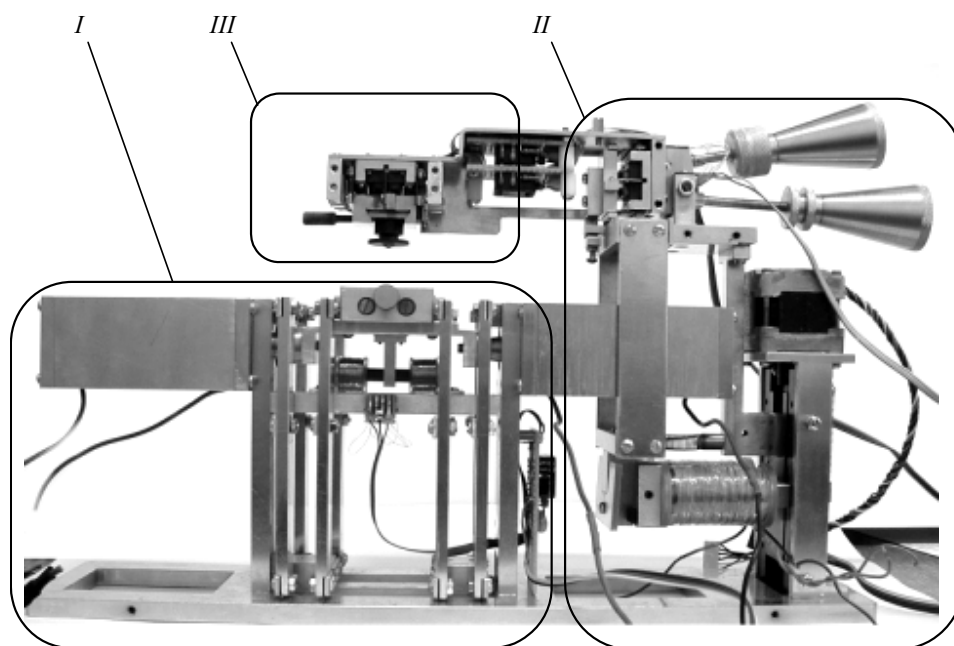


Рис. 1. Внешний вид микротрибометра со снятыми декоративными крышками: *I* — привод; *II* — система нагружения; *III* — система измерения силы трения

**Краткое описание микротрибометра.** Параметры прибора были приняты в соответствии с условиями нагружения узлов МЭМС [5]: контролируемая нормальная нагрузка  $10 \text{ мН} \div 1 \text{ Н}$ ; скорость скольжения  $0,1 \div 10 \text{ мм/с}$ . Для проведения триботехнических испытаний выбрана схема сфера—плоскость, позволяющая наиболее точно рассчитать площадь пятен контакта и величин контактного давления, а также исключить неизбежное влияние наклона индентора и пластины на геометрию контакта. Диаметр шарика выбирается в диапазоне  $1\text{—}5 \text{ мм}$  в зависимости от требуемой величины контактного давления. Покрытия наносятся на пластину, как правило, кремниевую. Исследуемое покрытие может быть также нанесено на шарик для расширения диапазона исследуемых пар трения. Для качественной оценки процессов изменения структуры поверхностных слоев образца, предшествующих началу их необратимого разрушения во время тестирования, прибор оснащен блоком регистрации акустической эмиссии (АЭ). Передача, прием и обработка данных осуществляется с помощью персонального компьютера. Программное обеспечение позволяет устанавливать скорость движения образца, величину нормальной нагрузки и длину трека, вести запись величины силы и коэффициента трения, а также скорости счета и амплитуды сигналов АЭ во время тестирования. Полученные данные могут быть сохранены в файле для дальнейшего анализа. Также обеспечена возможность визуализации и сохранения в файле результатов единичного цикла тестирования, что является важным при исследовании трения покоя и процесса перехода к трению скольжения. Проведение испытаний с высокой частотой и малой амплитудой движения образца, дает возможность исследования динамики фреттинг-изнашивания. Процесс испытания образцов полностью автоматизирован. Конструкция прибора позволяет реализовать на его базе методики, разработанные для SFA.

Основные узлы микротрибометра показаны на рис. 1. Схема прибора приведена на рис. 2.

**Привод.** Применение бесконтактного привода связано с необходимостью минимизации механического шума и вибрации, негативно влияющих на измерение малых сил трения. В сочетании с использованием направляющих изгиба, электромагнитный привод позволил реализовать перемещение образца в требуемом диапазоне скоростей при длине дорожки трения от  $0,1$  до  $10 \text{ мм}$ . Кроме того, применение электромагнитного привода позволяет реализовать различные законы изменения скорости движения образца. Обратная связи по положению дает возможность уменьшить время переходного процесса  $\tau$  при изменении направления движения образца и расширить зону  $a$  движения образца с постоянной скоростью в пределах единичного цикла тестирования (рис. 3). В качестве привода в SFA также используются направляющие изгиба, но относительное движение образца и контртела реализуется с помощью пьезоэлектрических преобразователей перемещения [6]. Пьезоэлектрический привод традиционно используется для реализации микроперемещений. Однако увеличение длины дорожки трения  $>100 \text{ мкм}$  сопряжено либо с неоправданным увеличением габаритов преобразователя,

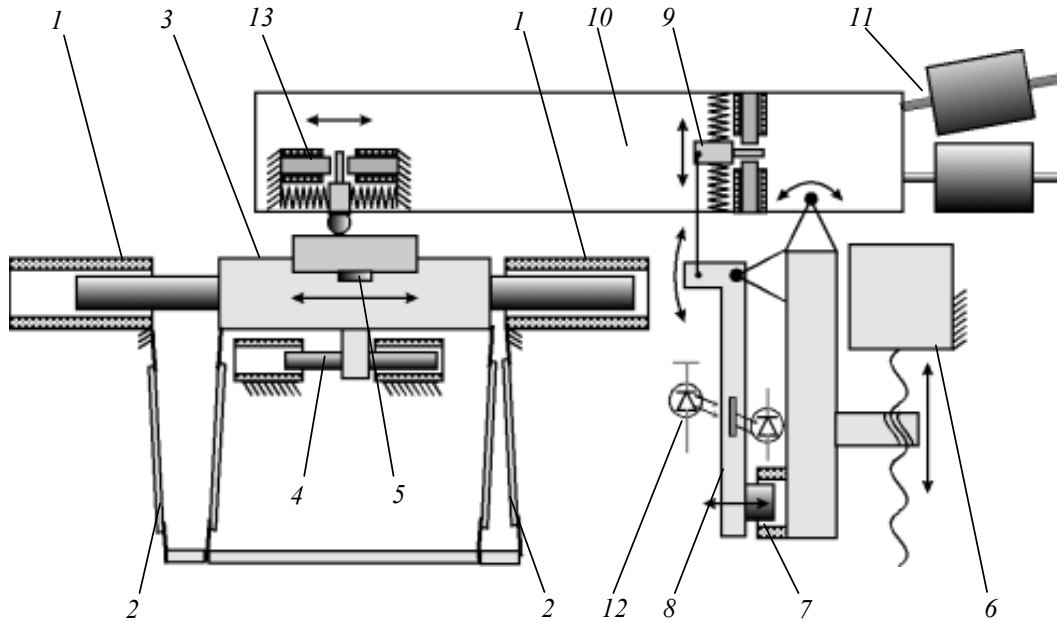


Рис. 2. Схема микротрибометра: 1 — электромагниты привода; 2 — направляющие изгиба; 3 — столик-держатель образца; 4 — датчик положения; 5 — датчик трибоакустической эмиссии; 6 — шаговый привод; 7 — электромагнит системы нагружения; 8 — рычаг; 9 — датчик нагрузки; 10 — головка; 11 — балансировочные грузы; 12 — оптопара; 13 — датчик силы трения

либо уменьшением жесткости подвески, что ухудшает динамические и точностные характеристики привода. В случае применения электромагнитного привода была достигнута устойчивая работа прибора в широком диапазоне перемещений и скоростей при относительной простоте реализации.

Тяговая характеристика электромагнитов, определяемая соотношением:

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} I^2, \quad (1)$$

где  $L$  — индуктивность обмотки;  $x$  — перемещение якоря, была линеаризована путем применения якорей переменного сечения. Изменение величины магнитного зазора электромагнита при движении якоря переменного сечения было рассчитано таким образом, чтобы усилие электромагнита однозначно определялось только током обмотки  $I$  и не зависело от величины перемещения якоря [7, 8].

Известно, что достоверность результатов трибоиспытаний непосредственно зависит от жесткости систем задания перемещений и измерения силы трения [9]. Безразлично от того, какой из вариантов привода используется для приведения в движение образца: пьезоэлектрический или электромагнитный, появление силы трения при взаимодействии шарика с пластиной оказывает влияние на равномерность движения привода, что приводит к появлению погрешностей измерения силы трения. В случае включения преобразователей перемещения и датчика положения образца в систему с обратной связью, влияние силы трения на параметры движения привода удастся частично скомпенсировать. Экспериментально установлено, что использование обратной связи по положению образца приводит к увеличению жесткости привода на порядок и более при неизменных параметрах электромагнитов и жесткости подвески. В качестве датчика положения держателя образца используется бесконтактная система, состоящая из двух катушек, закрепленных на неподвижном основании и подвижного сердечника, механически соединенного с элементами привода. Обмотки катушек включены в полумостовую схему, регистрирующую положение сердечника, изменяющего индуктивности катушек. Данная схема измерения перемещений наименее подвержена влиянию окружающей среды в отличие от емкостных систем измерения, применяемых в SFA. Недостатком индуктивных датчиков является меньшая, по сравнению с емкостными датчиками, чувствительность, а также нежелательное влияние возбуждаемого в катушках переменного магнитного поля на измеряемые величины, что более подробно освещено в разделе, посвященном системе измерения силы трения.

**Направляющие.** Держатель образца-пластины соединен

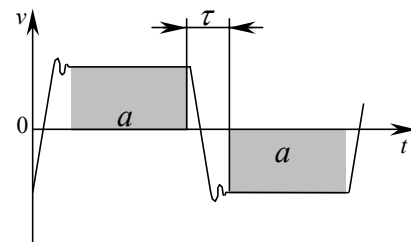


Рис. 3. Изменение скорости движения образца в пределах единичного цикла тестирования

с якорями электромагнитов привода и во время тестирования совершает возвратно-поступательные движения в горизонтальной плоскости. В качестве направляющих движения, используется система рычагов и пружин, образующих упругую подвеску. Применение направляющих изгиба позволяет избежать появления таких негативных явлений, как скачкообразного характера перемещения при малых скоростях движения, а также шума и вибрации, присущих традиционно используемым направляющим скольжения и качения. Применение направляющих изгиба позволяет реализовать перемещения в широком диапазоне, вплоть до субмикронных. Благодаря симметричности конструкции направляющих, вертикальное смещение образца во время движения держателя отсутствует.

**Датчики нагрузки и силы трения.** Определение величины нормальной нагрузки и силы трения производится с помощью одинаковых по конструкции датчиков (рис. 4, а).

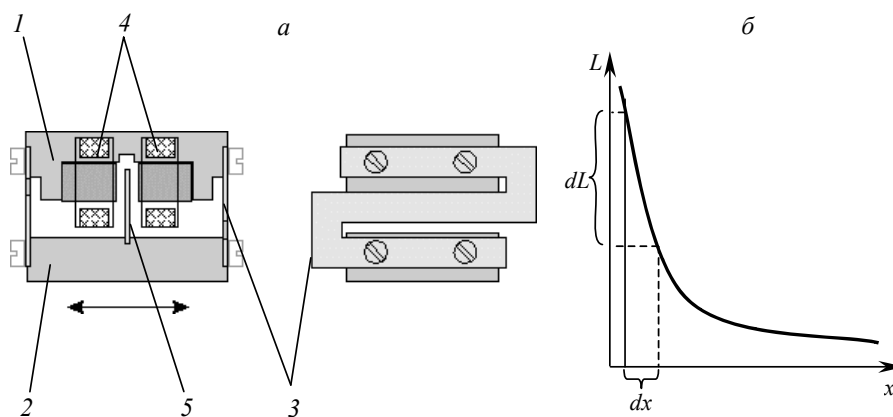


Рис. 4. Индуктивный датчик сил (а) и его характеристика (б). Обозначения позиций расшифрованы в тексте

Перемещение подвижной части датчика 2 регистрируется изменением величины магнитного зазора между Ш-образными магнитопроводами катушек индуктивности 4, закрепленных на неподвижном основании 1 и пластиной с высоким коэффициентом магнитной проницаемости 5, закрепленной на подвижной части датчика 2. Подвижная часть и неподвижное основание датчика соединены между собой с помощью пружин 3. Измерение перемещений производится на начальном линейном участке кривой изменения индуктивности катушек (рис. 4, б).

При измерении малых сил датчики перемещения должны иметь высокую чувствительность, поскольку использование пружин с низкой жесткостью приводит к уменьшению надежности конструкции, снижению резонансной частоты датчиков и ряду других проблем. В нашем случае жесткость пружин составляла  $2 \cdot 10^4$  Н/м. При этом производилось измерение смещения частей датчика на величину  $\pm 50$  мкм с 16-разрядным разрешением. Таким образом, чувствительность датчика при измерении максимальной силы трения  $F = 1$  Н, составила 15 мкН.

Очевидно, что увеличение жесткости пружин и чувствительности датчика перемещения позволяют производить измерения силы трения при меньших величинах перемещения образца. При отсутствии значительных перепадов температур и влажности воздуха, емкостные датчики в данном случае оказываются предпочтительнее индуктивных.

Необходимо отметить существующую проблему воздействия электромагнитного поля, возбуждаемого в катушках датчика при измерении их индуктивности, на измеряемую величину силы трения. Оценка степени воздействия электростатических сил в емкостных датчиках SFA, приведенная в работе [10], может быть также сделана и для катушек индуктивности. В данном случае приведенное для электромагнитного привода уравнение (1), также справедливо и для датчиков положения. Поскольку силовое воздействие катушек на пластину, замыкающую магнитные потоки, взаимно компенсируется в среднем положении пластины и увеличивается при отклонении ее от этого положения, увеличение жесткости пружин и чувствительности датчика предпочтительно и с данной точки зрения.

**Система нагружения.** Нормальная нагрузка индентора на образец устанавливается и поддерживается постоянной во время тестирования с помощью электромагнитной системы с обратной связью. Тяговое усилие электромагнита 7 (рис. 2), передается с помощью рычага 8 через датчик нагрузки 9 на качающуюся головку 10. Начальная балансировка головки осуществляется с помощью грузов 11. Угловое положение головки отслеживается с помощью оптопары 12, сигнал которой зависит от угла наклона рычага 8. Электромагнит 7 и датчик нагрузки 9 электрически соединены в цепь с обратной связью, благодаря чему обеспечивается поддержание нормальной нагрузки постоянной независимо от вертикального смещения головки, вызываемого погрешностью изготовления и установки

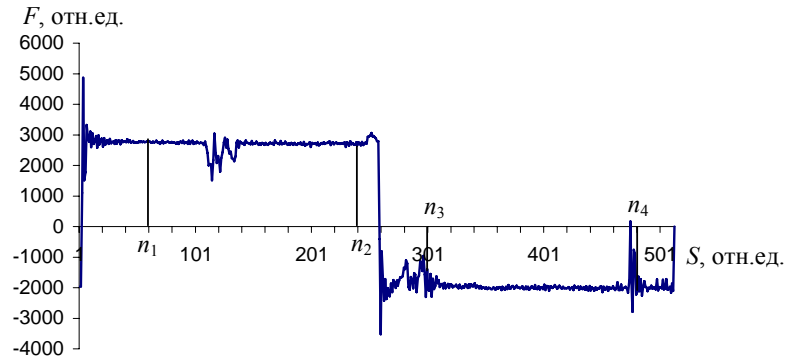


Рис. 5. Зависимость силы трения  $F$  от пройденного пути  $S$  (за время единичного цикла)

образца. Шаговый привод 6 служит для подвода индентора к поверхности образца перед началом тестирования, а также отвода от поверхности по окончании тестирования.

**Методика испытаний образцов.** Испытание образцов производится в автоматическом режиме, что обусловлено сложностью алгоритма юстировки системы нагружения и наличием нескольких цепей обратной связи, работающих одновременно.

Перед началом проведения испытаний, головка 10 с закрепленной на ней системой регистрации силы трения 13, отводится от держателя образца с помощью привода 6. Образец-пластина закрепляется с помощью мини-струбцины, размещенной в держателе 3. Сферический индентор закрепляется в цанговом зажиме, соединенном с датчиком силы трения 13. Рабочий цикл начинается после установки оператором требуемых параметров тестирования: нормальной нагрузки  $P$ , длины трека  $s$ , скорости движения образца  $v$ , времени тестирования  $T$  и максимально допустимого коэффициента трения  $f_{\max}$ . Установка параметров и контроль процесса тестирования производится с помощью программного обеспечения.

Перед началом тестирования, производится автоматическая юстировка прибора по следующему алгоритму.

1. С помощью электромагнита 7 головка 10 приводится в горизонтальное положение. Контроль углового положения осуществляется с помощью оптопары 12.

2. Регистрируется начальное смещение величины нагрузки  $P_0$  в соответствии с уровнем сигнала датчика нормальной нагрузки 9.

3. Усилие электромагнита 7 увеличивается, головка 10 наклоняется.

4. Включается шаговый привод 6 и осуществляется сближение индентора с образцом — пластиной. После касания индентором поверхности пластины и достижения головкой горизонтального положения, подвод прекращается.

5. С помощью электромагнита 7 устанавливается нормальная нагрузка  $P_1$ , равная сумме  $P$  и  $P_0$ . Поскольку определение начального смещения  $P_0$  и испытание образца производятся при одном и том же угловом положении головки, минимизируется влияние использования инденторов, имеющих различную массу и изменяющих балансировку головки, на величину нормальной нагрузки.

6. Включается система обратной связи по нагрузке. Во время тестирования усилие электромагнита изменяется в соответствии с уровнем сигнала датчика 9 с целью компенсации влияния внешних факторов на величину нормальной нагрузки.

После завершения юстировки прибора и установки нормальной нагрузки, включается электромагнитный привод. Поступающие с выхода датчика силы трения сигналы усредняются:

$$F_1 = \frac{1}{(n_2 - n_1)} \sum_{i=n_1}^{n_2} F_i; \quad F_2 = \frac{1}{(n_4 - n_3)} \sum_{i=n_3}^{n_4} F_i, \quad (2)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  — усредненные величины силы трения, полученные при движения образца в прямом и обратном направлениях в пределах единичного цикла;  $F_i$  — текущее значение силы трения;  $n_2 - n_1$  и  $n_4 - n_3$  — количество поступивших данных за время усреднения.

Длина участков трека, в пределах которой производится накопление данных для усреднения (рис. 5) при прохождении индентором пути  $S$ , выбирается оператором с помощью управляющей программы. Таким образом отсекаются данные, собираемые на участках разгона—торможения образца при изменении направления движения.

Результующая сила трения определяется выражением:

$$F = \frac{|F_2 - F_1|}{2} K_f, \quad (3)$$

где  $K_f$  — калибровочный коэффициент, связывающий получаемые на выходе датчика значения с реальной величиной силы трения.

Получаемые за время единичного цикла тестирования данные передаются управляющей программе персонального компьютера для построения зависимости силы и коэффициента трения от пройденного пути  $S$ , времени  $T$  или количества циклов тестирования  $N$ . Тестирование прекращается при превышении величиной коэффициента трения порогового уровня, а также по прошествии определенного времени тестирования, установленных оператором.

**Обсуждение результатов.** С помощью описанного микротрибометра производилось тестирование различных тонких пленок. На рис. 6 приведен результат испытаний мономолекулярного покрытия на основе стирол-этилен-бутилен-стирольного блоксополимера, нанесенного на поверхность кремниевой подложки. В качестве контртела использовался шарик диаметром 3 мм, изготовленный из стали ШХ15.

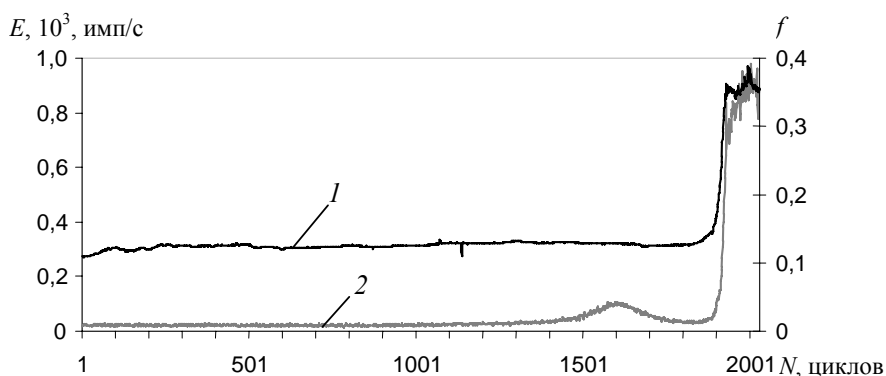


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения  $f(1)$  и скорости счета АЭ  $E(2)$  от количества циклов тестирования  $N$ .  
Нормальная нагрузка  $P = 300$  мН, скорость скольжения  $v = 4$  мм/с, длина трека  $S = 3$  мм

При испытании образца отмечены низкий уровень механических шумов. Эффективность системы контроля нормальной нагрузки подтверждается стабильностью определения коэффициента трения.

Одновременно с записью величины силы трения производилась регистрация скорости счета импульсов АЭ, поступающих с выхода датчика, который расположен под образцом — пластиной. Видно, что скорости счета АЭ позволяет получить дополнительную информацию о процессе изменения структуры поверхностных слоев, анализ которой, однако, представляет собой отдельную тему исследований.

Следует отметить, что результирующая сила взаимодействия индентора и подложки определяется суммой сил различной природы. Исследование поверхностных сил, возникающих при контактом взаимодействии образцов на разработанном в ИММС НАНБ приборе для исследования поверхностных сил (адгезиометре) показало, что между сферическим индентором диаметром 1—2 мм и поверхностью кремниевой подложки возникают силы притяжения величиной  $80 \div 360$  мкН [11], которые могут изменяться в несколько раз при нанесении различных покрытий, а также при изменении влажности окружающей среды, наличии поверхностных зарядов и электромагнитных полей. Наличие поверхностных сил существенно влияет на соотношение между адгезионной и деформационной составляющими силы трения при малых величинах нормальной нагрузки и, как следствие, на результаты триботехнических испытаний [3].

**Выводы.** Рассмотрена конструкция микротрибометра, позволяющего проводить триботехнические испытания тонких покрытий, применяемых в технологии МЭМС. Отличительными особенностями прибора являются применение бесконтактного электромагнитного привода, системы контроля нормальной нагрузки, а также бесконтактных индуктивных датчиков сил. Приведенная методика проведения испытаний образцов позволяет поддерживать рабочие параметры с высокой точностью при малых величинах нормальной нагрузки. Использование датчика АЭ позволило получить дополнительную информацию о процессе изменения структуры поверхностных слоев во время испытаний.

### Обозначения

$F_m$  — сила тяги электромагнитного привода;  $dL$  — изменение индуктивности катушки электромагнита при различном положении якоря, а также катушек датчика перемещения при изменении положения сердечника;  $dx$  — перемещение якоря электромагнита или сердечника датчика перемещения;  $P$  — величина нормальной нагрузки;  $P_0$  — начальное смещение величины нагрузки;  $F_1, F_2$  — значения силы трения при реверсивном движении образца;  $F_i$  — текущее значения величины силы трения, используемое для усреднения;  $n_1, n_2, n_3, n_4$  — показания счетчика при дискретном определении величины силы трения;  $F$  — значение величины силы трения;  $K_f$  — калибровочный коэффициент величины силы трения;  $f$  — коэффициент трения;  $S$  — длина трека;  $v$  — скорость движения образца;  $T$  — время тестирования;  $f_{\max}$  — максимально допустимый коэффициент трения;  $E$  — скорость счета АЭ;  $S$  — пройденный путь.

### Литература

1. **Haugstad G., Gladfelter W. L., Jones R. R.** Nanotribology on a polymer network film // J. Vac. Sci. Technol. — 1996, A 14(3), 1864—1869
2. **Izraelachvily J. N.** Intermolecular and Surface Forces. — Acad. NY: Press. — 1991
3. **Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya., Dubravin A. M., et al.** Experimental Equipment for Interfacial Force and Friction Measurements of Micro Scale Samples // 14th Int. Coll. Tribology, Tech. Akad. Esslingen, Germany. — 2004, 73—77
4. **Myshkin N. K., Dubravin A. M., Komkov O. Yu., et al.** Reciprocating Microtribometer for Testing at Light Loads // 47 Int. Sci. Coll. Tech. Univ. Ilmenau, Germany. — 2002, 41—42
5. **Dong F. Wang, Koji Kato.** Tribological evaluation of carbon coatings with and without nitrogen incorporation applicable to MicroElectroMechanical systems // Sensors and Actuators. — 2001, A 93, 251—257
6. **Linmao Qian, Gustavo Luendo, Denis Douillet, et al.** New two-dimensional friction force apparatus design for measuring shear forces at the nanometer scale // Rev. Sci. Instr. — 2001 (72), N 11, 4171—4177
7. **Витенберг М. И.** Расчет электромагнитных реле. — М.; Л.: Энергия. — 1966
8. **Афонин А. А., Гребеников В. В.** Линейный электромагнитный привод: Расчет статич. и динам. характеристик. (Препринт / АН УССР. Ин-т электродинамики; N 264). — Киев. — 1981
9. **Голего Н. Л., Козаков В. А.** Схемы и динамические модели машин для триботехнических испытаний // Трение и износ. — 1980 (1), № 2, 334—340
10. **Restagno F., Crassous J., Charlaix E., Monchanin M.** A new capacitive sensor for displacement measurement in a surface-force apparatus // Measurement Sci. and Tech. — 2001, N 12, 16—22
11. **Григорьев А. Я., Дубравин А. М., Ковалев А. В., и др.** Измерение контактной адгезии и аттракционного взаимодействия технических поверхностей // Трение и износ. — 2003 (24), № 4, 405—412

Поступила в редакцию 02.12.03.

Komkov O.Yu. A reciprocating type microtribometer operating within a range of light loads: design features and methods of tests of specimens.

The design of a reciprocating microtribometer is described in which a contactless linear electromagnetic drive with feedback is used and that has a system of monitoring of normal loading. The method of computerized testing enables to test fine coating within a range of light loads.