

**ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН**

© 2011 И.Д. Ибатуллин, А.Н.Журавлев, Т.А.Шашкина, А.В.Утянкин, А.Р. Галлямов

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 10.11.2011

В статье описывается комплекс новых методов и приборов исследования качества поверхностей, включая программно-аппаратурные диагностические комплексы для оценки микрогеометрии, микротвердости и прогнозирования остаточного ресурса. Приведены характеристики стенов для триботехнических испытаний материалов, а также приборы для оценки адгезии покрытий к основному материалу.

Ключевые слова: программно-аппаратурный комплекс, трибометр, склерометр, адгезиометр, микротвердость, шероховатость.

Качество поверхностей обеспечивает основные показатели надежности, технического совершенства и конкурентоспособности технологических, энергетических и транспортных машин при их разработке, производстве и в эксплуатации. От качества поверхностей деталей напрямую зависит износостойкость, коррозионная стойкость, усталостная прочность, трещиностойкость, контактная жесткость, электропроводность, оптические свойства, коэффициент трения материалов, а также внешний вид детали, и микрогеометрия, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения, пластичность. Для оценки этих свойств используется обширный перечень дорогостоящих приборов: профилографов, микротвердомеров, склерометров, трибометров и др. Поэтому для организации лабораторий оценки качества поверхностей требуются обширные площади и значительные капитальные вложения. В этом случае выходом из ситуации является применение универсальных, многофункциональных исследовательских приборов для оценки качества поверхностей, однако маркетинговые исследования и патентный анализ показал, что в последние годы сформировались новые направления в исследовании физического состояния поверхностных слоев, которые не могут быть реализованы с помощью классических приборов. К таковым относится оценка энергетических

параметров пластической деформации и разрушения материала поверхностного слоя, которые позволяют прогнозировать остаточный ресурс материалов, работающих в условиях усталости. В данной статье приводится описание ряда устройств, предназначенных для всесторонней оценки качества поверхностей.

**Переносной склерометр**

Одним из важных направлений исследований параметров поверхностных слоев, развиваемых в СамГТУ, является оценка критериев прочности. Внутренняя энергия материала на поверхностях трения деталей машин в процессе эксплуатации растет за счет накопления упругих искажений кристаллической решетки, тепловыделения при трении, диффузионных потоков, химических реакций и др. факторов. Поэтому, при оценке прочности поверхностных слоев, подверженных при эксплуатации усталости и изнашиванию используют критерии прочности, основанные на структурно-энергетической теории.

В энергетическом фазовом пространстве наиболее стабильным является состояние с минимальной внутренней энергией поверхностного слоя (в данном состоянии материал может находиться сколь угодно долго без разрушения). Процесс любой природы (физический, химический, механический и др.), вызывающий рост внутренней энергии и, следовательно, увеличивающий неравновесность системы, может быть интерпретирован, как процесс повреждаемости материала. Разрушение материала связано с достижением его внутренней энергии  $u$  критической величины  $u^*$  – энергии активации разрушения (в этом состоянии материал теряет пластичность и появляются хрупкие трещины). Фундаментальная роль энергетических барьеров в кинетике протекания неравновесных процессов отмечена в молекулярно-кинетической теории Я.И. Френкеля, термофлуктуационной концепции прочности академика С.Н. Журкова, синергетической теории бифуркаций открытых систем и т.д. Поэтому весьма важным направлением исследования свойств детонационных покрытий является оценка энергетических

*Ибатуллин Ильдар Дугласович, доктор технических наук, доцент кафедры «Нанотехнологии в машиностроении», факультет МиАТ, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Журавлев Андрей Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры технологии твердых химических веществ, факультет инженерно-технологический, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Шашкина Тамара Александровна, аспирантка, кафедры «Нанотехнологии в машиностроении», факультет МиАТ, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Утянкин Арсений Владимирович, аспирант кафедры «Нанотехнологии в машиностроении», факультет МиАТ, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Галлямов Альберт Рафисович, аспирант кафедры «Нанотехнологии в машиностроении», факультет МиАТ, E-mail: tribo@rambler.ru*

параметров деформации и разрушения материала поверхностного слоя. Уравнения энергетического баланса поверхностных слоев, деформируемых трением, и методики оценки энергетических параметров повреждаемости приведены в работе [1].

В качестве переносного устройства для безобразцовой оценки мольной энергии пластической деформации поверхностных слоев деталей машин в полевых условиях предложена модель маятникового склерометра, общий вид которого приведен на рис. 1.

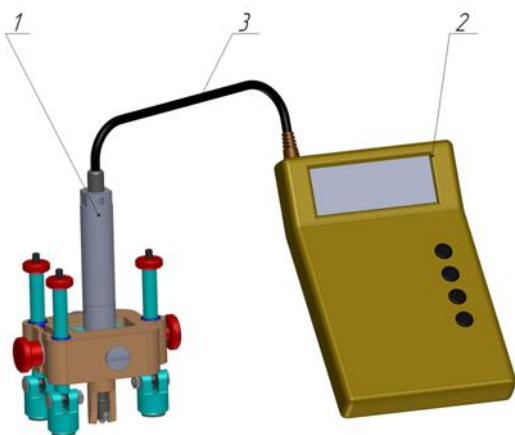


Рис. 1. Общий вид переносного склерометра.

Прибор состоит из переносного модуля 1, микроконтроллерного блока обработки информации 2 и соединительного кабеля 3.

Механическая часть маятникового склерометра включает следующие элементы: три магнитные опоры, жестко закрепленные на цилиндрических направляющих; вдоль направляющих перемещается каретка, положение которой относительно направляющих может фиксироваться боковыми винтами; ручка склерометра, шарнирно связанная с кареткой; датчик касательной силы, один конец которого связан с механизмом регулировки положения индентора (при настройке величины заглабления индентора) или жестко соединен с корпусом (после завершения настройки), а другой конец - с индентором.

В нижней части корпуса находятся два симметричных выступа. Опорная часть выступов изготовлена в виде заостренной с двух сторон кромки. Линии кромок на обоих выступах описывают дугу, лежащую на окружности, центр которой совпадает с центром вращения корпуса относительно поперечной планки. Методика склерометрирования выполняется по следующим этапам. Освобождают фиксирующие винты и все стойки с магнитными опорами опускают в крайнее нижнее положение. Затем склерометр при помощи магнитных стоек фиксируют на поверхности исследуемой детали. Корпус склерометра вращательным движением отводят вбок, при этом угол наклона корпуса по отношению к контролируемой поверхности составляет  $\sim 85^\circ$ . Плавно опускают корпус вдоль направляющих до соприкосновения одной из базирующих кромок корпуса с

поверхностью, после чего поперечную планку в данном положении фиксируют винтами. Затем, взявшись за верхний конец корпуса, по дуге перемещают его через вертикальное положение в противоположную сторону до контакта с поверхностью второй базирующей кромки. При этом индентор, описывая дугу, приближается к поверхности, внедряется в нее на заданную величину и плавно выходит из контакта. В процессе пропахивания поверхности индентором производят непрерывное измерение касательной силы, при этом с помощью пикового детектора выделяют и сохраняют максимальное значение касательной силы  $F_{\tau \max}$ , которая соответствует центральному участку царапины в зоне максимального внедрения индентора  $h$  (величина которого задается в ходе предварительной настройки склерометра). Расчет энергии активации пластической деформации выполняется автоматически с помощью микроконтроллерной системы сбора данных. Полученные результаты отображаются на жидкокристаллическом дисплее.

Технические характеристики маятникового склерометра: габариты (механическая часть) –  $70 \times 50 \times 140$  мм; масса – 300 г; рабочий угол поворота корпуса –  $30^\circ$ ; максимальная глубина лунки – до 5 мкм; длина лунки –  $\sim 2$  мм; отрывное усилие магнитных опор – 10 кгс; источник автономного питания – аккумулятор (6 в); потребляемая мощность – до 0,5 Вт; индентор – алмазная пирамида Виккерса; форма исследуемых поверхностей – плоские, цилиндрические (с радиусом не менее 35 мм); положение склерометра при испытаниях – произвольное (вертикальное, горизонтальное, под углом к горизонту).

#### Малогобаритный лабораторный склерометрический программно-аппаратурный диагностический комплекс

Основываясь на данном подходе в лаборатории наноструктурированных покрытий СамГТУ разработан склерометрический программно-аппаратурный комплекс, предназначенный для энергетической оценки накопленной повреждаемости и прогнозирования остаточного ресурса на образцах и деталях из конструкционных металлов и сплавов в лабораторных условиях. Общий вид прибора показан на рис. 2.

Прибор содержит датчики нормальной и касательной сил, а также датчик вертикального перемещения индентора и позволяет проводить исследования, как при фиксированной нормальной нагрузке, так и при фиксированном заглаблении индентора. За счет непрерывного контроля глубины внедрения индентора в поверхностный слой при нормальном нагружении индентора (в диапазоне до 200 гс) прибор позволяет оценивать микротвердость материала в процессе внедрения индентора. Отличительная особенность конструкции склерометрической головки прибора заключается в том, что механизмы нормального нагружения и тангенциального пере-

мещения индентора не содержат узлов трения. Они заменены системой плоско-параллельных пружин.

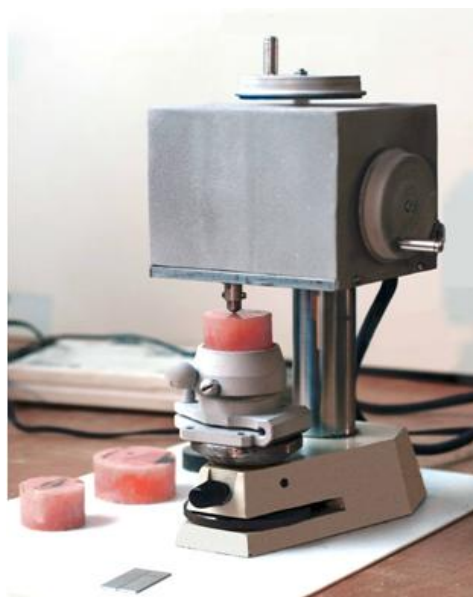


Рис. 2. Общий вид малогабаритного лабораторного склерометра.

Данное решение позволяет полностью устранить погрешности, связанные с трением и износом направляющих. Гибкая подвеска индентора позволяет при царапании поверхности огибать все неровности профиля, сохраняя заданную глубину внедрения алмазной пирамиды в поверхностный слой.

#### Универсальный программно-аппаратурный комплекс для контроля качества поверхностей

В развитие предыдущих разработок в СамГТУ создан новый многофункциональный программно-аппаратурный комплекс для оценки качества поверхностей (рис. 3).



Рис. 3. Диагностический программно-аппаратурный комплекс для оценки качества поверхностей.

Комплекс включает следующие элементы: стойку портального типа с автоматизированным и ручным вертикальным перемещением траверсы; стол с автоматизированным приводом горизонтального перемещения, имеющий также ручные механизмы вертикального перемещения столика и наклона исследуемых образцов; траверсу с измерительной головкой, включающую автоматизированные механизмы нагружения индентора и горизонтального перемещения каретки, а также датчики нормальных и касательных сил, действующих на индентор, датчик вертикальных перемещений индентора.

Комплекс имеет компьютеризированную систему сбора данных с каналами измерения нормальной и касательной нагрузок, вертикальных перемещений индентора, а также температуры разогрева испытываемой пары трения. Кроме того, имеются резервные каналы для сбора данных с других датчиков по усмотрению оператора. Простота конструкции позволяет снизить стоимость трибометров (в базовой комплектации) в 2...3 раза по сравнению с аналогичными образцами.

#### Технические характеристики склерометра

1. Методы испытаний: склерометрический; дюрометрический; трибометрический; профилографирование.
2. Типы используемых инденторов: алмазная четырехгранная пирамида Виккерса; сферический наконечник; конический наконечник для профилографирования.
3. Определяемые параметры: энергия активации пластической деформации, кДж/моль; микротвердость, кгс/мм<sup>2</sup>; остаточный ресурс, %; скорость изнашивания, мкм/час; сила трения, Н; профилограмма.
4. Пределы измерений: энергии активации: 5...300 кДж/моль; микротвердости: 20...1000 кгс/мм<sup>2</sup>; остаточного ресурса: 0...100%.
5. Характеристика испытываемых образцов. Материал: конструкционные стали и сплавы. Форма: плоские, цилиндрические ( $R_{\min}=10$  мм), -- сферические ( $R_{\min}=10$  мм). Шероховатость:  $R_z \leq 6,3$  мкм. Исследуемая площадь:  $\geq 10$  мм<sup>2</sup>. Габариты, не более 20×20×15 мм.
6. Погрешность измерения: энергии активации  $\leq \pm 10\%$ ; микротвердости  $\leq \pm 10\%$ ; остаточного ресурса  $\leq \pm 20\%$ .
7. Диапазон перемещений индентора: вертикальных  $\geq 30$  мм; продольных  $\geq 20$  мм; поперечных  $\geq 20$  мм.
8. Масса  $\leq 15$  кг.

Комплекс позволяет выполнять следующие функции: 1) профилографирование поверхности с возможностью записи волнограммы на участке поверхности длиной до 100 мм; 2) определение градиента механических свойств, путем измерения микротвердости в процессе внедрения индентора; 3) оценка энергии активации пластической деформа-

ции поверхностного слоя; 4) определение коэффициента трения и износостойкости при возвратно-поступательном движении шарикового индентора по поверхности; 5) прогнозирование остаточного ресурса испытываемого материала по энергетическому критерию прочности.

#### Адгезиометр

Для деталей с защитными (антикоррозионными, противоизносными и др.) покрытиями основным показателем качества является прочность сцепления покрытия с основой. Для исследования адгезионных свойств покрытий в лаборатории наноструктурированных покрытий разработаны способ и устройство (адгезиометр) (рис. 4), позволяющие исследовать прочности сцепления покрытий, как на срез, так и на отрыв. В новом способе предусмотрено нанесение покрытия на основу через калиброванное отверстие на отрывном элементе.



Рис. 4. Общий вид адгезиометра

Разработанный способ включает следующие этапы. Отрывной элемент, имеющий углубление в виде воронки с центральным калиброванным отверстием плотно прижимают винтами к основе до нанесения покрытия. Затем наносят покрытие так, чтобы часть покрытия легла на поверхность воронки, а часть – на основу через калиброванное отверстие в центре воронки, затем удаляют фиксирующие винты так, чтобы отрывной элемент был связан с основой только силой сцепления покрытия с основой.

Далее основу закрепляют на поворотном элементе, и поворачивают последний вокруг оси относительно нагружающего механизма таким образом, чтобы, в зависимости от цели испытания, обеспечить возможность приложения к отрывному элементу относительно основы нормальной отрывающей нагрузки для оценки прочности сцепления покрытия на отрыв или касательной нагрузки для оценки прочности сцепления покрытия на срез. Далее при помощи нагружающего механизма плавно создают усилие, действующее на отрывной элемент до отрыва (или сдвига) отрывного элемента, и с помощью измерительного устройства (тензометрического датчика сил и (или) стрелочного индикатора) опреде-

ляют максимальную нагрузку, действующую на отрывной элемент в момент отделения покрытия от основы. Затем определяют прочность сцепления покрытия с основой на отрыв (или на срез) как отношение максимальной нагрузки, действующей на отрывной элемент к площади калиброванного отверстия. Для более точной оценки измеряемой величины после отделения покрытия от основы производится уточненная оценка площади, на которой покрытие соединялось с основой.

#### Универсальный трибометр

В лаборатории наноструктурированных покрытий Самарского государственного технического университета создана компактная универсальная машина трения (рис. 5), имеющая следующие преимущества: оригинальная конструкция измерительной части трибометра позволяет использовать в качестве привода для испытаний практически любой сверлильный, сверлильно-фрезерный и токарный станок, с мощностью двигателя от 100 Вт; трибометр имеет компьютеризированную систему сбора данных с каналами измерения осевых и касательных усилий, а также температуры разогрева испытываемой пары трения. Кроме того, имеются резервные каналы для сбора данных с других датчиков по усмотрению оператора; трибометр создан по модульному принципу. Разработанный комплект сменных приспособлений позволяет реализовать до девятнадцати различных вариантов испытаний на трение и изнашивание, при этом возможны испытания, как на образцах, так и на готовых изделиях; простота конструкции позволяет снизить стоимость трибометров (в базовой комплектации) в 2...3 раза по сравнению с аналогичными образцами; используются малогабаритные образцы и контрообразцы, позволяющиекратно снизить затраты материалов на испытания; имеется режим автоматического отключения стенда по достижении длительности испытаний или момента трения заданной величины; имеется возможность триботехнических испытаний конструкционных материалов, смазочных материалов и покрытий в различных режимах трения и изнашивания (вплоть до схватывания поверхностей).



Рис. 5. Общий вид трибометра.

#### Технические характеристики трибометра

Виды трения: качение; скольжение; сухое трение; граничное трение. Типы используемых образцов: цилиндрические; сферические; плоские. Реализуемые схемы трения: кольцо-кольцо; кольцо-плоскость; шарик-диск; 4-х шариковая схема; палец-

диск; число реализуемых вариантов испытаний - 19. Габариты: 550x350x350 мм. Определяемые параметры: рабочая нагрузка; момент трения; температура разогрева. Пределы измерений: нормальной нагрузки - до 200 кгс; температуры - до 200 °С; момента трения до 1 Н·м. Погрешность измерения (от предела измерения)  $\leq \pm 5\%$ .

Основой трибометра является измерительный комплект, включающий моноблок, систему сбора данных и комплект оснастки, в который входят различные приспособления для фиксации образцов и контрообразцов. Моноблок имеет хвостовик, который позволяет фиксировать его как в резцедержателе токарного станка, так и в тисках сверлильного станка.

### Заключение

1. Разработано семейство лабораторных и переносных склерометрических программно-аппаратурных диагностических комплексов, позволяющих оценивать энергетическое состояние материала поверхностного слоя, механические свойства, а также ресурсные характеристики конструктивных материалов.

2. Разработаны прибор и методы контроля адгезионной прочности сцепления покрытий с подложкой на отрыв и на срез.

3. Разработан универсальный трибометр, позволяющий проводить оценку триботехнических свойств конструкционных и смазочных материалов, и покрытий различного назначения.

Отдельные материалы статьи выполнены при поддержке НО «Инновационно-инвестиционный фонд Самарской области».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев//Монография/ И.Д. Ибатуллин – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.: ил. ISBN – 978-5-7964-1211-4.
2. Патент РФ № 2419084. Способ определения прочности сцепления покрытия с подложкой и устройство для его осуществления. МПК G01N 19/04. Оpubл. 20.05.2011 Бюл. № 14/ Ненашев М.В., Ибатуллин И.Д., Тюрнина Т.А., Балашов Е.С., Якунин К.П., Кобякина О.А.

## DEVICES OF QUALITY ASSURANCE OF SURFACES OF DETAILS OF FRICTION UNITS OF MACHINES

© 2011 I.D.Ibatullin, A.N.Zhuravlev, T.A.Shashkina, A.V.Utjankin, A.R.Galljamov

Samara State Technical University, Samara

The complex of new methods and devices of researching the quality of surfaces, including programme-hardware diagnostic complexes for estimation of microgeometry, microhardness and forecasting of a residual resource of materials is described in the article. For tribotechnical tests of materials, and also devices for estimation of adhesion of coverings with the basic material.

Key words: programme-hardware complex, machine of friction, scratch tester, microhardness, roughness

*Ibatullin Ildar Duglasovich, Dr.Sci.Tech., the senior lecturer of chair «Nanotechnologies in mechanical engineering», faculty MiAt, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Zhuravlyov Andrey Nikolaevich, Cand.Tech.Sci., the senior research assistant of chair of technology firm himiche-skih substances, faculty engineering-technological, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Shashkina Tamara Aleksandrovna, the post-graduate student, chairs «Nanotechnologies in mechanical engineering», faculty MiAt, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Utjankin Arseny Vladimirovich, the post-graduate student of chair «Nanotechnologies in mechanical engineering», faculty MuAT, E-mail: tribo@rambler.ru;*

*Galljamov Albert Rafisovich, the post-graduate student of chair «Nanotechnologies in mechanical engineering», faculty MiAt, E-mail: tribo@rambler.ru*