

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2011 Т. А. Шашкина, А. В. Утянкин, А. Р. Галлямов, А. С. Дьяконов

Самарский государственный технический университет

Приводятся результаты разработки универсального программно-аппаратурного комплекса для исследования механических, геометрических и триботехнических свойств поверхностей образцов материалов и деталей машин.

Программно-аппаратурный комплекс, склерометрия, твердость, трение, профилографирование, остаточный ресурс, энергия пластической деформации.

Введение

Качество поверхностей на современном этапе научно-технического развития 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. К одним из основных свойств поверхностей относятся микрогеометрия, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения, пластичность. Для оценки этих свойств используется обширный перечень дорогостоящих приборов: профилографов, микротвердометров, склерометров, трибометров и др. Поэтому для организации лабораторий оценки качества поверхностей требуются обширные площади и значительные капитальные вложения, исчисляемые миллионами рублей. Для многих учебных заведений, научных центров, малых предприятий такие затраты зачастую неприемлемы, учитывая, что каждый прибор требует периодической поверки и сертификации. В этом случае выходом из ситуации является применение универсальных, многофункциональных исследовательских приборов для оценки качества поверхностей, однако маркетинговые исследования и патентный анализ показали, что в настоящее время такие приборы отсутствуют. Кроме того, в последние годы сформировались новые направления в исследовании физического состояния по-

верхностных слоев, которые не могут быть реализованы с помощью классических приборов. К таковым относится оценка энергетических параметров пластической деформации и разрушения материала поверхностного слоя, позволяющая 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, характеризующих фундаментальные свойства материалов. Материал на поверхностях трения деталей машин представляет собой открытую термодинамическую систему, внутренняя энергия которой в процессе эксплуатации растет за счет накопления упругих искажений кристаллической решетки, тепловыделения при трении, диффузионных потоков, химических реакций и др. факторов. Поэтому, касаясь проблемы оценки прочности поверхностных слоев, подверженных при эксплуатации усталости и изнашиванию, нельзя обойти критерии прочности, основанные на структурно-энергетической теории. Рассматривая состояние поверхностного слоя в энергетическом фазовом пространстве, наиболее стабильным является состояние с минимальной внутренней энергией (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 отмечается 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 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 и схема которого приведены на рис. 1, а, б. Прибор состоит из переносного модуля 1, микроконтроллерного блока обработки информации 2 и соединительного кабеля 3 (рис. 1, а).

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 заглубления индентора) или жестко соединен с корпусом (после завершения настройки), а другой конец - с индентором.

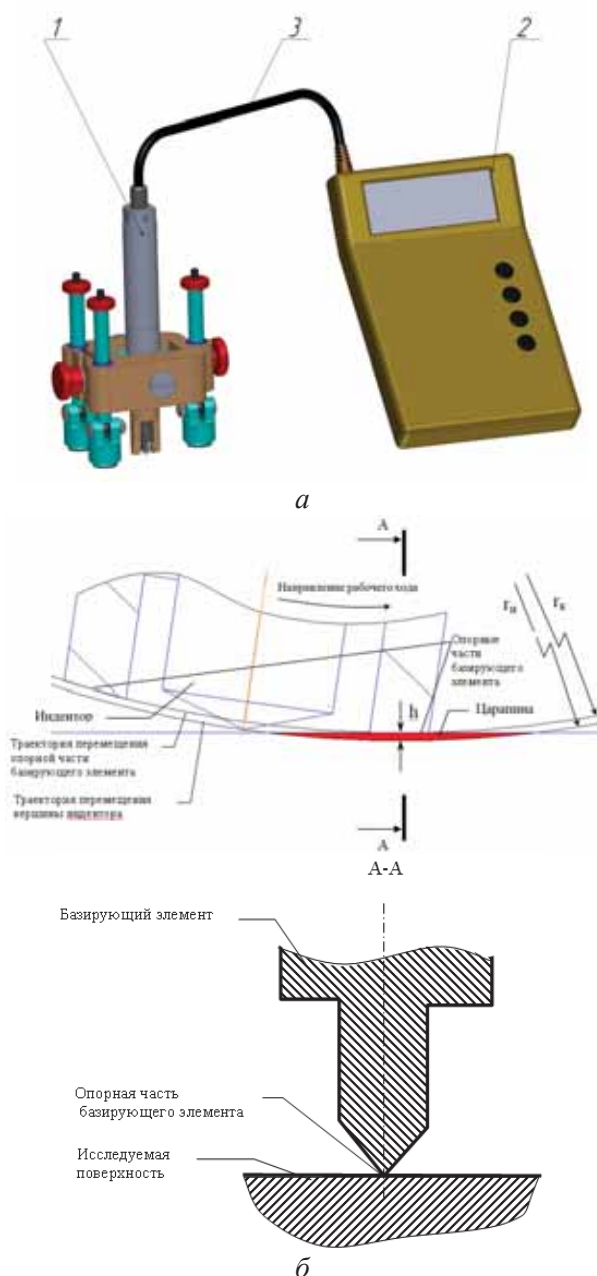


Рис. 1. Общий вид переносного склерометра (а) и схема формирования борозды (б)

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. В процессе отладки склерометра с помощью дифференциального винта регулировки положения индентора добиваются такого взаимного положения корпуса и датчика касательной силы, при котором расстояние r_u от центра вращения корпуса (оси шарнира) до вершины индентора превышает

ет расстояние r_k от того же центра до дуги, описываемой кромками выступов, на величину, равную требуемой глубине внедрения индентора при склерометрировании h . Таким образом, при повороте корпуса относительно поперечной планки вершина индентора и кромки выступов на корпусе описывают дуги с радиусами, отличающимися на величину, равную требуемой глубине внедрения индентора (рис. 1,б).

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 базисных 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 базисной 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° ; максимальная глубина лунки – до 5 мкм; длина лунки – ~ 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).

Малогабаритный 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 склерометров для работы в автономном и стационарном режимах показан на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид малогабаритного лабораторного склерометра

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 заглублении 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 перемещения индентора не содержат узлов трения. Они заменены системой плоскопараллельных пружин. 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.

Пример эпюры склерометрических испытаний приведен на рис 3.

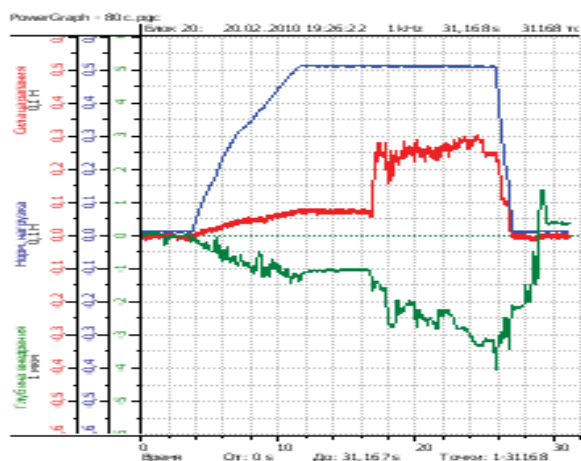


Рис. 3. К оценке энергии активации пластической деформации. Материал – твердый сплав ВК-12

Универсальный программно-аппаратурный комплекс для контроля качества поверхностей

В развитие предыдущих разработок в СамГТУ разработан новый многофункциональный программно-аппаратурный комплекс для оценки качества поверхностей (рис. 4).

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.



Рис. 4. Диагностический программно-аппаратурный комплекс для оценки качества поверхностей

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. Характеристики комплекса приведены в табл. 1.

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 деформации 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.

Таблица 1. Технические характеристики склерометра

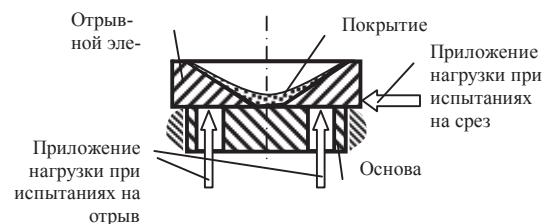
№ п/п	Технические характеристики	Параметры
1	Методы испытаний	1) Склерометрический; 2) ДюрOMETрический; 3) Трибометрический; 4) Профилографирование
2	Типы используемых инденторов	1) Алмазная четырехгранная пирамида Виккерса; 2) Сферический наконечник; 3) Конический наконечник для профилографирования
3	Определяемые параметры	1) Энергия активации пластической деформации, кДж/моль; 2) Микротвердость, кгс/мм ² ; 3) Остаточный ресурс, %; 4) Скорость изнашивания, мкм/ч; 5) Сила трения, Н; 6) Профилограмма
4	Пределы измерений: - энергии активации - микротвердости - остаточного ресурса	5...300 кДж/моль; 20...1000 кгс/мм ² ; 0...100%
5	Характеристика испытываемых образцов: - материал - форма - шероховатость - исследуемая площадь - габариты, не более	Конструкционные стали и сплавы; Плоские, цилиндрические (R _{мин} =10 мм), сферические (R _{мин} =10 мм); R _z ≤ 6,3 мкм; ≥ 10 мм ² ; 20×20×15 мм
6	Погрешность измерения - энергии активации - микротвердости - остаточного ресурса	≤ ±10%; ≤ ±10%; ≤ ±20%
7	Диапазон перемещений индентора: - вертикальных - продольных - поперечных	≥ 30 мм; ≥ 20 мм; ≥ 20 мм
8	Масса	≤ 15 кг

Данная модель диагностического комплекса в текущем году была отмечена серебряной медалью в номинации «Лучший инновационный проект года в области приборостроения» на технической ярмарке в г. Санкт-Петербурге.

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. 5), позволяющие исследовать прочностные сцепления покрытий, как на срез, так и на отрыв. В новом способе предусмотрено нанесение покрытия на основу через калиброванное отверстие на отрывном элементе.



а



б

Рис. 5. К описанию адгезиометра:

а - общий вид адгезиометра;

б - схема приложения нагрузок при испытаниях

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 во-

ронки, 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) определяют 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, как вариант вышеуказанного способа, после отделения покрытия от основы

производится уточненная оценка площади, на которой покрытие соединялось с основой.

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.

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

Библиографический список

1. Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев [Текст] / И.Д. Ибатуллин // монография – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.:

2. Пат. РФ, МПК G01N 19/04. Способ определения прочности сцепления покрытия с подложкой и устройство для его осуществления. [Текст] / М.В. Ненашев, И.Д. Ибатуллин, Т.А. Тюрнина [и др.] № 2419084. Опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14

DEVICES AND METHODS OF RESEARCH OF QUALITY OF SURFACES

© 2011 T. A. Shashkina, A. V. Utjankin, A. R. Galljamov, A. S. Dyakonov

Samara State Technical University

In article results of working out of a universal programme-hardware complex for research mechanical, geometrical and tribotechnical properties of surfaces of samples of materials and details of machines are resulted.

Programme-hardware complex, scratch tester, hardness, friction, residual resource, energy of plastic deformation.

Информация об авторах

Шашкина Тамара Александровна - аспирант Самарского государственного технического университета. E-mail: gverdcitelly@gmail.com. Область научных интересов: методы и приборы контроля качества поверхностей, механика разрушения твердых тел.

Утянкин Арсений Владимирович - аспирант Самарского государственного технического университета. E-mail: arsenii_86@mail.ru. Область научных интересов: компьютерное моделирование, методы и приборы контроля качества поверхностей.

Галлямов Альберт Рафисович - аспирант Самарского государственного технического университета. E-mail: albert-mechtatel@mail.ru. Область научных интересов: наноструктурированные покрытия, серебряно-алмазные покрытия.

Дьяконов Александр Сергеевич - старший преподаватель Самарского государственного технического университета. E-mail: tribo@rambler.ru. Область научных интересов: абразивный инструмент.

Shashkina Tamara Alexandrovna - post-graduate student of Samara State Technical University. E-mail: gverdcitelly@gmail.com. Area of research: methods and devices of quality assurance of surfaces, mechanics of destruction of firm bodies.

Utjankin Arseniy Vladimirovich - post-graduate student of Samara State Technical University. E-mail: arsenii_86@mail.ru. Area of research: computer modelling, methods and devices of quality assurance of surfaces.

Galljamov Albert Rafisovich - post-graduate student of Samara State Technical University. E-mail: albert-mechtatel@mail.ru. Area of research: nanostructured coverings, silver-diamond coverings.

Dyakonov Alexander Sergeevich - The senior teacher of Samara State Technical University. E-mail: tribo@rambler.ru. Area of research: detonation coverings, abrasive tool.