

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ю.Ф. Назаров\*, А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко, И.В. Компанец

*Украинская инженерно-педагогическая академия (Харьков)*

*Украина*

*\*Московский государственный открытый университет*

*Россия*

Поступила в редакцию 16.08.2007

Проанализированы известные методы контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов с привлечением вычислительной техники. Предложены для диагностики и контроля методы фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии и контактной разности потенциалов, позволяющие оценить влияние механической обработки на качество и физико-химическое состояние поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества выпускаемой продукции требует решения многочисленных проблем в самых различных областях. Технологические проблемы относятся к ряду важнейших, ибо их успешное решение определяет, в конечном итоге, эксплуатационные показатели даже прекрасно спроектированных изделий. Одной из таких проблем является оценка влияния шероховатости, волнистости и отклонений от формы поверхностей деталей на их функциональные свойства.

Шероховатость (микрорегеометрия) поверхности является одной из важнейших характеристик материалов и влияет на износостойкость, контактную жесткость, коррозионную стойкость и другие функциональные характеристики поверхности. Однако, до настоящего времени вопросы достоверности оценки шероховатости изучены недостаточно, а определение существующих стандартных и нестандартных критериев шероховатости достаточно трудоемки, и поэтому, не всегда могут быть использованы для решения многих задач в производственных условиях.

Проведение исследований по установлению наиболее достоверных критериев шероховатости, а также разработка методик и устройств, позволяющих автоматизировать процесс измерения, является актуальной задачей, направленной на повышение качества продукции и развитие производства.

Целью работы является анализ известных методов контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов и развитие методов на основе фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии (ФСЭЭ) и контактной разности потенциалов (КРП) для оценки качества поверхности.

### ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Существует несколько систем определения числовых значений параметров шероховатости поверхности, однако, самой распространенной из них является система средней линии (система  $M$ ), которая соответствует рекомендациям ISO и учтена ДСТУ 2413-94 и ГОСТ 2789-73.

Количественно шероховатость поверхности оценивается такими основными параметрами:

- среднее арифметическое отклонение профиля –  $R_a$ ;
- наибольшая высота неровностей профиля –  $R_{max}$ ;
- средний шаг неровностей профиля –  $S_m$ ;
- средний шаг неровностей профиля по вершинам –  $S$ ;
- опорная длина профиля –  $\eta_p$ ;
- относительная опорная длина профиля –  $t_p$ ;
- высота неровности профиля по десяти точкам (сумме средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших

минимумов и пяти наибольших максимумов) –  $R_z$ .

Опыт использования этих и других критериев оценки шероховатости показал, что они не всегда отвечают требованиям практики по следующим причинам [1, 2]:

- критериев достаточно много, что уже само по себе затрудняет оценку шероховатости;
- применяемые критерии не определяют однозначно и достаточно полно влияние микрогеометрии поверхности на эксплуатационные свойства материалов.

Контроль шероховатости поверхностей осуществляется тремя следующими основными методами.

**Сравнительный бесконтактный метод** основан на сравнении реальной поверхности изделия с образцами шероховатости, которые имеют стандартные значения параметра  $R_a$  (ГОСТ 9378-93) и изготавливаются для определенных способов обработки материалов. Контрольные образцы представляют собой набор пластин или образцовых деталей, которые обработаны с определенной шероховатостью. Этот метод является простым и доступным, обеспечивает достоверность контроля при  $R_a > 1,25$  мкм и  $R_z > 10$  мкм и широко применяется в цеховых условиях. Для повышения точности оценки используют сравнительные микроскопы, в которых рядом ставят образец и контролируемую деталь [3]. Вместо образцов шероховатости могут быть также применены аттестованные образцовые детали. Этот метод находит применение при единичном производстве изделий.

**Механический контактный метод** предусматривает измерение параметров шероховатости с помощью щуповых приборов (профилометров и профилографов). Числовые значения параметров шероховатости определяются либо непосредственно по шкале прибора (профилометров), либо по увеличенным изображениям профиля или записанной профилограммы разреза (профилографов). При контактных методах измерения шероховатости поверхности по контролируемой поверхности перемещается алмазная или стальная игла (с радиусом закругления  $1 \div 12$  мкм). При этом она осуществляет микроперемещения по направлению своей оси, соответствующие

изменению профиля поверхностных неровностей. Эти микроперемещения усиливаются и регистрируются отсчетными устройствами. Профилографы позволяют автоматически получить увеличенную запись микропрофиля поверхности в виде профилограммы.

**Оптический метод** представляет собой измерение параметров шероховатости бесконтактными оптическими приборами (двойными микроскопами, микроинтерферометрами и др.). Оптические приборы для измерения параметров шероховатости поверхности (ГОСТ 9847-79) основаны на принципе одновременного преобразования профиля поверхности и предназначены для измерения параметров  $R_{\max}$ ;  $R_z$ ;  $S$  по ГОСТ 2789-73. Стандартом устанавливаются следующие типы приборов: ПТС – приборы теневого сечения; ПСС – приборы светового сечения; МОМ – микроскопы однообъективные муаровые; МИИ – микроскопы интерференционные, действие которых основано на двухлучевой интерференции света; МПИ – микроскопы-профилометры интерференционные, действие которых основано на интерференции света с образованием полос равного хроматического порядка. Диапазоны измерений параметров шероховатости для некоторых из указанных типов приборов следующие: ПТС –  $R_z$ ;  $R_{\max} - 40 \div 320$  мкм; МИИ –  $R_z$ ;  $R_{\max} - 0,05 \div 0,8$  мкм;  $S - 0,2 \div 1,6$  мм;  $S - 0,002 \div 0,05$  мм; ПСС –  $R_z$ ;  $R_{\max} - 0,5 \div 40$  мкм; МПИ –  $R_z$ ;  $R_{\max} - 0,05 \div 0,8$  мкм;  $S - 0,002 \div 0,5$  мм; МОМ –  $R_z$ ;  $R_{\max} - 0,8 \div 40$  мкм;  $S - 0,0005 \div 0,5$  мм.

Оптический метод светового сечения (рис. 1а) позволяет наблюдать в окуляр 1 сильно увеличенный профиль неровностей и, измеряя их с помощью шкал окулярного микрометра, определять  $R_a$  и  $R_z$ . Метод светового сечения заключается в следующем [4].

Освещенная узкая щель  $S'$  проектируется микроскопом  $A_1$  на контролируемые поверхности  $B_1$  и  $B_2$ , образующие ступеньку высотой  $H$ . Изображение щели на поверхности  $B_1$  займет положение  $S'_1$ , а на поверхности  $B_2$  –  $S'_2$ . В поле зрения микроскопа  $A_2$ , ось которого расположена под углом  $90^\circ$  к оси проецирующего микроскопа, изображение щели будет

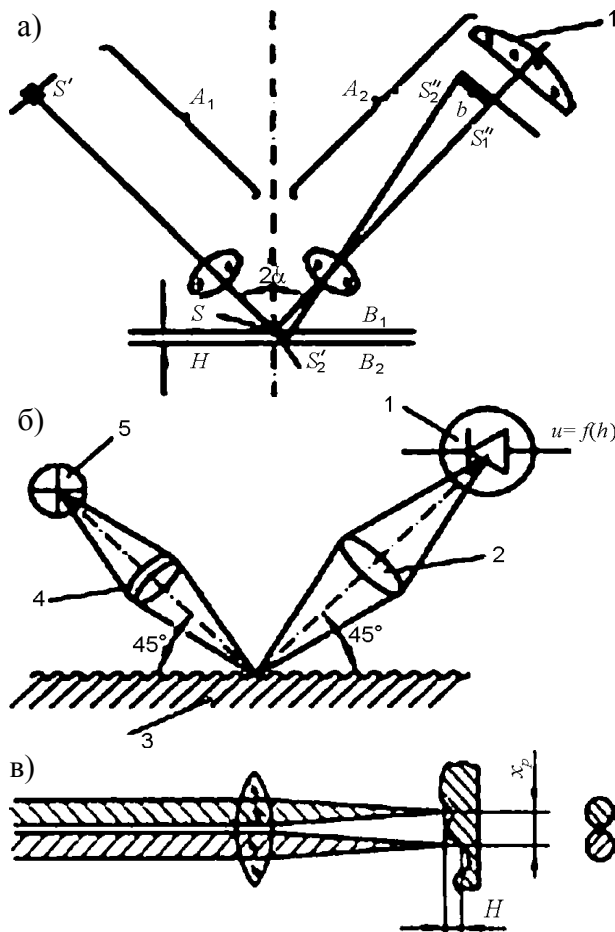


Рис. 1. Измерение шероховатости поверхности: а) – оптический метод светового сечения; б) – измерение с помощью двухлучевого интерферометра; в) – рефлектометрический метод; 1 – фотоприемник (окуляр); 2 – линза; 3 – объект измерения; 4 – объектив; 5 – осветитель.

иметь вид световой ступеньки. Размер ступеньки  $b$ , соответствующий смещению изображения относительно  $S_2'$ , служит мерой высоты ступеньки  $H$  – высоты неровности. На этом принципе построены такие приборы, как МИС-11, ПСС-2 и др. С помощью двухлучевого интерферометра (рис. 1б) измеряют разность длин путей двух пучков света, отраженных от разных участков исследуемой поверхности. Оптический прибор, построенный по схеме, изображенной на рис. 1в, реализует рефлектометрический метод измерения в автоматическом режиме, обеспечивая получение интегрального значения высоты неровностей.

В последние годы научно-производственными организациями проведена углубленная оптимизация промышленного инструмента по конструкции и составу инструментальных материалов, что позволило значительно рас-

ширить традиционный “советский” ассортимент лучшими доступными типами инструмента согласно международным стандартам DIN и ISO, с обеспечением требований системы качества ISO 9001:2000. На рынке Украины ведущие зарубежные и отечественные фирмы предлагают для измерения шероховатости микроскопы улучшенного качества изображения; мног шкальные и портативные профилометры и профилографы и др.[5].

### УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОЭВМ

Наиболее информативным стандартным параметром, позволяющим наиболее полно оценить микрогеометрию поверхностей, является относительная опорная длина профиля  $t_p$ , но для этого ее нужно задавать на нескольких уровнях. Из известных авторов приборов, автоматизированное определение этого параметра обеспечивает профилограф-профилометр мод. 252. Однако, проведение теоретических и экспериментальных исследований влияния микрогеометрии поверхности на ее различные функциональные свойства требует определения самых разнообразных критериев, а вышеуказанный прибор не может решить данную задачу. Наиболее рациональным представляется получение необходимых критериев с использованием вычислительной техники (ВТ). Вычисление любого математически описываемого критерия с помощью ЭВМ позволяет решать на современном техническом уровне как исследовательские, так и производственные задачи, связанные с микрогеометрией рабочих поверхностей деталей.

Первым шагом при сборе данных во время осуществления контроля шероховатости поверхности с использованием ВТ является ощупывание исследуемой поверхности с помощью профилометр-профилографа, который позволяет количественно оценить микрогеометрию поверхности путем преобразования ее в аналоговый сигнал.

Использование ВТ требует дискретизации аналогового сигнала, получаемого с помощью приборов, ощупывающих поверхность. Дискретизация непрерывной во времени ве-

личины  $x(t)$  заключается в ее преобразовании в прерывную во времени, т.е. величину, значения которой отличны от нуля и совпадают с соответствующими значениями  $x(t)$  только в определенные моменты времени. Это производится прибором, который разлагает непрерывный сигнал в ряд мгновенных значений. Промежуток между двумя соседними моментами времени дискретизации называют шагом дискретизации, который может быть постоянным или переменным.

Одной из важнейших задач является правильный выбор расстояния дискретизации  $\Delta l$  – расстояния между двумя соседними точками вдоль профиля. Расстояние дискретизации должно быть выбрано настолько большим, чтобы частоты, которые больше той, при которой спектр профиля исчезает в амплитудах помех инструментов, не были охвачены. Одновременно, это расстояние должно быть выбрано настолько малым, чтобы верхняя, еще учитываемая, частота как можно ближе подходила к этой границе. Чтобы дискретизированный сигнал получился хорошо соответствующим аналоговому, частота дискретизации сигнала должна быть минимум в два раза больше, чем высшая частота сигнала, которая еще обнаруживается в его содержании.

В процессе ошупывания поверхности с помощью профилографа всегда имеют место помехи как собственно прибора, так и от различных внешних воздействий. Отличительным признаком всех этих помех является то, что они в подавляющем большинстве случаев имеют значительно более высокую частоту, чем колебания профиля поверхности. Тем более что минимальная длина волны в профиле ограничивается размерами заострения алмазной иглы датчика профилографа.

В общем случае для получения корректного дискретизированного сигнала нужно поступать следующим образом:

- аналоговый сигнал в исходном состоянии должен быть отфильтрован в низкочастотном фильтре так, чтобы выше граничной частоты содержание сигнала исчезло;
- дискретизация сигнала должна производиться с расстоянием равным не более половины длины волны этой максимальной граничной частоты.

Одним из эффективных методов дискретизации аналогового сигнала является способ с использованием цифровых вольтметров.

Аналоговый сигнал от профилометр-профилографа необходимо передать на цифровой вольтметр и измерить его с определенной частотой, т.е. детализировать. Расстояние дискретизации устанавливается за счет изменения скорости хода датчика профилометр-профилографа и количества измерений вольтметра в единицу времени. Это можно представить следующей формулой:

$$f = \frac{V}{\Delta l \cdot n} \quad (1)$$

где  $\Delta l$  – величина дискретизации, мкм;  $V$  – скорость хода датчика, мм/мин;  $n$  – число точек дискретизации за 1 секунду.

Дискретизированный сигнал необходимо записать в требуемом коде микроЭВМ. После этого записанный дискретизированный профиль вводится в микроЭВМ, где и анализируется в соответствии с программой. Таким образом, с большой точностью и скоростью возможно получить критерии, которые можно описать математически.

С учетом вышесказанного, блок-схема установки для измерения шероховатости имеет следующий вид (рис. 2).

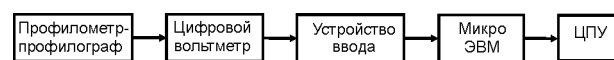


Рис. 2. Блок-схема устройства.

Установка позволяет автоматически преобразовывать значения ординат профиля поверхности в код и передавать преобразованные значения ординат профиля непосредственно в компьютер, который обрабатывает их по программе; обеспечивает значительное упрощение рассматриваемых методов измерения параметров шероховатости.

В установке ординаты профиля поверхности анализируемого образца с помощью профилографа-профилометра преобразуются в пропорциональное напряжение переменного тока, которое измеряется стандартным цифровым вольтметром, имеющим выход цифровой информации в двоично-десятичном коде 8-4-2-1. Посредством устройства ввода данных (УВ) эта информация поступает в

ЭВМ. Загрузка и обработка данных профилометр-профилографа производится по предварительно введенной в ЭВМ программе. Единственным не серийным узлом установки является устройство ввода данных, которое предназначено для организации автоматического сбора информации профилометр-профилографа с помощью цифрового вольтметра. Устройство ввода выполнено в виде автономного прибора и состоит из коммутирующего узла, узлов управления и питания, и буферных элементов. Предусмотрено подключение двухкоординатного самописца. Специальное программное обеспечение позволяет выводить протокол измерений в максимально удобном для пользователя виде.

Для решения задач микрогеометрии поверхности применяются во всех случаях параметрические критерии, основным достоинством которых является упрощение решения практических задач, но они не позволяют решать эти задачи на высоком техническом уровне, требующем индивидуализации и точной оптимизации микрогеометрии поверхности для конкретного ей функционального свойства и определения условий эксплуатации. Для этого требуется полное и достоверное описание микрогеометрии поверхности. С достаточной для практики степенью точности, шероховатость поверхности можно оценить одним параметром ( $R_a$  или  $R_q$ ) лишь при ее случайном характере и нормальном распределении отклонений профиля от средней линии. В остальных случаях для оценки шероховатости поверхности требуется большое количество различных параметров.

Известно, что в общем случае геометрия реальной обработанной поверхности зависит от большого количества различных факторов (параметров режимов резания, качества режущего инструмента, погрешности формы и неравномерности механических свойств материала заготовки и т.д.), поэтому ее следует рассматривать как реализацию случайного поля. Тогда профиль реальной поверхности есть реализация случайной функции. Естественным поэтому является стремление использовать для оценки профиля поверхности

критерии, которыми оценивают в математике случайные функции.

Исследования [6] показали, что самой полной информацией о профиле располагают функции плотности распределения его ординат и углов наклона. Поэтому и предлагается использовать в качестве критериев оценки микрогеометрии поверхности графические изображения этих функций. Эти функции чувствительны к любому изменению геометрии профиля, а значит, и к изменению режимов обработки. Алгоритмами для разработки программ служат математические выражения стандартных вышеперечисленных параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789-73 и ДСТУ 2409-94 (рис. 3) и дополнительно учтенных критериев оценки шероховатости, таких как функций плотности распределения ординат и углов наклона профиля [6, 7].

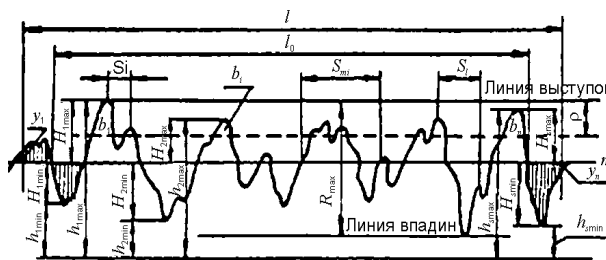


Рис. 3. Действительный профиль (профилограмма) поверхности.

Вычислительные операции по определению стандартных параметров и построению дополнительных критериев шероховатости выполняются в соответствии с разработанным алгоритмом. Построение дополнительных критериев по данному алгоритму заключается в вычислении коэффициентов распределения ординат; построении гистограммы тангенсов углов наклона профиля и гистограммы ординат безразмерного профиля, а также вероятностных интегральных кривых по этим гистограммам; вычислении безразмерного профиля, и в итоге в построении нормированной автокорреляционной функции для этого профиля. Разработанная программа прошла апробацию при определении стандартных критериев шероховатости, отлажена и готова к практическому использованию.

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ**

Исследование влияния механической обработки поверхностей металлов на эмиссионные характеристики (интенсивность, кинетика и энергетический спектр) вторичной электронной эмиссии, экзоэлектронной эмиссии и работы выхода электрона является актуальным в различных областях науки и техники.

**Метод экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ)** в настоящее время нашел достаточно широкое применение для исследования и неразрушающего контроля физико-химического состояния поверхностей твердых тел и процессов, протекающих в поверхностных и приповерхностных слоях при различных внешних воздействиях [8]. Метод ЭЭЭ позволяет регистрировать такие изменения субмикроразмеров (микротрещины и другие дефекты), которые другими методами зарегистрировать крайне трудно. Кроме этого, используемые для этих целей методы оптической и электронной микроскопии, автордиографии и другие обладают существенным недостатком: они дают изображение поверхности, но не дают количественной информации. Используя экзоэмиссионную методику, можно получить информацию, как в виде изображения, так и в количественном значении.

Для изучения распределения экзоэмиссионных свойств по поверхности образца с регулярным рельефом использовалась экспериментальная техника, описанная в [9]. Образцы подвергались пластической деформации путем вибрационного обкатывания поверхности металлическим шаром. Выбор этого способа был связан с тем, что, в отличие от всех традиционных видов механической обработки, он обеспечивает создание на поверхности управляемого регулярного микро-рельефа с однородными по форме и взаиморасположению микронеровностями. Виброобкатывание производилось металлическим шаром диаметром  $4 \cdot 10^{-3}$  м при усилиях от 19,6 Н до 68,6 Н. Измерения проводились путем сканирования светового пучка по длине образца из стали X18H10T на участке, представленном неровностями размером  $4 \div 6$  мкм. Отмечено, что независимо от длины

волны стимулирующего возбуждения ( $250 \div 350$  нм) интенсивность экзоэлектронов увеличивается на вершинах рельефа поверхности, т.е. зоны с наиболее высокой интенсивностью эмиссии находятся на вершинах (рис. 4).

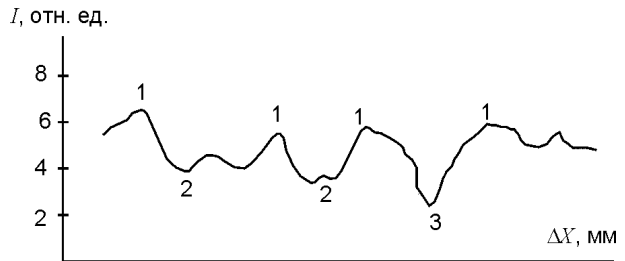


Рис. 4. Изменение интенсивности ФСЭЭ по плоскости образца: 1 – вершина; 2, 3 – впадины.

Влияние обработки поверхности на интенсивность ФСЭЭ представлено на рис. 5. Кривая 1 получена с центрального некатанного участка. Кривая 2 снята с образца, поверхность которого была подвергнута деформации накаткой с давлением 98 Н. Сравнивая кривые для некатанного участка (1) и накатанных областей (2), можно сказать, что максимальные различия по интенсивности для этих двух случаев составляют  $\approx 20\%$ .

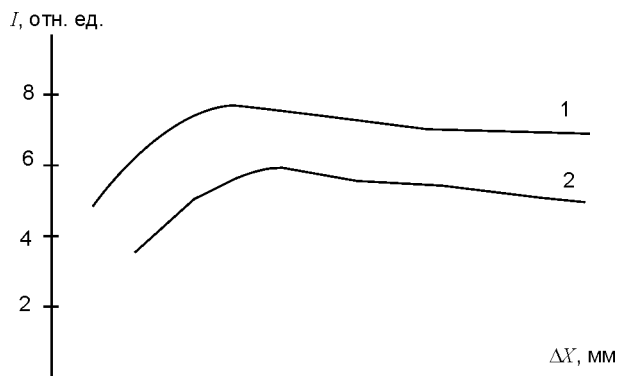


Рис. 5. Зависимость ФСЭЭ для различных участков поверхности с нанесенным микро-рельефом.

Установлено, что топография поверхности, даже если изменения ее рельефа не превышают разрешающей способности анализатора, играет важную роль в механизме возбуждения эмиссии экзоэлектронов и регистрации эмитированного сигнала.

Показано, что имеет место существенная неоднородность эмиссионных свойств накатанного образца по его поверхности. Интенсивность ФСЭЭ меньше для накатанного образца, чем для участков с рельефом. Суб-

микрорельеф поверхностей, обработанных по 4 – 6 качеству, практически не отличается от поверхностей с регулярным рельефом, в то время как микрорельеф поверхностей после механической обработки отличается от такового для поверхностей с регулярным рельефом.

Искажения, вносимые шероховатой поверхностью образца, могут быть определены косвенным образом, путем проведения предварительного топографического исследования образца, учитывая все критерии поверхности, но не так как это делалось в случае простого использования двухмерного профиля. Нетрудно показать, что образцы, характеризующиеся одинаковыми статистическими критериями, определенными по профилю, могут иметь различные виды топографии поверхности и, таким образом, давать совершенно различные картины при применении метода ФСЭЭ. Другими словами, результаты измерений показывают, что при применении экзоэмиссионной спектрометрии для количественной оценки сравнения пика интенсивности потока экзоэлектронов, полученного на шероховатом образце, с пиком интенсивности, полученным на гладком образце, может дать расхождение более 50%. Также возникает вопрос о воспроизводимости результатов, т.к. взаимное расположение детектора электронов и падающего пучка различно для каждого устройства.

**Метод контактной разности потенциалов.** Многочисленные исследования показали, что эффективно оценивать качество поверхности (в т. ч. шероховатость) металлов и сплавов можно путем измерения работы выхода электрона  $\Phi$ , как наиболее чувствительного параметра состояния поверхности твердого тела. Для определения работы выхода электрона широко используют измерение контактной разности потенциалов (КРП) между эталонной и исследуемой поверхностью  $V_{\text{КРП}} = (\Phi_1 - \Phi_2)/e$  [10].

Развитие электроники и микропроцессорной техники позволяет автоматически проводить процесс измерения изменений, возникающих на поверхности твердотельных объектов при различных внешних воздействиях. В работе [11] предложен измеритель

КРП, применяемый в качестве средства экспресс-контроля состояния поверхности конструкционных материалов после различных технологических операций. Структурная схема прибора приведена на рис. 6.

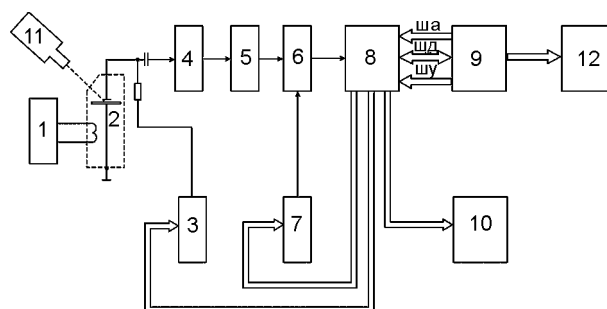


Рис. 6. Структурная схема автоматического измерителя и регистрации КРП: 1 – генератор, 2 – датчик (измерительная ячейка), 3 – цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) напряжения, 4 – усилитель переменного напряжения, 5 – прецизионный детектор, 6 – компаратор блока аналого-цифрового преобразователя (АЦП), 7 – ЦАП блока АЦП, 8 – программируемый периферийный адаптер связи МПСУ с блоками измерительной схемы, 9 – МПСУ, 10 – блок индикации, 11 – блок фотостимуляции, 12 – персональный компьютер (ПК).

Прибор конструктивно состоит из двух основных узлов: выносного измерительного блока и блока обработки сигнала, представляющего собой микропроцессорную систему управления (МПСУ), работающую в режиме реального масштаба времени. Применение МПСУ дает возможность резко повысить технические характеристики прибора и максимально автоматизировать управление.

Выносной измерительный блок представляет собой цилиндр, в котором в нижней его части размещены обмотка возбуждения и эталонный электрод, изготовленный из золота, имеющего наиболее стабильную работу выхода. Блоки 1 и 2 представляют собой элемент классической измерительной ячейки динамического конденсатора. Через разделительный конденсатор переменное напряжение подается на усилитель (блок 4), служащий для согласования измерительной ячейки с прецизионным детектором (блок 5). Абсолютная величина напряжения КРП с выхода блока 5 подается на один из входов компаратора 6, на второй вход которого поступает напряжение с выхода ЦАП (блок 7). Блоки 6 и 7 под управлением МПСУ реализует блок АЦП поразрядного уравнивания

вания. Блок ЦАП (3) реализует программно-управляющий источник компенсирующего напряжения. Блок 8 предназначен для связи МПСУ с внешними устройствами и реализует стандартный протокол обмена двухнаправленного порта ввода-вывода. Блок индикации служит для отображения значений КРП на светодиодном дисплее. Искомое значение КРП может быть зарегистрировано и обработано ПК (блок 12), подключаемым через устройство сопряжения.

КРП материалов, подвергнутых обработке абразивными шкурками с разной зернистостью и одинаковым материалом абразива и после полировки, показывает, что обработка, обеспечивая разную шероховатость поверхности, приводит к изменению величины КРП. Дальнейшее изменение КРП зависит как от вида материала, так и от способа обработки поверхности (степень шероховатости).

После абразивной обработки значение КРП увеличивается (уменьшается работа выхода электрона) и с течением времени возвращается в исходное состояние в результате адсорбции активных веществ окружающей атмосферы и других физико-химических процессов, протекающих на поверхности. При этом изменению параметра шероховатости  $R_a$  соответствует значение КРП различной величины. Так, для грубой обработки значение КРП в течение первых 2 ÷ 3 минут резко уменьшается, а затем уменьшение КРП происходит плавно [12].

В случае полированных поверхностей ( $R_a = 0,040 \div 0,050$  мкм) величина КРП минимальная. Исследования с привлечением методов электронографии и рентгеноструктурного анализа показали, что полированная поверхность представляет собой высокопрочную структуру, состоящую из ультрадисперсных частиц размерами 10 ÷ 100 нм. В работе [13] высказано предположение, что минимальное значение КРП полированных поверхностей обусловлено минимальной плоскостью дислокаций в тончайшем поверхностном слое с оптимальным субмикрорельефом.

Таким образом, при образовании сверхгладкой поверхности физико-химические параметры могут влиять на эксплуатационные

свойства в большей степени, чем геометрические характеристики.

Одним из авторов предложено для успешного решения проблем нанообработки деталей увязать эксплуатационные характеристики деталей с технологическими параметрами процессов обработки и таким образом управлять достижением заданных эксплуатационных характеристик [14]. Следовательно, необходимо иметь такие интегральные параметры поверхностного слоя, которые позволили бы установить такую взаимосвязь и управлять эксплуатационными свойствами непосредственно при обработке деталей технологической линии.

Разработанная концепция нанообработки деталей, в отличие от существующей, заключается в установлении взаимосвязей между эксплуатационными характеристиками и технологическими параметрами с помощью интегральных параметров поверхностного слоя: фактора шероховатости и величины работы выхода электрона.

При установлении взаимосвязей в качестве геометрических параметров были выбраны волнистость, шероховатость (согласно ГОСТ) и параметр фактора шероховатости, а параметрами физико-химического состояния поверхности приняты: структура, фазовое состояние, химический состав фаз и толщина неметаллической пленки. Интегральными параметрами рассогласования выбраны: для геометрических характеристик – фактор шероховатости  $F$ , для физико-химических –  $\Phi$  – величина работы выхода электрона (РВЭ).

Фактор шероховатости показывает отношение площади гладкой замыкающей части впадины к площади шероховатой части впадины. Он учитывает не только высоту шероховатости, высоту субмикрощероховатости, но и полноту впадин (выступов) шероховатости. На практике этот фактор определяется из профилограмм и электронных снимков. Анализ значений фактора шероховатости на поверхностях деталей после различной обработки показал, что при высоте шероховатости  $R_a \leq 0,1$  мкм его величина практически равна 1. Поэтому его можно использовать как интегральный параметр при измерении высоты шероховатости не менее 0,1 мкм.



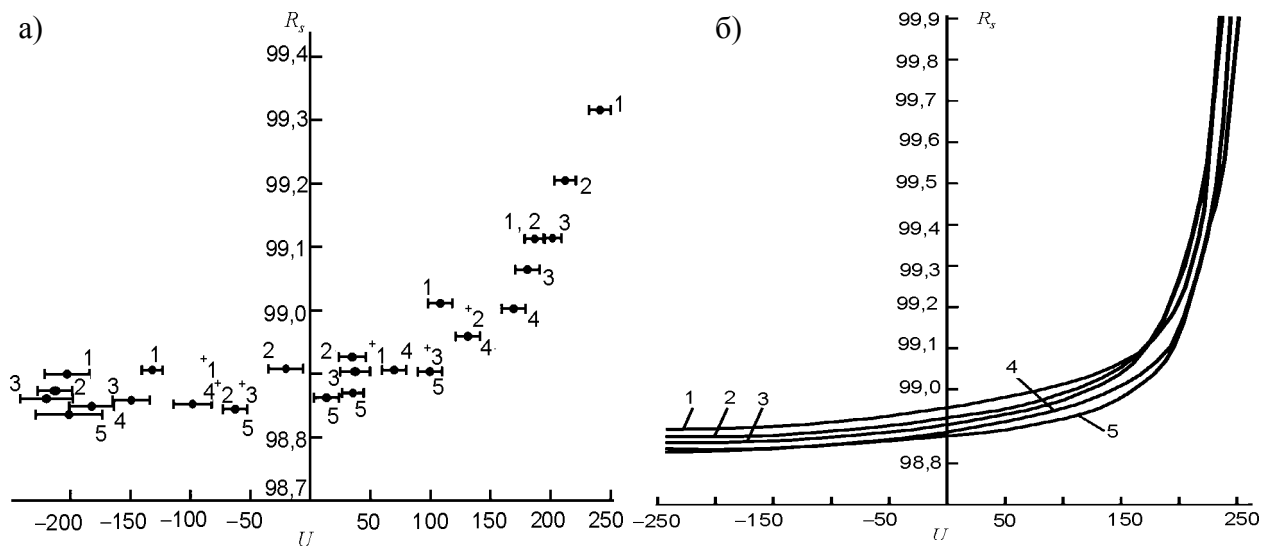


Рис. 7. Экспериментальные – а) и теоретические – б) значения отражательной способности и контактной разности потенциалов медных зеркал: 1 – после абразивного полирования; 2 – после абразивного полирования с последующей термообработкой в вакууме при 573 К в течение 1 часа; 3 – 5 – после абразивного полирования с последующей термообработкой на воздухе в течение 1 часа при 373 К, 473 К, 573 К.

При уменьшении высоты шероховатости менее 0,1 мкм интегральным параметром рассогласования принята величина КРП. Исследования показали, что, используя метод КРП можно оценивать любое изменение физико-химического состояния в результате обработки поверхности. По предварительно установленным зависимостям между эксплуатационными характеристиками, например, отражательной способностью и величиной РВЭ, можно оценить изменение отражательной способности на любом технологическом переходе.

В качестве примера на рис. 7 приведены зависимости между отражательной способностью  $R_s$  и величиной РВЭ поверхности медных зеркал после абразивного полирования и последующей термообработки с различными режимами. Из графического изображения результатов исследования видно, что график эмпирической линии регрессии можно аппроксимировать гиперболой.

По предварительно установленным зависимостям можно оценить отражательную способность поверхности детали из конкретного материала на любом этапе технологической обработки. Так, например, для исходной серии зеркал с предельным значением  $R_s = 99,3\%$  предельные значения КРП достигают 227 мВ. Различия в предельных значениях КРП обусловлены разной степенью дефектности (часто неконтролируемой) обрабатываемой поверхности.

Для меди КРП увеличивается с увеличением отражательной способности поверхности, поэтому наблюдаемое снижение  $R_s$  свидетельствует о повышении работы выхода электрона (снижения КРП) при термообработке в вакууме и отжиге на воздухе при 373 К в течение одного часа.

Повышение температуры отжига на воздухе до 473 К и 573 К также приводит к уменьшению величины  $R_s$ . Это свидетельствует об образовании устойчивой оксидной пленки на поверхности образцов, состояние и свойства которой характеризуют предельные значения  $R_s$  и  $V_T$ . Отрицательные значения указывают на качественное изменение зарядного состояния отражающей поверхности.

Для медных и золоченых зеркал установленная корреляция между  $R_s$  и КРП позволяет контролировать процесс их изготовления на любом этапе технологического процесса и отбирать детали с отражательной способностью, отвечающей требованиям технических условий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе проанализированы известные методы контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов, определены дополнительные критерии оценки микрогеометрии поверхностей и разработан алгоритм по определению стандартных параметров и построению дополнительных критериев шероховатости. Предложенная блок-схема уста-

новки для полного измерения шероховатости позволяет автоматизировать весь цикл измерения параметров шероховатости поверхности. Установление взаимосвязей между эксплуатационными характеристиками деталей и технологическими параметрами процессов обработки с помощью интегральных параметров поверхностного слоя (фактора шероховатости и величины работы выхода электрона) дает возможность управлять процессом достижения заданных эксплуатационных характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ардашников Б.Н., Витенберг Ю.Р. Исследование влияния шероховатости и наклепа на износостойкость//Сб. Технологические методы повышения качества поверхности деталей машин (Ленинград). – 1978. – С. 112-117.
2. Privin I.C., Morgan A., Mairey D. The Influence of Surface Polishihg on the Oxidation of the Pure Nickel//Acta Metallurgica. – 1984. – № 12. – С. 2203-2212.
3. Базієвський С.Д., Дмитришин В.Ф. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. Підручник. – К.: Видавничий Дім “Слово”, 2006. – 504 с.
4. Контрольно-измерительные приборы и инструменты: Учебник/С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстой, Р.В. Меркулов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 464 с.
5. Каталог подукции KODA® 2005/2006. Современные средства измерительной техники. – Харьков, 2005. – 89 с.
6. Валетов В.А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шерохова-

тости поверхности//Труды ЛКИ “Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении”. (Ленинград). – 1978. – С. 19-24.

7. Валетов В.А. Особенности контроля шероховатости продольношлифованных поверхностей//Труды ЛКИ “Технология судостроения, судового машиностроения, обработка металлов и сварка”. (Ленинград).– 1981.– С. 74-79.
8. Кортон В.С., Слесарев А.И., Рогов В.В. Экзоэмиссионный контроль поверхности деталей после обработки.– К.: Наукова думка, 1986. – 174 с.
9. Шкилько А.М., Креснин А.А. Применение экзoeлектронной эмиссии для исследования физико-химических свойств материалов. – Харьков: УЗПИ, 1980. – 75 с.
10. Царев Б.М. Контактная разность потенциалов. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 280 с.
11. Шкилько А.М. Метод контактной разности потенциалов//Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования: Сб. научных трудов – Харьков: ХГТУРЭ, 1998. – С. 248-254.
12. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения (применительно к избирательному переносу и водородному износу). – Минск: БГУ им. Ленина, 1978. – 208 с.
13. Ковшов А.И., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М. Основы нанотехнологии в технике. – М.: МГОУ, 2007.– 241 с.
14. Рубан В.М., Лурье Г.Б., Назаров Ю.Ф., Романова В.И. Корреляция между отражательной способностью меди и работой выхода электрона//ОПМ. – 1883. – № 12. – С. 9-11.

#### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Ю.Ф. Назаров, А.М. Шкілько,  
В.В. Тихоненко, І.В. Компанієць

Проаналізовані та розвинуті відомі методи контролю шорсткості поверхні металів та сплавів з залученням обчислювальної техніки. Запропоновані для діагностики та контролю методи фотостимульованої екзoeлектронної емісії та контактної різниці потенціалів, що дозволяє оцінити вплив механічної обробки на якість та фізико-хімічний стан поверхні.

#### METALS AND ALLOYS SURFACE ROUGHNESS INVESTIGATION AND CONTROL METHODS

Yu.F. Nazarov, A.M. Shkilko,  
V.V. Tihonenko, I.V. Kompaniec

The known metal surface roughness control methods have been analyzed and developed with the help of counting techniques. Methods of photostimulating exoelectron emission and contact potential difference are suggested for diagnostics and control. They allow to estimate mechanical processing influence on the quality and physical-chemical state of surface.