

Рисунок 6. Зависимость скорости диссипации энергии от внутренней координаты в НЧ<sub>2</sub>.

На рисунке 6 показано, что при радиусе НЧ<sub>2</sub> 7 нм, в слое с радиусом 6 нм, квадрупольные и октупольные спектральные резонансы становятся значительно больше по амплитуде, чем они были в слоях меньшего радиуса, и почти сравниваются с дипольным резонансом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта № 0743-2017-0001 (3.7758.2017/8.9).*

#### Литературы:

1. Kucherenko M.G. and Nalbandyan V.M. Absorption and spontaneous emission of light by molecules near metal nanoparticles in external magnetic field // Physics Procedia. 73. 136-142. (2015) doi: 10.1016/j.phpro.2015.09.134. Published by Elsevier B.V.
2. Агранович В.М., Баско Д.М. Резонансный перенос энергии от полупроводниковой квантовой точки к органической матрице // Письма в ЖЭТФ. 69. -В.3. 232-235. (1999).
3. Briskina S.M., Tarasov A.P., Markushev V.M., Shiryayev M.A. Magnetic field influence on the intensity of ZnO random lasing and exciton luminescence // Journal of Nanophotonics. 2018. Т. 12. № 4. С. 043506.
4. Кучеренко М.Г., Скуратова С.В. Перенос энергии экситон-активированной квантовой точки к нанокompозитным частицам в стеклах // Университет. комплекс как регион. центр образования, науки и культуры: Матер. всеросс. научно-метод. конфер. Оренбургский гос. ун-т. – Электрон. дан. – Оренбург: ОГУ, 2016. – С. 1237-1247.

В.М.Юров<sup>1</sup>, В.С.Олешко<sup>2</sup>, А.В.Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда, Республика Казахстан, exciton@list.ru, <sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, ovs\_mai@mail.ru

### Разработка устройства определения работы выхода электронов

*Введение.* В современном машиностроении в качестве материалов деталей машин широко применяются многокомпонентные сплавы на основе Al, Fe, Ti, Cu, Ni, Cr, и др. металлов [1].

Поверхность является важнейшей составляющей металлических деталей и необходим контроль ее состояния на всех этапах жизненного цикла детали — при ее производстве, эксплуатации и ремонте.

Поверхностный слой металлических деталей можно рассматривать как часть твердого тела, в которое входят составляющие его молекулы, атомы, протоны, нейтроны, электроны, вакансии, дислокации, и другие составляющие, каждая из которых обладает энергией. На поверхности металла имеются электроны проводимости, находящиеся в постоянном беспорядочном движении, которые практически не выходят с поверхности металла в вакуум при комнатной температуре, что объясняется увеличением потенциальной энергии электрона при удалении его от поверхности металла. Некоторые электроны постоянно покидают поверхность металла, а затем снова возвращаются, поскольку их потенциальной энергии недостаточно для преодоления некоего потенциального барьера. В результате металл оказывается окруженным электронным облаком, в котором действуют силы, направленные внутрь металла. И чтобы электрон покинул металл, необходимо совершить работу против этих сил, называемую работой выхода электронов (РВЭ). Одним из методов определения РВЭ является метод измерения контактной разности потенциалов (КРП).

Теория КРП непосредственно связана с зонной теорией твердого тела. Если рассмотреть контакт двух металлов с разной работой выхода, можно заметить, что при контакте электроны с более высоких уровней первого металла (с меньшей РВЭ) будут занимать более низкие уровни второго (с большей РВЭ), следовательно, первый металл зарядится положительно, а второй отрицательно. Одновременно происходит смещение энергетических уровней, поскольку уровни Ферми металлов совпадают, а работы выхода остались неизменными, потенциальная энергия в точках вне этих металлов будет различной. В результате между этими двумя точками устанавливается разность потенциалов.

Измерение КРП необходимо для оценки энергетического состояния поверхности металла. Знание энергетического состояния поверхности металлических деталей важно, например, при нанесении защитных покрытий, склеивании, пайке, сварке и при других технологических операциях.

*Материалы и методы.* Для проведения достоверного неразрушающего контроля металлических деталей необходимы специально разработанные для этого средства и методика его применения.

Измерительный электрод (ИЭ) датчика прибора измерения КРП и поверхность контролируемой металлической детали образуют конденсатор (ДК), между обкладками которого и возникает КРП. Датчик прибора является, своего рода, посредником между КРП и измерительной схемой.

К емкостным датчикам предъявляются следующие функциональные требования:

1. Простая для анализа форма зависимости между входной и выходной характеристиками, желательно линейная.

2. Достаточная чувствительность. Проведенные нами исследования показали, что ввиду энергетической неоднородности поверхности металлических деталей машин, необходимо обеспечить чувствительность прибора измерения КРП 1 мВ.

3. Стабильность характеристик, наименьшее влияние параметров окружающей среды (влажности, температуры, атмосферного давления, электромагнитных полей, радиации и др.). В целях выполнения данного требования необходимо использовать экранирование датчика от паразитных наводок и в качестве материала ИЭ использовать металл, имеющий стабильные во времени характеристики. Чаще всего разработчики приборов измерения КРП использовали Au, Ni или Cu [2–7].

4. Малое время измерения КРП.

5. Простота монтажа и эксплуатации.

6. Ремонтопригодность.

### 7. Малая стоимость.

Указанные свойства необходимо добиваться при создании прибора измерения КРП.

Преимуществами способа ДК метода КРП являются:

- конденсатор можно изготовить с высокой точностью;
- конденсатор обладает малыми потерями (прохождение электрического тока через емкостное сопротивление не сопровождается потерями тепла) и высоким коэффициентом полезного действия;
- малое влияние электрических сил на механические детали конденсатора;
- форму датчика конденсаторного типа можно приспособить к различной форме поверхности КО.

Недостатком конденсаторных способов измерения физических величин считаются малые значения емкости. Поэтому необходимо использовать усилители мощности электрического сигнала, либо высокочастотные колебания пластин конденсатора, что не всегда обеспечивает стабильность показаний измерительного прибора. Кроме того, погрешность измерений КРП могут увеличивать электромагнитные наводки, возникающие в цепи в результате удаленного расположения от ИЭ усилителя сигнала [8]. Поэтому предварительный усилитель сигнала целесообразно располагать непосредственно в датчике прибора измерения КРП.

*Результаты.* Качество конденсатора при переменном электрическом токе (что имеет место при ДК) лучше всего характеризует постоянная времени (произведение емкости и параллельного сопротивления)  $Q_v$  [8]:

$$Q_v = \omega \cdot R \cdot C = \omega \cdot T, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi F$  — круговая частота переменного тока, рад/с;  $F$  — частота переменного электрического тока, Гц;  $R = \frac{0,16}{F \cdot C}$  — сопротивление, Ом;  $C$  — емкость конденсатора, Ф;  $T$  — период, с.

Сопротивление  $R$  при высокой круговой частоте  $\omega$  определяется не только изоляцией, но и включает в себя и другие потери, например, потери на диэлектрический гистерезис, и поэтому согласно формуле (1) возрастает пропорционально круговой частоте  $\omega$  [8].

Вибрирующий ИЭ датчика, реализующего принцип ДК, включенный в цепь переменного тока, обладает сопротивлением  $R$  тем меньшим, чем больше частота  $F$  переменного тока согласно формуле (1) [8].

Емкость конденсатора, обкладки которого образуют контролируемая деталь и ИЭ, зависит от их формы (мы выбрали плоский ИЭ), площади перекрытия, диэлектрической проницаемости (в нашем случае это воздух) и расстояния между его обкладками [8].

При образовании ИЭ и контролируемой металлической деталью конденсатора, обкладками которого они являются, заряд конденсатора  $Q$  можно, определить на основе следующей формулы [9]:

$$Q = C \cdot U = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S \cdot U}{d},$$

где  $\epsilon_0 \approx 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума);  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость, для сухого воздуха  $\epsilon \approx 1,0006$ ;  $S$  — площадь ИЭ, м<sup>2</sup>;  $U$  — напряжение на конденсаторе;  $d$  — зазор между ИЭ и КО, м.

В случае же ДК, обкладками которого являются вибрирующий с частотой  $\omega$  ИЭ и поверхность КО, то емкость  $C_{\text{дин}}$  будет изменяться по закону [9]:

$$C_{\text{дин}}(t) = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d_0 + d_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)} = C \cdot \frac{1}{1 + m \cdot \sin(\omega \cdot t)},$$

где  $d_0$  — среднее расстояние между ИЭ и поверхностью контролируемой металлической детали;  $d_1$  — амплитуда вибрации ИЭ;  $t$  — время;  $m=d_1/d_0$  — коэффициент модуляции ДК.

При этом в цепи будет возникать электрический ток  $I(t)$  [121]:

$$I(t) = U \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = -\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot U \cdot \frac{d_1 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)}{d_0 + d_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)^2}.$$

Датчики приборов измерения КРП методом ДК подвержены воздействию различного рода факторов, снижающих чувствительность и достоверность данного метода — собственные шумы, наводки от электромагнитных полей, паразитные емкости связи и др. [9]. Это требует тщательного экранирования, применение других конструктивно-схемных решений в построении датчиков приборов.

Разработанный нами способ измерения КРП имеет особенности:

- контактная разность потенциалов измеряется цифровым осциллографом, регистрирующим напряжение и частоту периодически изменяющейся КРП между контролируемой деталью и ИЭ датчика прибора;
- экранирование элементов датчика и проводов;
- усиление регистрируемой КРП и фильтрацию паразитных сигналов;
- подготовка поверхностей детали и датчика к измерению КРП.

В качестве регистратора КРП нами был выбран портативный цифровой осциллограф MicSig TO1104 планшетного типа, имеющий чувствительность измерения электрического напряжения 0,5 мВ.

Датчик, подключаемый к осциллографу авторы разработали сами. Основную часть конструкции датчика прибора измерения КРП составляет электронная схема, которая позволяет контактирующему с металлической деталью ИЭ датчика работать в автоколебательном режиме. Кроме того, в состав датчика входит предварительный усилитель сигнала.

Комплекс измерения КРП, разработанный авторами, представлен на рисунке 1. Принципиальная схема датчика представлена на рисунке 2. Корпус датчика (рисунок 3) спроектирован в программе *SolidWorks* и напечатан на 3Д-принтере *Picaso3D Designer*.

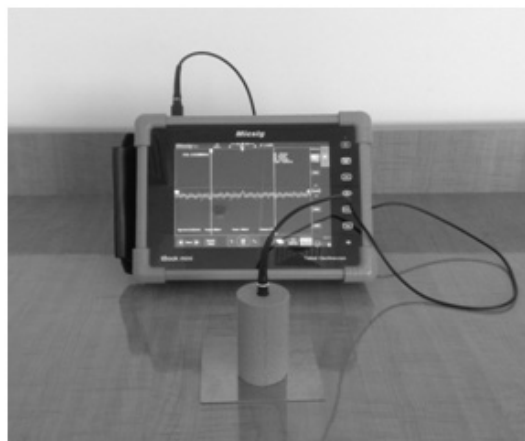


Рисунок 1 — Комплекс измерения контактной разности потенциалов металлических деталей

Корпус датчика разработан так, что обеспечивает зазор между ИЭ и КО, равный 0,5 мм в состоянии покоя ИЭ. Указанные конструктивные особенности датчика позволяют выполнять надежное измерение КРП металлов. Авторы продолжают совершенствование конструкции датчика комплекса измерения КРП металлических деталей машин.

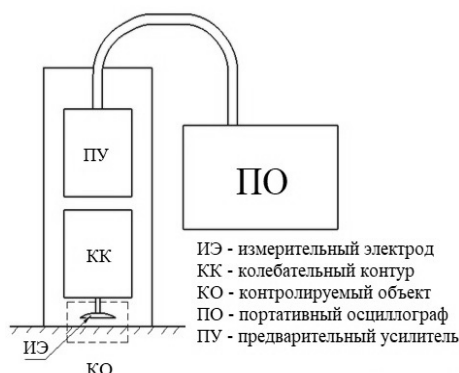


Рисунок 2 — Принципиальная схема датчика

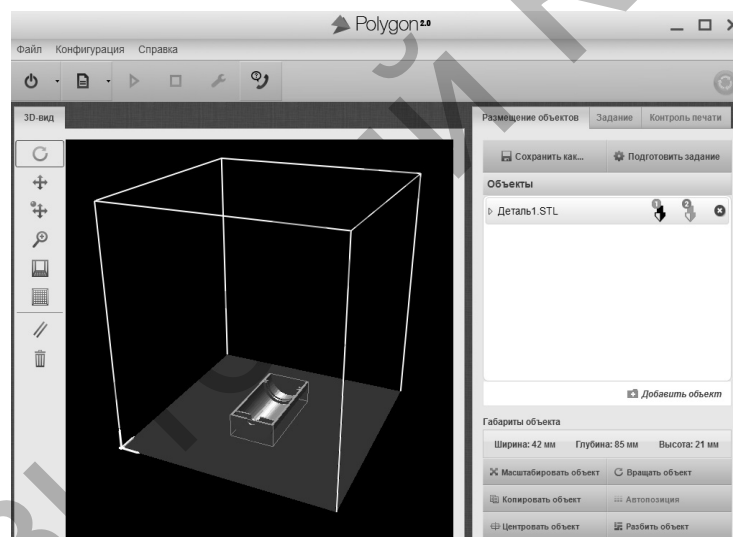


Рисунок 3 — Polygon 2.0: программа-оператор 3Д-принтера Picaso3D Designer

*Заключение.* Разработанный авторами переносной комплекс измерения КРП на основе портативного цифрового осциллографа позволяет выполнять в непрерывном режиме неразрушающий контроль поверхности металлических деталей в процессе их производства, эксплуатации или ремонта. Дальнейшая наша работа будет заключаться в разработке методики измерения КРП на поверхности деталей машин [13–15].

*Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты №0118РК000063 и №Ф.0781.*

#### *Литературы:*

1. Бецофен С.Я., Осинцев О.Е., Князев М.И., Долгова М.И., Кабанова Ю.А. Количественный фазовый анализ сплавов системы Al-Cu-Li-Mg // Вестник Московского авиационного института. 2016. Том 23. № 4. С. 181–188.

2. Мусохранов М.В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя направляющих элементов машиностроения. Дисс. ... к.т.н. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 138 с.

3. Жарин А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. Минск: Бестпринт, 1996. 240 с.
4. Кочаров Э.А. Физические методы в контроле материалов и разработке наукоемких технологий. — М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 477 с.
5. Крячко В.В., Левин М.Н., Татаринцев А.В., [и др.]. Бесконтактный метод исследования зарядового состояния границы раздела полупроводник–диэлектрик // Журнал технической физики. 2004. Том 74. Выпуск 10. С. 128–133.
6. Лоскутов С.В. Закономерности формирования энергетического рельефа металлической поверхности // Вісник Запорізького державного ун-ту. 1999. № 1. С. 138–142.
7. Петров Л.М., Плихунов В.В. Определение энергетического состояния поверхности конструкционных металлических материалов после технологических воздействий // Авиационная промышленность. 2012. № 1. С. 22–26.
8. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин. Перевод с чешск. В.И. Дмитриева. Библиотека по автоматике. Выпуск 213. М.-Л.: Энергия, 1966. 160 с.
9. Тявловский А.К., Жарин А.Л. Анализ метода измерения поверхностного потенциала диэлектриков по схеме токовой компенсации // Приборы и методы измерений. 2011. № 2 (3). С. 136–144.
10. Компанец И.В., Комолов В.М., Шкилько А.М. Оценка чувствительности измерителя контактной разности потенциалов // Вестник НТУ «ХПИ»: Серия «Новые решения в современных технологиях». 2010. № 46. С. 89–94.
11. Илюкович А.М. Техника электрометрии. М.: Энергия, 1976. 400 с.
12. Пантелеев К.В. Методы и средства измерения контактной разности потенциалов на основе анализа компенсационной зависимости зонда Кельвина. Автореф. дисс. ... к.т.н. Минск: Белорусский нац. техн. ун-т, 2016. 26 с.
13. Олешко В.С., Юров В.М. Флуктуация контактной разности потенциалов при определении работы выхода электронов из конструкционных материалов ионизационным способом // 10-я Междунар. конф. «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». Алматы: КазНУ им. Аль-Фараби. С. 165–169.
14. Олешко В.С., Гученко С.А., Юров В.М. Определение величины поверхностной энергии твердых металлов // Материалы XIV Межд. науч. конф. «Физика твердого тела, функциональные материалы и новые технологии» (ФТТ-2018), посвященной 80-летию проф. Т.А. Кукетаева, Бишкек-Караганда, 2018. – С. 124-128.
15. Yurov V.M., Oleshko V.S. The impact of the environment on the contact potential difference of metal machine parts // Eurasian Physical Technical Journal, 2019. Vol. 16. № 1 (31). С. 99-108.

В.С.Олешко<sup>1</sup>, В.М.Юров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия, [ovs\\_mai@mail.ru](mailto:ovs_mai@mail.ru), <sup>2</sup> Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда, Республика Казахстан, [exciton@list.ru](mailto:exciton@list.ru)

### **Работа выхода электронов и толщина поверхностного слоя металлов и сплавов**

*Введение.* Важнейшей характеристикой металлов является работа выхода электронов (РВЭ). По РВЭ судят о многих физико-химических характеристиках металлических деталей. Так в работах [1, 2] разработанный нами способ позволяет оперативно определять величину поверхностной энергии (ПЭ) металлических деталей и может применяться в процессе производства, эксплуатации и ремонта авиационной техники (АТ). Определение ПЭ мы предлагаем проводить по следующему, разработанному нами алгоритму:

1. Определение РВЭ измерительного электрода  $\phi_{иэ}$  прибора измерения контактной разности потенциалов (КРП) (для измерительного электрода разработанного нами прибора, напомним,  $\phi_{иэ}=7,21\cdot 10^{-19}$  Дж).