

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-3>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/131EVN316.pdf>

Статья опубликована 06.07.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Олешко В.С., Пиговкин И.С. Оперативное определение поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/131EVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Работа выполнена согласно Программе развития Московского авиационного института как национального исследовательского университета

УДК 620.179.1

Олешко Владимир Станиславович

ГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, Москва¹
Профессор учебного военного центра при МАИ
Кандидат технических наук
E-mail: ovs_mai@mail.ru

Пиговкин Иван Сергеевич

ГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, Москва
Студент учебного военного центра при МАИ
E-mail: ivanavia14@gmail.com

Оперативное определение поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники

Аннотация. Работа выполнена согласно Программе развития Московского авиационного института как национального исследовательского университета. В статье рассмотрена проблема определения энергетического состояния поверхности металлических деталей авиационной техники. Поверхностную энергию авиационных деталей необходимо учитывать при проведении различных технологических операций: при пайке, сварке, склеивании, нанесении защитных покрытий, трибологических и других исследованиях в процессе их проектирования, производства, эксплуатации и ремонта. Между тем данная проблема весьма сложна. Существующие методы определения поверхностной энергии твердых металлов имеют существенные недостатки, основными из которых являются — низкая точность, высокая трудоемкость, то, что многие методы являются разрушающимися. Авторами предлагается определение поверхностной энергии проводить посредством определения работы выхода электрона контролируемого объекта измерением контактной разности потенциалов и последующим расчетом по разработанной авторами оригинальной методике, учитывающей электронное строение и упругие характеристики контролируемых деталей. Метод определения поверхностной энергии металлических авиационных деталей посредством определения их работы выхода электрона измерением контактной разности потенциалов является неразрушающим методом, имеет малую трудоемкость. Предлагаемый авторами метод определения поверхностной энергии может применяться не только в проектировании, производстве, эксплуатации и ремонте авиационных деталей, но и других отраслях науки и техники.

¹ 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

Ключевые слова: авиационная техника; поверхностная энергия; металл; сплав; детали машин; пайка; сварка; склеивание; трибология; твердость; работа выхода электрона; контактная разность потенциалов; разрушающий контроль

Введение

Сто лет назад, в 1916 году американский физик Х. Лестер впервые ввел термин «работа выхода электрона» (РВЭ). Он писал: «Работа для удаления электрона определяется в хорошо

известном уравнении Ричардсона:
$$I = a \cdot \theta^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{b}{\theta}\right)$$
 постоянной b . Чтобы полностью удовлетворить предположениям, связанным с b , надо признать, что *работа выхода действительно существует и по величине равна b* » [1]. Наша статья посвящается 100-летию термина РВЭ и описывает применение РВЭ в оценке поверхностной энергии (ПЭ) металлических деталей авиационной техники (АТ).

Понятие поверхностной энергии

При проектировании, производстве, эксплуатации и ремонте АТ важно учитывать уровень ПЭ ее металлических деталей. От значения ПЭ в значительной степени зависят эксплуатационные свойства деталей машин, в том числе и деталей АТ. Особенно важно определение ПЭ деталей в трибологии, при нанесении защитных покрытий, при создании неразъемных соединений — сваркой, пайкой, склеиванием и др.

Физический смысл ПЭ заключается в следующем. Внутренние частицы металла окружены со всех сторон соседними частицами. Но частицы поверхностного слоя окружены соседними частицами лишь с нескольких сторон и взаимодействуют поверхностные частицы с окружающими иначе, чем в глубине металла. Поверхностные частицы имеют больший запас ПЭ по сравнению с внутренними.

Рассматриваемая нами ПЭ концентрируется в поверхностных слоях металлов и сплавов, имеющих толщину порядка 10 нм, что соответствует радиусу молекулярного взаимодействия [2].

Избыток свободной ПЭ, отнесенный к единице площади, является коэффициентом поверхностного натяжения (поверхностным натяжением) [3]:

$$E_n = \delta \cdot S, \tag{1}$$

где: E_n - поверхностная энергия, Дж;

δ - поверхностное натяжение, Дж/м²;

S - единица площади, м².

Таким образом, поверхностное натяжение по физическому смыслу является удельной ПЭ твердого тела. По поверхностному натяжению судят о ПЭ твердых металлов. Более того, многие исследователи принимают $E_n \equiv \delta$. Примем в нашей работе такое допущение и мы.

Поверхностная энергия, как и другие свойства металлов, имеющих кристаллическую структуру, обладает анизотропией. Причем ПЭ имеет различные значения не только на различных кристаллографических плоскостях, но, и в различных кристаллографических направлениях, лежащих в той же плоскости. В реальном кристалле металла кристаллографические плоскости на поверхности расположены хаотично. Кроме того, поверхность авиационных деталей, изготовленных из металлов и сплавов имеет различного

рода и размера дефекты, неоднородности, адсорбированные вещества, влияющие на величину ПЭ. Поэтому при экспериментальном определении или расчетах ПЭ металлических деталей речь будет идти о среднем значении ПЭ.

Между тем определение ПЭ твердых металлических деталей является сложной задачей. Разработка методов экспериментального определения ПЭ твердого тела была начата в 1920 годах и продолжается по сей день. Основными методами экспериментального определения ПЭ твердых металлов являются: «нулевой ползучести», разрушения кристаллов, «нейтральной капли», растворения порошка, ступеней роста и испарения, «залечивающейся царапины» и другие [3–5]. Перечисленные методы определения ПЭ твердых металлов имеют существенные недостатки, основными из которых являются их низкая точность, высокая трудоемкость, а, главное, то, что многие методы являются разрушающимися. Таким образом, разработка оперативного и неразрушающего метода определения ПЭ металлических деталей АТ является актуальной задачей.

Электронная теория поверхностной энергии твердых тел

Поверхностную энергию твердых металлов хорошо описывает *электронная теория*, связывающая ПЭ с экспериментально определенными значениями РВЭ [2–5]. Работа выхода электрона является фундаментальным параметром твердого тела. Упрощенно электронную теорию ПЭ металлов можно описать следующим образом: ПЭ в значительной степени зависит от сил межатомного взаимодействия, проявлением которых и является РВЭ. Чем больше эти силы, тем больше РВЭ и, соответственно, тем больше ПЭ. На рис. 1 графически представлена зависимость экспериментально установленной ПЭ $E_{nэ}$ от РВЭ ϕ . Также на рис. 1 представлена формула, описывающая данную зависимость. Наилучшим образом (с коэффициентом парной корреляции $R^2 \approx 0,64$) зависимость ПЭ от РВЭ описывает степенная функция, представленная формулой на рис. 1.

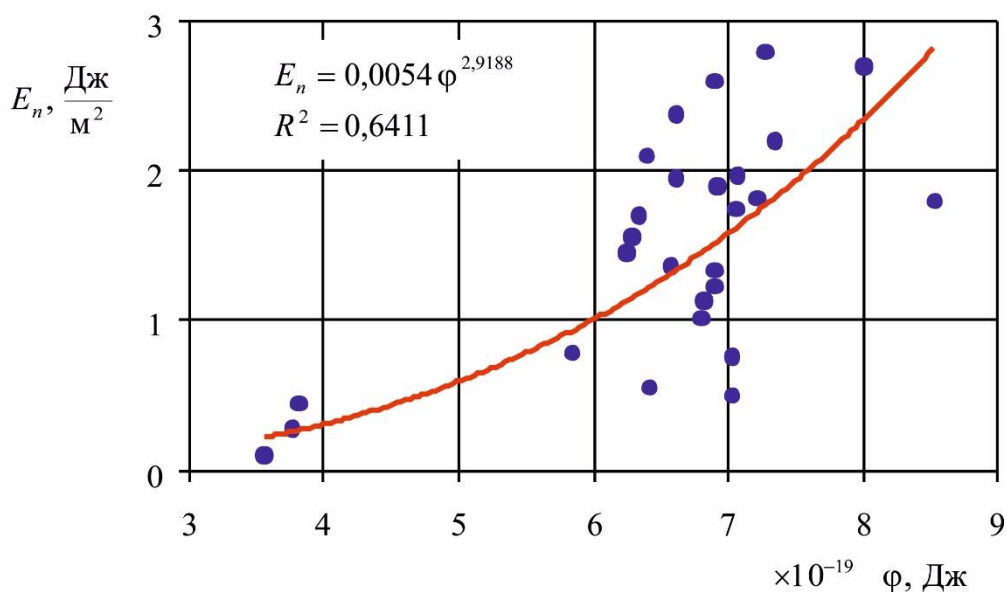


Рисунок 1. Зависимость ПЭ металлов от РВЭ

В таблице 1 представлены исходные данные для 26 металлов, которые были использованы нами в наших исследованиях, в том числе представленные на рис. 1. Значения РВЭ ϕ , представленные в таблице 1 и на рис. 1, взяты нами из справочника [6], а экспериментально полученные значения ПЭ E_n — из источников [7–9].

Достаточно слабая, корреляция ПЭ с РВЭ, представленная на рис. 1, свидетельствует о необходимости исследования других факторов, оказывающих влияние на ПЭ твердых металлов.

Таблица 1

Исходные данные РВЭ и ПЭ металлов

Металл	$\times 10^{-19} \varphi$, Дж	E_n , Дж/м ²	Металл	$\times 10^{-19} \varphi$, Дж	E_n , Дж/м ²
Li	3,81	0,452	Zr	6,24	1,455
Be	6,28	1,558	Ni	7,21	1,820
Na	3,76	0,280	Nb	6,39	2,100
Mg	5,83	0,790	Mo	6,89	2,600
K	3,55	0,103	Ag	6,89	1,234
Al	6,81	1,140	Cd	6,56	1,370
Ti	6,33	1,700	Ta	6,60	2,380
V	6,60	1,950	Sn	7,02	0,760
Cr	7,34	2,200	W	7,27	2,800
Cu	7,05	1,750	Re	8,00	2,700
Zn	6,79	1,020	Pt	8,52	1,800
Fe	6,91	1,900	Au	6,89	1,336
Co	7,06	1,970	Pb	6,41	0,560

Известна хорошо согласующаяся с экспериментальными данными формула Л.Л. Кунина, связывающая поверхностное натяжение δ с РВЭ и радиусом атома [10]:

$$\delta = 444,5 \frac{\varphi}{R^2} - 110, \quad (2)$$

где: φ - РВЭ, Дж;

R - радиус атома, м.

Напомним, что поверхностное натяжение есть удельная ПЭ твердого металла согласно формуле (1).

Зависимость (2) была предложена Л.Л. Куниным на основании следующих соображений [10]:

- наличием корреляции (хотя и достаточно слабой) в периодическом изменении рассматриваемых величин;
- значительным влиянием адсорбции на РВЭ и ПЭ;
- возможностью экспериментального сопоставления поверхностных свойств металлов в твердом и жидком состояниях.

Позднее формула (2) была уточнена Л.Л. Куниным введением вместо радиуса атома R величин, характеризующих кристаллическую структуру твердого тела перед плавлением и учитывающей изменение свободного объема [6]:

$$\delta = \frac{3}{5} \cdot \frac{\varphi}{\pi \cdot N \cdot a^2}, \quad (3)$$

где: N - число Авогадро, моль⁻¹;

a - параметр решетки, м.

Известна формула С.Н. Задумкина, связывающая ПЭ с РВЭ и другими параметрами твердого тела [6]:

$$\delta = 1,15 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{z \cdot D}{A} \right)^{\frac{5}{6}} \cdot \varphi, \quad (4)$$

где: z - число свободных электронов, приходящихся на 1 атом;

D - плотность, кг/м³;

A - атомная масса, кг.

Приведенные нами зависимости (2)–(4) имеют значительные, на наш взгляд, недостатки, препятствующие их использованию в производстве, эксплуатации и ремонте АТ:

- применимость их лишь для чистых металлов, в то время, как в конструкции АТ применяются многокомпонентные сплавы;
- трудность определения величин, от которых зависит ПЭ, например, число свободных электронов z , приходящихся на 1 атом металла;
- низкая точность (за исключением формулы (2) — ПЭ, рассчитанная по данной формуле, хорошо согласуется с экспериментально полученными ее значениями).

Требуется разработка новой методики, позволяющей определять ПЭ в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта авиационных деталей, и агрегатов.

Зависимость поверхностной энергии от твердости металлов и сплавов

Между тем ПЭ зависит от твердости металла. Твердостью называют свойство материалов сопротивляться внедрению в них других твердых тел [11].

Установлено, чем выше твердость материала образца, тем выше его ПЭ [3, 5, 7]. Твердые тела, расположенные в ряд по твердости, располагаются в тот же ряд и по ПЭ. Более того, в своей работе [3] В.Д. Кузнецов прямо отождествляет твердость хрупких тел и их ПЭ. На зависимости ПЭ от твердости металлов основаны методы определения ПЭ, основанные на разрушении кристаллов [3–5].

П.А. Ребиндер, определяя твердость H как работу поверхностного диспергирования на единицу площади вновь образуемой поверхности раздела фаз, вывел зависимость [3]:

$$H = \frac{dA}{dS} = k \cdot \frac{dF}{dS} = k \cdot \delta, \quad (5)$$

где: dA - работа на диспергирование (например, при шлифовании) поверхности;

dS - увеличение поверхности твердого тела при диспергировании;

dF - сила, затрачиваемая на диспергирование поверхности;

$k \geq 1$ - коэффициент необратимости процесса диспергирования;

δ - поверхностное натяжение.

Коэффициент k в формуле (5) является величиной, обратной коэффициенту полезного действия. Этот коэффициент может иметь значения от $k=1$ (предельный случай, например, при идеальном упруго-хрупком расщеплении кристалла типа слюды) до значений порядка 10^4 – 10^5 для процессов диспергирования кристалла при шлифовании, истирании при

измельчении. Для твердых тел 1 и 2 различной твердости коэффициент k для одного вида процесса диспергирования постоянен [3]:

$$k \approx \frac{H_1}{H_2} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$$

Известна формула Н.И. Джерахова, позволяющая проводить расчет ПЭ в зависимости от твердости вещества [7]:

$$E_n = 2 \cdot \left(3,172 \cdot 10^{-3} \cdot H \cdot B \cdot \left(1 - 6,28 \cdot 10^{-3} \cdot H \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{E_1} \right) \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где: H - твердость вещества от 0 до 1500 (единиц измерения не имеет);

μ - коэффициент Пуассона;

$E_1 = 10^{-10} \cdot E$ (E - модуль Юнга);

$B = \frac{a^3 \cdot n}{S \cdot K \cdot C}$ - параметр;

a^3 - объем элементарной ячейки;

n - число разорванных связей при образовании поверхности S ;

K - число атомов в элементарной ячейке;

C - координатное число.

Однако использовать формулу (6) в целях оперативного определения ПЭ металлических деталей, на наш взгляд, весьма затруднительно ввиду сложности определения параметра B для многокомпонентных сплавов, из которых изготовлены авиационные детали.

Таким образом, зависимость ПЭ от величины твердости поверхности значительна, и необходимо ее учитывать при определении величины ПЭ.

Определение комплексной зависимости поверхностной энергии от работы выхода электрона и твердости металлов и сплавов

На основании вышесказанного нами проведены теоретические и экспериментальные исследования комплексной зависимости ПЭ металлов и сплавов от РВЭ и твердости, и получены следующие результаты. Для оперативного определения ПЭ металлических авиационных деталей предлагается для определения ПЭ E_n использовать разработанную нами формулу:

$$E_{np} = 0,062 \cdot 10^{19} \cdot \frac{\varphi_{ко} \cdot H_u}{S_1} + 0,083 \quad (7)$$

где: E_{np} - расчетное значение ПЭ, Дж/м²;

$\varphi_{ко}$ - РВЭ контролируемого объекта, Дж;

H_u - относительная твердость материала по шкале Мооса;

$S_1 = 1 \text{ м}^2$ - «единичная площадь», которую необходимо ввести для соблюдения размерности ПЭ.

Безразмерная относительная твердость по шкале Мооса H_u берется из справочников. Однако в большинстве случаев относительная твердость конструкционных металлических материалов в справочниках отсутствует. Тогда H_u может быть рассчитана по разработанной нами формуле [11]:

$$H_u = 0,4517 \left(\frac{HB}{H_1} \right)^{0,3358}, \quad (8)$$

где: HB - твердость материала по Бринеллю, МПа;

$H_1=1$ МПа - «единичная твердость», которую необходимо ввести для соблюдения соответствия единиц измерения H_u (если же в справочнике указана безразмерная твердость материала по Бринеллю, использовать H_1 в формуле (8) не нужно).

Подставив (8) в (7), получим формулу для расчетов ПЭ E_{np} в зависимости от РВЭ $\varphi_{ко}$ и твердости материала по Бринеллю HB :

$$E_{np} = 0,028 \cdot 10^{19} \cdot \frac{\varphi_{ко}}{S_1} \cdot \left(\frac{HB}{H_1} \right)^{0,3358} + 0,083 \quad (9)$$

Результаты проведенных нами расчетов по формуле (9) зависимости ПЭ E_{np} представлены в таблице 2. При расчетах E_{np} по формуле (9) значения РВЭ $\varphi_{ко}$ мы принимали равными φ из таблицы 1, а значения относительной твердости металлов HB взяты нами из источника [11].

Таблица 2

Результаты расчетов ПЭ E_{np} металлов по формуле (9)

Металл	HB , МПа	$\frac{Дж}{E_{np}, м^2}$	Металл	HB , МПа	$\frac{Дж}{E_{np}, м^2}$
Li	5,00	0,266	Zr	570,00	1,555
Be	1500,00	2,133	Ni	600,00	2,087
Na	0,68	0,175	Nb	750,00	2,007
Mg	300,00	1,191	Mo	1600,00	2,381
K	0,40	0,156	Ag	255,00	1,323
Al	167,00	1,146	Cd	160,00	1,093
Ti	600,00	1,602	Ta	1000,00	1,963
V	628,00	1,691	Sn	60,00	0,860
Cr	1000,00	2,174	W	2250,00	2,802
Cu	450,00	1,619	Re	1300,00	2,571
Zn	412,00	1,519	Pt	470,00	1,966
Fe	700,00	1,829	Au	220,00	1,208
Co	1200,00	2,221	Pb	38,00	0,692

График соответствия величин ПЭ E_{np} , рассчитанных по формуле (9), и экспериментальных значений ПЭ E_n для 26 металлов представлены на рис. 2. На рис. 2 также представлена формула, описывающая взаимосвязь E_{np} и E_n .

На рис. 2 видно, что сходимость между экспериментальными и расчетными значениями ПЭ хорошая — коэффициент парной корреляции $R^2 \approx 0,89$. Данный подход в определении ПЭ металлических авиационных деталей, учитывающий комплексную

зависимость ПЭ от РВЭ и твердости материала деталей может применяться в инженерных целях.

Учет совместного влияния РВЭ и твердости материалов на величину их ПЭ дает более точные результаты по сравнению с учетом только, например, РВЭ (см. рис. 1).

Металлические конструкционные и инструментальные сплавы имеют достаточно сложный химический состав, представленный (для наиболее распространенных сплавов) в таблице 3. Химический состав сплавов, представленных в таблице 3, взят нами из источника [8], твердость по Бринеллю *HB* — из источников [8, 11].

Таблица 3

Химический состав и твердость металлических сплавов

Сплав	Основные элементы, %	<i>HB</i> , МПа
В95	От 91,50 Al; до 7,00 Zn; до 2,80 Mg; до 2,00 Cu; до 0,60 Mn и др.	1500
Д16	От 94,70 Al; до 4,90 Cu; до 1,80 Mg; до 0,90 Mn; до 0,25 Zn и др.	1200
АМг2	От 98,20 Al; до 2,40 Mg; до 0,50 Mn; до 0,25 Zn; до 0,15 Cu и др.	450
30ХГСА	От 95,60 Fe; до 1,20 Si; до 1,10 Cr; до 1,10 Mn; до 0,34 С и др.	2290
ШХ15	От 95,80 Fe; до 1,65 Cr; до 1,05 С; до 0,40 Mn; до 0,37 Si и др.	1900
Р18	От 71,90 Fe; до 18,5 W; до 4,40 Cr; до 1,40 V; до 0,83 С и др.	2550
У9	От 97,8 Fe; до 0,93 С; до 0,30 Si; до 0,30 Mn; до 0,25 Ni и др.	1920
ВТ9	От 86,00 Ti; до 7,00 Al; до 3,80 Mo; до 2,00 Zr; до 0,35 Si и др.	1550
ВТ20	От 85,00 Ti; до 7,00 Al; до 2,50 V; до 2,50 Zr; до 2,00 Mo и др.	1600
БрБ2	От 96,45 Cu; до 2,10 Be; до 0,50 Ni; до 0,15 Fe; до 0,15 Al и др.	1400

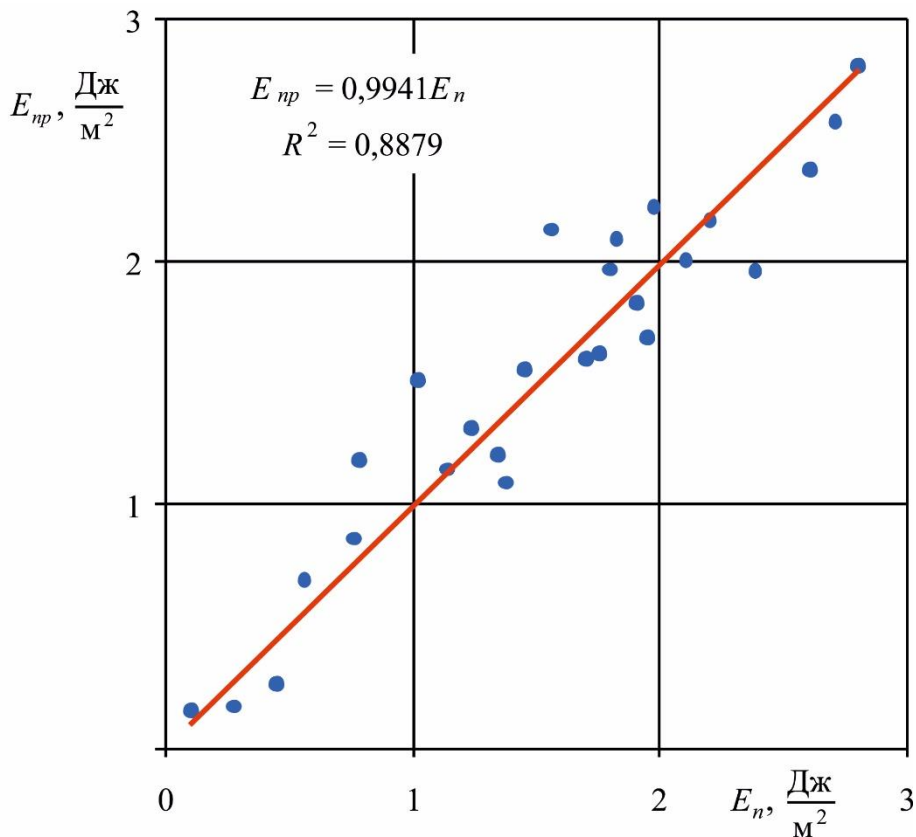


Рисунок 2. Соответствие расчетных и экспериментальных значений ПЭ

Из таблицы 3 видно, основной металл (Al, Fe, Ti, Cu, Mg и т.д.) составляет значительно большую часть сплава. Значение РВЭ основного металла превалирует над значениями РВЭ

других элементов, входящих в состав сплава. Подавляющее большинство легирующих элементов сплавов относится к металлам. Применяв научный метод подобия, оценим возможность применения формулы (9) определения ПЭ чистых элементов в целях определения ПЭ многокомпонентных металлических сплавов применяемых на АТ.

Определение работы выхода электрона

Работу выхода электрона контролируемого объекта $\varphi_{ко}$ в формуле (7) возможно определить измерением контактной разности потенциалов (КРП) и рассчитать затем по формуле [12]:

$$\varphi_{ко} = \varphi_{из} - U_{к} \cdot e, \quad (10)$$

где: $\varphi_{из}$ - РВЭ измерительного электрода прибора измерения КРП, Дж;

$U_{к}$ - КРП, измеренная на поверхности контролируемого объекта, В;

$e \approx 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона.

Подставив (10) в (9), получим итоговую формулу определения ПЭ металлических деталей АТ посредством измерения КРП с учетом твердости:

$$E_{np} = 0,028 \cdot 10^{19} \cdot \frac{\varphi_{из} - U_{к} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19}}{S_1} \cdot \left(\frac{HB}{H_1} \right)^{0,3358} + 0,083 \quad (11)$$

Контактную разность потенциалов $U_{к}$ для формул (9)–(11) позволяет измерить прибор (рис. 3), разработанный нами под руководством Заслуженного изобретателя России, профессора Э.А. Кочарова.

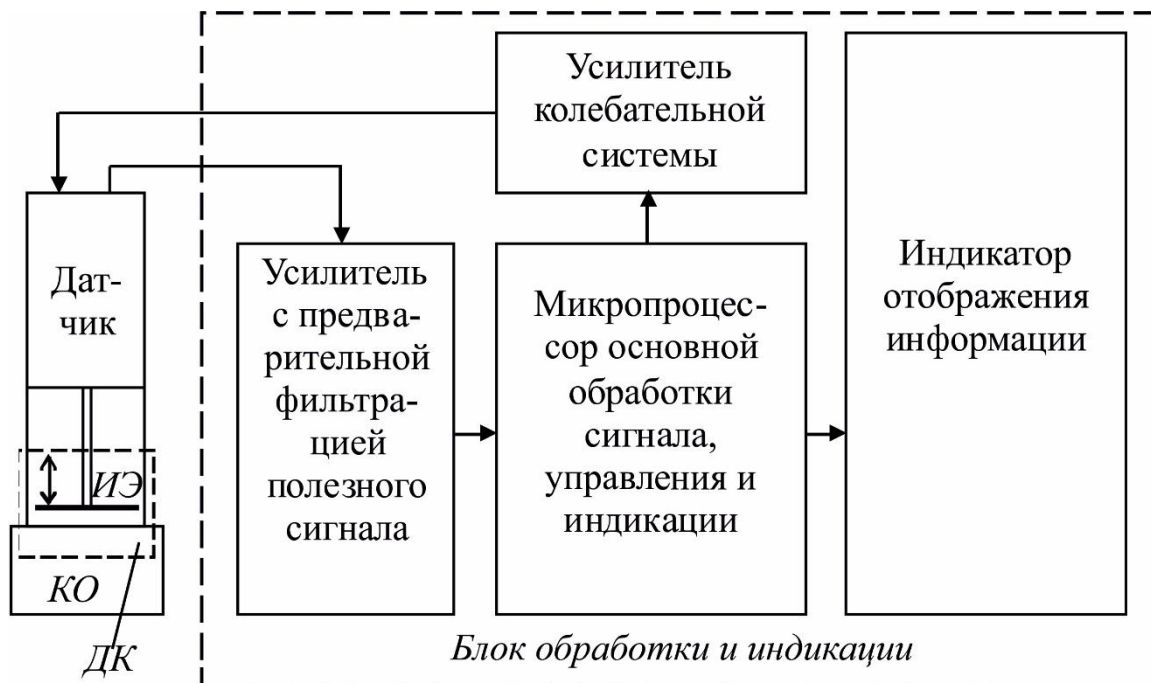


Рисунок 3. Функциональная схема прибора измерения КРП

Прибор измерения КРП состоит из датчика, блока обработки и индикации, а также зарядного устройства (на рис. 3 не показано). Датчик состоит из электромеханической колебательной системы, электромагнитного возбудителя колебаний, буферного усилителя

сигнала, снимаемого с динамического конденсатора (ДК), образуемого измерительным электродом (ИЭ) и поверхностью контролируемого объекта (КО), как показано на рис. 3.

Блок обработки и индикации состоит из усилителя сигнала, микропроцессора основной обработки сигнала, управления и индикации, жидкокристаллического индикатора отображения информации, а также блока питания с аккумулятором.

При измерении КРП датчик прикладывается к поверхности КО (рис. 3). В результате образуется ДК, обкладками которого являются поверхность КО и ИЭ. В состоянии покоя зазор между ИЭ и КО составляет 0,4 мм. Измерительный электрод представляет собой круглую никелированную пластину диаметром 4 мм. Работа выхода электрона никеля известна и составляет $7,21 \cdot 10^{-19}$ Дж [11]. Для того чтобы при изменении емкости ДК возник полезный сигнал, на ИЭ подается напряжение компенсации, а на КО через цилиндрический контакт (корпус датчика) подается 0 В («земля»).

Конденсатор называется динамическим потому, что ИЭ совершает возвратно-поступательные движения с частотой 410 Гц. Механические колебания ИЭ задаются микропроцессором основной обработки сигнала, управления и индикации, тактируемым от кварцевого резонатора. Для получения мощности, требуемой для приведения в движение электромеханической колебательной системы датчика, служит усилитель колебательной системы.

При измерении КРП между ИЭ и КО возникает электрический ток i согласно следующей формуле [13]:

$$i = \frac{du}{dt} = (\varphi_{ко} - \varphi_{иэ}) \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot S}{L^2} \cdot \frac{dL}{dt} = (\varphi_{ко} - \varphi_{иэ}) \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot S}{L^2} \cdot \omega \cdot a \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

где: u - напряжение;

t - время;

ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость;

S - площадь ИЭ;

$L=L_0+a \cdot \sin(\omega \cdot t)$ - расстояние между ИЭ и КО;

a - амплитуда колебаний ИЭ;

ω - частота колебаний ИЭ.

Поступающий от датчика сигнал, пройдя основной усилитель с предварительной фильтрацией полезного сигнала, обрабатывается в микропроцессоре основной обработки сигнала, управления и индикации. Результатом данной обработки является напряжение компенсации U , которое подается на ИЭ для получения нулевого эффективного значения напряжения полезного сигнала. Величина напряжения компенсации U и является значением искомой нами КРП U_k в формуле (7). Полученное значение КРП выводится на жидкокристаллический индикатор отображения информации в формате «999,9» мВ.

Измерению КРП должна предшествовать тщательная очистка поверхности контролируемого объекта согласно методике, изложенной нами в работе [14], так как загрязнения увеличивают РВЭ и, соответственно, уменьшают измеряемую величину КРП.

Определение поверхностной энергии авиационных металлических сплавов

Нами проведены экспериментальные исследования по определению ПЭ конструкционных и инструментальных металлических материалов, результаты представлены в таблице 4. Расчеты ПЭ E_{np} проводились по формуле (11). Контактная разность потенциалов U_k , используемая для определения РВЭ исследуемого образца $\phi_{ко}$ в формуле (11), измерялась нами прибором «Поверхность-11» [12] с измерительным электродом сравнения из технического чистого никеля. Отрицательные значения КРП исходной поверхности образцов из 30ХГСА, ШХ15 и P18 означают, что их РВЭ больше РВЭ измерительного электрода $\phi_{из}$ согласно формуле (10).

Таблица 4

Результаты расчетов ПЭ металлических сплавов по формуле (11)

Сплав	$U_k, В$		$E_{np}, \frac{Дж}{м^2}$		$\Delta E_{np}, \frac{Дж}{м^2}$	E_n , по источникам других авторов, $\frac{Дж}{м^2}$	
	исходное состояние	после зачистки	исходное состояние	после зачистки		исходное состояние	источник
Д16	0,543	1,134	2,003	1,716	0,287	0,901	[15]
						Более 1,800	[16]
30ХГСА	Минус 0,147	0,117	2,884	2,642	0,242	Нет данных	
ШХ15	Минус 0,156	0,087	2,719	2,581	0,138	Нет данных	
P18	Минус 0,181	0,048	3,008	2,782	0,226	1,950	[15]
						Более 3,000	[16]
BT9	0,047	0,425	2,437	2,237	0,200	Нет данных	
BT20	0,190	0,496	2,386	2,223	0,163	Нет данных	

Контактная разность потенциалов измерялась нами на воздухе при комнатной температуре перед и после зачистки вручную в течение 3 мин поверхности образцов наждачной бумагой зернистостью 8. В обоих случаях (и до, и после зачистки) измерению КРП предшествовала очистка поверхности образцов петролейным эфиром и выдержка в течение 15 мин для испарения петролейного эфира с поверхности исследуемых образцов. Нами производилось несколько замеров КРП до и после зачистки образцов, поэтому в таблице 4 представлены средние значения КРП.

После зачистки наждачной бумагой КРП исследуемых образцов непрерывно уменьшалась в течение 12–17 сут. для различных образцов, пока не достигала исходных значений и более не изменялась. Уменьшение КРП объясняется релаксацией (ростом) РВЭ вследствие восстановления слоя оксидов на обработанных участках поверхности КО.

Значения твердости HV исследуемых материалов при расчете ПЭ согласно формуле (11) взяты нами из таблицы 3.

Из таблицы 4 видно, что после зачистки металлических образцов наждачной бумагой КРП U_k увеличивалась, что свидетельствует об уменьшении РВЭ. Уменьшение РВЭ в результате зачистки наждачной бумагой объясняется удалением оксидов с поверхности КО и обнажением ювенильного металла. В многочисленных литературных источниках, например, в [3, 5], указывается, что оксиды увеличивают ПЭ, а, соответственно, их удаление влечет за собой ее уменьшение.

Из таблицы 4 также видно, что наибольшее падение ПЭ ΔE_{np} в результате удаления оксидного слоя при зачистке поверхности наблюдается у дюралюминия Д16 и наименьшее — у подшипникового сплава ШХ15. Это объясняется различием обрабатываемости и твердости материала (твердость ШХ15 в 1,58 раза выше твердости Д16), а также структурой, прочностью и скоростью восстановления слоя оксидов поверхностей образцов.

Выводы

Таким образом, разработанный нами способ позволяет оперативно определять величину ПЭ металлических деталей и может применяться в процессе производства, эксплуатации и ремонта АТ. Определение ПЭ мы предлагаем проводить по следующему, разработанному нами алгоритму:

1. Определение РВЭ измерительного электрода $\varphi_{из}$ прибора измерения КРП (для измерительного электрода разработанного нами прибора, напомним, $\varphi_{из}=7,21 \cdot 10^{-19}$ Дж).
2. Определение относительно твердости по шкале Мооса H_u по справочнику, экспериментально или расчетом по формуле (8).
3. Подготовка поверхности контролируемой детали к измерению КРП согласно методике, изложенной в работе [12].
4. Измерение КРП на поверхности контролируемой детали.
5. Расчет ПЭ контролируемой детали по формуле (11).

Разработанный нами способ позволяет оперативно определять ПЭ не только авиационных металлических деталей, но применяться и в других отраслях науки и техники. А метод КРП определения РВЭ, являющейся универсальным параметром, отображающим энергетические состояния твердых тел, в том числе и неравновесные, является перспективным методом неразрушающего контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грин М. Поверхностные свойства твердых тел. - М.: Мир, 1972. - 432 с.
2. Мамонова М.В., Прудников В.В., Прудникова И.А. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. - 400 с.
3. Кузнецов В.Д. Поверхностная энергия твердых тел. - М.: ГИТТЛ, 1954. – 220 с.
4. Гегузин Я.Е., Овчаренко Н.Н. Поверхностная энергия и процессы на поверхности твердых тел // Успехи физических наук. - 1962. - Том 76. - Выпуск 2. - С. 283–328.
5. Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. Перевод с польского Г.Н. Мехеда. Под ред. Ю.Н. Тарана. - М.: Металлургия, 1978. - 176 с.
6. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. - М.: Киев: Наукова думка, 1981. - 339 с.
7. Лазарев С.Ю. Оценка свойств веществ по критериям поверхностной энергии, твердости и энергоплотности // Металлообработка. - 2003. - №2. - С. 38–42.

8. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
9. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Поверхностное натяжение нитридов металлов // Современные наукоемкие технологии. - 2012. - №3. - С. 36–40.
10. Кунин Л.Л. К вопросу о современном состоянии теории поверхностного натяжения металлов // Теория металлургических процессов. Сборник трудов Центрального научно-исследовательского института черной металлургии им. И.П. Бардина. Выпуск 40. - М.: Металлургия, 1965. - С. 67–77.
11. Олешко В.С. Расчет твердости металлических деталей авиационной техники // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. - 2016. - №1. - С. 22–25.
12. Самойленко В.М., Олешко В.С. Применение прибора измерения контактной разности потенциалов «Поверхность-11» в неразрушающем контроле деталей машин // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. - 2011. - №2. - С. 3–6.
13. Ритти Дж. Новый вариант метода динамического конденсатора со сканированием компенсирующего напряжения // Приборы для научных исследований. - 1980. – Том 51. - №10. - С. 136–137.
14. Олешко В.С. Способ подготовки поверхности металлических деталей к оперативному выявлению прижогов измерением работы выхода электрона. Патент РФ на изобретение № 2488093 С1. Опубликовано 20.07.2013 г. Бюллетень №20.
15. Чертовских С.В., Семенов В.И., Шустер Л.Ш. Влияние поверхностных энергий контактирующих материалов на триботехнические характеристики // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2015. - Том 3. - №4-1 (15-1). - С. 134–141.
16. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.

Oleshko Vladimir Stanislavovich

Moscow aviation institute (national research university), Russia, Moscow
E-mail: ovs_mai@mail.ru

Pigovkin Ivan Sergeevich

Moscow aviation institute (national research university), Russia, Moscow
E-mail: ivanavia14@gmail.com

The operational definition of the surface energy of metal parts of aeronautical engineering

Abstract. The article considers the problem of determining the energy state of the surface of metal parts of aircraft. The surface energy of aircraft parts to consider when carrying out different technological operations: soldering, welding, gluing, applying protective coatings, tribological and other studies in the process of design, production, operation and maintenance. This problem is very complicated. Existing methods of determining surface energy of solid metals have significant drawbacks, the main of which are low accuracy, high labor intensity, the fact that many methods are crumbling. The authors propose a definition of the surface energy spend by determining the electron work function of the controlled object by measuring the contact potential difference and subsequent calculation by the authors' original method, taking into account the electronic structure and elastic characteristics of controlled items. The method of determining the surface energy of metal aviation parts through the determination of their electron work function measurement of contact potential difference is a non-destructive method, has a low complexity. The proposed method of determining the surface energy can be used not only in the design, manufacture, operation and repair of aviation parts, but also in other branches of science and technology.

Keywords: aeronautical engineering; surface energy; metal; alloy; parts of machines; soldering; welding; bonding; tribology; hardness; electron work function; contact potential difference; nondestructive testing

REFERENCES

1. Grin M. Poverkhnostnye svoystva tverdykh tel. - M.: Mir, 1972. - 432 s.
2. Mamonova M.V., Prudnikov V.V., Prudnikova I.A. Fizika poverkhnosti. Teoreticheskie modeli i eksperimental'nye metody. - M.: FIZMATLIT, 2011. - 400 s.
3. Kuznetsov V.D. Poverkhnostnaya energiya tverdykh tel. - M.: GITTL, 1954. - 220 s.
4. Geguzin Ya.E., Ovcharenko N.N. Poverkhnostnaya energiya i protsessy na poverkhnosti tverdykh tel // Uspekhi fizicheskikh nauk. - 1962. - Tom 76. - Vypusk 2. - S. 283–328.
5. Missol V. Poverkhnostnaya energiya razdela faz v metallakh. Pervod s pol'skogo G.N. Mekheda. Pod red. Yu.N. Tarana. - M.: Metallurgiya, 1978. - 176 s.
6. Fomenko V.S. Emissionnye svoystva materialov. - M.: Kiev: Naukova dumka, 1981. - 339 s.
7. Lazarev S.Yu. Otsenka svoystv veshchestv po kriteriyam poverkhnostnoy energii, tverdosti i energoplotnosti // Metalloobrabotka. - 2003. - №2. - S. 38–42.
8. Fizicheskie velichiny. Spravochnik. Pod red. I.S. Grigor'eva, E.3. Meylikhova. - M.: Energoatomizdat, 1991. - 1232 s.

9. Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Guchenko S.A., Zavatskaya O.N. Poverkhnostnoe natyazhenie nitridov metallov // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. - 2012. - №3. - S. 36–40.
10. Kunin L.L. K voprosu o sovremennom sostoyanii teorii poverkhnostnogo natyazheniya metallov // *Teoriya metallurgicheskikh protsessov. Sbornik trudov Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta chernoy metallurgii im. I.P. Bardina. Vypusk 40*. - M.: Metallurgiya, 1965. - S. 67–77.
11. Oleshko V.S. Raschet tverdosti metallicheskih detaley aviatsionnoy tekhniki // *Oboronnyy kompleks - nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. - 2016. - №1. - S. 22–25.
12. Samoylenko V.M., Oleshko V.S. Primenenie pribora izmereniya kontaktnoy raznosti potentsialov «Poverkhnost'-11» v nerazrushayushchem kontrole detaley mashin // *Oboronnyy kompleks - nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. - 2011. - №2. - S. 3–6.
13. Ritti Dzh. Novyy variant metoda dinamicheskogo kondensatora so skanirovaniem kompensiruyushchego napryazheniya // *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy*. - 1980. - Tom 51. - №10. - S. 136–137.
14. Oleshko V.S. Sposob podgotovki poverkhnosti metallicheskih detaley k operativnomu vyyavleniyu prizhgov izmereniem raboty vykhoda elektrona. Patent RF na izobretenie № 2488093 S1. Opublikovan 20.07.2013 g. Byulleten' №20.
15. Chertovskikh S.V., Semenov V.I., Shuster L.Sh. Vliyanie poverkhnostnykh energiy kontaktiruyushchikh materialov na tribotekhnicheskie kharakteristiki // *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. - 2015. - Tom 3. - №4-1 (15-1). - S. 134–141.
16. Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na trenie i iznos. - M.: Mashinostroenie, 1977. - 526 s.