

УДК 629.7.08, 621.3.088, 53.082.72

Разработка методики определения работы выхода электрона деталей аэрокосмической техники измерением контактной разности потенциалов

В.С. Олешко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Developing a method for the electron work function determination in the aerospace systems parts by measuring the contact potential difference

V.S. Oleshko

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Повышение эффективности неразрушающего контроля металлических деталей аэрокосмической техники — актуальная задача. Перспективным является относящийся к электрическому виду неразрушающего контроля деталей машин метод контактной разности потенциалов. Исследован вопрос точности определения работы выхода электрона твердых металлов и сплавов методом контактной разности потенциалов. Показано, что существующая методика не позволяет точно определять работу выхода электрона при измерении контактной разности потенциалов на воздухе. На основании результатов экспериментальных исследований получена формула, обеспечивающая более точный расчет работы выхода электрона по измеренным значениям контактной разности потенциалов. На базе полученной формулы создана методика, которая является универсальной и может применяться в научных исследованиях, машиностроении и при эксплуатации аэрокосмической техники.

EDN: EOCPYD, <https://elibrary/eocpyd>**Ключевые слова:** работа выхода электрона, твердый металл, поверхностная энергия, неразрушающий контроль, линейная регрессия

Increasing the efficiency in non-destructive testing of the aerospace systems metal parts remains an urgent task. The contact potential difference method is related to the electrical type of non-destructive testing of the machine parts and is a promising option. The paper studies the problem of accuracy in determining the electron work function in the solid metals and alloys using the contact potential difference method. It shows that the existing technique does not allow for an accurate determination of the work function when measuring the contact potential difference in the air. Based on the experimental study results, a formula is obtained that provides a more accurate computation of the work function based on the contact potential difference measured values. The obtained formula forms a basis for creating a technique that is universal and could be applied in scientific research, mechanical engineering and operation of the aerospace systems.

EDN: EOCPYD, <https://elibrary/eocpyd>**Keywords:** electron work function, solid metal, surface energy, non-destructive testing, linear regression

Уровень надежности техники, в том числе аэрокосмической (АКТ), заложенный при проектировании, производстве и испытаниях, необходимо поддерживать в процессе эксплуатации. Важной составляющей поддержания надежности АКТ является неразрушающий контроль ее деталей. Совершенствование методов и средств неразрушающего контроля при постоянном развитии АКТ делает контроль более эффективным [1–4].

Перспективным методом неразрушающего контроля является метод контактной разности потенциалов (КРП), основанный на сравнении работ выхода электрона (РВЭ) объекта контроля и эталонного металла измерительного электрода средства измерения. За рубежом этот метод получил название метода зонда Кельвина.

Метод КРП относится к конденсаторным методам измерения — при прикладывании датчика устройства измерения КРП входящие в его состав измерительный электрод и поверхность контролируемого металла образуют конденсатор, обкладками которого они являются.

Значение РВЭ коррелирует со многими физико-химическими свойствами металлов, в том числе со значением поверхностной энергии. Определение значений РВЭ и поверхностной энергии металлов или сплавов можно использовать при нанесении защитных покрытий, пайке, склеивании и контроле качества очистки поверхностей от загрязнений, а также в трибо-технике [5–10].

Взаимосвязь КРП и РВЭ первого и второго контактирующих металлов описывается выражением [11]

$$U = (A_1 - A_2)/e, \quad (1)$$

где U — КРП, возникающая между первым и вторым металлами, В; A_1 и A_2 — работы выхода из первого и второго металлов, Дж (или эВ); e — элементарный заряд электрона, Кл.

Формула (1) справедлива для находящихся в вакууме металлов с ювенильной поверхностью, непокрытой слоем оксидов. Следует отметить, что при контакте образцов, выполненных из одного и того же металла, КРП возникает, как и при контакте разнородных металлов. Это обусловлено различием в состоянии поверхностей контактирующих образцов.

Поверхности твердых металлов и изготовленных из них изделий в атмосфере воздуха покрыты пленками оксидов. Оксиды металлов увеличивают РВЭ из них [12].

Принимаем следующее:

- элементарный заряд электрона $e = 1$ Кл;
- РВЭ из первого металла $A_1 = A_{me}$ соответствует РВЭ из измерительного электрода датчика прибора измерения КРП, изготовленного из чистого никеля (имеющего РВЭ, равную 5,04 эВ);
- РВЭ из второго металла $A_2 = A_m$ соответствует неизвестной РВЭ из исследуемого металла;
- КРП U можно измерить техническими средствами, например, устройством, описанным в работе [13].

Тогда на основании формулы (1) работу выхода из исследуемого металла можно найти по выражению

$$A_m = A_{me} - U = 5,04 - U. \quad (2)$$

Цель работы — анализ возможности применения формулы (2) для оперативного определения РВЭ из металлов и сплавов и (при необходимости) разработки новой методики ее определения.

Параметры исследуемых металлов приведены в таблице. Значения РВЭ A для двадцати одного металла взяты из источника [14], значения РВЭ A_m рассчитаны по формуле (2). Значения КРП U измерены на воздухе устройством [13] на поверхности предварительно тщательно очищенных петролевым эфиром образцов металлов, имеющих форму куба с ребром, равным 1 см (рис. 1). Значения КРП U представляют собой оценки математического ожидания КРП, рассчитанные по двенадцати измерениям для каждого образца металла.

Коэффициент парной корреляции значений параметров A и U составил $-0,81$, что свидетельствует о сильной взаимосвязи между РВЭ и КРП.

Погрешность определения РВЭ по измеренным значениям КРП U на воздухе найдена по формуле

$$\Delta_m = \left| \frac{A_m - A}{A} \right| \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Из таблицы следует, что средняя погрешность Δ_m для двадцати одного металла, рассчитанная по формуле (3), равна 11 %, а максимальная ошибка определения РВЭ A_m по формуле (2) для иттрия — 48 %. Отсюда можно сделать вывод, что формула (2) не в полной мере подходит для определения РВЭ по измеренным на воздухе значениям КРП металлов.

Зависимость РВЭ A от КРП U образцов металлов, построенная по данным, указанным в

Параметры исследуемых металлов

Металл	A, эВ	U, В	A _m , эВ	Δ _m , %	A _c , эВ	Δ _c , %
Mg	3,66	0,9053	4,1347	13	3,6350	1
Al	4,26	0,8621	4,3779	2	3,6868	14
Si	4,85	-0,1584	5,1984	7	4,9089	1
Ti	4,33	0,3208	4,7192	9	4,3351	0
V	4,30	0,1362	4,9038	14	4,5561	6
Cr	4,50	0,2099	4,8301	7	4,4678	1
Fe	4,67	0,1375	4,9025	5	4,5545	3
Co	5,00	-0,2623	5,3023	6	5,0333	1
Ni	5,04	0,1121	4,8579	4	4,5850	9
Cu	4,94	0,1997	4,8403	9	4,4800	9
Zn	3,63	0,8679	4,1721	15	3,6798	1
Y	3,10	0,4520	4,588	48	4,1779	35
Zr	4,05	0,2394	4,8006	19	4,4325	9
Nb	4,36	0,1296	4,9104	13	4,5640	5
Mo	4,53	0,1318	4,9082	8	4,5614	1
Ag	4,52	0,0862	4,9538	10	4,6160	2
Sn	4,42	0,2604	4,7796	8	4,4074	0
Sb	4,70	0,0109	5,0291	7	4,7062	0
W	4,55	0,2217	4,8183	6	4,4537	2
Pb	4,25	0,4153	4,6247	9	4,2218	1
Bi	4,34	0,3830	4,6570	7	4,2605	2



Рис. 1. Внешний вид образцов металлов

таблице, приведена на рис. 2. Здесь точками обозначены значения РВЭ семнадцати металлов из таблицы в зависимости от измеренной на их поверхности КРП, прямой линией — график линейной зависимости $A = f(U)$. Как видно

из рис. 2, большие значения КРП соответствуют меньшим РВЭ металлов.

Проведенный методом наименьших квадратов анализ позволил вывести следующую формулу линейной регрессии для расчета РВЭ по

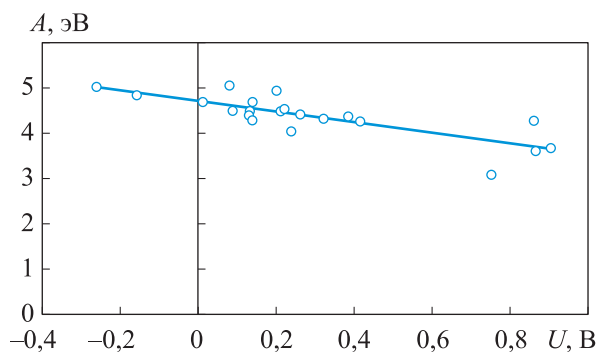


Рис. 2. Зависимость РВЭ A от КРП U образцов металлов

значениям КРП U исследуемых образцов металлов:

$$A_c = 4,7192 - 1,1976U. \quad (4)$$

Зависимость, определяемая формулой (4), имеет коэффициент детерминации $R^2 = 0,66$.

Результаты расчета РВЭ A_c по формуле (4) указаны в таблице.

Также в таблице приведены значения погрешности определения РВЭ, вычисленные по измеренным значениям КРП U на воздухе следующим образом:

$$\Delta_c = \left| \frac{A_c - A}{A} \right| \cdot 100 \, \%.$$

Из таблицы следует, что средняя погрешность Δ_c для двадцати одного металла уменьшилась по сравнению со средней погрешностью Δ_m и составила 5 %. Для иттрия погрешность Δ_m также осталась максимальной, но снизилась на 13 %.

Следовательно, выражение (5) позволяет определить РВЭ по измеренным на воздухе значениям КРП металлов точнее (более чем в 2 раза), чем по формуле (2).

Анализ формулы (4) показывает, что вычисленные с ее помощью РВЭ в 1,1976 раза меньше, чем РВЭ, определенные по формуле (2). Физи-

ческий смысл такого уменьшения РВЭ заключается в преобразовании измеренных значений КРП на воздухе на оксидированной поверхности, которая увеличивает РВЭ [12]. Формула (4) позволяет снизить это влияние и получить более точные значения РВЭ по измерениям на воздухе КРП реальных металлов.

Следует отметить, что для никеля по формуле (4) получено РВЭ $A_c = 4,585$ эВ, которое является более близким к РВЭ из никеля 4,5 эВ, указанному в работе [11]. Возможно, источник [11] является более точным по сравнению с более новым справочником [14], откуда были взяты исходные данные для расчетов.

Так как формула (4) отражает общие тенденции для металлов, ее можно применять и для определения РВЭ деталей АКТ, изготовленных из многокомпонентных сплавов. Однако измерению КРП должно предшествовать удаление защитных покрытий, тщательная очистка поверхности и ее сушка.

На основании исследований, выполненных с использованием формулы (4), на языке Python написана программа для ЭВМ [15], позволяющая определять РВЭ по измеренным значениям КРП с меньшими трудозатратами.

(5)

Выводы

1. На основании данных экспериментальных исследований получена формула для более точного определения РВЭ по измеренным значениям КРП на поверхности деталей АКТ.

2. Созданную на базе полученной формулы методику можно применять в научной работе и для нахождения параметров технологических операций в машиностроении, в том числе при производстве и ремонте техники.

3. Разработанная программа для ЭВМ позволяет уменьшить трудозатраты при определении РВЭ методом КРП.

Литература

- [1] Мартынюк А.В., Курицына В.В., Силюянова М.В. Исследование влияния режимов резания на эффективность процесса чернового фрезерования деталей авиационных двигателей. *СТИН*, 2023, № 6, с. 17–20.
- [2] Нагорнов А.Ю., Парафесъ С.Г., Туркин И.К. *Моделирование в проблемах аэроупругой устойчивости и динамического поведения тонкостенных конструкций беспилотных аппаратов*. Москва, Изд-во МАИ, 2021. 160 с.
- [3] Karpovich E., Kombaeв T., Gueraiche D. et al. *Rocket-based versus solar wing-tail Martian UAVs: design, analysis, and trade studies*. AS, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s42401-023-00267-w>

- [4] Алешин А.К., Кондратьев И.М., Рашоян Г.В. и др. Методы определения параметров функциональных характеристик механизмов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 5, с. 38–47. EDN: NMLMRR
- [5] Yurov V.M., Zhangozin K.N. Peierls-Nabarro barrier in the surface layer of allotropic modifications of carbon. *Journal of Science. Lyon*, 2024, no. 50, pp. 36–45, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10609838>
- [6] Aslamazova T.R., Kotenev V.A. The influence of phthalocyanine on the thermogravimetric behavior of acrylic elastomers. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2023, vol. 59, no. 6, pp. 1230–1238, doi: <https://doi.org/10.1134/s207020512370137x>
- [7] Шебзухова И.Г., Арефьева Л.П. Поверхностная энергия и работа выхода электрона полиморфных модификаций титана. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, 2023, № 15, с. 288–298, doi: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.288>
- [8] Бердибеков А.Т., Юров В.М., Грузин В.В. и др. Влияние внешней среды на микротрещины деталей военной техники. *Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России*, 2023, № 2, с. 45–50.
- [9] Мусохранов М.В., Антонюк Ф.И., Калмыков В.В. Определение значения поверхностной энергии через работу выхода электрона. *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16036>
- [10] Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Свистун А.И. и др. Зарядочувствительный метод исследования деформации материалов. *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка. Мат. 15-й Межд. науч.-тех. конф.* Минск, Белорусская наука, 2022, с. 305–310.
- [11] Фоменко В.С. *Эмиссионные свойства материалов*. Киев, Наукова думка, 1981. 339 с.
- [12] Олешко В.С. Исследование влияния оксидов металлов на определение работы выхода электронов методом контактной разности потенциалов. *Актуальные вопросы прочности. Сб. тез. LXVII Межд. конф.* Екатеринбург, УГТУ, 2024, с. 231–232.
- [13] Олешко В.С., Ткаченко Д.П., Федоров А.В. *Устройство измерения контактной разности потенциалов металлических деталей авиационной техники*. Патент РФ 2717747. Заявл. 14.08.2019, опублик. 25.03.2020.
- [14] Haynes W.M. *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC Press, 2016. 2670 p.
- [15] Олешко В.С. *Программа для определения величины работы выхода электронов*. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2024615430. Заявл. 28.02.2024, опублик. 06.03.2024.

References

- [1] Martynyuk A.V., Kuritsyna V.V., Siluyanov M.V. Investigation of the influence of cutting modes on the efficiency of the process of rough milling of aircraft engine parts. *STIN*, 2023, no. 6, pp. 17–20. (In Russ.).
- [2] Nagornov A.Yu., Parafes S.G., Turkin I.K. *Modelirovanie v problemakh aerouprugoy ustoychivosti i dinamicheskogo povedeniya tonkostennykh konstruktivnykh bespilotnykh apparatov* [Modelling in problems of aeroelastic stability and dynamic behaviour of thin-walled structures of unmanned vehicles]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2021. 160 p. (In Russ.).
- [3] Karpovich E., Kombayev T., Gueraiche D. et al. *Rocket-based versus solar wing-tail Martian UAVs: design, analysis, and trade studies*. AS, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s42401-023-00267-w>
- [4] Aleshin A.K., Kondratyev I.M., Rashoyan G.V. et al. Methods for determining parameters of the mechanism functional characteristics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 5, pp. 38–47. EDN: NMLMRR (In Russ.).
- [5] Yurov V.M., Zhangozin K.N. Peierls-Nabarro barrier in the surface layer of allotropic modifications of carbon. *Journal of Science. Lyon*, 2024, no. 50, pp. 36–45, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10609838>
- [6] Aslamazova T.R., Kotenev V.A. The influence of phthalocyanine on the thermogravimetric behavior of acrylic elastomers. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2023, vol. 59, no. 6, pp. 1230–1238, doi: <https://doi.org/10.1134/s207020512370137x>

- [7] Shebzukhova I.G., Arefyeva L.P. Surface energy and electron work function for polymorphic modifications of titanium. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials], 2023, no. 15, pp. 288–298, doi: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.288> (in Russ.).
- [8] Berdibekov A.T., Yurov V.M., Gruzin V.V. et al. The influence of the external environment on microcracks in military equipment parts. *Oboronnyy kompleks — nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii* [Defense Industry Achievements — Russian Scientific and Technical Progress], 2023, no. 2, pp. 45–50. (In Russ.).
- [9] Musokhranov M.V., Antonyuk F.I., Kalmykov V.V. Determination of the value of the surface energy through electron work function. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16036> (in Russ.).
- [10] Panteleev K.V., Mikitevich V.A., Svistun A.I. et al. [Charge sensitive techniques in deformation of materials studies]. *Novye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka. Mat. 15-y Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding. Proc. 15th Int. Sci.-Tech. Conf.]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2022, pp. 305–310. (In Russ.).
- [11] Fomenko V.S. *Emissionnyye svoystva materialov* [Emission properties of materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 339 p. (In Russ.).
- [12] Oleshko V.S. [Investigation of influence of metal oxides on determination of electron yield work by contact potential difference method]. *Aktualnye voprosy prochnosti. Sb. tez. LXVII Mezhd. konf.* [Current Issues of Strength. Abs. LXII Int. Conf.]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2024, pp. 231–232. (In Russ.).
- [13] Oleshko V.S., Tkachenko D.P., Fedorov A.V. *Ustroystvo izmereniya kontaktnoy raznosti potentsialov metallicheskih detaley aviatsionnoy tekhniki* [Device for measuring contact potential difference of metal parts of aviation equipment]. Patent RU 2717747. Appl. 14.08.2019, publ. 25.03.2020. (In Russ.).
- [14] Haynes W.M. CRC handbook of chemistry and physics. CRC Press, 2016. 2670 p.
- [15] Oleshko V.S. *Programma dlya opredeleniya velichiny raboty vykhoda elektronov. Svid. o gos. reg. prog. dlya EVM № 2024615430* [Software for determining the value of electron yield work. Software reg. certificate 2024615430]. Appl. 28.02.2024, publ. 06.03.2024. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.07.2024

Информация об авторе

ОЛЕШКО Владимир Станиславович — кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры «Летательные аппараты». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: oleshkovs@mai.ru).

Information about the author

OLESHKO Vladimir Stanislavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Aircraft Department. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Highway, Bldg. 4, e-mail: oleshkovs@mai.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Олешко В.С. Разработка методики определения работы выхода электрона деталей аэрокосмической техники измерением контактной разности потенциалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 4, с. 50–55.

Please cite this article in English as:

Oleshko V.S. Developing a method for the electron work function determination in the aerospace systems parts by measuring the contact potential difference. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 4, pp. 50–55.