

## Поверхностная энергия и работа выхода электрона граней кристаллов алюминия и свинца

И.Г. Шебзухова<sup>1</sup>, Л.П. Арефьева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФБГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

<sup>2</sup>ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Irina.Shebzukhova@mail.ru<sup>1</sup>, Ludmilochka529@mail.ru<sup>2</sup>

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.308

**Аннотация:** От поверхностных свойств металлов во многом зависят технологические процессы и эксплуатационные свойства материалов. Алюминий и свинец широко применяются в разных отраслях промышленности, однако до сих пор наблюдается широкий разброс экспериментальных данных их поверхностной энергии и работы выхода электрона. Изменение данных характеристик при росте температуры практически не исследовано. В связи с этим в работе электронно-статистическим методом проведена оценка поверхностной энергии граней кристаллов алюминия и свинца с учетом вкладов дисперсионной, поляризационной и осцилляционной поправок, а также термического влияния. Аналитическая связь между поверхностной энергией и работой выхода плотноупакованных граней монокристаллов позволила оценить влияние температуры на анизотропию исследуемых свойств. Сравнение изменения предела прочности и поверхностной энергии поликристаллов алюминия и свинца показало возможность развития аналитической связи указанных величин, что позволит прогнозировать поведение металлов и сплавов, в том числе для материалов с пониженной размерностью. Однако, по мимо связи между поверхностной энергией поликристалла, энергией когезии и пределом прочности, необходимо учитывать и другие составляющие энергии разрушения материала.

**Ключевые слова:** поверхностная энергия, работа выхода электрона, анизотропия, электронно-статистический метод, предел прочности, алюминий, свинец.

Шебзухова Ирина Гусейновна – д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики ФБГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Арефьева Людмила Павловна – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Original paper

### Surface energy and electron work function of aluminum and lead crystal faces

I.G. Shebzukhova<sup>1</sup>, L.P. Aref'eva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russia

<sup>2</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.308

**Abstract:** Technological processes and operational properties of materials largely depend on the surface properties of metals. Aluminum and lead are widely used in various industries, but there is still a wide range of experimental data on their surface energy and electron work function. Changes in these characteristics with increasing temperature have not been studied in practice. In this regard, the surface energy of the faces of aluminum and lead crystals was evaluated using the electronic statistical method, taking into account the contributions of dispersion, polarization, and oscillation corrections, as well as thermal effects. The analytical relationship between the surface energy and the electron work function of densely packed single crystal faces allowed us to evaluate the effect of temperature on the anisotropy of the properties under study. A comparison of changes in the tensile strength and surface energy of aluminum and lead polycrystals has shown the possibility of developing an

analytical relationship between these values, which will make it possible to predict the behavior of metals and alloys, including materials with reduced dimensionality. However, in addition to the relationship between the surface energy of polycrystals, the cohesion energy, and the tensile strength, it is necessary to take into account other components of the fracture energy of materials.

*Keywords: surface energy, electron output work, anisotropy, electron statistical method, tensile strength, aluminum, lead.*

*Irina G. Shebzukhova – Dr. Sc., Professor, Department of Theoretical and Experimental Physics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, ORCID: 0000-0002-1532-1873*

*Ludmila P. Arefeva – Dr. Sc., Professor, Department of Material Science and technology of metals, Don State Technical University, ORCID: 0000-0003-2431-6897*

Поступила в редакцию/received: 28.06.2025; после рецензирования/ revised: 29.08.2025; принята/accepted 04.09.2025.

## **1. Введение**

Возможность контролировать и изменять свойства поверхности материалов в зависимости от предъявляемых требований к изделиям из них играет ключевую роль в технологических процессах. Зная энергетические и силовые характеристики поверхности, можно получать изделия с повышенной износостойкостью, теплостойкостью, устойчивые к действию агрессивных сред, улучшать литейные свойства и влиять на смачиваемость поверхности. От поверхностной энергии (ПЭ) зависят адсорбция на границах с газом и жидкой средой, сегрегация примесей и легирующих элементов на границах зерен поликристаллов и поверхности, диффузионные и адгезионные процессы, смачиваемость и лиофильность. Знание величины работы выхода электрона (РВЭ) и ее зависимости от различных факторов позволяет модернизировать и оптимизировать свойства металлических покрытий и композиционных материалов. При этом в литературе практически отсутствуют экспериментальные данные ПЭ и РВЭ грани кристаллов большинства металлов.

В то же время с практической точки зрения измерить РВЭ металла и установить влияние на нее внешних факторов технически гораздо легче, чем провести измерения ПЭ кристаллического образца. В связи с этим вопрос о корреляции между ПЭ и РВЭ граней металлических кристаллов рассматривался в ряде работ [1-5].

Объектами исследования выбраны полубесконечные монокристаллы алюминия и свинца.

Алюминий является одним из важнейших конструкционных материалов современной промышленности, занимая второе место по объемам использования после железа. Уникальное сочетание физико-химических и механических свойств алюминия определяет его широкое применение в различных отраслях промышленности, таких, как аэрокосмическая отрасль, автомобилестроение, железнодорожный транспорт, радиотехника, нефтехимия, производство бытовой техники и даже кухонной посуды. Свойства алюминия сильно зависят от

температуры и чистоты металла [6]. Поэтому представляется интересным сравнить зависимость от температуры поверхностных свойств алюминия со свойствами, которые достаточно легко установить экспериментально, например, с температурной зависимостью предела прочности.

Свинец, в отличие от алюминия, не является конструкционным материалом. В последние десятилетия активно ведется работа по созданию бессвинцовых материалов [7, 8], что должно снизить негативные последствия для экологии и здоровья населения. Однако, в некоторых отраслях промышленности свинец продолжает играть важную роль. Например, он применяется в мягких припоях, в химической промышленности, как компонент жидкометаллических теплоносителей в ядерной энергетике, как защитный материал. Свинец оказывает существенное влияние на процессы смачиваемости поверхностей [9], что является ключевым вопросом работы с припоями и литейными сплавами.

Таким образом, теоретическое и экспериментальное исследование поверхностных свойств металлических материалов, в частности алюминия и свинца, необходимо для развития как фундаментальной науки, так и прикладного материаловедения.

## **2. Постановка задачи**

Целью данной работы являлось исследование взаимосвязи величин ПЭ и РВЭ граней полубесконечного монокристалла на границе с вакуумом. Для достижения поставленной цели в рамках электронно-статистической теории [4, 5] проведены вычисления ПЭ и РВЭ алюминия и свинца с учётом дисперсионного взаимодействия ячеек Вигнера-Зейтца (ВЗ) и осцилляции электронной плотности в поверхностном слое, поляризации поверхностных ионов в поле полубесконечного металла, установлена связь между ПЭ и РВЭ, показана температурная и ориентационная зависимости.

## **3. Методология расчетов**

*Поверхностная энергия алюминия и свинца для грани металлических кристаллов.* Поверхностная энергия при температуре  $T$  с учётом поправок запишем в виде:

$$f_{\omega}(hkl) = f_{\omega}^0(hkl) + \Delta f_{\omega}^T(hkl) = f_{\omega}^k(hkl) + f_{\omega}^g(hkl) + f_{\omega}^p(hkl) + f_{\omega}^{osc}(hkl) + T \frac{df_{\omega}(hkl)}{dT}. \quad (1)$$

Основной вклад в ПЭ при 0 К  $f_{\omega}^0(hkl)$  вносит первое слагаемое  $f_{\omega}^k(hkl)$ , полученное на основе статистической электронной теории Томаса-Ферми (ТФ) и гиббсова определения избыточной удельной ПЭ (при 0 К), принимая за потенциал металла потенциал Френкеля, с учетом

теоремы вириала и квантовых поправок [4] имеем:

$$f_{\omega}^k(hkl) \cong \frac{1}{5} n(hkl) |W(r_0)| \sum_{j=0}^{\infty} [\Phi_j(hkl)]^{-6}, \quad (2)$$

где  $n(hkl)$  – число частиц на единице площади грани,  $W(r_0)$  – полная энергия металлической решётки в равновесии (в расчёте на 1 атом),  $\Phi_j(hkl) = (1 + \delta(hkl)(2j+1))/2bs\lambda$ ,  $\delta(hkl)$  – межплоскостное расстояние,  $s$  – линейный параметр, приводящий уравнение ТФ к безразмерному виду,  $\lambda$  – вариационный параметр, минимизирующий ПЭ металла на границе с вакуумом при учёте обменной поправки. Суммирование в (2) проводится по  $j$ -м плоскостям грани  $(hkl)$  (до значения  $j$ , при котором вклад  $< 0,01$  мДж/м<sup>2</sup>). Остальные слагаемые в  $f_{\omega}^0(hkl)$  – поправки к ПЭ. Дисперсионная  $f_{\omega}^g(hkl)$ , поляризационная  $f_{\omega}^p(hkl)$ , осцилляционная  $f_{\omega}^{osc}(hkl)$  поправки нами получены в виде [10]:

$$f_{\omega}^g(hkl) \cong 12,115 \frac{\hbar f(z/\gamma)^{1/2}}{R^{7/2}} \left(1 - \frac{r - x_{\Gamma}}{R}\right)^{-2} \left(1 - \frac{2}{k-n}\right) \left(\frac{A}{N_A d}\right)^{3/2} n(hkl), \quad (3)$$

$$f_{\omega}^p(hkl) = -0,698\alpha \frac{V_F^2 (1 - \chi(0))^2}{s^2 \lambda^{10}} n(hkl) \sum_{j=0}^{\infty} \left(1 - \frac{\beta_j}{b}\right)^{-14}. \quad (4)$$

$$f_{\omega}^{osc}(hkl) \approx 35,6 \left(\frac{z^{5/4}}{N_A}\right)^{2/3} f\left(\frac{d}{A}\right)^{1/6} n(hkl), \quad (5)$$

где  $f$  – коэффициент упаковки зависящий от структуры металла,  $\gamma = m^*/m$ ,  $m^*$  – эффективная масса электрона,  $m$  – масса свободного электрона,  $z$  – число свободных электронов на атом,  $A$  и  $D$  – атомный вес и плотность;  $\hbar$  и  $N_A$  – постоянная Планка и число Авогадро,  $r$  – радиус иона,  $x_{\Gamma}$  – координата гиббсовой поверхности раздела,  $R$  – радиус сферы равновеликой ячейки ВЗ,  $n$  – показатель степени в решении уравнении ТФ для внутренней области металла,  $k$  – показатель степени в потенциале борновских сил отталкивания вследствие перекрытия ячеек ВЗ,  $\alpha$  – поляризуемость ионов металла,  $V_F$  – потенциал Ферми,  $\chi(0)$  – безразмерный потенциал на физической поверхности раздела;  $|\beta_j| = j(\delta(hkl) + r + x_{\Gamma})/s\lambda$ . Учитывая зависимость всех величин в  $f_{\omega}^0(hkl)$  от температуры нами получен температурный коэффициент ПЭ в виде:

$$\frac{df_{\omega}(hkl)}{dT} = -f_{\omega}^0(hkl) \left[ 2\alpha_p + \frac{c_V^s - c_V^v}{|W(r_0)|} + \frac{3\alpha_p \delta(hkl) \sum_{j=0}^{\infty} (2j+1) \Phi_j^{-7}(hkl)}{sb\lambda \sum_{j=0}^{\infty} \Phi_j^{-6}(hkl)} \right] \quad (6)$$

где  $\alpha_p$  – термический коэффициент линейного расширения,  $c_V^s$  и  $c_V^v$  – теплоёмкости твёрдого и паробразного металла.

Для сравнения полученных результатов с экспериментальными

данными ПЭ жидких металлов проведена оценка среднестатистических значений ПЭ металлов при температуре плавления по формуле:

$$\bar{f}_\omega = \frac{\sum_{i=1}^n g_i f_{\omega i} \exp(-f_{\omega i} / (n_i kT))}{\sum_{i=1}^n g_i \exp(-f_{\omega i} / (n_i kT))} \quad (7)$$

где  $f_{\omega i} = f_\omega(hkl)$ ,  $n_i = n(hkl)$ ,  $g_i$  – статистический вес грани.

*Работа выхода электрона алюминия и свинца.* Полную энергию полубесконечного металлического кристалла  $E_1$  можно записать как функцию числа положительных ионов и валентных электронов. При удалении одного электрона полная энергия системы станет  $E_2$  [4, 5]. Переход системы из состояния 1 в 2 зависит от условий удаления электрона из металла (адиабатически, изотермически и т.д.).

Энергия, приходящаяся на один атом в поверхностном слое:

$$E = E_0 + f_\omega(hkl) / n_v \tau, \quad (8)$$

где  $E_0$  – энергия ячейки ВЗ в объёме полубесконечного кристалла; второе слагаемое – ПЭ, отнесённая к одной частице,  $n_v = f_v / \beta a^3$  – число частиц в единице объёма металла,  $f_v$  – число частиц в элементарной ячейке,  $\beta$  – численный коэффициент, зависящий от типа кристаллической структуры,  $\tau$  – эффективная толщина поверхностного слоя.

Устанавливая связь между РВЭ (адиабатической и изотермической) при помощи известных термодинамических соотношений и, имеет в виду соотношение (8), получим:

$$\varphi(hkl) = - \left( \frac{\partial E_0}{\partial z} \right)_{\bar{R}} - \frac{1}{n_v \tau} \left( \frac{\partial f_\omega(hkl)}{\partial z} \right)_{R,T}. \quad (9)$$

В (9) первое слагаемое постоянная величина и не зависит от кристаллографической грани, второе определяет ориентационную зависимость РВЭ. Определяя производную  $(\partial f_\omega(hkl) / \partial z)_{R,T}$ , используя формулу (1) с учётом (2)-(6) и, принимая во внимание, что полная энергия в расчете на атом равна сумме кулоновской потенциальной энергии взаимодействия положительных ионов с электронным газом и нулевой кинетической энергии валентных электронов [4], находим:

$$\left( \frac{\partial W(r)}{\partial z} \right)_R = \frac{2W(r)}{z}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в  $(\partial f_\omega(hkl) / \partial z)_{R,T}$ , а затем в (9), получим выражение, связывающее РВЭ и ПЭ грани  $(hkl)$  в виде:

$$\varphi(hkl) = \varphi_0 (1 - f_\omega(hkl) / f_0), \quad (11)$$

где  $\varphi_0 = \varphi_P + \frac{B(hkl)}{z} a^2 f_\omega^{liq}$ ,  $f_0 = \frac{\phi_0 z}{B(hkl) a^2}$ ,  $\varphi_P$  – ричардсоновская РВЭ из поликристаллического образца,  $f_\omega^{liq}$  – ПЭ жидкого металла при

температуре плавления, параметр  $B(hkl)$ , зависящий от типа кристаллической структуры и ориентации грани, для моноатомного поверхностного слоя толщиной  $\tau=R$  получен в [4]. Работу выхода электрона поликристаллов можно оценить по формуле, подобной (7).

Для анализа характера зависимости ПЭ и РВЭ от температуры проводилось сравнение с температурной зависимостью предела прочности алюминия и свинца. Подобное сравнение корректно, так как предел прочности металла зависит от энергии связи молекул в кристаллической решетке, то есть от энергии когезии. Энергия когезии, в свою очередь, выражается через ПЭ [11].

#### 4. Анализ результатов и обсуждение

По выражениям (1)-(6) проведены численные расчеты ПЭ трех граней алюминия и свинца (ГЦК структура) при 0 К и при температуре плавления с учетом вкладов в ПЭ поправок на дисперсионное взаимодействие элементарных ячеек ВЗ в поверхностном слое, поляризацию поверхностных ионов в поле полубесконечного металла, осцилляцию электронной плотности в поверхностном слое, температурного коэффициента ПЭ граней (см. рис. 1). Также рассчитана РВЭ граней алюминия и свинца, температурный коэффициент РВЭ и среднестатистические значения ПЭ и РВЭ (см. рис. 1, 2).

Поверхностная энергия граней кристаллов алюминия и свинца линейно понижается с увеличением температуры, а РВЭ незначительно увеличивается, то есть ее температурный коэффициент положителен и для обоих металлов составляет  $\sim 10^{-5}$  эВ/К. Температурный коэффициент ПЭ граней отрицателен. Анизотропия ПЭ граней с ростом температуры незначительно сглаживается, а РВЭ – практически не изменяется.

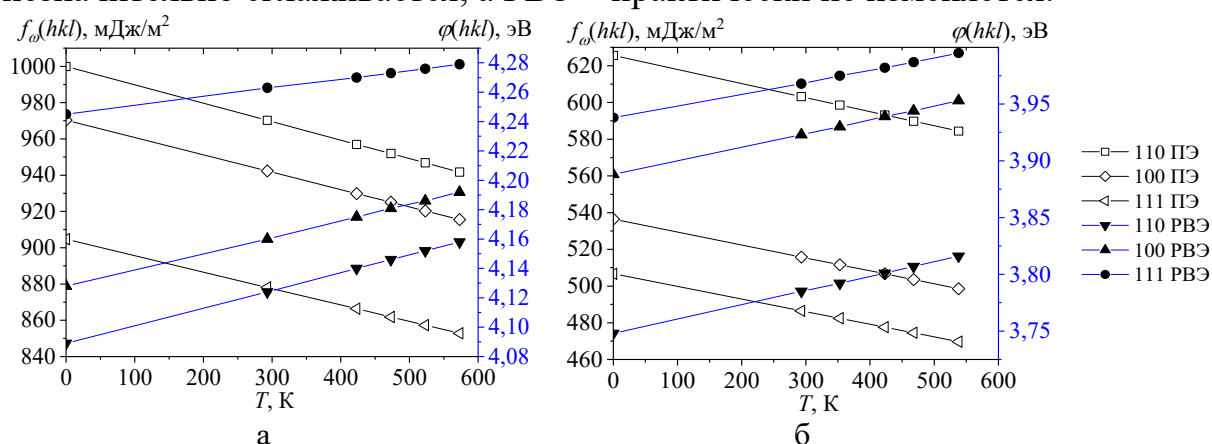


Рис. 1. Температурная зависимость ПЭ и РВЭ (а) алюминия и (б) свинца.

Усредненное значение ПЭ алюминия (873,4 мДж/м<sup>2</sup>) сравнивалось со справочными данными поверхностного натяжения (ПН) расплава (844 и 885 мН/м) [6, 12]. Видно, что данные по ПН имеют существенный разброс,

однако, расчетные значения ПЭ согласуются с ними достаточно хорошо (отклонение  $\sim 3\%$ ). Для свинца ( $524,8 \text{ мДж/м}^2$ ) также наблюдается хорошее согласие с данными ПЭ поликристаллов ( $556$  и  $560 \text{ мДж/м}^2$  [6, 13]) и с ПН расплава ( $560, 470$  и  $536 \text{ мН/м}$ ) [6, 12].

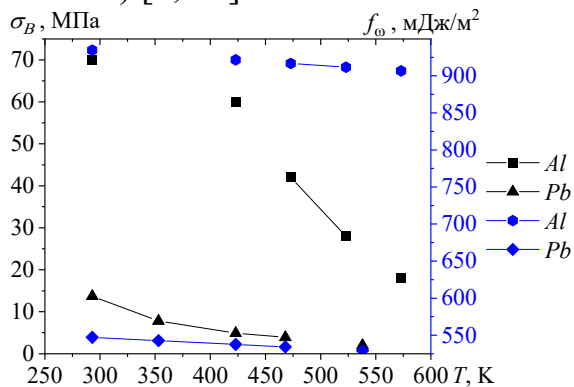


Рис. 2. Зависимость ПЭ и предела прочности поликристаллов алюминия и свинца от температуры.

Работа выхода электрона алюминия ( $4,239 \text{ эВ}$ ), рассчитанная по (11), отклоняется от известного значения для поликристалла ( $4,25 \text{ эВ}$ ) на  $-0,26\%$ , что показывает высокую точность расчетов. Для свинца погрешность вычислений РВЭ ( $3,907 \text{ эВ}$ ) по сравнению с экспериментальным значением ( $4,0 \text{ эВ}$ ) составляет  $-2,3\%$ . Данный анализ показывает применимость приведенных выше выражений для оценки величин ПЭ и РВЭ металлов.

Известно, что плотноупакованные грани кристалла являются плоскостями легкого скольжения при деформации, то есть их характеристики во многом определяют механические свойства и влияют на процессы разрушения. Образование и рост трещин вплоть до полного разрушения материала фактически является процессом образования новых поверхностей.

Таким образом ПЭ граней кристалла и зависящие от нее энергии когезии и адгезии можно связать с пределом прочности. Однако, на сегодняшний день формального выражения подобной связи нет. Поэтому проводится сравнение полученных значений усредненной по граням ПЭ со значениями предела прочности [6] при росте температуры (см. рис. 2).

Видно, что с ростом температуры предел прочности свинца уменьшается почти в семь раз при уменьшении ПЭ в 1,033 раза, а алюминия – всего в 4 раза при уменьшении ПЭ в 1,031 раза. То есть изменение величины усредненной ПЭ для обоих металлов практически одинаковое в интервале температур от  $293 \text{ К}$  до  $538 \text{ К}$  (для *Pb*) и  $573 \text{ К}$  (для *Al*). Тип кристаллической решетки обоих металлов ГЦК и, следовательно, количество плоскостей скольжения одинаково, а также с ростом температуры изменяются физико-химические свойства металла и увеличивается энергия, необходимая на процесс предварительной

пластической деформации. Предел прочности обоих металлов получен в процессе вязкого разрушения. Следовательно, при оценке соотношения между ПЭ и пределом прочности, очевидно, необходимо учитывать также и другие составляющие процесса разрушения (энергию образования дефектов, энергию пластической деформации, энергию зернограничного проскальзывания и т.д.).

## **5. Заключение**

Проведена оценка ПЭ граней алюминия и свинца. Поверхностная энергия граней кристаллов с ростом температуры линейно уменьшается, а РВЭ медленно увеличивается. Усредненная ПЭ обоих металлов находится в хорошем согласии с экспериментальными данными ПН расплавов. Аналитическая связь РВЭ и ПЭ монокристаллов металлов позволяет анализировать ориентационную и температурную зависимости обеих величин. Показано, что предложенная методика расчета ПЭ может использоваться как основа для дальнейшего развития аналитической связи между энергетическими характеристиками поверхности и механическими свойствами металлов только при учете других составляющих энергии разрушения.

### **Библиографический список:**

1. **Задумкин, С.Н.** Поверхностная энергия и работа выхода гладких граней металлического монокристалла / С.Н. Задумкин, И.Г. Шебзухова, Б.Б. Алчагиров // Физика металлов и металловедение. – 1970. – Т. 30. – № 6. – С. 1313-1318.
2. **Калажоков, Х.Х.** Об ориентационной зависимости работы выхода электрона и поверхностной энергии металлов / Х.Х. Калажоков, З.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Вестник КБГУ. Серия физические науки. – 1997. – Вып. 2. – С. 6-9.
3. **Liu, W.** First-principles study of the surface energy and work function of III-V semiconductor compounds / W. Liu, W.T. Zheng, Q. Jiang // Physical Review B. – 2007. – V. 75 – I. 23. – P. 235322-1-235322-8. DOI: 10.1103/PhysRevB.75.235322.
4. **Шебзухова, И.Г.** Анизотропия поверхностной энергии и работы выхода электрона ПВ металлов / И.Г. Шебзухова, Л.П. Арефьева // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – Вып. 2. – С. 306-309. DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47087.188-18.
5. **Шебзухова, И.Г.** Поверхностная энергия и работа выхода электрона полиморфных модификаций титана / И.Г. Шебзухова, Л.П. Арефьева // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 288-298. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.288.
6. Свойства элементов. Справочник / под общей ред. проф. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.
7. **Gharaibeh, M.A.** Material and constitutive parameters of various Pb-based and Pb-free solders and other interconnection materials: a collective review / M.A. Gharaibeh // Results in Engineering. – 2025. – V. 26. – Art. № 105618. – 18 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105618.
8. **Зерница, Д.А.** Кристаллизация бессвинцовых бинарных сплавов олово-цинк, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава / Д.А. Зерница // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 92-100. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.092.
9. **Жевненко, С.Н.** Взаимодействие многослойного композиционного материала Cu-Nb с насыщенными расплавами свинца / С.Н. Жевненко, П.В. Проценко, А.Н. Смирнов, В.А. Тимошенко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2015. – Т. 1. – С. 228-232.
10. **Шебзухова, И.Г.** Оценка поляризационной и дисперсионной поправок к поверхностной энергии граней металлических кристаллов / И.Г. Шебзухова, Л.П. Арефьева // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 319-325.

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.319.

11. Li, Y. Electron work function, adhesion, and friction between 3d transition metals under light loads / Y. Li, D.Y. Li // *Wear*. – 2005. – V. 259. – I. 7-12. – P. 1432-1436. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.027.

12. **Ниженко, В.И.** Поверхностное натяжение металлов и сплавов. Справочник / В.И. Ниженко, Л.И. Флока. – М.: Металлургия, 1981. – 208 с.

13. **Шебзухова, И.Г.** Поверхностное натяжение твердых металлов в газовых средах / И.Г. Шебзухова, Х.Б. Хоконов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2012. – Т. 76. – Вып. 13. – С. 86-88.

#### References:

1. Zadumkin S.N., Shebzukhova I.G., Alchagirov B.B. Poverkhnostnaya energiya i rabota vykhoda gladkikh granej metallicheskogo monokristalla [Surface energy and output work of smooth faces of a metallic single crystal], *Fizika metallov i metallovedenie [Physics of Metals and Metallography]*, 1970, vol. 30, no. 6, pp. 1313-1318 (In Russian).

2. Kalazhokov Kh.Kh., Kalazhokov Z.Kh., Khokonov Kh.B. Ob orientatsionnoj zavisimosti raboty vykhoda elektrona i poverkhnostnoj energii metallov [On the orientation dependence of the work of the electron output and the surface energy of metals], *Vestnik KBGU. Seriya fizicheskie nauki [Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University. Physical Sciences Series]*, 1997, vol. 2, pp. 6-9. (In Russian).

3. Liu W., Zheng W.T., Jiang Q. First-principles study of the surface energy and work function of III-V semiconductor compounds, *Physical Review B*, 2007, vol. 75, issue 23, pp. 235322-1-235322-8. DOI: 10.1103/PhysRevB.75.235322.

4. Shebzukhova I.G., Aref'eva L.P. Anisotropy of the surface energy and work function of IIB metals, *Technical Physics*, 2019, vol. 64, issue 2, pp. 274-277. DOI: 10.1134/S1063784219020208.

5. Shebzukhova I.G., Aref'eva L.P. Poverkhnostnaya energiya i rabota vykhoda elektrona polimorfnykh modifikatsij titana [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, issue 15, pp. 288-298. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.288.

6. *Svoystva elementov. Spravochnik* [Properties of elements. Handbook], ed. M.E. Drits, Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 672 p. (In Russian).

7. Gharaibeh M.A. Material and constitutive parameters of various Pb-based and Pb-free solders and other interconnection materials: a collective review, *Results in Engineering*, 2025, vol. 26, art. no. 105618, 18 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105618.

8. Zernitsa D.A. Kristallizatsiya bessvintsovykh binarnykh splavov olovo-tsink, poluchennykh metodom sverkhbystroy zakalki iz rasplava [Crystallization of lead-free binary tin-zinc alloys produced by the method of rapidly solidification from the melt], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 92-100. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.092. (In Russian).

9. Zhevnenko S.N., Protsenko P.V., Smirnov A.N., Timoshenko V.A. Vzaimodeistvie mnogosloinogo kompozitsionnogo materiala Cu-Nb s насыщченными расплавными свинца [Interaction of Cu-Nb multilayer composite material with saturated lead melts], *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya [Current problems of modern science, technology and education]*, 2015, vol. 1, pp. 228-232. (In Russian).

10. Shebzukhova I.G., Aref'eva L.P. Otsenka polyarizatsionnoj i dispersionnoj popravok k poverkhnostnoj energii granej metallicheskikh kristallov [Estimation of the polarization and dispersion corrections to the surface energy of the faces of metal crystals], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 319-325. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.319. (In Russian).

11. Li Y., Li D.Y. Electron work function, adhesion, and friction between 3d transition metals under light loads *Wear*, 2005, vol. 259, issue 7-12, pp. 1432-1436. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.027.

12. Nizhenko V.I., Floka L.I. *Poverkhnostnoye natyazheniye metallov i splavov. Spravochnik* [Surface tension of metals and alloys. Handbook], Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 208 p. (In Russian).

13. Shebzukhova I.G., Khokonov Kh. B. Poverkhnostnoye natyazheniye tverdykh metallov v gazovykh sredakh [Surface tension of solid metals in gas media], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya fizicheskaya [Bulletin of Russian Academy of Sciences: Physics]*, 2012, vol. 76, issue 13, pp. 86-88. (In Russian).