

ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ Cu НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ Al_2O_3

¹М.У. Хайдаров, ²Н.Н. Черенда, ¹Э.Э. Окилов

¹Физико-технический институт имени С.У. Умарова НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Проанализировано влияние шероховатости и волнистости поверхности на коэффициент трения: установлено, что сглаживание микрорельефа снижает деформационную составляющую силы трения. Определён оптимальный режим напыления - расстояние 5,5 см и 3 импульса: он обеспечивает минимальную шероховатость за счёт оплавления выступов и заполнения впадин медью. Установлено, что при всех режимах напыления волнистость поверхности снижается по сравнению с исходным образцом. Сформирована методика оценки параметров: коэффициент трения измеряли на трибометре ТАУ-1М, шероховатость - на профилометре MarSurf SD 26. Показано, что при оптимальном режиме коэффициент трения достигает ~0,025; подтверждена корреляция топографии поверхности с трибологическим поведением материала. Обоснована перспективность применения ЭКПП для модификации Al_2O_3 - такие композиты могут использоваться в подшипниках и скользящих электрических контактах.

Ключевые слова: эрозионные плазменные потоки, шероховатость, электрод, волнистость, высота неровностей профиля, керамика, оксид алюминия, трение, износ, скольжение, осаждение (напыление).

ТАЪСИРИ ТАҲШИНИ Cu БА НОҲАМВОРИИ САТҲ ВА КОЭФФИЦИЕНТИ СОИШИ Al_2O_3

М.У. Ҳайдаров, Н.Н. Черенда, Э.Э. Окилов

¹Институти физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, Душанбе,

Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Донишгоҳи давлатии Беларус, ш.Минск, Ҷумҳурии Беларус

Таъсири ноҳамворӣ ва мавҷнокӣи сатҳ ба коэффисиенти соиш таҳлил карда шуд. Муайян гардид, ки ҳамворшавии микрорелефи сатҳ боиси кам шудани қузьи деформатсионӣ қувваи соиш мегардад. Речаи оптималии рӯйпушкунӣ муайян карда шуд, ки масофаи 5,5 см ва 3 импульс дар бар мегирад. Ин реча ба туфайли ғудохта шудани барҷастагиҳои сатҳ ва пур гардидани фурурафтагӣҳо бо мис, ҳадди ақали ноҳамвории сатҳро таъмин менамояд. Методикаи баҳодиҳии параметрҳо таҳия гардид: коэффисиенти соиш бо истифода аз трибометри ТАУ-1М, ноҳамвории сатҳ бошад, тавассути профилометри MarSurf SD 26 чен карда шуд. Нишон дода шуд, ки дар речаи оптималӣ коэффисиенти соиш то тақрибан 0,025 паст мешавад ва вобастагии байни топографияи сатҳ ва хусусиятҳои трибологии мавод тасдиқ гардид. Дурнамои истифодаи усули ЭКПП барои модификасияи композитҳои Al_2O_3 аз ҷиҳати илмӣ асоснок карда шуд. Чунин композитҳо метавонанд дар истеҳсоли милдонҳо ва контактҳои лағжандаи барқӣ истифода шаванд.

Калидвожаҳо: ҷараёнҳои плазмавии эрозӣ, ноҳамворӣ, электрод, мавҷнокӣ, баландии нобаробарии профил, сафол, алюминий, соиш, фарсудашавӣ, лағжиш, рӯйпушкунӣ.

Effect of Cu deposition on the surface roughness and friction coefficient of Al_2O_3

M.U. Khaidarov, N.N. Cherenda, E.E. Okilov

¹S.U. Umarov Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

The influence of surface roughness and waviness on the coefficient of friction was analyzed. It was found that smoothing the surface microrelief reduces the deformation component of the friction force. The optimal coating deposition mode was determined to be a spraying distance of 5.5 cm and 3 pulses. This mode provides the minimum surface roughness due to the remelting of surface asperities and the filling of surface depressions with copper. It was also established that, under all coating deposition modes, the surface waviness decreases compared to the initial sample. A methodology for evaluating the parameters was developed. The coefficient of friction was measured using a TAU-1M tribometer, while the surface roughness was determined with a MarSurf SD 26 profilometer. The results showed that, under the optimal deposition mode, the coefficient of friction reached approximately 0.025. A clear correlation between the surface topography and the tribological behavior of the material was confirmed. The prospects of applying electrocontact pulse coating deposition (EPCD) for the modification of Al_2O_3 were substantiated. Such composites can be effectively used in bearings and sliding electrical contacts.

Keywords: erosive plasma flows, roughness, electrode, waviness, profile unevenness height, ceramics, alumina, friction, wear, sliding, Deposition.

Введение

Одним из актуальных направлений современного материаловедения является разработка новых материалов с высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения [1-10].

Представляет интерес и разработка новых способов модификации трибологических свойств широко распространенных материалов, в частности оксида алюминия. Оксид алюминия используется в различных областях благодаря его химической стойкости, высокой температуре плавления и твердости [2]. Этот материал может применяться для создания подшипников в различного вида генераторах [3]. В то же время для расширения использования оксида алюминия в трибологических приложениях необходимо решить задачи по уменьшению коэффициента трения и увеличению износостойкости.

Эти задачи могут быть решены несколькими путями. Один из них основан на трансформации химического состава поверхности материала, в частности формирование композитов оксида алюминия с металлами.

Например, композиты с медной матрицей обеспечивают сочетание высокой электропроводности и износостойкости, что позволяет их использовать в скользящих электрических контактах и других электротехнических приложениях [1]. Также широко распространенным способом уменьшения коэффициента трения и увеличения износостойкости поверхности является нанесение покрытий соответствующего целевого назначения [4-11].

К другим способам относится изменение качества поверхности, т.е. шероховатости и волнистости. Известно, что шероховатость поверхности оказывает существенное влияние на работу трущихся деталей:

- шероховатость поверхности влияет на площадь фактического контакта между сопряженными поверхностями и, кроме того, может меняться в процессе трения за счет износа выступов профиля;
- коррозия металла возникает и распространяется быстрее на грубо обработанных поверхностях;
- шероховатость влияет на точность измерения деталей и т.д. [7].

Экспериментальное оборудование и методы измерения

Объектом исследований являлись образцы поликристаллического оксида алюминия (Al_2O_3), полученные компактированием и последующим спеканием порошка. Покрытия меди на поверхности образцов оксида алюминия были сформированы с помощью эрозионных компрессионных плазменных потоков (ЭКПП), создаваемых миниатюрным плазменным ускорителем с медными электродами [8]. Схема разрядного устройства представлена на рисунке 1. Эксперимент проводился в вакуумной камере с давлением остаточного воздуха 1,3 Па. Питание разрядного устройства осуществлялось с помощью конденсаторной батареи емкостью 400 мкФ. Образцы размещались в камере на различном расстоянии от разрядной системы ($d = 5-6$ см). Длительность импульса составляла ~ 100 мкс. Количество импульсов варьировалось от 3 до 6 см.

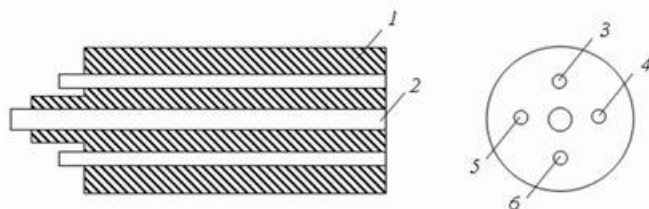


Рисунок 1 – Схема разрядного устройства миниатюрного эрозионного плазменного ускорителя: 1) изолирующий блок, 2) катод (внутренний электрод), 3)–6) стержни внешнего электрода (анод) [9]

Figure 1 – Schematic diagram of the discharge device of a miniature erosion plasma accelerator: 1) insulating block; 2) cathode (inner electrode); 3–6) rods of the outer electrode (anode) [9]

Ранее проведенные исследования показали, что при разряде конденсаторной батареи на систему электродов и формирование компрессионного плазменного потока происходит эрозия поверхности электродов в условиях пониженного давления в камере [8]. Эрозия металлических электродов приводит к появлению металлической составляющей в газовом плазменном потоке. При окончании действия импульса и распаде плазменного потока металлическая компонента начинает

конденсироваться у поверхности мишени в металлсодержащие кластеры в результате адиабатического охлаждения, которые осаждаются на поверхности образца [8].

В данной работе коэффициент трения измерялся на трибометре ТАУ-1М, схема которого представлена на рисунке 2. Испытания проводились в условиях сухого трения при возвратно-поступательном движении сферического индентора, изготовленного из твердого сплава ВК8 (состав: 92% WC, 8% Co; твердость 37 ГПа) в течение 0,5ч. Скорость движения индентора составляла 0,004 м/с, нагрузка на индентор – 20 г.

Сила трения F выражается через коэффициент трения μ следующей формулой:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{P} = \frac{F_{\text{тр.мол}} + F_{\text{тр.деф}}}{P} = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta + k \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (1)$$

где P – нагрузка на индентор, $F_{\text{тр.мол}}$, $F_{\text{тр.деф}}$ – молекулярная и деформационная составляющие силы трения, действующие на отдельную неровность, внедрившуюся на глубину h и движущуюся по деформируемому телу, τ_0 – напряжение среза молекулярной связи, P_r – фактическое давление на контакте, β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под воздействием нормальных сжимающих напряжений. $k = 0,19\alpha$ – при упругом контакте (α – коэффициент гистерезисных потерь материала).

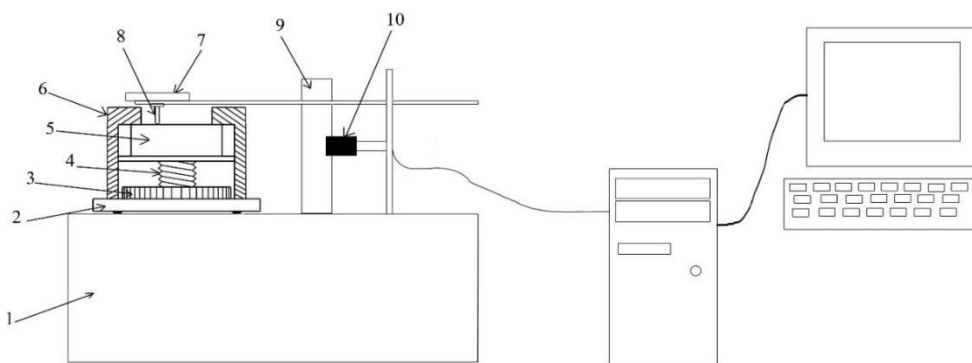


Рисунок 2 – Схема установка трибометрия ТАУ-1М: Центральным элементом является стойка (1), в которой размещен электромотор. Этот мотор приводит в движение каретку (2), к которой посредством винта (4) крепится колесо (3) для зажима образца (5). Образец удерживается в фиксированном положении с помощью держателей (6). На образец прикладывается нагрузка (7). Для измерения силы трения используется закругленная игла (8), соединенная с гибкой пластиной (9). Изменение положения пластины, вызванное силой трения, регистрируется электромагнитным датчиком смещения (10) [7]

Figure 2 – Schematic diagram of the TAU-1M tribometer. The central component is the support column (1), which houses the electric motor. The motor drives the carriage (2), to which the sample clamping wheel (3) is attached by means of a screw (4). The specimen (5) is securely fixed using holders (6). A normal load (7) is applied to the specimen. The friction force is measured using a rounded stylus (8) connected to a flexible plate (9). The displacement of the plate, caused by the friction force, is recorded by an electromagnetic displacement sensor (10) [7]

В настоящем исследовании для количественной оценки параметров шероховатости поверхности применялся профилометр MarSurf SD 26, принципиальная схема которого иллюстрирована на рисунке 3. Расчет показателей шероховатости, основанный на данных инструментального анализа профиля поверхности, осуществлялся с использованием приведенных ниже формул для трех ключевых параметров

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 y_i, \quad (2)$$

где R_a – высота y_i i -го пика;

$$R_{\max} = R_p + R_v, \quad (3)$$

где R_p – максимальная высота пика, R_v – максимальная глубина впадины на всей рабочей длине образца;

$$R_z = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 R_{pi} + \sum_{i=1}^5 R_{vi}), \quad (4)$$

где R_{pi} – i -ый наивысший пик, R_{vi} – i -ая самая глубокая впадина.

Управление профилометром и обработка данных осуществляется программным комплексом MarSurf XR1. [7]

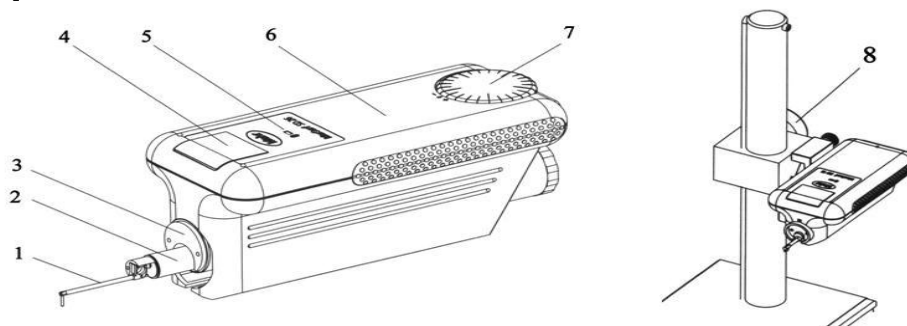
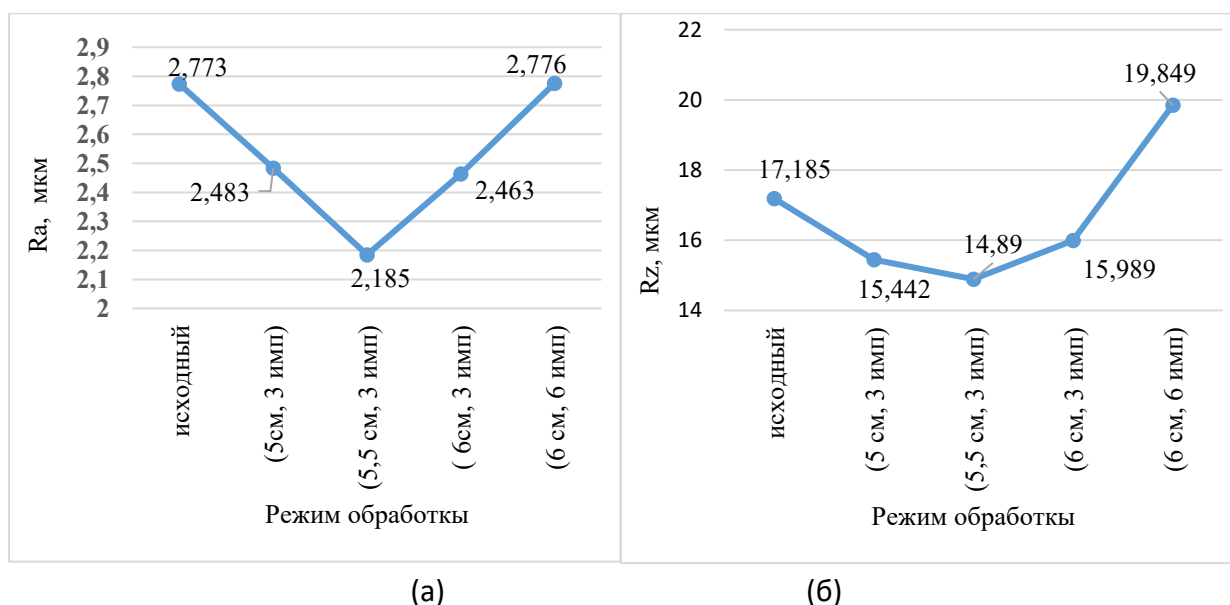


Рисунок 3 – Схема профилометра MarSurf SD 26: 1) консоль щупа; 2) датчик, интегрированный в механизм подачи и оснащенный магнитным фиксатором для консоли щупа; 3) механизм подачи; 4) кнопка запуска (Старт); 5) индикатор статуса Bluetooth-соединения; 6) корпус прибора; 7) маховик для регулировки угла наклона; и 8) рукоятка для настройки высоты [7]

Figure 3 – Schematic diagram of the MarSurf SD 26 profilometer: 1) stylus arm; 2) sensor integrated into the feed mechanism and equipped with a magnetic holder for the stylus arm; 3) feed mechanism; 4) Start button; 5) Bluetooth connection status indicator; 6) instrument housing; 7) handwheel for tilt angle adjustment; and 8) height adjustment handle [7]

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рисунке 4 представлены результаты измерения параметров шероховатости (R_a , R_z , R_{max}) и волнистости (W_a) поверхности образцов с медным покрытием, осажденным при различных режимах. Как видно из рисунка, зависимость параметров шероховатости от расстояния между образцом и системой электродов имеет нелинейный характер. Минимальное значение шероховатости было зарегистрировано при следующем режиме: расстояние -5,5 см, число импульсов -3. Можно предположить, что такое поведение связано с влиянием следующих факторов. Во-первых, уменьшение расстояния ведет к увеличению энергии, поглощенной поверхностным слоем образца, и соответственно росту количества оплавленных выступов поверхности и ее сглаживанию. Во-вторых, напыление слоя меди также может приводить к сглаживанию поверхности за счет заполнения впадин на поверхности. Последний эффект усиливается с уменьшением расстояния. При возрастании расстояния (свыше 5,5 см) влияние этих факторов уменьшается, и показатели шероховатости поверхности образцов с покрытием приближаются к показателям образцов до плазменного воздействия. Необходимо подчеркнуть, что волнистость поверхности всех образцов с напыленным покрытием оказалась меньше, чем у исходного образца вне зависимости от режима напыления.



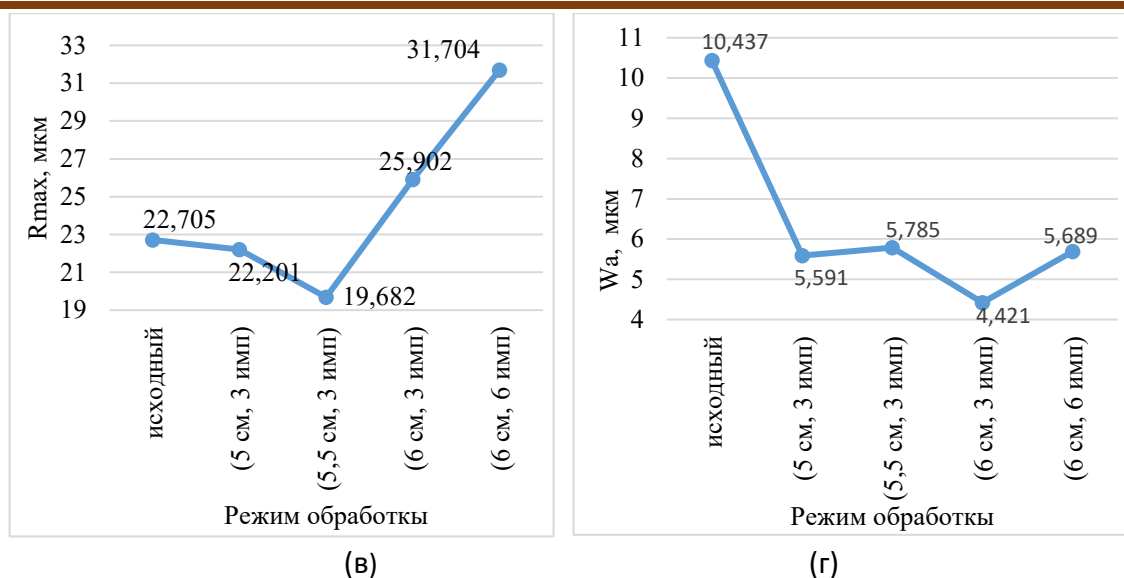


Рисунок 4 – Результаты измерения параметров шероховатости поверхности и волнистости образцов, покрытых медью, полученных в различных условиях осаждения. В частности, отображены значения шероховатости R_a (а), R_z (б), R_{max} (в) и волнистости W_a (г)

Figure 4 – Results of measurements of the surface roughness and waviness parameters of copper-coated samples obtained under different deposition conditions. In particular, the values of roughness parameters R_a (a), R_z (b), R_{max} (c) and waviness parameter W_a (d) are presented.

Рисунок 5 демонстрирует, как коэффициент трения изменяется в зависимости от пройденного индентором расстояния для исходного образца оксида и образцов с медным покрытием, нанесенным в разных условиях. Наилучшие результаты (самый низкий коэффициент трения) были достигнуты при осаждении на расстоянии 5.5 см от подложки с использованием 3 импульсов. Этот же режим обеспечил минимальную шероховатость поверхности. Предполагается, что наблюдаемое снижение коэффициента трения при нанесении медного покрытия является следствием уменьшения микрорельефа поверхности. Это, в свою очередь, приводит к снижению деформационного компонента силы трения.

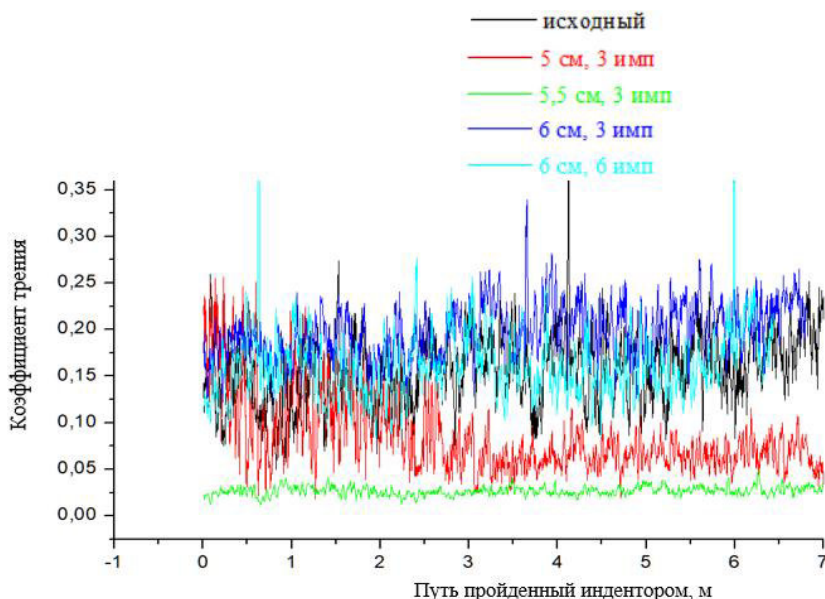


Рисунок 5 – Проведен сравнительный анализ зависимостей коэффициента трения от пройденного индентором пути для исходного образца и образцов с медным покрытием, полученным в различных условиях

Figure 5 – Comparative analysis of the dependences of the coefficient of friction on the sliding distance of the indenter was performed for the initial sample and copper-coated samples obtained under different deposition conditions.

Заключение

Данная работа демонстрирует, что осаждение медных покрытий является эффективным методом для модификации трибологических свойств оксида алюминия. Было показано, что шероховатость и волнистость поверхности изменяются в зависимости от режима осаждения, что, в свою очередь, сказывается на коэффициенте трения. Оптимальный режим для достижения минимальной шероховатости был определен как 5.5 см, 3 импульса. При этом для всех режимов воздействия наблюдалось уменьшение волнистости по сравнению с исходным образцом. Образец, осажденный в режиме 5.5 см, 3 импульса, показал наименьший коэффициент трения (около 0.025), что подтверждает корреляцию между шероховатостью поверхности и коэффициентом трения.

Благодарность

Выражаю искреннюю признательность и благодарность сотрудникам кафедры физики твердого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета за помощь в проведении исследований, а также В.М. Асташинскому, заведующему отделением физики плазмы и плазменных технологий, и сотрудникам лаборатории физики плазменных ускорителей Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси за оказанную помощь в обработке образцов эрозионными плазменными потоками.

Рецензент: Юнусов М.М. — к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ПГЛУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Behera, A. Tribological Study of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Cu}$ Composite by Using Pin-on-Disc Wear Machine / A. Behera, S. C. Chaine, A. Behera // *Elixir Chem. Phys.* – 2013. – Vol. 61. – P. 16672–16674.
2. Wear-Resistant Alumina Coatings [Электронный ресурс]. – URL: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wear_resistant_alumina_coatings (дата обращения: 25.03.2026).
3. Zhao, X. Wear Behaviour of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN}$ Composite Ceramic Sliding Against Pure Al, Fe and Stainless Steel / X. Zhao, J. Liu, B. Zhu, Z. Luo, H. Miao // *Ceramics International.* – 1997. – Vol. 23, No. 3. – P. 197–202.
4. Heimann, R. B. [Название статьи не указано] / R. B. Heimann, H. D. Lehmann // *Recent Patents on Materials Science.* – 2008. – Vol. 1. – P. 41.
5. Fauchais, P. [Название статьи не указано] / P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2001. – Vol. 10, No. 1. – P. 44.
6. Vuoristo, P. [Название статьи не указано] / P. Vuoristo, P. Nylén // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2007. – Vol. 16, No. 4. – P. 466.
7. Черенда, Н. Н. Методы механических испытаний материалов: пособие / Н. Н. Черенда, Н. И. Поляк, В. И. Шиманский. – Минск: БГУ, 2017. – 135 с.
8. Astashynski, V. M. Generation of Erosion Compression Plasma Flows in a Miniature Plasma Accelerator and Their Capability for Formation of Thin Nanostructured Coating / V. M. Astashynski, H. M. Dzahnidze, E. A. Kostyukevich, A. M. Kuzmitski, P. N. Shoronov, V. I. Shymanski, V. V. Uglov // *High Temperature Material Processes.* – 2020. – Vol. 24, No. 2. – P. 99–107.
9. Углов, В. В. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов, Н. Н. Черенда, В. М. Анищик, В. М. Асташинский, Н. Т. Квасов. – Минск: БГУ, 2011. – 252 с.
10. Юнусов, М. Ю. Комплексная алюминиевая смазка для трибоузлов современных машин и механизмов / М. Ю. Юнусов, М. С. Холикзода, Ш. Шарифов, О. С. Ниезов // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования.* – 2025. – № 4(72). – С. 97–101. – DOI: 10.65599/UJEU4043. – EDN: GOFZKV.
11. Бодурбеков, Ф. С. Изменение качества моторного масла — индикатор текущего состояния автомобильных двигателей / Ф. С. Бодурбеков, М. Ю. Юнусов, Б. Ж. Мажитов, Н. Б. Сахибов // *Peasant.* – 2018. – № 1. – С. 38–40. – EDN: STQAJE.

Reference

1. Behera, A. Tribological Study of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Cu}$ Composite by Using Pin-on-Disc Wear Machine / A. Behera, S. C. Chaine, A. Behera // *Elixir Chem. Phys.* – 2013. – Vol. 61. – P. 16672–16674.
2. Wear-Resistant Alumina Coatings [Electronic resource]. – URL: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wear_resistant_alumina_coatings (access date: 03/25/2026).
3. Zhao, X. Wear Behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN}$ Composite Ceramic Sliding Against Pure Al, Fe and Stainless Steel / X. Zhao, J. Liu, B. Zhu, Z. Luo, H. Miao // *Ceramics International.* – 1997. – Vol. 23, No. 3. – P. 197–202.

4. Heimann, R. B. [The title of the article is not specified] / R. B. Heimann, H. D. Lehmann // Recent Patents on Materials Science. – 2008. – Vol. 1. – P. 41.
5. Fauchais, P. [The title of the article is not specified] / P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs // Journal of Thermal Spray Technology. – 2001. – Vol. 10, No. 1. – P. 44.
6. Vuoristo, P. [Article title not specified] / P. Vuoristo, P. Nylén // Journal of Thermal Spray Technology. – 2007. – Vol. 16, No. 4. – P. 466.
7. Cherenda, N. N. Methods of mechanical testing of materials: manual / N. N. Cherenda, N. I. Polyak, V. I. Shimansky. – Minsk: BSU, 2017. – 135 p.
8. Astashynski, V. M. Generation of Erosion Compression Plasma Flows in a Miniature Plasma Accelerator and Their Capability for Formation of Thin Nanostructured Coating / V. M. Astashynski, H. M. Dzahnidze, E. A. Kostyukevich, A. M. Kuzmitski, P. N. Shoronov, V. I. Shymanski, V. V. Uglov // High Temperature Material Processes. - 2020. - Vol. 24, No. 2. - P. 99–107.
9. Uglov, V. V. Modification of Materials by Compression Plasma Flows / V. V. Uglov, N. N. Cherenda, V. M. Anishchik, V. M. Astashynski, N. T. Kvasov. - Minsk: BSU, 2011. - 252 p.
10. Yunusov, M. Yu. Complex aluminum grease for friction units of modern machines and mechanisms / M. Yu. Yunusov, M. S. Kholikzoda, Sh. Sharifov, O. S. Niyozov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. - 2025. - No. 4 (72). - P. 97-101. - DOI: 10.65599/UJEU4043.
11. Bodurbekov, F. S. Change in the quality of motor oil - an indicator of the current state of automobile engines / F. S. Bodurbekov, M. Yu. Yunusov, B. Zh. Mazhitov, N. B. Sakhibov // Peasant. - 2018. - No. 1. - P. 38-40.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Ҳайдаров Муҳсинҷон Умаралиевич	Хайдаров Мухсинджон Умаралиевич	Khaidarov Muhsinjon Umaralievich
ҳодими илмӣ	научный сотрудник	research scientist
Институти физикаю техника ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Физико-технический институт им.С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана	S.U. Umarov Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: muhsinhajdarov@gmail.com		
TJ	RU	EN
Черенда Николай Николаевич	Черенда Николай Николаевич	Cherenda Nikolay Nikolaevich
н.и.ф.м., дотсент	к.ф.-м.н., доцент	Ph.D., Associate Professor
Донишгоҳи давлатии Белоруссия	Белорусский государственный университет	Belarusian State University
TJ	RU	EN
Окилов Эминҷон Эркинович	Окилов Эминджон Эркинович	Okilov Eminjon Erkinovich
муҳандиси	инженер	is an engineer
Институти физикаю техника ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Физико-технический институт им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана	S.U. Umarov Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Tajikistan