

Труды МАИ. 2025. № 143
Trudy MAI. 2025. No. 143. (In Russ.)

Научная статья

УДК 621.7.09

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185652>

EDN: <https://www.elibrary.ru/CWMDUA>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ АЛМАЗОПОДОБНОГО PVD ПОКРЫТИЯ КРАЦЕВАНИЕМ

Альберт Викторович Королев¹, Андрей Альбертович Королев²,

Кирилл Андреевич Авдонин³✉

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов, Россия

²Саратовская государственная юридическая академия, Саратов, Россия

³АО ЭОКБ "Сигнал" им. А.И. Глухарева,
Энгельс, Саратовская область, Россия

¹science7@bk.ru

³kirill.avdonin@mail.ru✉

Аннотация. В статье представлено математическое моделирование процесса полирования алмазоподобного PVD покрытия деталей вращения методом крацевания. Актуальность исследования обусловлена широким применением алмазоподобных покрытий в автомобильной, аэрокосмической, электронной промышленности и медицине, где требуется снижение трения, износа и коррозии деталей, работающих в экстремальных условиях. Основной проблемой является достижение низкой шероховатости поверхности, так как традиционные методы полирования работают с низкой производительностью и недостаточной

эффективностью. Разработанная модель описывает механизм массового скалывания микронеровностей хрупкого покрытия под воздействием ударов металлических нитей полировального инструмента. В работе приведена формула для расчёта величины скола вершины микронеровности, учитывающая массу, геометрические и механические характеристики металлической нити, а также параметры микрорельефа и скорость удара. Микроскопический профиль покрытия аппроксимируется синусоидой, что позволяет определить радиус округления вершин микронеровностей и связать его с параметрами шероховатости поверхности. Анализируется схема полирования с вращением детали и инструмента, что позволяет рассчитать число ударов по каждой вершине микронеровности и их влияние на снижение шероховатости в процессе обработки. Модель учитывает изменение интенсивности ударов по мере уменьшения высоты микронеровностей, что отражает динамику процесса полирования. Выполненное компьютерное моделирование подтвердило сложность механизма хрупкого разрушения микронеровностей, обусловленную взаимодействием теорий удара, хрупкого разрушения и контакта твёрдых тел. Полученные результаты позволяют глубже понять процесс крацевания и эффективно управлять технологией полирования алмазоподобных покрытий для достижения заданных параметров микрорельефа и повышения производительности.

Ключевые слова: алмазное покрытие, полирование, шероховатость поверхности, поликристаллический алмаз, PVD-покрытие

Для цитирования: Королев А.В., Королев А.А., Авдонин К.А. Математическая модель процесса полирования алмазоподобного PVD покрытия крацеванием // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185652>

Original article

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF POLISHING DIAMOND-LIKE PVD COATING BY SCRUB

Albert V. Korolev¹, Andrey A. Korolev², Kirill A. Avdonin³✉

¹Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin,
Saratov, Russia

² Saratov State Law Academy, Saratov, Russia

³JSC EOKB "Signal" named after A.I. Glukharev,
Engels, Saratow region, Russia

¹science7@bk.ru

³kirill.avdonin@mail.ru✉

Abstract. The article presents mathematical modeling of the process of polishing diamond-like PVD coating of rotating parts by the brushing method. The relevance of the study is due to the widespread use of diamond-like coatings in the automotive, aerospace, electronics and medicine industries, where it is necessary to reduce friction, wear and corrosion of parts operating in extreme conditions. The main problem is to achieve low surface roughness, which traditional polishing methods perform with low productivity and insufficient efficiency. The developed model describes the mechanism of mass chipping of microroughness's of a brittle coating under the impact of metal threads of a polishing tool. The paper provides a formula for calculating the chipping value of the microroughness top, taking into account the mass, geometric and mechanical characteristics of the metal thread, as well as the microrelief parameters and the impact speed. The microscopic profile of the coating is approximated by a sinusoid, which allows us to determine the radius of rounding of the microroughness tops and relate it to the surface roughness parameters. The polishing

scheme with rotation of the part and the tool is analyzed, which allows calculating the number of impacts on each vertex of the microroughness and their effect on the reduction of roughness during processing. The model takes into account the change in the intensity of impacts as the height of the microroughness decreases, which reflects the dynamics of the polishing process. The performed computer modeling confirmed the complexity of the mechanism of brittle fracture of microroughness's, caused by the interaction of theories of impact, brittle fracture and contact of solids. The obtained results allow a deeper understanding of the brushing process and effective control of the technology of polishing diamond-like coatings to achieve the specified parameters of the microrelief and increase productivity.

Key words: diamond coating, polishing, surface roughness, polycrystalline diamond, PVD coating

For citation: Korolev A.V., Korolev A.A., Avdonin K.A. Mathematical model of the process of polishing diamond-like PVD coating by scrub. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185652>

Введение

Алмазоподобное PVD-покрытие [1-5] находит большое применение в автомобильной, аэрокосмической, электронной промышленности, в медицине, в энергетическом машиностроении для снижения трения, износа и коррозии деталей машин, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Основной проблемой при производстве алмазоподобных покрытий является сложность полирования получившихся поверхностей до низких значений шероховатости. Используемые в

настоящее время методы полирования [6-13] обладают низкой производительностью и не обеспечивают требуемые параметры микрорельефа. Исследования показали [14,15], что наиболее перспективным методом полирования алмазоподобных покрытия является крацевание. Крацевание – это процесс обработки поверхностей с использованием щеток. Данный метод является перспективным так как по сравнению с используемыми в настоящее время методами он обеспечивает низкие значения шероховатости обработанной поверхности и высокую производительность. Однако слабая изученность механизма этого процесса ограничивает его практическое применение. Математическое моделирование данного процесса направлено на выявление новых закономерностей оно, что позволит более целенаправленно использовать его на практике.

Моделирование процесса крацевания

В процессе крацевания, если рассматривать нить щетки как стержень, а микроскопическую вершину неровности алмазоподобного покрытия как деформируемое твёрдое тело, важно учитывать динамические особенности механических систем, которые могут влиять на качество и эффективность процесса полирования [16-20]. В работе [21] получена модель единичного скола вершины микроскопической неровности алмазоподобного покрытия под действием удара о неё металлической нити:

$$\delta_v = \left(\frac{m \cdot (L_n^2 + 12r^2) \cdot u_{xn}^2 \cdot K_v}{(r + 0,5L_n)^2 \cdot r_v \cdot A_0} \right)^{\frac{5}{12}}, \quad (1)$$

где r – радиус вращения центра массы нити, м;

L_n – длина нити от места ее крепления в точке A до точки удара B , м;

m – масса нити, кг;

u_{xn} – начальная скорость удара нити по вершине микронеровности, м/с;

A_0 – удельная работа внешних сил, необходимая для разрушения единицы объема материала, Н/м²;

K_v – коэффициент, зависящий от соотношения контактной деформации нити с микронеровностью при ударе и деформации упругого изгиба нити, м^{2/5}:

$$K_v = \frac{0,042E_n \cdot J_n \cdot \eta^{\frac{4}{5}}}{r_v^{\frac{3}{5}} \cdot L_n^3 \cdot \left(\frac{k_m^3}{16K_P} (6k_m - 1) - 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{\delta_v}{3r_v} \right) \cdot A_0^{\frac{1}{5}}} x \cdot \left(1 - \frac{0,788E_n \cdot J_n \cdot \eta^{\frac{4}{5}}}{r_v^{\frac{3}{5}} \cdot L_n^3 \cdot \left(\frac{k_m^3}{16K_P} (6k_m - 1) - 1 \right) \cdot A_0^{\frac{1}{5}}} \right),$$

где r_v – радиус деформированной части вершинки микронеровности, м;

J_n – момент инерции поперечного сечения нити, м⁴;

E_n – модуль упругости материала нити, Па;

k_m – коэффициент, учитывающий, что центр массы может находиться на обязательно строго середине между точкой удара и точкой закрепления нити в корпусе инструмента:

$$K_P = \frac{k_m}{(6 - k_m)} \left(1 + \frac{8r^2}{k_m^3 (r + 0,5L_n)^2} \right) + \frac{k_m}{(6 - k_m)} \sqrt{\left(1 + \frac{8r^2}{k_m^3 (r + 0,5L_n)^2} \right)^2 + \frac{r^2 (6k_m - 1) (6 - k_m)}{(r + 0,5L_n)^2 k_m}}.$$

Микроскопический профиль поликристаллического алмазного покрытия

представим в виде синусоиды:

$$a_x(x) = 0,5R_{cp} \cdot \sin(2\pi \cdot \sqrt{\rho_v} \cdot x), \quad (2)$$

где ρ_v – плотность расположения вершин микронеровностей на поверхности покрытия детали, шт./мм²;

R_{cp} – средняя высота микронеровностей, мм.

Среднее арифметическое отклонение микроскопического профиля:

$$R_a = 2R_{cp} \cdot \sqrt{\rho_v} \cdot \int_0^{\frac{0,25}{\sqrt{\rho_v}}} \sin(2\pi \cdot \sqrt{\rho_v} \cdot x) dx = \frac{1}{\pi} \cdot R_{cp}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) можно определить радиус округления вершин микронеровностей:

$$r_v(x) = \frac{(1 + d(x)^2)^{\frac{3}{2}}}{a''(x)} = \frac{(1 + \pi^2 \cdot R_{cp}^2 \cdot \rho_v \cdot \cos(2\pi \cdot \sqrt{\rho_v} \cdot x)^2)^{\frac{3}{2}}}{-2\pi^2 \cdot R_{cp} \cdot \rho_v \cdot \sin(2\pi \cdot \sqrt{\rho_v} \cdot x)} \quad (4)$$

Модуль радиуса округления вершины получаем из (4) при $x = 0,25\sqrt{\rho_v}$:

$$r_v = \frac{1}{2\pi^2 \cdot R_{cp} \cdot \rho_v}. \quad (5)$$

Интенсивность скалывания вершин микронеровностей в процессе обработки во многом зависит от числа ударов. Число ударов о вершинку микронеровности определяется схемой обработки и плотностью расположения металлических нитей на поверхности инструмента. Рассмотрим наиболее часто применяемую для обработки схему (рис.1).

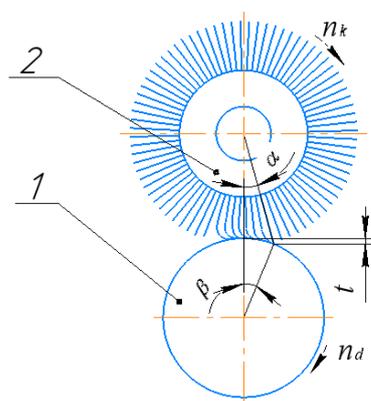


Рис. 1. Схема полирования

Обрабатываемую деталь 1, имеющую на цилиндрической поверхности поликристаллическое алмазное покрытие, вращают вокруг оси с частотой n_d . К поверхности поликристаллического алмазного покрытия детали 1 подводят полировальный инструмент 2 на глубину врезания t и придают ему вращение с частотой n_k . В качестве полировального инструмента 2 используют дисковую металлическую щетку, изготовленную из химически активного по отношению к алмазу материала, например, сплавов на основе железа, титана, хрома, кобальта, никеля и других.

Под действием ударов щетинок металлической щетки 2 наиболее выступающие хрупкие вершинки микронеровностей поликристаллического алмазного покрытия детали 1 скалываются, в результате чего шероховатость поверхности значительно снижается.

При глубине контакта инструмента и детали равной t , длина контакта будет равна:

$$B = 2 \sqrt{t \frac{d \cdot D}{d + D}}, \quad (6)$$

где d и D – соответственно диаметр детали и инструмента, мм;

t – глубина врезания инструмента в обрабатываемую поверхность, мм.

Но важно учесть то обстоятельство, что ударную нагрузку вершины микронеровностей могут получить только на выходе из зоны контакта с инструментом, так как внутри площадки контакта концы тонких нитей изгибаются и просто скользят по вершинам микронеровностей. Время контакта каждой вершины микронеровности с металлическими нитями инструмента за один оборот детали равно:

$$\tau_1 = \frac{1}{\pi d \cdot n_d \cdot \sqrt{\rho_v}}, \quad (7)$$

где n_d – частота вращения заготовки, 1/с.

С учетом (7) за один оборот детали каждая вершинка получит число ударов равное:

$$c_1 = \pi D \cdot n_k \cdot \sqrt{\rho_D} \cdot \tau_1 = \frac{2D \cdot n_k \sqrt{\rho_D}}{d \cdot n_d \sqrt{\rho_v}}, \quad (8)$$

где n_k – частота вращения инструмента, 1/с;

ρ_D – плотность расположения металлических нитей на поверхности инструмента, шт./мм².

Тогда, используя (8), определим число ударов металлических нитей по вершинкам микронеровностей за время t :

$$c_t = \frac{2D \cdot n_k \sqrt{\rho_D}}{d \sqrt{\rho_v}} t, \quad (9)$$

где t – время обработки, с.

Далеко не все удары будут осуществляться по центру металлической нити. Подавляющая часть ударов будет приходиться на боковые поверхности металлической нити. Поэтому средняя скорость удара будет равна:

$$u_n = 2D \cdot n_k \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \gamma d\gamma = 2D \cdot n_k. \quad (10)$$

Кроме того, угол удара, а следовательно, скорость удара зависит от высоты микронеровностей. Чем меньше высота микронеровностей, тем меньше угол удара, тем ниже интенсивность удара. Но так как высота микронеровностей в результате скалывания вершинок постоянно уменьшается, то снижается и интенсивность их скалывания. Поэтому величина скалывания микронеровности при каждом ударе зависит от значения шероховатости поверхности, полученной на предыдущем ударе:

$$R_z(\tau) = R_{z0} - \sum_{i=1}^{c_t} \delta_{vi}(R_{z(i-1)}), \quad (11)$$

где δ_{vi} – величина скалывания вершинок микронеровностей при единичном ударе, определяемая (1) с учетом равенств (5) и (10), мм;

c_t – число ударов металлических нитей по каждой вершинки микронеровностей (09) за время обработки t .

Зависимость (11) является рекуррентной. В явном виде выразить эту зависимость невозможно. Поэтому для анализа механизма хрупкого разрушения микронеровностей поликристаллического алмазного покрытия была разработана соответствующая компьютерная программа и выполнено компьютерное моделирование.

Заключение

Выполненное моделирование показало, что процесс скалывания вершин микронеровностей в процессе обработки поликристаллического алмазного покрытия металлической щеткой, чрезвычайно сложен. Его механизм связан с закономерностями теории удара, теории хрупкого разрушения твердых тел, теории контакта твердых тел, с теорией вероятности. Величина сколовшейся вершины микронеровности при каждом ударе (1) сложно зависит от массы и геометрических параметров металлической нити, от её механических свойств, от геометрических параметров микроскопических вершин, от скорости удара. В свою очередь скорость удара и число ударов по каждой вершине зависит от плотности расположения микроскопических вершин на поверхности покрытия, плотности распределения металлических нитей на поверхности инструмента, от высоты микронеровностей. Так как данное исследование позволило выявить все эти зависимости, то это позволяет глубже понять сложный механизм полирования алмазоподобного покрытия крацеванием и более эффективно им управлять.

Список источников

1. Дорожкин С.И. Напыление пленок в вакууме. Фонд инфраструктурных и образовательных программ: монография. – М.: [б. и.], 2012. – 48 с.
2. Политыко К.Н., Мантуров Д.С. Формирование PVD покрытий для трибологического назначения // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (64). С. 81-93.

3. Королев А.В., Охлупин Д.Н., Синев И.В. Способ нанесения алмазоподобного PVD-покрытия на многогранные подложки // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 23. С. 147-153. DOI: [10.26160/2658-3305-2023-23-147-153](https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-23-147-153)
4. Барышников В.В., Заярский Д.А., Крылова С.Е. Исследование износостойкого покрытия на основе диоксида циркония, полученного PVD методом // Всероссийская научно-методическая конференция «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры» (Оренбург, 26–27 января 2022): сборник материалов. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. С. 1488-1493.
5. Богачев В.А., Маркачев Н.А., Петров Ю.А. и др. Износостойкие и антифрикционные материалы и покрытия, применяемые в узлах трения элементов конструкций космических аппаратов производства АО «НПО Лавочкина» // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176841>
6. Chen Y., Liu W., Feng H., Zhang L. Failure mechanisms of CVD diamond wafers and thin films during polishing // Machining Science and Technology. 2015. Vol. 19, No. 1. P. 152-173. DOI: [10.1080/10910344.2014.991030](https://doi.org/10.1080/10910344.2014.991030)
7. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Vetrov A.G. Formation of flat surfaces of optoelectronic components in diamond polishing // Journal of Superhard Materials. 2017. Vol. 39, No. 2. P. 129-133.
8. Епифанов В.И., Лесина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. – М.: Высшая школа, 1987. - 350 с.

9. Кирсанов С.В., Гончаренко И.М., Бабаев А.С. Влияние «сухого» полирования твердосплавных образцов на характеристики износостойкого покрытия // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 4 (193). С. 12-15.
10. Дерябкин А.В. Диффузионная термохимическая обработка поверхности алмаза // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 4. 35-37.
11. Дерябкин А.В., Федоров Ю.Ю., Темиряева М.П. Исследование зависимости шероховатости поверхности алмаза при термохимической обработке на никелевых и железных поверхностях разного класса чистоты // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. № 1. С. 550-551.
12. Kubota A., Nagae S., Motoyama S., Touge M. Two-Step Polishing Technique for Single Crystal Diamond (100) Substrate Utilizing a Chemical Reaction with Iron Plate // Diamond and Related Materials. 2015. No. 60. P. 75-80. DOI: [10.1016/j.diamond.2015.10.026](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.10.026)
13. Roy S., Balla V.K., Mallik A.K., Dandapat N., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Ashkinazi E.E. A Comprehensive Study of Mechanical and Chemo-Mechanical Polishing of CVD Diamond // Materials Today Proceedings. 2018. No. 5 (3). P. 9846-9854. DOI: [10.1016/j.matpr.2017.10.176](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.176)
14. Королев А.В., Охлупин Д.Н., Синев И.В., Авдонин К.А. Полирование деталей с алмазным покрытием различными режимами обработки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 569-574. DOI: [10.24412/2071-6168-2022-9-569-575](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-569-575)
15. Королев А.В., Охлупин Д.Н., Синев И.В., Авдонин К.А. Влияние режимов полирования на шероховатость деталей с алмазным покрытием // Известия

- Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 1 (272). С. 22-25. DOI: [10.35211/1990-5297-2023-1-272-22-25](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-1-272-22-25)
16. Добрышкин А.Ю. Колебания стержня, несущего малую присоединенную массу // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112820>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-2)
17. Гришакин В.Т. Деформирование нити упругого маятника при резонансе // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174598>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-03](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-03)
18. Прокудин О.А., Рабинский Л.Н., Чан К.Т. Определение динамических характеристик металлополимерного слоистого стержня // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161419>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-06)
19. Быкова Т.В., Могилевич Л.И., Попов В.С. и др. Радиальные и изгибные колебания круглой трехслойной пластины, взаимодействующей с пульсирующим слоем вязкой жидкости // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112836>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-6](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-6)
20. Коровайцева Е.А. Систематизация одномерных краевых задач механики деформируемого твердого тела // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112827>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-3](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-3)
21. Королев А.В., Охлупин Д.Н., Синев И.В., Авдонин К.А. Исследование модели удара металлической нити о вершину микронеровности алмазного покрытия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 225-230. DOI: [10.24412/2071-6168-2023-12-225-226](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-225-226)

References

1. Dorozhkin S.I. *Napylenie plenok v vakuume. Fond infrastrukturykh i obrazovatel'nykh programm* (Physical vapor deposition, Foundation for Infrastructure and Educational Programs). Moscow: [b. i.], 2012. 48 p.
2. Polityko K.N., Manturov D.S. Formation of PVD coatings for tribological purposes. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2023. No. 3 (64). P. 81-93. (In Russ.)
3. Korolev A.V., Okhlupin D.N., Sinev I.V. Method of applying diamond-like PVD coating on multifaceted substrates. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2023. No. 23. P. 147-153. (In Russ.). DOI: [10.26160/2658-3305-2023-23-147-153](https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-23-147-153)
4. Baryshnikov V.V., Zayarskii D.A., Krylova S.E. Study of wear-resistant coating based on zirconium dioxide obtained. *Vserossiiskaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya «Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury»*: sbornik materialov. Orenburg: Orenburgskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2022. P. 1488-1493.
5. Bogachev V.A., Markachev N.A., Petrov Yu.A. et al. Wear-resistant and antifriction materials and coatings used in friction units of spacecraft structural elements manufactured by Lavochkin association. *Trudy MAI*. 2023. No. 132. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176841>
6. Chen Y., Liu W., Feng H., Zhang L. Failure mechanisms of CVD diamond wafers and thin films during polishing. *Machining Science and Technology*. 2015. Vol. 19, No. 1. P. 152-173. DOI: [10.1080/10910344.2014.991030](https://doi.org/10.1080/10910344.2014.991030)

7. Filatov Y.D., Sidorko V.I., Kovalev S.V., Vetrov A.G. Formation of flat surfaces of optoelectronic components in diamond polishing. *Journal of Superhard Materials*. 2017. Vol. 39, No. 2. P. 129-133. DOI: [10.3103/S1063457617020083](https://doi.org/10.3103/S1063457617020083)
8. Epifanov V.I., Lesina A.Ya., Zykov L.V. *Tekhnologiya obrabotki almazov v brillianty* (Technology of diamond processing into brilliants). Moscow: Vysshaya shkola, Publ. 1987. 333 p.
9. Kirsanov S.V., Goncharenko I.M., Babaev A.S. Effect of "dry" polishing of carbide samples on the characteristics of wear-resistant coating. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*. 2013. No. 4 (193). P. 12-15. (In Russ.)
10. Deryabkin A.V. Diffusion thermochemical treatment of diamond surface. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2018. No. 4. P. 35-37. (In Russ.)
11. Deryabkin A.V., Fedorov Yu.Yu., Temiryazeva M.P. Study of the dependence of diamond surface roughness during thermochemical treatment on nickel and iron surfaces of different purity classes. *Elektronika i mikroelektronika SVCH*. 2018. No. 1. P. 550-551. (In Russ.).
12. Kubota A., Nagae S., Motoyama S., Touge M. Two-Step Polishing Technique for Single Crystal Diamond (100) Substrate Utilizing a Chemical Reaction with Iron Plate. *Diamond and Related Materials*. 2015. No. 60. P. 75-80. DOI: [10.1016/j.diamond.2015.10.026](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.10.026)
13. Roy S., Balla V.K., Mallik A.K., Dandapat N., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Ashkinazi E.E. A Comprehensive Study of Mechanical and Chemo-Mechanical Polishing of CVD Diamond. *Materials Today Proceedings*. 2018. No. 5 (3). P. 9846-9854. DOI: [10.1016/j.matpr.2017.10.176](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.176)

14. Korolev A.V., Okhlupin D.N., Sinev I.V., Avdonin K.A. Polishing of parts with a diamond coating using various processing modes. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2022. No 9. P. 569-574. (In Russ.). DOI: [10.24412/2071-6168-2022-9-569-575](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-9-569-575)
15. Korolev A.V., Okhlupin D.N., Sinev I.V., Avdonin K.A. Influence of polishing modes on the roughness of diamond-coated parts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023. No. 1 (272). P. 22-25. (In Russ.). DOI: [10.35211/1990-5297-2023-1-272-22-25](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-1-272-22-25)
16. Dobryshkin A.Yu. Oscillations of a rod carrying a small attached mass. *Trudy MAI*. 2020. No. 110. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112820>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-2](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-2)
17. Grishakin V.T. Deformation of the elastic pendulum thread at resonance. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174598>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-03](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-03)
18. Prokudin O.A., Rabinskii L.N., Chan K.T. Depressurization loads analysis method for flange connection of pipes with metal Z-shape seal. *Trudy MAI*. 2021. No. 120. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161419>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-06)
19. Bykova T.V., Mogilevich L.I., Popov V.S. et al. Radial and Flexural Vibrations of the Round Three-Layered Plate Interacting with Pulsating Layer of a Viscous Liquid. *Trudy MAI*. 2020. No. 110. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112836>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-6](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-6)

20. Korovaitseva E.A. Systematizing one-dimensional boundary problems of deformed solid mechanics. *Trudy MAI*. 2020. No. 110. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112827>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-3](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-3)

21. Korolev A.V., Okhlupin D.N., Sinev I.V., Avdonin K.A. Study of the model of impact of a metal thread on the peak of microroughness of a diamond coating. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2023. No. 12. P. 225-230. (In Russ.).

DOI: [10.24412/2071-6168-2023-12-225-226](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-225-226)

Статья поступила в редакцию 06.07.2025

Одобрена после рецензирования 16.07.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 06.07.2025; approved after reviewing on 16.07.2025; accepted for publication on 25.08.2025