

Труды МАИ. 2025. № 142
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.)

Научная статья

УДК 621.7.09

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185114>

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

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПОЛИРОВАНИЯ КВАРЦЕВАНИЕМ АЛМАЗОПОДОБНОГО PVD ПОКРЫТИЯ

Кирилл Андреевич Авдонин

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

kirill.avdonin@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлена методика оптимизации режима полирования алмазоподобного PVD-покрытия с использованием симплекс-метода, который является эффективным инструментом для решения задач линейного программирования. Оптимизация основана на регрессионных зависимостях, полученных в результате экспериментальных исследований, что позволило построить систему неравенств для определения оптимальных условий полирования. В качестве целевой функции выбрана максимальная производительность процесса, что является ключевым критерием для серийного и крупносерийного производства, особенно в контексте создания высококачественного режущего инструмента. Исследования показали, что при допустимом уровне шероховатости обработанной поверхности $Ra \leq 0,04$ мкм, оптимальными условиями полирования являются: продольная подача 400 мм/мин, поперечная подача 1,0 мм и частота вращения

инструмента 2000 об/мин. Эти параметры обеспечивают максимальную эффективность процесса, что имеет важное значение для повышения конкурентоспособности продукции на рынке. Таким образом, результаты работы могут быть полезны для повышения эффективности процесса обработки алмазоподобных покрытий, что имеет важное значение для машиностроения, производства режущего инструмента и других высокотехнологичных отраслей. Данная методика может быть адаптирована для различных условий обработки, что открывает новые горизонты для дальнейших исследований и разработок в области оптимизации технологических процессов, а также для внедрения инновационных технологий в производственную практику.

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

Для цитирования: Авдонин К.А. Оптимизация режима полирования кварцеванием алмазоподобного PVD покрытия // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185114>

Original article

OPTIMIZATION OF THE POLISHING MODE BY SCRATCHING DIAMOND-LIKE PVD COATING

Kirill A. Avdonin

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

Saratov, Russia

kirill.avdonin@mail.ru

Abstract. This article presents a novel and effective technique for optimizing the polishing mode of diamond-like PVD coatings by employing the simplex method, which is widely recognized as a powerful tool for solving linear programming problems. The optimization process is firmly grounded in regression dependencies derived from extensive and detailed experimental studies, enabling the construction of a comprehensive system of inequalities that accurately determine the optimal polishing conditions. The maximum productivity of the polishing process was selected as the primary target function, serving as a crucial and practical criterion for serial and large-scale industrial production, especially in the context of developing high-quality and durable cutting tools. The research findings clearly indicate that, while maintaining an acceptable level of surface roughness of $Ra \leq 0.04 \mu\text{m}$, the optimal polishing conditions are established as follows: a longitudinal feed rate of 400 mm/min, a transverse feed of 1.0 mm, and a tool rotation speed of 2000 rpm. These carefully determined parameters guarantee maximum process efficiency, which is essential for significantly enhancing the competitiveness and marketability of products in the highly demanding marketplace. Therefore, the results of this comprehensive study hold significant potential for substantially improving the efficiency and quality of the diamond-like coating processing process, which is of great importance for mechanical engineering, the production of cutting tools, and various other high-tech industrial sectors. Furthermore, this adaptable technique can be modified and applied to a wide range of processing conditions, thereby opening up new and promising avenues for further research, development, and innovation in the field of technological process optimization, as well as facilitating the seamless integration of cutting-edge technologies into modern production practices.

Keywords: diamond coating, polishing, surface roughness, polycrystalline diamond, optimization, PVD coating

For citation: Avdonin K.A. Optimization of the polishing mode by scratching diamond-like PVD coating. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185114>

Введение

В машиностроении считается, что для механической обработки деталей следует использовать инструмент более высокой твердости, чем твердость обрабатываемой заготовки. Поэтому для обработки PVD-покрытия [1-5] обычно используют либо алмазные пасты [6-8] или сухое полирование в абразивной среде [9]. Однако, если учесть, что у алмазоподобного покрытия имеются «слабые» свойства, а именно повышенная хрупкость и способность растворяться в переходных металлах типа железа, никеля и других, то открывается возможность использования для полирования алмазоподобного покрытия более эффективных методов обработки, таких как термомеханическая обработка [10-13] и обработка крацеванием [14, 15].

Крацевание – это процесс обработки поверхностей с использованием щеток. Если рассматривать нить щетки как стержень, а микроскопическую вершину неровности алмазоподобного покрытия как деформируемое твёрдое тело, то в этом контексте важно учитывать динамические особенности механических систем, которые могут влиять на качество и эффективность процесса полирования [16-20].

Оптимизация режимов полирования становится актуальной задачей, поскольку она позволяет улучшить производственные процессы и повысить общую эффективность обработки. Внедрение усовершенствованных методов полирования может привести к созданию более надежных и износостойких инструментов, что особенно важно в высокотехнологичных отраслях, таких как авиационно-ракетная космическая техника. Эти инновации позволят открыть новые возможности для применения современных технологий в производстве компонентов, способных выдерживать экстремальные условия эксплуатации.

Оптимизация

Для определения оптимальных условий доводки алмазоподобного PVD-покрытия крацеванием был выполнен факторный эксперимент [14, 15], в результате которого получена следующая регрессионная зависимость:

$$Ra = 0,17 - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot V_d - 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot V_i - 5,1 \cdot 10^{-2} \cdot t \quad (1)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение микропрофиля обработанной поверхности образца, мкм;

V_d – скорость вращения образца, мм/мин;

V_i – скорость вращения инструмента, м/мин;

t – величина поперечной подачи инструмента, мм/дв. ход.

В качестве критерия оптимизации используем максимальную производительность обработки, так как этот критерий очень важен для условий промышленного производства, к которому относится производство режущего инструмента. Производительность оптимизируемого процесса обработки является

обратной величиной времени обработки одной заготовки, которая определяется одним технологическим фактором – продольной подачей инструмента. Следовательно, в процессе оптимизации требуется найти такое значения S , которое обеспечивает минимальное время обработки заготовки при имеющихся ограничениях процесса. В таком случае, целевой функцией при решении задачи оптимизации будет являться:

$$f = S_{max} \quad (2)$$

Ограничительными факторами процесса полировки являются шероховатость обработанной поверхности и предельные значения режимных факторов, используемые в процессе экспериментальных исследований. Предельно допустимым значением шероховатости поверхности является $Ra\ 0,04$. Но следует учитывать, что значение шероховатости колеблется в широких пределах. Поэтому, чтобы не допустить выход значения шероховатости за допустимое значение, примем за нормативное следующее значение шероховатости:

$$Ra_n = Ra - k \cdot s \quad (3)$$

где Ra - допустимое значение шероховатости;

Ra_n – нормативное значение шероховатости, на которое настроен технологический процесс;

s – среднее квадратичное отклонение значений шероховатости, возникающее за счет действия случайных факторов;

k – так называемый коэффициент риска, от которого зависит вероятность выхода случайной величины за установленные пределы.

Величину k определяли по критерию Стьюдента. Для этого по таблице Стьюдента для симметричного распределения при доверительной вероятности 0,95 и числу степеней свободы $N - 1$, где N число всех значений случайной величины Ra определяли равным 12, а коэффициент Стьюдента $\beta = 2,2$. Тогда ошибка опытных данных ε , получаемая в результате случайного рассеивания значений Ra , будет равна:

$$k = \frac{\beta \cdot \sigma}{\sqrt{N}} = \frac{2,2 \cdot 0,025}{\sqrt{12}} = 0,015 \text{ мкм} \quad (4)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение значений Ra , полученное после обработки экспериментальных данных, мкм.

Таким образом, для предварительного расчета оптимальных режимов обработки принимаем:

$$Ra_n = 0,04 - 2,3 \cdot 0,0054 = 0,0386 \text{ мкм.}$$

Предельные значения частоты вращения инструмента составляют: $n_{min} = 1000$ об/мин, $n_{max} = 2000$ об/мин, так как эти предельные значения были использованы при проведении опытов. Соответственно: $t_{min} = 0,5$ мм; $t_{max} = 1,0$ мм; $S_{min} = 200$ мм/мин; $S_{max} = 400$ мм/мин. Ограничение по допустимой мощности процесса обработки не рассматриваем, так как мощность процесса полирования даже при самых форсированных режимах намного меньше мощности оборудования.

В качестве закономерностей оптимизируемого процесса рассмотрим регрессионную зависимость, полученную в результате эксперимента:

$$Ra_n = 0,0838 - 0,000024 \cdot n - 0,025 \cdot t + 0,000072 \cdot S \quad (5)$$

Наиболее универсальным методом выбора оптимальных условий обработки является симплекс-метод решения задач линейного программирования, который заключается в том, чтобы по заданным исходным данным и ограничениям определить область допустимых значений оптимизируемых параметров, а затем с помощью целевой функции определить в этой области точку, соответствующую критерию оптимизации.

Симплекс-метод предусматривает решение конечной системы неравенств с конечным числом вещественных неизвестных. При составлении системы неравенств в левую часть переносим искомый параметр, а в правую часть – допустимые значения всех других параметров. В рассматриваемом случае имеет место всего один искомый параметр, оказывающий влияние на производительность обработки – продольная подача S . Ограничительным фактором является нормативное значение шероховатости обработанной поверхности. Предельные значения остальных факторов определены выше.

Поэтому, используя равенство (5) и перенося величину Ra_n в правую часть, а величину S в левую, получим следующую оптимизационную математическую модель:

$$S \leq 13889 \cdot Ra_n - 1163,9 + 0,333 \cdot n_{max} + 347,2 \cdot t_{max} \quad (6)$$

$$S \geq 13889 \cdot Ra_n - 1163,9 + 0,333 \cdot n_{min} + 347,2 \cdot t_{min} \quad (7)$$

$$S \leq S_{min} \quad (8)$$

$$S \geq S_{max} \quad (9)$$

$$f = S_{max}$$

Неравенство (6) отражает ограничение по нормативному значению шероховатости поверхности и по максимальным значениям частоты вращения инструмента и поперечной подачи. Неравенство (7) отражает ограничение по нормативному значению шероховатости поверхности и по минимальному значению частоты вращения инструмента и минимальному значению поперечной подачи. Неравенство (8) отражает ограничение по минимальному значению продольной подачи. Неравенство (9) отражает ограничение по максимальному значению продольной подачи.

Величина f представляет собой целевую функцию, показывающую, что из всех возможных значений S надо выбрать максимально допустимое значение.

Подставим в правую часть неравенств (6)-(9) численные допустимые значения параметров: $Ra_n = 0,038$; $n_{min} = 1000$ об/мин ; $n_{max} = 2000$ об/мин ; $t_{min} = 0,5$ мм; $t_{max} = 1,0$ мм; $S_{min} = 200$ мм/мин; $S_{max} = 400$ мм/мин. Получим:

$$S \leq 379 \quad (10)$$

$$S \geq 0 \quad (11)$$

$$S \leq 200 \quad (12)$$

$$S \geq 400 \quad (13)$$

$$f = S_{max}$$

Обычно для выбора оптимальных режимов строят графическую зависимость с указанием допустимых значений искомых параметров процесса обработки. Но в данном случае, когда искомым является всего один параметр, допустимый диапазон

значений виден из системы неравенств (10) - (13) и без графических построений. Он находится в пределах от 200 до 379 мм/мин. В соответствии с целевой функцией выбираем максимальной из этих значений. На станке ближайшим фиксированным значением продольной подачи является $S = 400$ мм/мин.

Следовательно, оптимальными значениями технологических факторов при принятых ограничениях являются: продольная подача $S = 400$ мм/мин, поперечная подача $t = 1,0$ мм и частота вращения инструмента $n = 2000$ об/мин.

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. V. 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. V. 39, No. 2. P. 129-133. DOI: [10.3103/S1063457617020083](https://doi.org/10.3103/S1063457617020083)

8. Епифанов В.И., Лесина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. – М.: Высшая школа, 1987. – 333 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. С. 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. 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)
15. Королев А.В., Охлупин Д.Н., Синев И.В., Авдонин К.А. Результаты дискретного полирования поликристаллического алмазного покрытия инструментов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). С. 156-162. DOI: [10.34771/UZCEPU.2022.77.3.030](https://doi.org/10.34771/UZCEPU.2022.77.3.030)
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)

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. V. 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. V. 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. 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)
15. Korolev A.V., Okhlupin D.N., Sinev I.V., Avdonin K.A. Results of discrete polishing of polycrystalline diamond coating of tools. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*. 2022. No. 3 (77). P. 156-162. (In Russ.). DOI: [10.34771/UZCEPU.2022.77.3.030](https://doi.org/10.34771/UZCEPU.2022.77.3.030)
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. 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)

Статья поступила в редакцию 11.05.2025

Одобрена после рецензирования 26.05.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 11.05.2025; approved after reviewing on 26.05.2025; accepted for publication on 25.06.2025