

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. №3 (153). С.42-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №3 (153). P.42-48.

Научная статья
УДК 621(075)
doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

Технологическое уменьшение времени приработки поверхностей трения

Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.

Михаил Геннадьевич Шалыгин², д.т.н.

^{1,2} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ naukatm@yandex.ru, orcid// 0000-0003-2566-2759

² migshalygin@yandex.ru, orcid// 0000-0002-8102-9918

Аннотация. Проведен анализ работ по управлению процессами, происходящими в период приработки деталей пар трения. Приведены технологические и другие способы уменьшения времени процесса приработки. Представлены режим и оборудование проведенного низкотемпературного отжига в диоксиде кремния. Приведены средства измерения шероховатости, химического состава, структуры и износа поверхности. Установлено, что при проведении низкотемпературного отжига в диоксиде кремния происходит выглаживание микронеровностей поверхности по основным параметрам шероховатости. Высотные параметры шероховатости R_a , R_{max} уменьшились: параметр R_a в 4,5 раз; параметр R_{max} – в 5,1 раз. Шаговые параметры S , S_m повели себя разнонаправленно: параметр S_m увеличился в 2,2 раза; параметр S уменьшился в 1,6 раз. Уменьшение высотных R_a , R_{max} и увеличение шаговых S_m параметров шероховатости свидетельствует о выглаживании поверхности в следствии проведенного отжига. Уменьшение параметра S говорит об общем уменьшении количества выступов шероховатости. Также следует отметить уменьшение значения параметра опорной кривой профиля tr на уровне 50 %, как характеристики уменьшения несущей способности материала. Результаты химического анализа показали увеличение в поверхностном слое количества кремния и уменьшения количества хрома. Металлографический анализ позволил установить образование поверхностного слоя, насыщенного кремнием. В результате испытаний на износ, установлено, что суммарный износ пары трения образца после проведения низкотемпературного отжига уменьшился по сравнению с базовым образцом. При испытаниях на износ использовалась схема цилиндр-плоскость при нагрузке 30 Н.

Ключевые слова: приработка, низкотемпературный отжиг, диоксид кремния, износ, качество поверхности

Для цитирования: Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. Технологическое уменьшение времени приработки поверхностей трения // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

Technological running-in time reduce for friction surfaces

Anatoly G. Suslov¹, D. Eng.

Mikhail G. Shalygin², D. Eng.

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ naukatm@yandex.ru

² migshalygin@yandex.ru

Abstract. The process control analysis for the period of running-in of friction pair parts is carried out. Technological and other ways for running-in time reduce are given. The mode and equipment of low-temperature annealing in silicon dioxide are presented. Roughness measurement instrument, chemical composition measurement, structure and wear measurement of the surface are provided. It is found that under low-temperature annealing in silicon dioxide, the surface roughness is smoothed according to the main roughness parameters. The height roughness parameters R_a , R_{max} decreased: R_a (parameter) by 4,5 times; the R_{max} (parameter) by 5,1 times. The stepwise parameters S , S_m had differently directed movement: the parameter S_m increased by 2,2 times; the parameter S decreased by 1,6 times. A decrease in the height R_a , R_{max} and an increase in the stepwise S_m

roughness parameters proves surface smoothing resulted from annealing. A decrease in the parameter S indicates a general decrease in the number of roughness peaks. It should also be noted that the value of the parameter of the t_p profile reference curve decreases by 50 %, as a characteristic of reducing the bearing capacity of the material. The results of the chemical analysis showed an increase in the amount of silicon in the surface layer and a decrease in the amount of chromium. Metallographic analysis made it possible to come at the formation of a surface layer enriched with silicon. As a result of wear tests, it was found that the total wear of a sample friction pair after low-temperature annealing decreased as compared to the base sample. Under wear tests, the cylinder-plane scheme was used at the load of 30 N.

Keywords: running-in, low-temperature annealing, silicon dioxide, wear, surface quality

For citation: Suslov A.G., Shalygin M.G. Technological running-in time reduce for friction surfaces / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

В инженерной практике принято считать, что в процессе приработки трущихся поверхностей происходит пластические и упругие деформации макро-, микро- и нанонеровностей. Причем смещение поверхностей перед каждым новым приложением нагрузки будет вызывать упругие и пластические деформации или срез ранее не контактирующих поверхностей, после многократных смещений и повторных приложений нагрузки все большая часть неровностей будет деформироваться упруго и все меньшая их часть будет иметь пластический характер. При уменьшении длительности процесса приработки неровности поверхностей трения быстрее приобретают равновесную шероховатость и скорость изнашивания уменьшается. В этой связи пути уменьшения времени на приработку поверхностей трения представляют интерес для научной общественности.

Ведется анализ процессов формирования микропрофиля поверхностей деталей машин на этапах обработки и приработки [1]. Разрабатываются методы технологического управления физико-химическими параметрами поверхностных слоев [2]. Проводятся исследования износостойкости, контактной жесткости и антифрикционных свойств поверхностей после их напыления и упрочнения [3]. Предлагаются новые методики приработки [4], которая состоит из двух режимов. На первом режиме задаётся максимальная нагрузка, ниже нагрузки «заедания» при минимальной скорости скольжения. На втором режиме задаётся минимальная нагрузка и максимальная

скорость скольжения. Получены переходные характеристики приработки трибосистем, которые позволяют установить взаимосвязь между конструкцией трибосистемы, рациональными режимами нагружения, временем приработки и износом за приработку. Проводится моделирование процессов приработки для поверхностей различной геометрии и упрочнения [5].

Исследуются трибологические характеристики и микрогеометрия поверхностей антифрикционных сплавов в период приработки [6]. Показано, что при малых нагрузках микрогеометрия оказывает более сильное влияние на трибологические характеристики, чем при высоких нагрузках. Для минимального и среднего значения нормальной нагрузки выявлен эффект образования равновесной шероховатости, не зависящей от исходного качества поверхности трения. Исследуются влияние приработки на трибологические свойства различных фрикционных материалов [7]. Рассматривается процесс нанесения внешних антифрикционных покрытий из алюминия, оловянистой бронзы и меди механическим путем на поверхность закаленных чугуновых зубчатых колес с внешним диффузионным ванадиевым покрытием взамен операции тонкого шлифования, для сглаживания исходной шероховатости поверхности [8].

В зарубежной литературе большой объем исследований направлен на поиск методов и средств уменьшения времени приработки [9], т. к. таким образом стремятся научиться управлять упругими свойствами поверхностей. Исследуется изменение коэффициента трения

в период приработки [10]. Строятся численные [11] и аналитические [12] модели приработки.

Целью настоящей статьи является уменьшение времени приработки поверхностей трения.

Методы и средства

Исследования проводили на образце, изготовленном из стали 45, поверхности образца обрабатывали шлифованием до шероховатости $Ra = 1,0$ мкм. Шероховатость образцов измерялась на профилографе БВ7669М на базовой длине 0,8 мм, в трех измерениях. Химический анализ поверхности проводили на спектрометре Искролайн-100, металлографию осуществляли на микроскопе LeicaDM, предварительно обработав поверхность 3,0 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты. В качестве контртела выступала сталь 40Х с качеством поверхностей $Ra = 1,0$ мкм.

Отжиг образцов проводили в муфельной печи. Печь разогревалась до температуры 180 °С, образцы, обсыпанные порошкообразным диоксидом кремния, помещали в печь и выдерживали в течении 30 мин. Остывание образцов происходило в печи при открытой дверце. Более детально методика проведения отжига приведена в работе [13].

Испытания на износ проводили по

схеме цилиндр-плоскость. Испытания проводили без смазочного материала, при нагрузке 30 Н. Скорость вращения цилиндрического образца 60 об/мин, продолжительность испытаний 4,0 мин. Радиус контртела $R = 25$ мм.

Результаты и обсуждение

Сравнение проводили по двум образцам: первый образец – не отожженный в печи; второй образец – отожженный в печи. Результаты измерения параметров шероховатости образцов приведены на рис. 1 и в табл. 1.

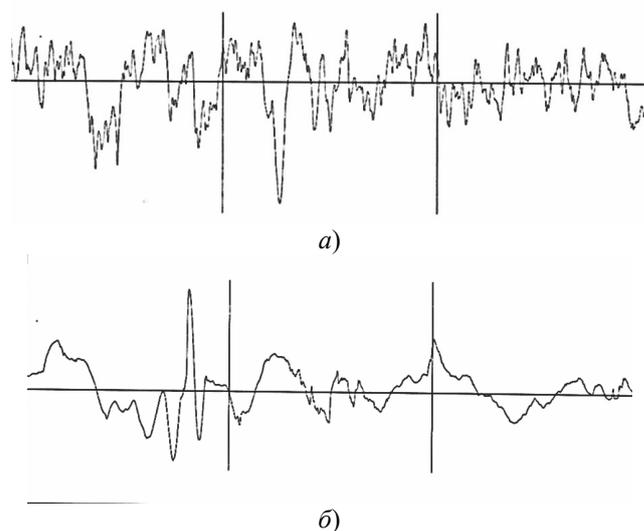


Рис. 1. Профиль поверхности образца: а – первый образец; б – второй образец

Fig. 1. Surface profile of the sample: a – the first sample; b – the second sample

1. Средние значения параметров шероховатости поверхности по трем измерениям

1. The average values of the surface roughness parameters in three dimensions

Параметр	Первый образец	Второй образец
Ra , мкм	0,993	0,220
Rz , мкм	3,701	–
R_{max} , мкм	5,942	1,163
S_m , мм	0,073	0,167
S , мм	0,013	0,008
t_{50} , %	68,50	52,20

Как видно из табл. 1 высотные параметры шероховатости уменьшились: параметр Ra в 4,5 раза; параметр R_{max} – в 5,1 раза. Шаговые параметры повели себя разнонаправленно: параметр S_m увеличился в 2,2 раза; параметр S уменьшился в 1,6 раза. Уменьшение высотных Ra , R_{max} и увеличение шаговых S_m параметров шероховатости свидетельствует о выглаживании поверхности в следствии проведенного отжига. Уменьшение параметра S

говорит об общем уменьшении количества выступов шероховатости. Также следует отметить уменьшение значения параметра опорной кривой профиля $t50$, как характеристики уменьшения несущей способности материала.

Испытания образцов на износ (рис. 2) позволили установить, что, в целом, выглаживание поверхности привело к уменьшению износа.

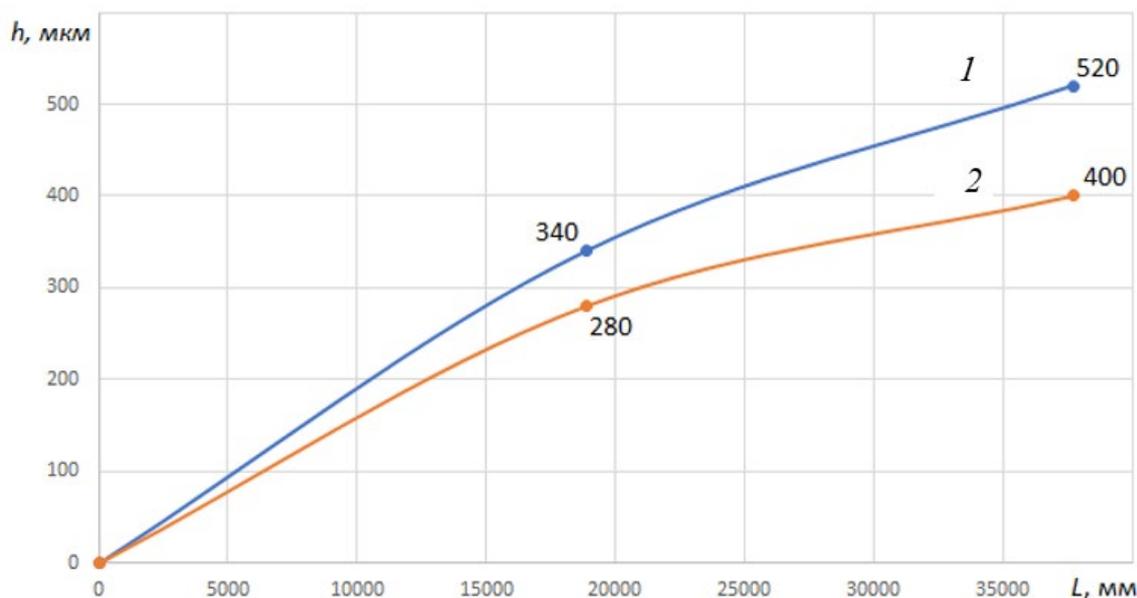


Рис. 2. Результаты испытания на износ пары трения с образцами:
1 – первый образец; 2 – второй образец

Fig. 2. The results of the friction pair wear test for samples:
1 – the first sample; 2 – the second sample

Так, износ пары трения с первым образцом составил 0,52 мм, со вторым образцом – 0,4 мм. Интенсивность изнашивания пары трения с первым образцом – $1,38 \cdot 10^{-5}$, со вторым образцом – $1,06 \cdot 10^{-5}$. Следовательно, можно прийти к заключению, что процесс приработки второго образца завершится быстрее, чем у первого.

Проведенный химический анализ образцов (рис. 3) показал, что в поверхностном

слое второго образца после отжига в порошке диоксида кремния увеличилось количество кремния в 1,18 раз и уменьшилось содержание хрома в 0,18 раз. Увеличение содержания кремния можно объяснить его переходом из диоксида кремния в поверхностный слой стали. Объяснить потерю хрома можно его расходом на возникающую химическую реакцию $Cr + SiO_2 = CrO + SiO_2$. Однако, данное предположение требует дополнительно подтверждения.

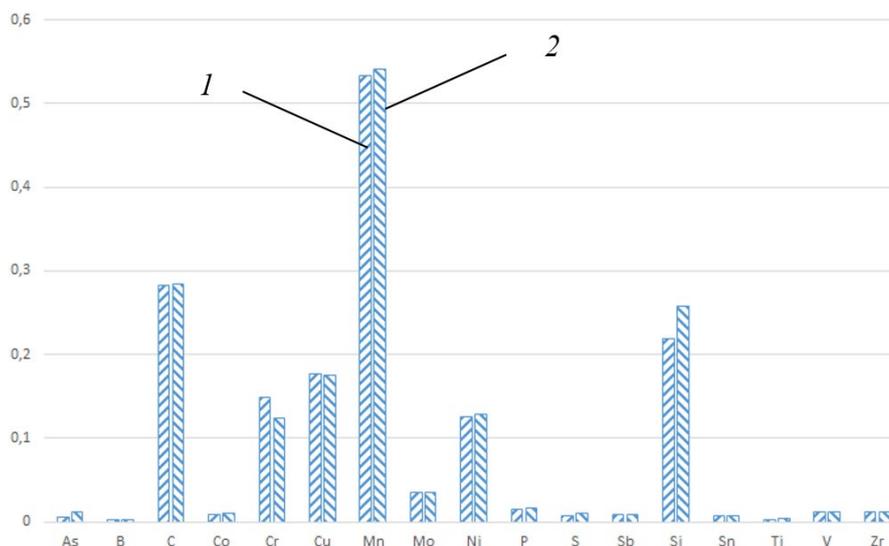


Рис. 3. Содержание химических элементов в образцах:
1 – первый образец; 2 – второй образец

Fig. 3. The content of chemical elements in the samples:
1 – first sample; 2 – second sample

На металлографии второго образца (рис. 4, в) виден образовавшийся поверхностный слой. При этом, изначальная структура поверхности первого образца (рис. 4, а) после отжига (рис. 4, б) практически не претерпела изменений.

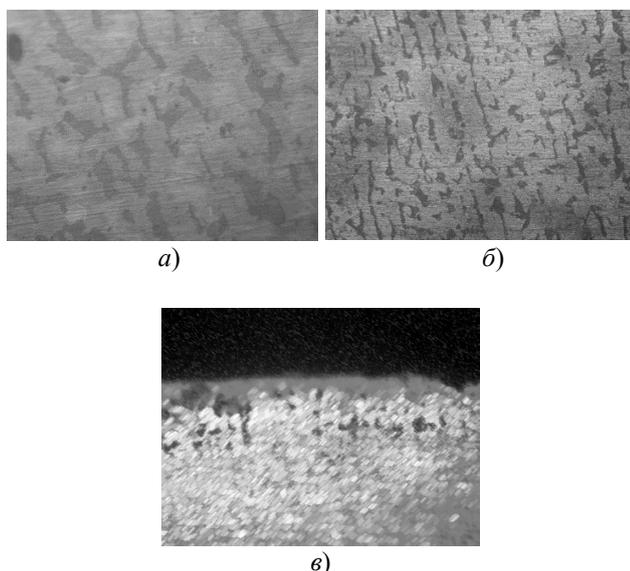


Рис. 4. Структура поверхности:
а – первый образец ($\times 500$); б – второй образец ($\times 500$);
в – срез торца второго образца ($\times 200$)

Fig. 4. Surface structure:
а – the first sample ($\times 500$); б – the second sample ($\times 500$);
с – end face cut of the second sample ($\times 200$)

Выводы

Низкотемпературный отжиг в порошкообразном диоксиде кремния позволяет «сгладить» микронеровности поверхности. В результате на поверхности образуется слой, содержащий кремний или его карбиды. Интенсивность изнашивания при этом уменьшается, что приведет к уменьшению времени приработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нагоркин М.Н., Федоров В.П., Суслов А.Г., Тотай А.В. Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 37–45. DOI 10.30987/2223-4608-2023-37-45. EDN QFJRDD.
2. Тотай А.В. Повышение эксплуатационной надежности деталей технологическим управлением физико-химическими параметрами их поверхностных слоев // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 1(103). С. 24–30. DOI 10.30987/2223-4608-2020-1-24-30. EDN WRAIUI.
3. Пыриков И.Л. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств плоских поверхностей скольжения // Научные технологии в

машиностроении. 2021. № 1(115). С. 15–23. DOI 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-15-23. EDN NPWXVY.

4. **Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В., Цымбал Б.М.** Методика приработки трибосистем и экспериментальная проверка ее эффективности // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 5. С. 487–497. EDN XNTCSA.

5. **Волченков А.В., Никитина Л.Г.** Алгоритм разработки программы приработки криволинейных поверхностей // Транспортное машиностроение. 2023. № 2(14). С. 12–18. DOI 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18. EDN CQFMSY.

6. **Цуканов И.Ю., Щербакова О.О., Мезрин А.М. и др.** Трибологические характеристики и микрогеометрия поверхностей антифрикционных сплавов в период приработки // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 1. С. 19–26. EDN OCNFBR.

7. **Буковский П.О., Морозов А.В., Кириченко А.Н.** Влияние приработки на коэффициент трения углеродных композитных материалов авиационных тормозов // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 4. С. 448–456. DOI 10.32864/0202-4977-2020-41-4-448-456. EDN SLHWRN.

8. **Веселовский А.А.** Влияние внешних антифрикционных покрытий на состояние поверхности и приработку упрочненных диффузией чугуновых зубчатых колес в паре // Вестник Курганской ГСХА. 2020. № 2(34). С. 58–61. EDN ZGBMWG.

9. **Jeng, Yeau-Ren, Zhi-Way Lin, and Shiuh-Hwa Shyu.** «Changes of surface topography during running-in process». J. Trib. 126.3 (2004): 620–625.

10. **A. Ruggiero, G. D. Leo, C. Liguori, D. Russo and P. Sommella.** «Accurate Measurement of Reciprocating Kinetic Friction Coefficient Through Automatic Detection of the Running-In», in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 5, pp. 2398–2407, May 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2974055.

11. **Rifky Ismail, Muhammad Tauviquirrahman, Jamari, Dirk J. Schipper.** Two-Dimensional Finite Element Analysis on Running-in of Elastic-Plastic Rolling Contact. AIP Conf. Proc. 23 December 2010; 1325 (1): 190–193. <https://doi.org/10.1063/1.3537894>

12. **Akbarzadeh, Saleh, and M. M. Khonsari.** «Experimental and theoretical investigation of running-in». Tribology International 44.2 (2011): 92–100.

13. **Суслов А.Г., Шалыгин М.Г.** Управление наногометрией деталей методом поверхностного упрочнения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 11. С. 38–41.

REFERENCES

1. Nagorkin M.N., Fedorov V.P., Suslov A.G., Totai A.V. Technological control of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through combined antifriction surfacing // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, No. 12 (150), pp. 37–45. DOI 10.30987/2223-4608-2023-37-45. EDN QFJRDD.

2. Totai A.V. Increase of parts operation reliability by technological control of physical-chemical parameters of their surface layers // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 1(103), pp. 24–30. DOI 10.30987/2223-4608-2020-2020-1-24-30. EDN RYKI.

3. Pyrikov I.L. Technological support of operation properties in flat sliding surfaces // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, No. 1(115), pp. 15–23. DOI 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-15-23. EDN NPWXVY.

4. Voitov V.A., Bakirov A.Sh., Voitov A.V., Tsymbal B.M. Tribosystem aging technique and experimental proof of its effectiveness // Friction and wear, 2019, vol. 40, No. 5, pp. 487–497. EDN XNTCSA.

5. Volchenkov A.V., Nikitina L.G. Algorithm for developing the program of curved surfaces burn-in // Transport engineering, 2023, No. 2(14), pp. 12–18. DOI 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18. EDN CQFMSY.

6. Tsukanov I.Yu., Shcherbakova O.O., Mezrin A.M. et al. Tribological characteristics and microgeometry of surfaces of antifriction alloys in the running-in period // Friction and wear, 2020, vol. 41, No. 1, pp. 19–26. EDN OCNFBR.

7. Bukovsky P.O., Morozov A.V., Kirichenko A.N. Influence of running-in on the friction coefficient of C/C composite materials for aircraft brakes // Friction and wear, 2020, vol. 41, No. 4, pp. 448–456. DOI 10.32864/0202-4977-2020-41-4-448-456. EDN SLHWRN

8. Veselovsky A.A. Effect of external anti-friction coatings on the surface condition and running-in of diffusion-hardened cast-iron toothed gears in a pair // Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy, 2020, No. 2(34), pp. 58–61. EDN ZGBMWG.

9. Jeng, Yeau-Ren, Zhi-Way Lin, and Shiuh-Hwa Shyu. «Changes of surface topography during running-in process». J. Trib. 126.3 (2004): 620–625.

10. **A. Ruggiero, G. D. Leo, C. Liguori, D. Russo and P. Sommella.** «Accurate Measurement of Reciprocating Kinetic Friction Coefficient Through Automatic Detection of the Running-In», in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 5,

pp. 2398–2407, May 2020,
doi: 10.1109/TIM.2020.2974055.

11. Rifky Ismail, Muhammad Tauviquirrahman, Jamari, Dirk J. Schipper. Two-Dimensional Finite Element Analysis on Running-in of Elastic-Plastic Rolling Contact. AIP Conf. Proc. 23 December 2010; 1325 (1): 190–193. <https://doi.org/10.1063/1.3537894>

12. Akbarzadeh, Saleh, and M. M. Khonsari. «Experimental and theoretical investigation of running-in». Tribology International 44.2 (2011): 92–100.

13. Suslov A.G., Shalygin M.G. Control of nanogeometry of parts by the method of surface hardening / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No.1(127), pp. 38–41.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.02.2024; одобрена после рецензирования 15.02.2024; принята к публикации 24.02.2024.

The article was submitted 08.02.2024; approved after reviewing 15.02.2024; accepted for publication 24.02.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Верстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.03.2024. Выход в свет 29.03.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

