

magnitude of the external normal force, has to be taken into account. It is shown that the linear dependence of the specific friction force on the actual contact pressure directly corresponds to the nonlinear dependence of the friction force on the external normal load. However, over a certain range of the latter's variation, this dependence is well approximated by a linear equation known as Coulomb's two-term friction law. A comparison of the experimental friction force measurements with their calculated values is provided, demonstrating good agreement for the tested metal friction pairs.

Keywords: friction force, specific friction force, Coulomb's friction law, contact adhesion.

Поступила в редакцию/received: 17.11.2025; после рецензирования/revised: 24.11.2025;
принята/accepted: 28.11.2025

УДК 621.791.92:621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-53-61

О ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2026

Исследованы фрикционные характеристики порошковой лазерной наплавки никелевого сплава: силы трения, коэффициента трения и удельной силы трения. Порошковую лазерную наплавку осуществляли последовательным нанесением трех слоев с использованием многоканального лазера. После наплавки поверхность покрытия дополнительно переплавляли на разных режимах лазерного излучения, изменяя условия кристаллизации сплава. В результате на всех образцах в поверхностном слое сформировалась однотипная микроструктура, различающаяся только размером структурных составляющих. Показано, что изменение режимов плавления поверхности покрытия в выбранном диапазоне не оказывает заметного влияния на фрикционные характеристики контакта стального индентора с поверхностью покрытия.

Ключевые слова: коэффициент трения, удельная сила трения, порошковая лазерная наплавка, многоканальный лазер, сплавы никеля.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение износостойкости материалов узлов трения является актуальной задачей трибологии. Технологические возможности лазерного модифицирования контактных поверхностей позволяют успешно решить указанную задачу путем нанесения наплавленных износостойких покрытий. Для этого широко используются различные присадочные материалы, например порошки состава Ni-Cr-B-Si [1–3]. Сплавы на основе никеля широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как нефтегазовая, химическая, нефтехимическая, горнодобывающая, при производстве форм для стекла, для технического обслуживания и ремонта деталей машин [4–6].

Лазерные технологии позволяют управлять процессом структурообразования нанесенных покрытий, так как они обеспечивают контролируемый подвод тепла и подходят для деталей сложной геометрической формы [7–11]. Многие исследователи обнаружили, что износостойкость Ni-Cr-B-Si или аналогичных самофлюсующихся покрытий можно улучшить, применяя процесс переплавления нанесенных покрытий [7, 8]. Его обычно используют после различных напылительных технологий для улучшения структуры, уменьшения пористости, повышения качества связи между покрытием и подложкой.

Переплавление поверхности нанесенного порошковой лазерной наплавкой покрытия позволяет уменьшить шероховатость и сформировать микроструктуру, обеспечивающую улучшенный комплекс свойств [1, 12].

Цель данной работы – исследовать фрикционные характеристики поверхности порошковой наплавки Ni-Cr-B-Si на углеродистую конструкционную сталь в зависимости от режимов лазерной обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования применялись образцы, полученные по технологии порошковой лазерной наплавки [12]. Материалом подложки служила углеродистая конструкционная сталь 30 (ГОСТ 1050-2013). Для наплавки использовались порошковые присадочные материалы системы Ni-Cr-B-Si. Слои присадочного материала расплавлялись непрерывным лазерным излучением с перекрытием валиков 30 %. Затем часть поверхности никелевого покрытия была переплавлена на режимах, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Режимы лазерной обработки поверхности образцов сплава Ni-Cr-B-Si

№ образца	Состояние поверхности	Мощность, Вт	Скорость, мм/с	Диаметр пятна, мм
1	Исходная (наплавка)	2 300	5	6
2	После обработки по режиму 1	2 000	10	
3	После обработки по режиму 2	2 700	10	

Триботехнические характеристики определяли с помощью микротрибометра [13] по схеме шар – плоскость. Согласно этой схеме, гладкая плоская поверхность исследуемого покрытия контактирует с гладкой поверхностью сферического контробразца с известным радиусом кривизны r . В качестве контробразцов использовали индентор из стали ШХ15 ($r = 0,5$ мм).

Нормальная нагрузка N на контакт изменялась в диапазоне 0,49...5,88 мН. Измерение при одной нагрузке повторяли 10...20 раз.

Исследования микроструктуры проводили с помощью оптического металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ микроструктуры. На рис. 1 представлено изображение шлифа полученного образца. Наплавка осуществлялась последовательным нанесением трех слоев. При лазерной наплавке первого слоя происходило расплавление присадочного материала и основы с формированием прочного соединения. В первом слое покрытия с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализа выявлено повышенное содержание железа до 7,0...23,5 % мас. на расстоянии до 600...700 мкм от линии

сплавления. Обогащение железом связано с конвекционным перемешиванием материалов подложки (углеродистой стали) и наплавки. Второй и третий слои наплавленного металла имеют химический состав, соответствующий исходному порошку, т. е. железа содержится около 4 % мас. В результате получено наплавленное покрытие толщиной около 2 мм.

На рис. 2 представлена микроструктура одного из исследуемых образцов. Наплавленный металл имеет дендритную структуру высокой дисперсности: матрицы γ – твердого раствора на основе никеля и некоторого количества упрочняющих боридов и карбидов. Такой тип структуры характерен для лазерных наплавов с использованием присадочных материалов системы легирования Ni-Cr-B-Si [10]. Дендриты ориентированы вдоль направления теплоотвода, эвтектика располагается в междендритных пространствах. Микроструктура наплавленного покрытия в области переплавления поверхности однотипная и отличается только размером структурных составляющих.

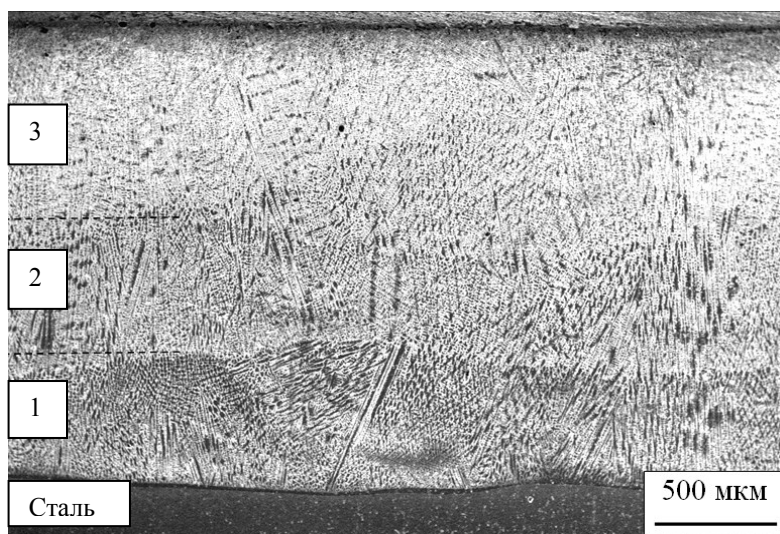


Рис. 1. Полученное растровой электронной микроскопией изображение поперечного шлифа покрытия. Цифрами 1, 2 и 3 отмечены наплавленные слои

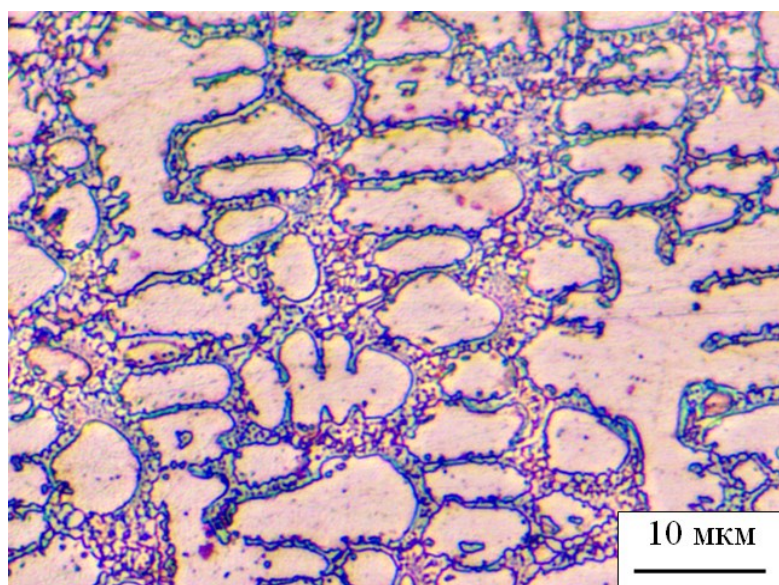


Рис. 2. Микроструктура покрытия Ni-Cr-B-Si. Оптическая микроскопия

Определение фрикционных характеристик. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости статической силы трения $F_{\text{тр}}$ от нормальной нагрузки N для исследованных образцов. Все зависимости соответствует известному двучленному закону трения Ш. Кулона

$$F_{\text{тр}} = F_0 + f_c N, \quad (1)$$

где F_0 – статическая сила трения при $N = 0$; f_c – коэффициент трения по Кулону.

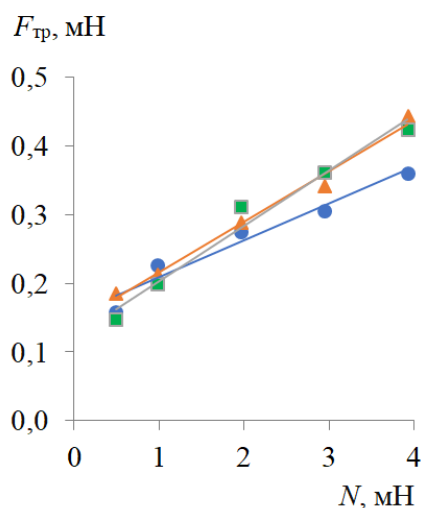


Рис. 3. Зависимости статической силы трения от нормальной нагрузки:

● – исходная; ▲ – по режиму № 1; ■ – по режиму № 2

Уравнение (1) можно рассматривать как уравнение линейной регрессии зависимой переменной $F_{\text{тр}}$ на независимую переменную N , параметры которой f_c и F_0 приведены в табл. 2. Все параметры статистически значимы. Обращают на себя внимание сравнительно большие значения параметра F_0 – статической силы трения при нулевой нормальной силе, приложенной к контакту. Такие значения свидетельствуют о существенном адгезионном взаимодействии в контакте поверхностей образцов сплава Ni-Cr-B-Si со стальным индентором. Следует также отметить малые значения коэффициента трения, нетипичные для контакта металлических поверхностей без смазочного материала.

Таблица 2. Фрикционные параметры поверхности образцов сплава Ni-Cr-B-Si

№ образца	Состояние поверхности	F_0 , мН	f_c	Коэффициент корреляции
1	Исходная (наплавка)	$0,156 \pm 0,017$	$0,053 \pm 0,007$	0,95
2	После обработки по режиму 1	$0,143 \pm 0,011$	$0,073 \pm 0,004$	0,97
3	После обработки по режиму 2	$0,123 \pm 0,019$	$0,081 \pm 0,007$	0,98

Значения коэффициента трения f_A , определенные в соответствии с ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» как

отношение силы трения $F_{\text{тр}}$ к нормальной силе N , приложенной к контакту, приведены на рис. 4 в зависимости от величины этой силы. Такое определение коэффициента трения соответствует другому известному в трибологии закону внешнего трения – закону Г. Амонтона:

$$F_{\text{тр}} = f_A N.$$

Непостоянство коэффициента трения по Амонтону сильно снижает его информативность и затрудняет его применение в расчетах узлов трения. Зависимость коэффициента трения по Амонтону от нормальной силы N , приложенной к контакту, объясняется наличием силы адгезионного притяжения контактирующих тел, особенно ощутимом при малых величинах нормальной силы. С ростом последней вклад силы адгезионного притяжения в общую величину контактной нагрузки уменьшается и значения коэффициента трения f_A приближаются к соответствующим значениям f_C .

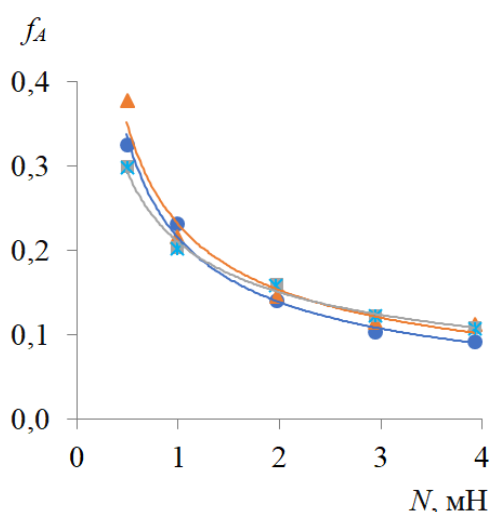


Рис. 4. Зависимости коэффициента статического трения по Амонтону от нормальной нагрузки: ● – исходная; ▲ – по режиму № 1; ■ – по режиму № 2

Используя корреляционную зависимость (1), перейдем к удельным характеристикам фрикционного взаимодействия – удельной силе трения и фактическому контактному давлению. Последнее характеризует среднее нормальное давление в контакте, тогда как удельная сила трения, по сути, представляет собой сдвиговую прочность (критическое напряжение сдвига) фрикционного контакта.

Радиус площадки контакта шарового индентора радиусом r с плоской поверхностью исследуемого образца на основании известного решения Г. Герца можно представить в виде

$$a = \left(\frac{3}{4} \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где N – нормальная нагрузка; E^* – эквивалентный модуль упругости, $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$; E_1 и E_2 – модули упругости материалов индентора и образца;

μ_1 и μ_2 – соответствующие коэффициенты Пуассона. Тогда фактическое контактное давление определяется формулой

$$p_r = \frac{N}{\pi a^2} = \frac{1}{c} N^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где $C = \pi \left(\frac{3}{4} \frac{r}{E^*} \right)^{\frac{2}{3}}$.

Удельная сила трения с учетом уравнения (1) определяется формулой

$$\tau = \frac{F_{тр}}{\pi a^2} = \frac{F_0}{c N^{\frac{2}{3}}} + \frac{f_c}{c} N^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Объединив уравнения (2) и (3), получим окончательную зависимость $\tau(p_r)$:

$$\tau = \frac{F_0}{c^3 p_r^2} + f_c p_r. \quad (4)$$

Зависимость (4) имеет минимум при $p_r = \frac{1}{c} \sqrt[3]{\frac{2F_0}{f_c}}$.

Примеры зависимости $\tau(p_r)$ при различных комбинациях параметров F_0 и f_c представлены на рис. 5. С ростом фактического давления зависимость $\tau(p_r)$ стремится к линейной $\tau = f_c \cdot p_r$.

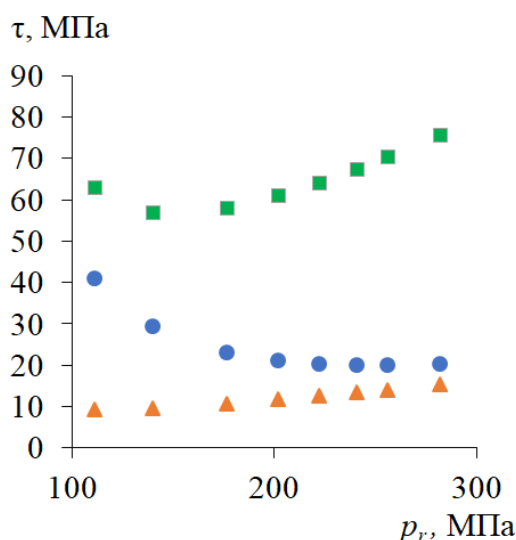


Рис. 5. Примеры зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления: ● – $F_0 = 0,156$ мН, $f_c = 0,053$; ▲ – $F_0 = 0,0156$ мН, $f_c = 0,053$; ■ – $F_0 = 0,156$ мН, $f_c = 0,25$

На рис. 6 представлены экспериментальные результаты определения удельной силы трения в зависимости от фактического контактного давления для исследованных образцов (см. табл. 1). Расположение экспериментальных точек соответствует характеру теоретической зависимости (4). Значения удельной силы трения заключены в

диапазоне 20...40 МПа, что согласуется с типичными значениями для контакта металлических поверхностей без смазочного материала [14].

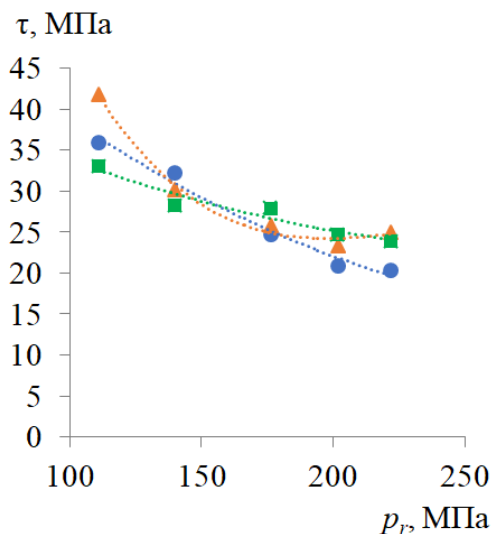


Рис. 6. Экспериментальные зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления: ● – исходная; ▲ – по режиму № 1; ■ – по режиму № 2

Минимальные значения удельной силы трения в соответствии с уравнением (4) равны соответственно 20, 24 и 25 МПа для наплавки, после режимов № 1 и № 2.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что исследуемое покрытие Ni-Cr-B-Si после наплавки и последующего плавления при различных режимах имеет близкие значения фрикционных характеристик (силы трения, коэффициента трения и удельной силы трения) в исследованном диапазоне контактных нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статическая сила трения в контакте стального шарового индентора с поверхностью исследованных образцов из порошкового сплава Ni-Cr-B-Si, нанесенных лазерной наплавкой на подложку из углеродистой стали, хорошо описывается двучленным законом трения Ш. Кулона, который выражает линейную зависимость силы трения от нормальной нагрузки на контакт. Сравнительно большая величина силы трения покоя, действующей между контактирующими телами при отсутствии приложенной к контакту внешней нормальной силы, свидетельствует о значительном адгезионном взаимодействии контактирующих поверхностей. При этом коэффициент трения покоя по Кулону имеет сравнительно небольшую величину (менее 0,1) и не зависит от нормальной нагрузки. В то же время переменный коэффициент трения по Амонтону (зависящий от нормальной нагрузки), равный отношению силы трения к нормальной силе, прижимающей тела друг к другу, ожидаемо превосходит коэффициент трения по Кулону (до 6 раз), стремясь к последнему с ростом нормальной нагрузки.

Существенного влияния режимов лазерной наплавки (см. табл. 1) на фрикционные характеристики контакта стального индентора с поверхностью образцов сплава Ni-Cr-B-Si не выявлено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной поверхностной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 376 с.
2. Balaguru S., Gupta M. Hardfacing studies of Ni alloys: A Critical Review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. V. 10. P. 1210–1242.
3. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 4. С. 311–318.
4. Климов В.Г. Применение лазерной импульсной наплавки при разработке технологии восстановления рабочих лопаток турбины газотурбинного двигателя // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 1. С. 170–179.
5. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.
6. Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Абразивная износостойкость хромоникелевого наплавленного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 34–41.
7. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures of Metallic NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and in Situ Laser Remelting Process // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011. V. 20. № 1. P. 336–343.
8. Habib K.A., Cano D.L., Alvaro J.A.H., Serrano-Mira J., Llopis R., Moreno D.L., Mohammed S.S. Effects of Thermal Spraying Technique on the Remelting Behavior of NiCrBSi Coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 444. P. 128669.
9. de Sousa J.M.S., Ratusznei F., Pereira M., de Medeiros Castro R., Curi E.I.M. Abrasion resistance of Ni-Cr-B-Si Coating Deposited by Laser Cladding Process // *Tribology International*. 2020. V. 143. P. 106002.
10. Afanasieva L.E., Pavlov I.S. Microstructure of the Deposited NiCrBSiC Coating after Laser Polishing // *Letters on Materials*. 2022. V. 12. № 4. P. 287–291.
11. Hemmati I., Ocelík V., Csach K., De Hosson J.T.M. Microstructure and Phase Formation in a Rapidly Solidified Laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C Hardfacing Alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014. V. 45. № 2. P. 878–892.
12. Раткевич Г.В. Повышение износостойкости поверхностей трения модифицированием структуры сплавов лазерным излучением: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2021. 137 с.
13. Патент РФ 2150688. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А. Заявл. 25.12.1998. Опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.
14. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Основы механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания технических поверхностей: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2025. 172 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О фрикционных характеристиках поверхности лазерной наплавки никелевого сплава // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 53–61.

ON THE FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF THE LASER-DEPOSITED NICKEL ALLOY SURFACE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., AFANASIEVA L.E., Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

The frictional characteristics of powder laser cladding of a nickel alloy were studied, including friction force, friction coefficient, and specific friction force. Powder laser cladding was performed by sequentially depositing three layers using a multichannel laser. After cladding, the coating surface was further remelted using different laser radiation modes, varying the alloy crystallization conditions. As a result, a uniform microstructure formed in the surface layer of all samples, differing only in the size of the structural components. It was shown that varying the coating surface melting modes within the selected range does not significantly affect the frictional characteristics of the contact between the steel indenter and the coating surface.

Keywords: friction coefficient, specific friction force, powder laser cladding, multichannel laser, nickel alloys.

Поступила в редакцию/received: 04.12.2025; после рецензирования/revised: 10.12.2025;
принята/accepted: 15.12.2025

УДК 621.941.229.3

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-61-66

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВКИ ВАЛА С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ЦЕНТРАХ СТАНКА

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2026

В работе приведен анализ известных способов и средств технологического оснащения для установки заготовок в виде валов на металлорежущих станках. Выявлены их достоинства и недостатки. Раскрыта сущность усовершенствованных способа и патрона для установки валов, содержащих коническую поверхность, на центрах станка. Проведено их сравнение по существенным признакам с аналогичными известными решениями. Отражен достигаемый при использовании предложенного усовершенствования технический результат.

Ключевые слова: вал, установка, способ, патрон, зажимные элементы, коническая поверхность, технологические возможности, упорные центры.