

The stepper motor drive can provide high resolution in areas with complex stress concentrations due to the 3 μm discretization of the laser module's movement.

Key words: automatic control of the device, stepper motor, laser polariscope, physical model, stress state.

For citation: Dorodov P. V., Kiselyov M. M., Gavrilov R. I., Petrov V. A. On the development of a coordinate table drive for automatic control of a laser polariscope. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2025; 4 (84): 157-163. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_157-163.

Authors:

P. V. Dorodov, Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>;

M. M. Kiselyov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

R. I. Gavrilov[✉], Senior Lecturer;

V. A. Petrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

romanfildef@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 03.09.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 03.09.2025; approved after reviewing 13.10.2025; accepted for publication 01.12.2025.

Научная статья

УДК 621.791.92:621.373.8

DOI 10.48012/1817-5457_2025_4_163-168

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Ипатов Алексей Геннадьевич[✉], Шмыков Сергей Николаевич

Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

Ipatow.al@yandex.ru

Аннотация. У 48 % деталей машин предельный износ наступает при величине износа менее 0,1 мм. Традиционные технологические процессы восстановления обеспечивают толщину покрытия более 0,5 мм, что сказывается на его себестоимости за счет необходимости дорогостоящей механической обработки. Свойства восстановительных покрытий ограничены по причине использования в качестве присадочных материалов стандартных металлических сплавов. Целью исследований является реализация комбинированной технологии наращивания восстановительного покрытия с использованием технологии традиционной лазерной наплавки, с последующим упрочнением восстановительного покрытия керамическим слоем. Комбинированная технология на первом этапе предполагает нанесение на изношенную поверхность восстановительного слоя методом традиционной лазерной наплавки присадочной проволоки Нп-55. Второй этап подразумевает упрочнение восстановительного слоя высокоскоростной лазерной наплавкой керамической композиции на основе карбонитрида бора. Для формирования восстановительного слоя применяется импульсное лазерное излучение, генерируемое лазерной установкой BULAT LRS-300. Наплавка производится в среде защитного газа аргона. Оценку качества покрытия произвели методом оптического анализа с использованием инвертированного микроскопа Olympus GX53. Анализ восстановительного покрытия выявил, что толщина восстановительного покрытия составляет 150 мкм, толщина упрочненного слоя – 8 мкм. Восстановительное покрытие обладает высокой плотностью и удовлетворительной адгезией с поверхностью детали и керамическим слоем.

Ключевые слова: восстановительное покрытие, высокоскоростная лазерная наплавка, керамическая композиция, комбинированная технология.

Для цитирования: Ипатов А. Г., Шмыков С. Н. Технология нанесения тонких восстановительных покрытий методом лазерной наплавки // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 4 (84). С. 163-168. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_163-168.

Актуальность. Опыт эксплуатации деталей машин выявил, что 72 % деталей машин выходят из строя при предельном износе менее 0,3 мм. Из них 48 % деталей, преимущественно типа «вал», имеют предельный износ менее 0,1 мм. Для восстановления деталей машин в условиях современного ремонтного производства используются дуговые, газовые, плазменные технологии наращивания восстановительных покрытий, которые обеспечивают минимальную толщину покрытия свыше 0,5 мм. Большая толщина покрытия негативно сказывается на экономической эффективности восстановления, поскольку требует длительной механической обработки [10].

При наращивании восстановительных покрытий в качестве присадочных материалов применяются металлические сплавы на основе железа, что продиктовано необходимостью обеспечения близких к восстанавливаемой детали физико-механических свойств покрытия. Однако такой подход негативно влияет на возможности повышения физико-механических свойств восстановительных покрытий в силу отсутствия возможности дополнительного легирования наращиваемого восстановительного слоя.

Одним из актуальных направлений в ремонтном производстве является использование в качестве присадочных материалов керамических соединений [1, 4, 6, 8]. Опыт нанесения керамических соединений на поверхности изношенных деталей машин выявил ряд сложностей, в частности, низкую адгезию с поверхностью детали, высокую остаточную пористость структуры покрытия, низкую трещиностойкость [3, 7, 9]. Применение традиционных технологических процессов при формировании керамических покрытий осложнено по ряду причин:

1. Низкая теплотворная способность источников тепла (большинство керамических материалов требуют температуры нагрева свыше 2500 °C).

2. Невысокая плотность вводимой энергии не обеспечивает интенсивного переплава керамического присадочного материала с материалом детали, что снижает адгезионную прочность покрытия.

3. Низкая скорость кристаллизации оплавленной ванны формирует неравномерность компонентного состава покрытия (в силу диффузионных процессов структурообразования), что вызывает трещинообразование и нестабильность физико-механических свойств.

В этих условиях при получении восстановительных покрытий на основе керамических сое-

динений наиболее привлекательно использование технологии лазерной наплавки. Преимущества лазерного излучения известны давно и их применение в машиностроительном производстве экономически и технологически оправданы [2, 5, 11]. Однако возникает сложность, которая заключается в том, что формирование устойчивых восстановительных покрытий на основе керамических соединений толщиной свыше 100 мкм осложнено [11], поэтому в данных исследованиях мы предлагаем использовать комбинированную технологию, которая подразумевает формирование отдельно восстановительного покрытия и последующего упрочняющего покрытия на основе керамических соединений.

Целью настоящих исследований является реализация комбинированной технологии наращивания восстановительного покрытия с использованием технологии традиционной лазерной наплавки, с последующим упрочнением восстановительного покрытия керамическим слоем.

Для реализации цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка технологии высокоскоростной лазерной наплавки тонкого покрытия на поверхности изношенной стальной детали. Обоснование режимов, материалов высокоскоростной лазерной наплавки.

2. Разработка технологии высокоскоростного лазерного оплавления тонкого керамического слоя на поверхности восстановительного покрытия.

Методика исследований. Нанесение восстановительного и упрочняющего покрытия на стальной изношенной поверхности представляет собой реализацию двух последовательных этапов:

- на первом этапе на поверхность изношенного стального изделия наносится покрытие, обеспечивающее восстановление номинального размера и физико-механических свойств поверхности;

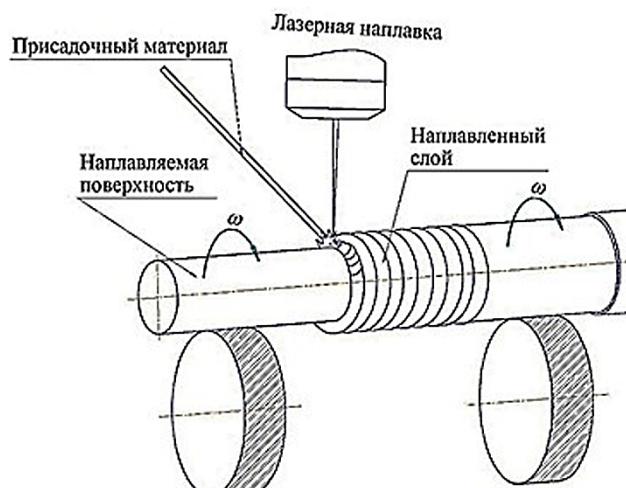
- на втором этапе на восстановительную поверхность наносится упрочняющее покрытие на основе керамической композиции B_4C -BN.

Схема нанесения восстановительного и упрочняющего покрытий представлена на рисунке 1.

Согласно представленной схеме, технология нанесения восстановительного слоя, компенсирующего величину износа поверхности, состоит из следующих операций:

1. Предварительная механическая обработка методом круглого шлифования с целью снятия

усталостного слоя с поверхности восстанавливаемой детали и исправления геометрии.



Механическая обработка поверхностей

Рисунок 1 – Схема нанесения восстановительного слоя на изношенной поверхности методом лазерной наплавки присадочной проволоки Нп-55

2. Лазерная наплавка в среде защитного газа аргона. Наплавку реализуем при помощи лазерной технологической установки BULAT LRS-300 со следующими режимами: частота лазерного излучения 12 Гц, энергия импульса 9 Дж, длительность импульса 3,8 мс, скорость наплавки 0,1 м/мин.

В качестве присадочного материала используем наплавочную проволоку Нп-55 диаметром 0,5 мм. Наплавку ведем по винтовой линии с шагом 0,4 мм/об при постоянной подаче аргона в зону сварочной ванны (рис. 2а).

Ширина восстановительного валика составляет 1,2 мм (рис. 2б). Ширина перекрытия между валиками – 30 % (при снижении величины перекрытия наблюдаются непровары и большая

гребнистость слоя, при увеличении свыше 30 % повышается риск отслоения слоя от поверхности детали).

3. Механическая обработка восстановительного слоя методом круглого шлифования с целью обеспечения необходимой шероховатости поверхности.

После нанесения восстановительного слоя приступаем ко второму этапу, который заключается в нанесении упрочняющего покрытия на поверхности восстановленного слоя методом высокоскоростного лазерного плавления порошковой композиции (рис. 3).

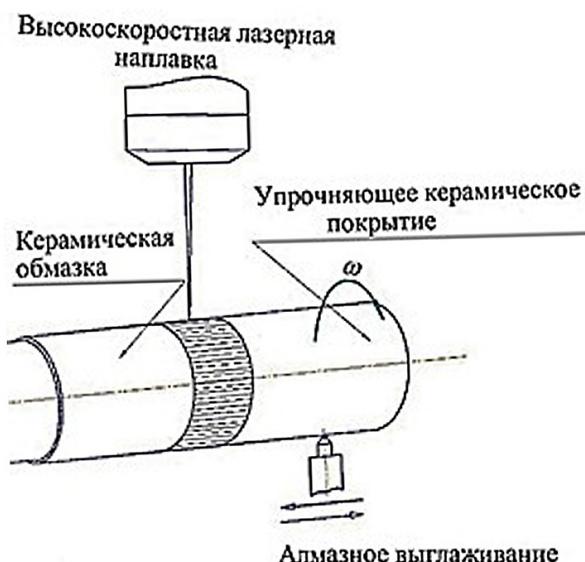


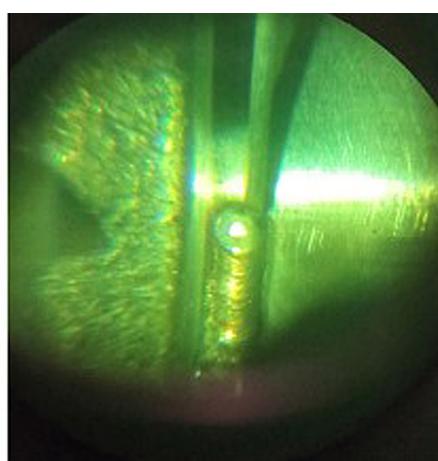
Рисунок 3 – Схема нанесения упрочняющего слоя на основе керамической композиции методом высокоскоростной лазерной обработки

Технология нанесения керамического упрочняющего слоя реализуется при помощи следующих операций:

1. Нанесение на поверхность восстановительного слоя порошковой керамической обмазки



а



б

Рисунок 2 – Лазерная наплавка:
а – наплавка изношенной поверхности золотника гидрораспределителя Р-80; б – наплавляемый восстановительный валик

толщиной в 30 мкм [11]. Керамическая обмазка представляет собой суспензию, состоящую из 80 % по массе порошковой композиции B_4C -BN-MgO-Li₂O [15] и 20 % по массе 5 %-ного раствора канифоли в этиловом спирте. Обмазка наносится методом обволакивания поверхности изделия в порошковой суспензии.

2. Высокоскоростная лазерная наплавка порошковой суспензии выполняется с использованием высокочастотного лазерного излучения со следующими режимами: частота импульсов – 20 кГц, энергия импульса – 0,5 мДж, скорость наплавки – 100 мм/с. Наплавка производится в защитной камере с постоянной продувкой аргоном.

3. Финишная обработка поверхности методом алмазного выглаживания с целью достижения необходимой чистоты поверхности.

Режимы алмазного выглаживания: усилие выглаживания $P = 350$ Н, продольная подача $S = 0,05$ мм/об, скорость выглаживания $V = 40$ м/мин, радиус алмазного наконечника $R = 3,5$ мм. Режимы алмазного выглаживания были определены в ранее опубликованных работах [11, 14].

Для оценки качества формируемого покрытия выполнили металлографические исследования с использованием инвертированного микроскопа Olympus GX53.

Результаты исследований. В данной работе нами не были исследованы параметры работоспособности создаваемого восстановительного слоя. Основная задача сводилась к оценке качества покрытия, а именно, наличие пористости и дефектности структуры, состояние адгезионной зоны и геометрические характеристики покрытия.

На рисунке 4 показано состояние поверхности восстановительного покрытия после лазерной наплавки присадочной проволоки Нп-55 (рис. 4а) и упрочняющего керамического покры-

тия, полученного высокоскоростной лазерной наплавкой (рис. 4б).

Состояние поверхности покрытий удовлетворительное: видимых трещин, сколов и непроваров не наблюдается. Наплавленный слой имеет плотную структуру, без видимых дефектов. Особенностью лазерной наплавки и лазерного термоупрочнения является формирование «белого» кристаллизационного слоя, состоящего из сильнодеформированного мартенсита. Зона адгезии не имеет дефектов и характеризуется тонкой линией зоны переплава с минимальным термическим воздействием на стальную подложку.

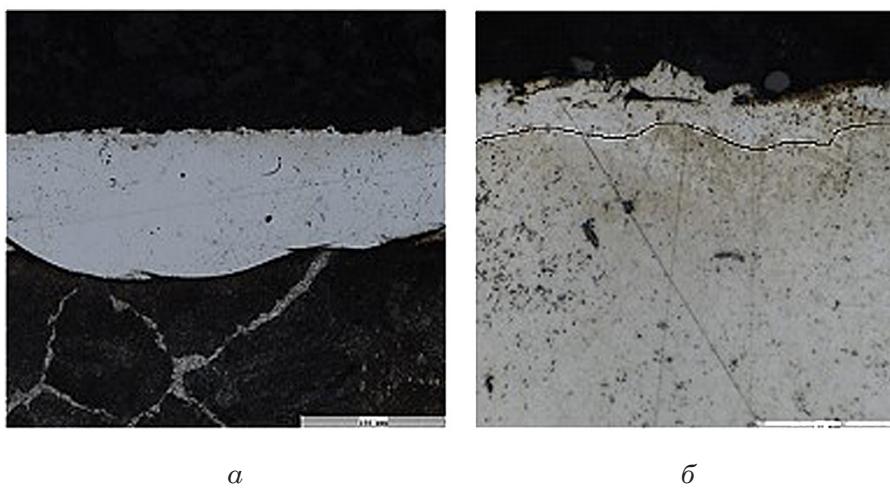
Толщина наплавленного покрытия колеблется от 120 до 150 мкм. Керамическое упрочняющее покрытие на поверхности наплавленного слоя имеет более светлый тон, его толщина составляет 8-10 мкм.

Выводы. Предложена оригинальная технология восстановления изношенных деталей машин типа «вал» с комбинацией технологии наращивания восстановительного слоя методом лазерной наплавки и упрочнения восстановительного слоя методом наплавки на восстановительный слой керамического покрытия. Толщина покрытия колеблется от 155 до 160 мкм, что позволяет восстанавливать детали машин с малыми износами с минимальной механической обработкой. Получаемые восстановительные покрытия обладают устойчивой адгезионной зоной, низкой пористостью, отсутствием трещин. Комбинированная технология за счет упрочняющего керамического слоя позволяет увеличивать физико-механические свойства поверхности восстановительного покрытия, тем самым обеспечивая повышение ресурса деталей.

Список источников

- Болотов А. Н., Новиков В. В., Новикова О. О. Применение износостойких керамических покрытий

Рисунок 4 – Структура восстановительного слоя (а) и упрочняющего покрытия на поверхности восстановительного слоя (б)



в строительстве // Вестник Тверского государственного технического университета. 2016. № 2(30). С. 112-114. EDN WKOANF.

2. Букаева А. З. Технология лазерной наплавки деталей машин // Достижения науки и образования. 2023. № 2(89). С. 19-21. EDN YFGHOV.

3. К вопросу адгезионной прочности керамических покрытий со стальной поверхностью / А. Г. Ипатов [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 4(72). С. 58-64.

4. Мишин М. М., Медведев В. М. Методы нанесения керамических покрытий металлов // Наука и Образование. 2019. Т. 2, № 2. С. 220. EDN YPMLLK.

5. Перспективные направления применения лазерной наплавки при реставрации деталей машин и механизмов / В. А. Рыбин [и др.] // Сварка и диагностика. 2020. № 6. С. 44-48. EDN YYKKCP.

6. Структура износостойких плазменных покрытий из никель-керамической смеси / Ю. С. Чесов [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 405-409. EDN TZDZGL.

7. Технологические особенности формирования пористых функциональных керамических покрытий на алюминии методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах / М. А. Марков [и др.] // Сварочное производство. 2020. № 3. С. 23-29. EDN CQLDCX.

8. Трибологические показатели упрочняющих и восстановительных керамических покрытий на основе карбида бора / А. Г. Ипатов [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 7. С. 12-19. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-7-12-19. EDN MMYERY.

9. Функциональные керамические и композитные материалы практического назначения: синтез, свойства, применение / Отв. ред.: Е. К. Папынов, С. Б. Ярусова. Владивосток: Владивосток. гос. ун-т, 2022. 246 с. DOI 10.24866/9736-0677-0/2022-246. EDN FRIOBW.

10. Шмыков С. Н., Ипатов А. Г., Новикова Л. Я. Эффективность различных способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин на примере стрельчатой лапы культиватора // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1(69). С. 64-71. DOI 10.48012/1817-5457_2022_1_64. EDN MJAOEQ.

11. Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора / А. Г. Ипатов [и др.] // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 71-76.

12. Ипатов А. Г., Волков К. Г., Малинин А. В. Керамические антифрикционные покрытия подшипниковых сопряжений турбокомпрессоров ДВС // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2024. № 4. С. 33-38. DOI 10.31044/1684-2561-2024-0-4-33-38. EDN RZBJSF.

13. Kharanzhevskiy E. V. [et al.]. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication. Sci Rep. 2023; 13: 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>.

14. Kharanzhevskiy E. V. [et al.]. Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials. Wear. 2021; 477: 203835. DOI 10.1016/j.wear.2021.203835. EDN GCSTIQ.

References

1. Bolotov A. N., Novikov V. V., Novikova O. O. Primenenie iznosostojkix keramicheskix pokry'tij v stroitel'stve // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2016. № 2(30). S. 112-114. EDN WKOANF.
2. Bukaeva A. Z. Texnologiya lazernoj naplavki detalej mashin // Dostizheniya nauki i obrazovaniya. 2023. № 2(89). S. 19-21. EDN YFGHOV.
3. K voprosu adgezionnoj prochnosti keramicheskix pokry'tij so stal'noj poverxnost'yu / A. G. Ipatov [i dr.] // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2022. № 4(72). S. 58-64.
4. Mishin M. M., Medvedev V. M. Metody' naneseniya keramicheskix pokry'tij metallov // Nauka i Obrazovanie. 2019. T. 2, № 2. S. 220. EDN YPMLLK.
5. Perspektivny'e napravleniya primeniya lazernoj naplavki pri restavracii detalej mashin i mexanizmov / V. A. Ry'bin [i dr.] // Svarka i diagnostika. 2020. № 6. S. 44-48. EDN YYKKCP.
6. Struktura iznosostojkix plazmennix pokry'tij iz nikel'-keramicheskoy smesi / Yu. S. Chesov [i dr.] // Aktual'ny'e problemy' v mashinostroenii. 2015. № 2. S. 405-409. EDN TZDZGL.
7. Texnologicheskie osobennosti formirovaniya poristy'x funkcional'ny'x keramicheskix pokry'tij na alyuminii metodom mikrodugovogo oksidirovaniya v silitatny'x elektrolitax / M. A. Markov [i dr.] // Svarochnoe proizvodstvo. 2020. № 3. S. 23-29. EDN CQLDCX.
8. Tribologicheskie pokazateli uprochnyayushhix i vosstanovitel'nyx keramicheskix pokry'tij na osnove karbida bora / A. G. Ipatov [i dr.] // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2021. № 7. S. 12-19. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-7-12-19. EDN MMYERY.
9. Funkcional'ny'e keramicheskie i kompozitny'e materialy' prakticheskogo naznacheniya: sintez, svojstva, primenie / Otv. red.: E. K. Papy'nov, S. B. Yarusova. Vladivostok: Vladivostok. gos. un-t, 2022. 246 s. DOI 10.24866/9736-0677-0/2022-246. EDN FRIOBW.
10. Shmy'kov S. N., Ipatov A. G., Novikova L. Ya. E'ffektivnost' razlichnyx sposobov vosstanovleniya i uprochneniya rabochix organov pochvoobrabatyvayushhix mashin na primere strel'chatoj lapy' kul'tivatora // Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2022. № 1(69). S. 64-71. DOI 10.48012/1817-5457_2022_1_64. EDN MJAOEQ.
11. Fiziko-mekanicheskie svojstva keramicheskix pokry'tij, poluchaemyx korotkoimpul'snoj lazernoj naplavkoj poroshkovoj smesi na osnove bora / A. G. Ipatov [i dr.] // Agroinzheneriya. 2023. T. 25, № 1. S. 71-76.
12. Ipatov A. G., Volkov K. G., Malinin A. V. Keramicheskie antifrikcionny'e pokry'tiya podshipnikovyx sопryazhenij turbokompressorov DVS // Remont.

Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2024. № 4. S. 33-38. DOI 10.31044/1684-2561-2024-0-4-33-38. EDN RZBJSF.

13. Kharanzhevskiy E. V. [et al.]. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication. *Sci Rep.* 2023; 13: 17362. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44702-6>.

14. Kharanzhevskiy E. V. [et al.]. Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials. *Wear.* 2021; 477: 203835. DOI 10.1016/j.wear.2021.203835. EDN GCSTIQ.

Сведения об авторах:

А. Г. Ипатов✉, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>;

С. Н. Шмыков, кандидат экономических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2103-8695>

Удмуртский ГАУ, 426069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 9

Ipatow.al@yandex.ru

Original article

TECHNOLOGY OF APPLYING THIN RESTORATIVE COATINGS BY LASER CLADDING

Alexey G. Ipatov✉, Sergey N. Shmykov

Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

Ipatow.al@yandex.ru

Abstract. Wear limits for 48 % of machine parts are reached at wear values less than 0.1 mm. Traditional restoration processes produce coating thicknesses greater than 0.5 mm, which increases restoration costs caused by the expensive machining. The properties of restoration coatings are limited due to the use of standard metal alloys as filler materials. The purpose of the research is to implement a combined technology for building a restorative coating using traditional laser surfacing technology, followed by hardening the restorative coating with a ceramic layer. The first stage of this combined technology involves applying a restoration layer to the worn surface using traditional laser cladding with Np-55 filler wire. The second stage involves hardening the restoration layer using high-speed laser cladding of a ceramic composite based on boron carbonitride. Pulsed laser radiation generated by a BULAT LRS-300 laser system is used to form the restoration layer. Cladding is performed in an argon shielding gas environment. The coating quality was assessed by optical analysis using the Olympus GX53 inverted microscope. The restoration coating analysis revealed a thickness of 150 μm , with the hardened layer being 8 μm . The restoration coating exhibits high density and satisfactory adhesion to the part surface and the ceramic layer.

Key words: restorative coating, high-speed laser cladding, ceramic composite, combined technology.

For citation: Ipatov A. G., Shmykov S. N. Technology of applying thin restorative coatings by laser cladding. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy.* 2025; 4 (84): 163-168. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_163-168.

Authors:

A. G. Ipatov✉, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>;

S. N. Shmykov, Candidate of Economical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2103-8695>

Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

Ipatow.al@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; одобрена после рецензирования 27.11.2025; принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 27.11.2025; accepted for publication 01.12.2025.