

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 6 (180). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 6 (180). P. 40-48.

Научная статья
УДК 621.923
doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-40-48

Технология и оборудование послойного восстановления деталей в зависимости от степени износа их поверхностей

Петр Александрович Витязь¹, д.т.н.

Михаил Львович Хейфец², д.т.н.

Николай Леонидович Грецкий³, нач. отдела

¹ ГНПО Порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

^{2,3} Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

¹ vitiaz@pminstitute.by, <https://orcid.org/0000-0001-9950-2120>

² mlk-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>

³ nikolay_gnl@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Аннотация.** Рассматривается концепция послойной реновации поверхностей деталей машин с целью повышения их эксплуатационной надежности и долговечности. Отличается, что физико-механическое состояние поверхностного слоя значительно влияет на работоспособность деталей. Основные причины износа поверхностей включают абразивное и адгезионное изнашивание, усталостное разрушение и коррозию. Внедрение адаптивных технологий, основанных на синтезе электрофизических и термомеханических процессов, является ключевым шагом эффективному восстановлению деталей. Предлагается метод, использующий сочетание наплавки легированных ферромагнитных порошков (ФМП) в электромагнитном поле с поверхностно-пластическим деформированием и наплавкой низколегированной проволоки с ротационным резанием. Описывается технологическая установка, обеспечивающая гибкость настройки с возможностью достижения высокого качества покрытий. Различные режимы упрочнения, в зависимости от степени износа, интегрируют процессы наплавки и резания, и позволяют минимизировать затраты на последующую механическую обработку. Исследованы микроструктуры образованного поверхностного слоя, выявлены их характеристики и определено влияние на эксплуатационные свойства. Предложенная концепция послойной реновации и интеграция современных технологий производства создают основу для внедрения инновационных методов упрочнения и восстановления в практику ремонта, обеспечивая улучшения в физико-механических характеристиках восстановленных узлов. Практическая значимость работы заключается в создании эффективного метода восстановления деталей, позволяющего дифференцированно подходить к компенсации износа, улучшать физико-механические характеристики материала, сокращать затраты на последующую механическую обработку. Полученные результаты открывают новые возможности для внедрения адаптивных методов упрочнения и реновации в современное ремонтное производство, обеспечивая повышение надежности и долговечности деталей машин.*

Ключевые слова: проектирование оборудования, комбинированные импульсные термомеханические воздействия, электромагнитное поле, деформирующий инструмент, упрочнение и восстановление деталей

Для цитирования: Витязь П.А., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л. Технология и оборудование послойного восстановления деталей в зависимости от степени износа их поверхностей // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 6 (180). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-40-48

Technology and equipment for layer-by-layer parts reconditioning depending on the degree of their surface wear

Peter A. Vityaz¹, D. Eng.
Mikhail L. Kheifets², D. Eng.
Nikolai L. Gretsky³, DM

¹ The National Academy of Sciences of Belarus. The state scientific institution «Powder metallurgy institute» (SSI PMI), Minsk, Republic of Belarus

^{2, 3} Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

¹ vityaz@pminstitute.by

² mlk-z@mail.ru

³ nikolay_gnl@mail.ru

Abstract. The concept of layer-by-layer reconditioning of the surfaces of machine parts is viewed for increasing their operational reliability and durability. The difference lies in the fact that physical and mechanical condition of the surface layer significantly affects the operability of the parts. The main causes of surface wear include abrasive and adhesive wear, fatigue failure, and corrosion. The introduction of adaptive technologies based on the synthesis of electrophysical and thermomechanical processes is a key step in the effective parts reconditioning. A proposed method consists in using a combination of alloyed ferromagnetic powders (FMP) buildup in an electromagnetic field with surface yield strain and low-alloyed wire buildup with rotary cutting. A unit for production is described that provides flexibility of configuration with the ability to achieve high-quality coatings. Various hardening modes, depending on the degree of wear, integrate the processes of buildup and cutting, and minimize the cost of subsequent machining. The microstructures of the formed surface layer are investigated, their characteristics are revealed, and their effect on operational properties is estimated. The proposed concept of layer-by-layer renovation and the integration of modern production technologies create the basis for the introduction of innovative methods of hardening and restoration into repair practice, providing improvements in the physical and mechanical characteristics of the restored components. The practical significance of the work lies in the creation of an effective method for restoring parts, allowing a differentiated approach to wear compensation, improving the physical and mechanical characteristics of the material, and reducing the cost of subsequent machining. The results obtained open up new opportunities for the introduction of adaptive methods of hardening and renovation in modern repair production, providing increased reliability and durability of machine parts.

Keywords: process equipment design, combined pulsed thermomechanical effects, electromagnetic field, deforming tool, hardening and reconditioning of parts

For citation: Vityaz P.A., Kheifets M.L., Gretsky N.L. Technology and equipment for layer-by-layer parts reconditioning depending on the degree of their surface wear / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 6 (180). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-40-48

Введение

Эксплуатационная надежность и долговечность современных узлов машин в значительной степени определяются физико-механическим состоянием их поверхностного слоя [1]. Анализ отказов показывает, что доминирующими факторами потери работоспособности деталей и изделий остаются абразивное и адгезионное изнашивание, усталостное разрушение материала, а также повреждения и поломки, вызванные явлениями ползучести, коррозионной и эрозионной активностью сред.

Поэтому особую значимость приобретают адаптивные технологии послойной реновации [2]. Данный подход позволяет дифференцированно подходить к компенсации износа, выбирая способ воздействия в строгом соответствии с фактическим износом поверхности. В современной практике наиболее эффективным считается синтез различных электрофизических и термомеханических технологических приемов в рамках единого цикла, использующих энергию электромагнитных полей в сочетании с дополнительным воздействием деформирующих и режущих инструментов [2 – 4].

**Концепция послойной реновации
 поверхностей деталей в зависимости
 от степени их износа**

Для повышения качественного состояния поверхностных слоев при минимальных затратах на восстановление деталей, в зависимости от степени их износа, предложена концепция послойной реновации поверхностей деталей, использующая электрофизические термомеханические источники энергии. Эта концепция заключается в выборе и комбинировании различных технологических воздействий в процессе послойного восстановления деталей. [4, 5].

Механизм формирования модифицированных слоев разделяется на две функциональные стадии (рис. 1):

1. Формирование физико-механических свойств осуществляется наплавкой легированных ферромагнитных порошков (ФМП) под воздействием электромагнитного поля. Совмещение термического цикла с поверхностно-пластическим деформированием (ППД) обеспечивает мелкодисперсную структуру металла и благоприятные остаточные напряжения сжатия.

2. Восстановление геометрии для значительной компенсации износа осуществляется наплавкой низколегированной проволоки в сочетании с упрочняюще-размерным ротационным резанием.

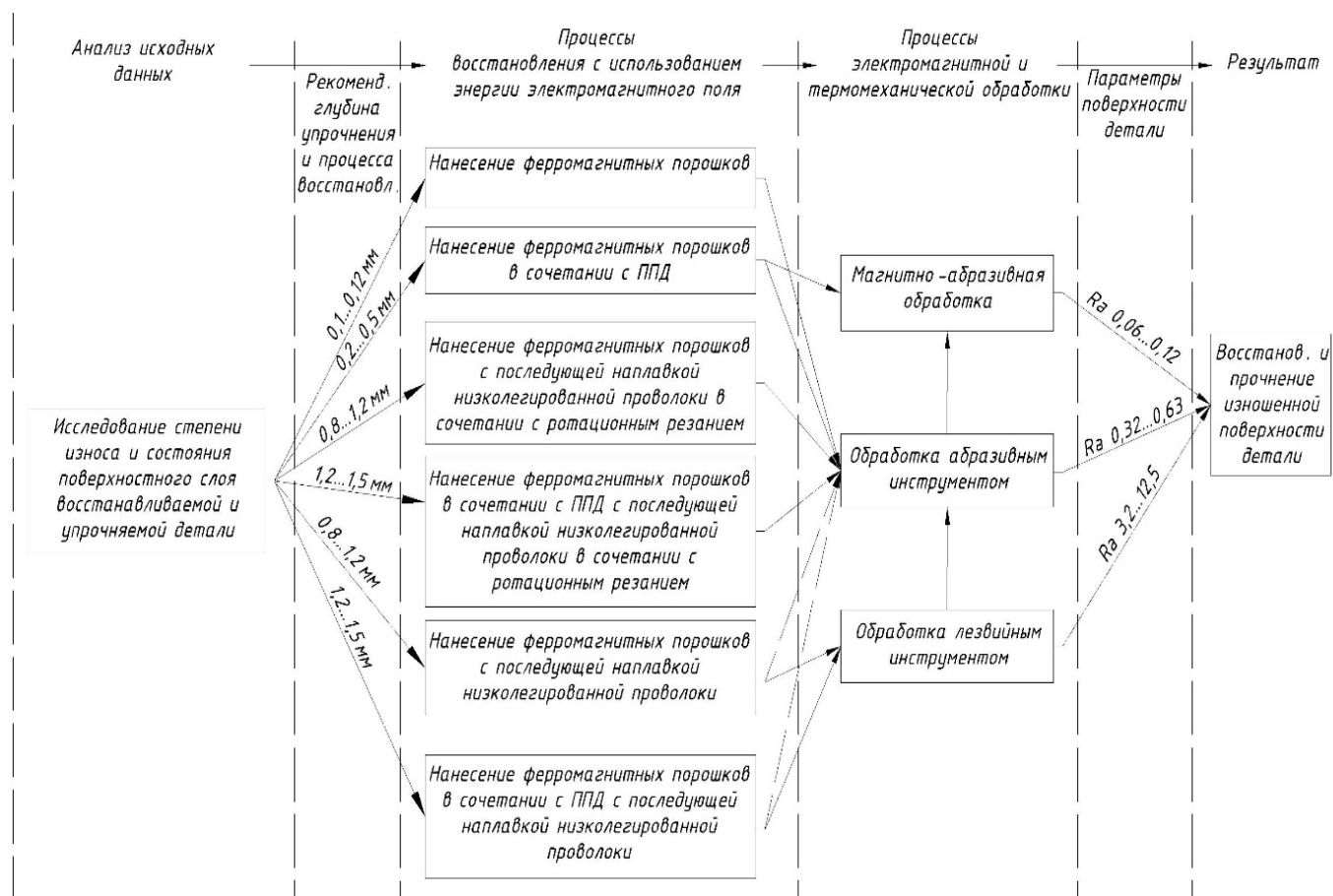


Рис. 1. Блок схема упрочнения и восстановления поверхностей деталей машин комплексными методами

Fig. 1. Block diagram of hardening and restoration of surfaces of machine parts by complex methods

Технологическая установка для нанесения ферромагнитных порошков должна обладать функциями, позволяющими комбинировать процесс упрочнения деталей в электромагнитном поле с поверхностно-пластическим деформированием [2, 6].

Применение электромагнитного поля совместно с деформирующим и режущим инструментом для восстановления и упрочнение поверхностей

В комплексном методе восстановления физико-механические свойства получаемых покрытий формируются в результате наплавки легированных ферромагнитных порошков с возможностью одновременного проведения поверхностно-пластического деформирования. Геометрические характеристики, в свою очередь, создаются в процессе наплавки низколегированной углеродистой проволоки в сочетании с упрочняюще-размерным ротационным резанием.

Принципиальная блок-схема технологической установки, реализующей комплексный метод упрочнения и восстановления физико-механических свойств поверхностей, показана на рис. 2. Где X1...X6 – электрические разъемы; ФВ – фильтр влага-отделитель; ЭРРГ – электронный регулятор расхода газа; ДД – датчик давления; М1 и М2 двигатели вентиляторов охлаждения силовых диодов и блока силовых ключей соответственно; М3 – двигатель протяжки проволоки для наплавки; РП – редуктор протяжки проволоки; БМК1 и БМК2 биметаллические контакты силовых диодов и блока силовых ключей соответственно; КПП – клапан подачи газа; УПФ – устройство подачи флюса; K1...K3 электромагнитные реле управления; Т1 – сварочный трансформатор; SA1 – переключатель режима нанесения ФМП или проволоки; SB4...SB4 – выбор Режим упрочнения.

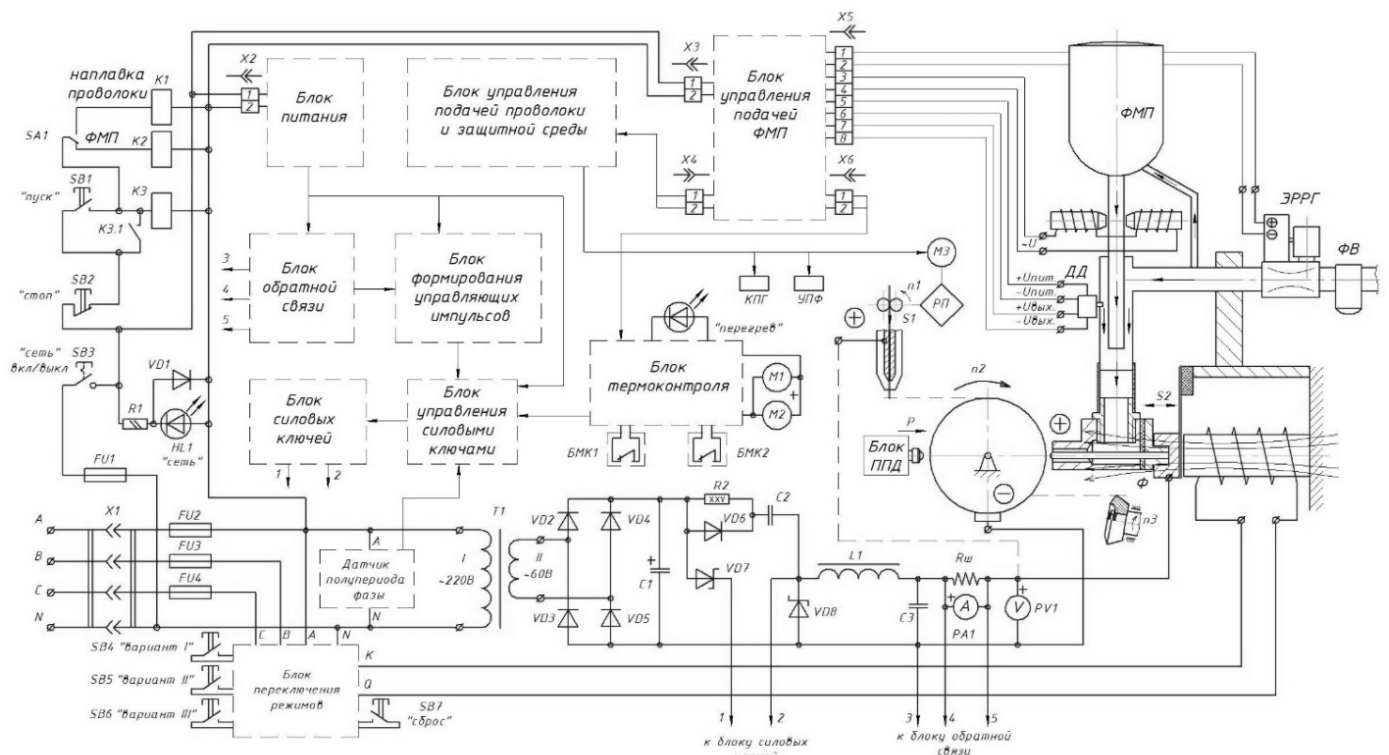
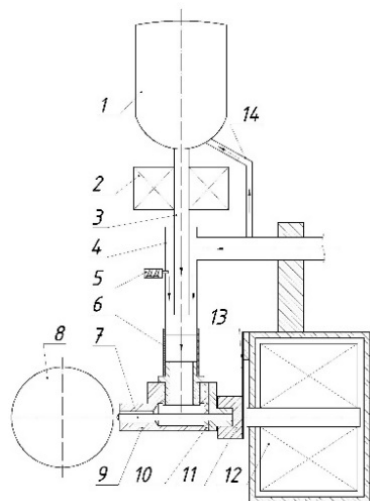


Рис. 2. Принципиальная блок-схема технологической установки

Fig. 2. Schematic block diagram of the engineering unit

Дозирующее устройство для подачи ФМП и применяемый импульсный полюсный наконечник представлены на рис. 3. Где 1 – бункер, 2 и 12 – электромагнитные катушки, 3 – медная трубка, 4 – каркас установки,

5 – датчик давления, 6 – резиновая трубка, 7 – электрод, 8 – заготовка, 9 – полюсный наконечник, 10 – текстолитовая пластина, 11 – державка, 13 – гибкая металлическая пластина, 14 – трубка.



а)



б)



в)

Рис. 3. Дозирующее устройство для подачи порошка с импульсным полюсным наконечником:

а – структурная схема; б – внешний вид оборудования на базе токарно-винторезного станка; в – внешний вид импульсного полюсного наконечника с образовавшимися цепочками порошка под действием электромагнитного поля

Fig. 3. Powder dosing device with a pulse pole tip:

а – a block diagram; б – the appearance of the equipment based on a turning and screw-cutting machine; в – the appearance of a pulsed pole tip with formed powder chains under the influence of an electromagnetic field

Гибкая система управления параметрами технологического источника, реализованная в разработанной электронной схеме, обеспечивает возможность переключения режимов работы сварочного трансформатора между операциями нанесения ферромагнитных

порошков и последующей наплавкой проволоки. При этом, оборудование позволяет интегрировать процесс упрочнения деталей в электромагнитном поле с ППД, а также совмещать наплавку низколегированной проволоки (в защитной газовой среде или с применением

флюса) с ротационным резанием. Оптимальные условия для формирования покрытий обеспечиваются благодаря особой схеме подключения установки, где электрический ток и магнитная индукция имеют одинаковое направление – от полюсного наконечника к поверхности детали, что гарантирует стабильность технологического процесса. [6, 7].

Гибкость производственного процесса, реализуемого технологическим комплексом, обеспечивается возможностью настройки параметров. Ключевым фактором является регулировка фазового угла между импульсами напряжения питания электромагнитной катушки U_k и сварочного трансформатора U_t (рис. 4) [7]. Технологический комплекс в зависимости от требуемых свойств поверхностей деталей и области их применения способен реализовать три режима упрочнения:

Режим I (рис. 4, а) применяется для упрочнения поверхностей с созданием

диффузионного слоя из ФМП. В этом режиме напряжение сварочного трансформатора отстает от напряжения электромагнитной катушки на угол 60° .

Режим II (рис.4, б) рекомендуется для восстановления и упрочнения, изношенных до 0,3 мм поверхностей деталей. Данный режим характеризуется отставанием напряжения, питающего сварочный трансформатор от напряжения, питающего электромагнитную катушку на угол 120° , а также нанесением порошка в сочетании с ППД.

Режим III (рис. 4, в) используется при восстановлении и упрочнении поверхностей деталей машин со значительным износом до 1,5 мм. Характерной особенностью этого режима является отсутствие фазового смещение напряжения, питающего сварочный трансформатор, относительно напряжения, питающего электромагнитную катушку, и последующая наплавка низколегированной проволоки.

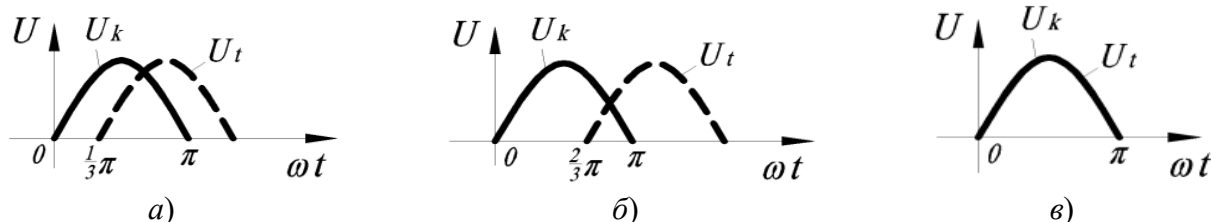


Рис. 4. Схемы режимов фазового смещения напряжения цепи сварочного тока U_t относительно напряжения цепи электромагнитной катушки U_k :

ω – угловая частота переменного тока; t – время

Fig. 4. Diagrams of the phase shift modes of the welding current circuit voltage U_t relative to the voltage of the electromagnetic coil circuit U_k :

ω – the angular frequency of the alternating current; t – the time

Описание работы дозирующего устройства для транспортировки порошка к полюсному элементу с импульсным воздействием

Электромагнитная система установки функционирует следующим образом. Катушка 2 работает от переменного напряжения, что предотвращает намагничивание ферропорошка и обеспечивает его точное дозирование. Медная трубка 3 разработана специально для

равномерного распределения магнитного потока и быстрой реакции системы на изменения количества подаваемого порошка. Механизм движения наконечника формируется за счет взаимодействия катушки 12, гибкой металлической пластины 13 и резиновой трубки 6. Концентрация магнитного потока достигается благодаря текстолитовой пластине 10 и алюминиевому полюсному наконечнику 9, направляющему поле на электрод 7. Система подачи воздуха через трубку 14 предотвращает

образование арочных структур ферропорошка при переходе из бункера 1 в медную трубку.

Процесс дозирования реализуется через автоматическую регулировку. Воздушный поток от компрессора транспортирует частицы порошка из медной трубки. Магнитное поле катушки 2 удерживает порошок в нужном положении. При избыточной подаче активируется датчик давления 5, передающий сигнал в блок управления. Система корректирует напряжение катушки 2, регулируя количество подаваемого порошка. При недостаточной подаче происходит обратный процесс увеличения подачи материала. Охлаждение электрода обеспечивается воздушным потоком и алюминиевым корпусом наконечника. Очистка рабочей зоны происходит благодаря вибрации наконечника и воздушному потоку между импульсами.

Комбинированные технологии упрощений и восстановления поверхностей деталей, объединяющая процессы наплавки низкоуглеродистой проволоки в защитной среде с

одновременной термомеханической обработкой ротационным инструментом в момент кристаллизации слоя, демонстрирует высокую эффективность в устранении дефектов структуры и повышение усталостной прочности деталей. Применение ротационного резца в качестве деформирующего элемента позволяет достичь оптимальных физико-механических характеристик и геометрии поверхности, существенно сокращая объём последующей механической обработки.

Микроструктуры поверхностного слоя, полученные при импульсном термомеханическом воздействии

При изучении микроструктуры поверхностного слоя выявлено, что кроме зоны наплавки, образующейся в результате непосредственного нанесения ферромагнитного порошка и последующей наплавки низколегированной проволоки, в поверхностных слоях присутствуют несколько зон (рис. 5).

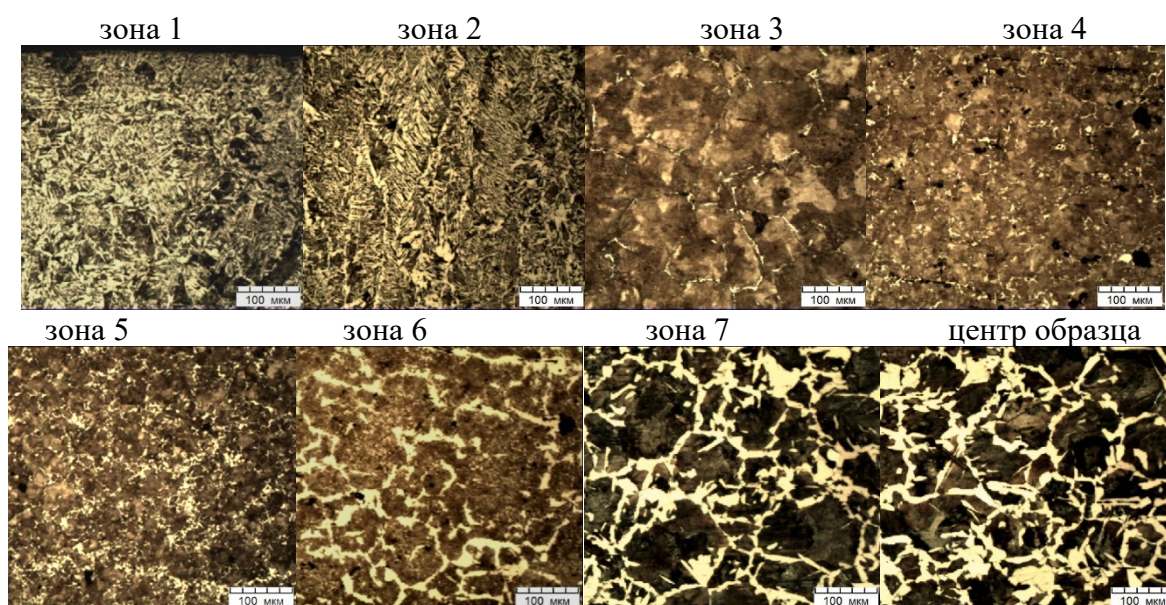


Рис. 5. Микроструктуры поверхностного слоя в различных зонах

Fig. 5. Microstructures of the surface layer in various zones

Зона наплавки (1) характеризуется дисперсным, относительно равноосным зерном. Далее следует зона столбчатой структуры,

ориентированная по направлению теплоотвода (2). Ниже идет зона достаточно мелких, равноосных зерен с вкраплениями дисперсной фазы,

расположенной по границам зерен (3). В следующей зоне (4) видимое зерно еще более измельчается, а количество светлой фазы становится больше. В зоне 5 данная фаза наиболее активно формируется по границам вновь образующегося зерна, более крупного, чем в зоне (3). Ниже в зоне (6), это зерно уже полностью сформировалось, при этом светлая фаза выглядит как оторочка в виде сплошной и прерывистой сетки вокруг темных зерен. В зонах 6 и 7 видно, что темное зерно является перлитом, а светлая оторочка – ферритом. Ниже зоны (7) микроструктура по виду все более приближается к микроструктуре основного материала.

В целом, сформированный поверхностный слой может быть классифицирован как гетерогенная феррито-перлитная структура с переменной степенью дисперсности и градиентным распределением концентрации углерода. Ключевым фактором, определяющим итоговую морфологию и эксплуатационные свойства каждой из выделенных зон, является локальная скорость охлаждения и интенсивность термомеханического цикла в конкретной точке сечения. [8].

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что предложенная концепция послойной реновации, реализованная на базе специализированного оборудования с использованием импульсных электрофизических и термомеханических воздействий, представляет собой эффективное решение актуальной задачи ремонтного производства машиностроения. Разработанная технология позволяет реализовать дифференцированный подход к восстановлению деталей в результате, который обеспечивается восстановлением геометрических параметров поверхностей в соответствии с их фактическим износом и достигается существенное улучшение комплекса физико-механических и триботехнических характеристик материала за счет формирования градиентных микроструктур. Интеграция процессов наплавки с

поверхностно-пластическим деформированием и резанием в едином цикле позволяет минимизировать затраты на последующую обработку и повысить ресурс восстановленных узлов.

В результате, созданный научно-технический задел открывает широкие возможности для внедрения адаптивных методов упрочнения и реновации в практику современного ремонтного производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев А.С., Дальский А.М., Клименко С.А., Полонский Л.Г., Хейфец М.Л., Ящерицин П.И. Технологические основы управления качеством машин. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.
2. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. М.: Колос, 1981. 351 с.
3. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272с.
4. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель: ИММС НАНБ, 1999. 276 с.
5. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж.А. Мрочка. Минск: Дизайн ПРО, 1997. 208 с.
6. Хейфец М.Л., Чемисов Б.П., Грецкий Н.Л. Технология и оборудование для комбинированного восстановления и упрочнения деталей двигателя внутреннего сгорания // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А.Соловьева. 2007. № 1 (11). С.144–147.
7. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Грецкий Н.Л. Электромеханика импульсных процессов наплавки покрытий ферромагнитными порошками // Упрочняющие технологии и покрытия, 2008. № 3. С. 51–56.
8. Анисович А.Г., Андрушевич А.А. Микроструктура черных и цветных металлов. Минск, Белорусская наука, 2015. 131с.
9. Kolmakov A.G. Technological Control on the Heredity of Operational Quality Parameters Prement. In: Engineering Failure Analysis. Chapter 8 / Ed. By K.Thanapalan. London: IntechOpen, 2020. pp.141–160.
10. Vityaz P.A. Synergetic Technologies of Direct Layer Deposition in Aerospace Additive Manufacturing / Ed. By F. Fores and R. Boyer. Cambridge: Elsevier. 2019. pp. 427–448.

REFERENCES

1. Vasiliev A.S., Dalskiy A.M., Klimenko S.A., Polonskiy L.G., Kheifets M.L., Lizarditsin P.I.

Technological foundations of machine quality management, Moscow: Mashinostroenie, 2003. 256 p.

2. Volovik E.L. Handbook of restoration of parts. Moscow: Kolos, 1981. 351 p.

3. Kheifets M.L. Design of combined processing operations. Moscow: Mashinostroenie, 2005. 272 p.

4. Kheifets M.L., Kozhuro L.M., Mrochek J.A. Self-organization processes at surface formation. Gomel: IMMS NANB, 1999. pp. 276.

5. Treatment of wear-resistant coatings / Edited by J.A. Mrochek. Minsk: Design PRO, 1997. 208 p.

6. Kheifets M.L., Chemisov B.P., Gretskey N.L. Technology and equipment for combined restoration and hardening of internal combustion engine parts // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov. 2007. No. 1 (11). pp.144–147.

7. Kheifets M.L., Kozhuro L.M., Gretskey N.L. Electromechanics of pulsed coating processes with ferromagnetic powders // Hardening technologies and coatings, 2008, No. 3, pp. 51–56.

8. Anisovich A.G., Andrushevich A.A. Microstructures of ferrous and non-ferrous metals. Minsk, Belorusskaya nauka, 2015. 131p.

9. Kolmakov A.G. Technological Control on the Heredity of Operational Quality Parameters Prement. In: Engineering Failure Analysis. Chapter 8 / Ed. By K.Thanapalan. London: IntechOpen, 2020. pp.141–160.

10. Vityaz P.A. Synergetic Technologies of Direct Layer Deposition in Aerospace Additive Manufacturing / Ed. By F. Fores and R. Boyer. Cambridge: Elsevier. 2019. pp. 427–448.

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 17.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 17.05.2026.

The article was submitted 17.02.2026; approved after reviewing 20.03.2026; assepted for publication 17.05.2026.

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 А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.06.2026. Выход в свет 30.06.2026.

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

