

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 3. Number 87 (2025). Pp. 44–57
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.87.03.004>

УДК 621

NANOMATERIALS AND SYNTHESIS OF HYBRID TECHNOLOGIES IN SHAPING PARTS OF TRANSPORT ENGINEERING

V. Perevertov¹, M. Abulkasimov^{2}, G. Afanasyev², Y.M. Tanzharykov³*

¹Samara State University of Transport, Samara, Russia;

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

³ RSE on the PHB "Gylym Ordasy" by the Committee of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan.

E-mail: abilkk@mail.ru

Valeriy Perevertov — candidate of Technical Sciences, Samara State University of Railways and Communications, Samara, Russian Federation

E-mail: prkom@samgups.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

Manas Abulkasimov — candidate of Technical Sciences, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

E-mail: abilkk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

Gennady Afanasev — candidate of Technical Sciences, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

E-mail: afanasyev-g@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

Tanzharykov Yerzhan Maratovich — Head of the Information Technology Department. RSE on the PHB "Gylym Ordasy" by the Committee of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan

E-mail: tanzharykove@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9343-7284>.

© V. Perevertov, M. Abulkasimov, G. Afanasyev, Y.M. Tanzharykov

Abstract. In modern railway transport, ensuring the quality, reliability, and durability of rolling stock (RS) and track machines (TM) is critical. Effective management of manufacturing processes for parts, components, and assemblies is possible through the implementation of additive and nanotechnologies, as well as flexible manufacturing systems integrated with modern information management and transport systems. The study aims to analyze and improve engineering processes in railway transport by using traditional, additive, and nanotechnologies to enhance the quality of parts. Specific objectives include: investigating the potential of additive technologies (3D printing) to produce complex components; evaluating the effectiveness of nanotechnologies to improve strength, wear resistance, and corrosion resistance of parts and assemblies; developing and optimizing quality control methods using modern sensors and devices, including industrial computed tomography; assessing the economic impact of implementing nanostructured coatings and advanced production processes. Additive technologies allow the production of complex parts and reduce the weight of components without compromising strength. Nanotechnologies enable the formation of defect-free materials and nanoscale structures, increasing durability and service life of parts by 2–5 times. Quality control is performed via surface diagnostics and incoming material inspection. The introduction of nanostructured coatings on cutting tools, springs, and railway components improves wear resistance, strength, and reliability. Modern synthesis and material processing methods reduce production costs, extend maintenance



intervals, and enhance the efficiency of railway engineering. Integration of traditional, additive, and nanotechnologies with advanced control and management systems improves the quality, reliability, and economic efficiency of railway transport component production. Technologies such as ultra-high-strength springs and nanocoatings ensure longevity, reliability, and enhanced performance of RS and TM under the conditions of JSC “Russian Railways.”

Keywords: nanotechnology, additive technologies, railway engineering, flexible manufacturing systems, nanocoatings, quality control, 3D printing

For citation: V. Perevertov, M. Abulkasimov, G. Afanasyev, Y.M. Tanzharykov. Nanomaterials and synthesis of hybrid technologies in shaping parts of transport engineering // Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 87. Pp. 44–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.87.03.004>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

НАНОМАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ КӨЛІК МАШИНАЛАРЫН ЖАСАУ БӨЛШЕКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУ КЕЗІНДЕГІ ГИБРИДТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫҢ СИНТЕЗІ

В. Перевертов¹, М. Абулкасимов^{2}, Г. Афанасьев², Е.М. Танжарыков³*

¹Самара мемлекеттік жол және қатынас университеті, Самара, Ресей;

²Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей;

³ҚР ҰӘМ ҒК "Ғылым ордасы" ШЖҚ РМК, Алматы, Қазақстан.

E-mail: abilkk@mail.ru

Валерий Перевертов — т.ғ.к., Самара мемлекеттік жол және қатынас университеті, Самара, Ресей Федерациясы

E-mail: prkom@samgups.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

Геннадий Афанасьев — т.ғ.к., Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы

E-mail: afanasyev-g@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

М. Абулкасимов — т.ғ.к., Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы, abilkk@mail.ru

E-mail: abilkk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

Мадина Акаева — т.ғ.к., Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: akaeva.madina@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

Танжарыков Ержан Маратович — Ақпараттық технологиялар бөлімінің басшысы. ҚР ҰӘМ ҒК "Ғылым ордасы" ШЖҚ РМК

E-mail: tanzharykove@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9343-7284>.

© В. Перевертов, М. Абулкасимов, Г. Афанасьев, Е.М. Танжарыков

Аннотация. Қазіргі заманғы теміржол тасымалдау саласында подвижной құрам (ПС) және жол машиналарының (ПМ) сапасы, сенімділігі және беріктігін арттыру маңызды. Дәстүрлі, аддитивтік және нанотехнологияларды қолдану, сондай-ақ заманауи ақпараттық-басқару және транспорттық жүйелермен интеграцияланған икемді өндіріс жүйелерін енгізу арқылы бөлшектер мен агрегаттарды өндіру процестерін тиімді басқаруға болады. Зерттеудің мақсаты – теміржол техникасының бөлшектерін өндіру сапасын арттыру үшін инженерлік процестерді дәстүрлі, аддитивтік және нанотехнологияларды қолданып жетілдіру. Міндеттері: күрделі бөлшектерді өндіру үшін аддитивтік технологиялардың (3D-басып шығару) мүмкіндіктерін зерттеу; нанотехнологиялардың бөлшектердің беріктігін, тозуға және коррозияға төзімділігін арттыру тиімділігін бағалау; заманауи датчиктер мен

құрылғыларды, оның ішінде өндірістік компьютерлік томографияны қолдана отырып сапаны бақылау әдістерін әзірлеу және онтайландыру; наноқабаттар мен жаңа өндіріс технологияларын енгізудің экономикалық тиімділігін бағалау. Аддитивтік технологиялар арқылы кез келген күрделілік деңгейіндегі бөлшектерді жасауға және олардың массасын азайтуға болады. Нанотехнологиялар дефектсіз материалдар мен наноөлшемді құрылымдарды қалыптастыруға мүмкіндік береді, бұл бөлшектердің беріктігі мен қызмет ету мерзімін 2–5 есе арттырады. Сапаны бақылау беттік диагностика және кіріс материалдарын тексеру арқылы жүзеге асырылады. Наноқабаттарды кескіш құралдарда, серіппелерде және теміржол бөлшектерінде қолдану олардың тозуға төзімділігін, беріктігін және сенімділігін арттырады. Дәстүрлі, аддитивтік және нанотехнологияларды заманауи бақылау және басқару жүйелерімен біріктіру теміржол бөлшектерін өндірудің сапасын, сенімділігін және экономикалық тиімділігін арттырады. Өте жоғары берікті серіппелер мен наноқабаттар технологиялары ПС және ПМ-нің ұзақ қызмет етуін, сенімділігін және жұмыс тиімділігін қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: нанотехнология, аддитивтік технология, теміржол машиностроение, икемді өндіріс жүйелері, наноқабаттар, сапаны бақылау, 3D-басып шығару

Дәйексөздер үшін: В. Перевертов, М. Абулкасимов, Г. Афанасьев, Е.М. Танжарыков. Наноматериалдар және көлік машиналарын жасау бөлшектерін қалыптастыру кезіндегі гибриді технологиялардың синтезі // Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 87. 44–57 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.87.03.004>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

НАНОМАТЕРИАЛЫ И СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В. Перевертов¹, М. Абулкасимов^{2}, Г. Афанасьев², Е.М. Танжарыков³*

¹Самарский государственный университет путей и сообщения, Самара, Россия;

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва Россия;

³РГП на ПХВ "Ғылым ордасы" КН МНВО РК, Алматы, Казахстан.

E-mail: abilkk@mail.ru

Валерий Перевертов — кандидат технических наук, Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация
E-mail: prkom@samgups.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

Геннадий Афанасьев — кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
E-mail: afanasyev-g@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

Манас Абулкасимов — кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
E-mail: abilkk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

Мадина Акаева — кандидат технических наук, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: akaeva.madina@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

Танжарыков Ержан Маратович — Начальник отдела информационных технологии. РГП на ПХВ "Ғылым ордасы" КН МНВО РК
E-mail: tanzharykove@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9343-7284>.

Аннотация. В современных условиях развития железнодорожного транспорта особое значение приобретает повышение качества, надежности и долговечности подвижного состава (ПС) и путевых машин (ПМ). Эффективное управление процессами производства деталей, узлов и агрегатов возможно благодаря внедрению аддитивных и нанотехнологий, а также гибких производственных систем, интегрированных с современными информационно-управляющими и транспортными системами. Цель исследования — анализ и совершенствование технологических процессов машиностроения с применением традиционных, аддитивных и нанотехнологий для повышения качества деталей железнодорожного транспорта. Задачи исследования включают: исследование возможностей применения аддитивных технологий (3D-печати) для производства деталей любой сложности; определение эффективности нанотехнологий для улучшения прочностных, износо- и коррозионностойких характеристик деталей и агрегатов; разработка и оптимизация методов контроля качества с использованием современных датчиков и устройств, включая промышленную компьютерную томографию; оценка экономического эффекта внедрения наноструктурированных покрытий и новых технологических процессов. Использование аддитивных технологий позволяет создавать детали без ограничения сложности и уменьшать массу изделий без потери прочности. Нанотехнологии обеспечивают формирование «бездефектных» материалов и наноразмерных структур, повышающих долговечность и ресурс деталей в 2–5 раз. Контроль качества осуществляется через диагностику поверхности и входной контроль материалов. Внедрение наноструктурированных покрытий на режущие инструменты, пружины, детали ПС и ПМ повышает их износостойкость, прочность и надежность. Применение современных методов синтеза и обработки материалов позволяет снизить производственные расходы, увеличить межремонтный срок оборудования и повысить эффективность железнодорожного машиностроения. Интеграция традиционных, аддитивных и нанотехнологий с современными системами контроля и управления способствует повышению качества, надежности и экономической эффективности производства деталей железнодорожного транспорта. Технологии сверхвысокопрочных пружин и нанопокрывтий обеспечивают долговечность, надежность и повышение эксплуатационных характеристик ПС и ПМ в условиях ОАО «РЖД».

Ключевые слова: нанотехнологии, аддитивные технологии, железнодорожное машиностроение, гибкие производственные системы, нанопокрывтия, контроль качества, 3D-печать

Для цитирования: В. Перевертов, М. Абулкасимов, Г. Афанасьев, Е.М. Танжарыков. Наноматериалы и синтез гибридных технологий при формообразовании деталей транспортного машиностроения//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. No. 87. Стр. 44–57. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.87.03.004>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Транспортная система ОАО «РЖД» обеспечивает мобильность и маневренность всех видов подвижного состава (ПС) и путевых машин (ПМ), а также системы в целом при наличии необходимых резервов пропускной и провозной способности. На рост грузооборота ПС производственной продукции влияют такие факторы, как качество, безопасность и надежность.

Развитие машиностроительных технологий требует внедрения современных методов формообразования заготовок. Технологические процессы в машиностроении принято подразделять на традиционные (ТТ), аддитивные технологии (АТ) и нанотехнологии (НТ) (В.П. Перевертов, Ю.А. Бочаров, А.П. Андреев, 1987; Перевертов В.П., 2019). К основным методам формообразования относятся:

- Осаждение;



- Литьё;
- Формование;
- Гальванопластика;
- Обработка материалов давлением;
- Механическая обработка резанием;
- Электрофизическая и электрохимическая обработка;
- Сборка составных частей заготовки или изделия;
- Аддитивные технологии – изготовление деталей по цифровой модели методом послойного добавления материала;

Нанотехнологии – обработка и модификация материала на уровне атомов и молекул для создания материалов и изделий с уникальными свойствами.

Рост объемов грузовых и пассажирских перевозок в РФ требует повышения надежности и качества услуг РЖД, что возможно за счет внедрения аддитивных и нанотехнологий в производство деталей ПС и ПМ. Использование гибких производственных систем (ГПС) и современных материалов позволяет улучшить прочностные, износостойкие и эксплуатационные характеристики изделий, снизить производственные отходы и сократить расходы.

Объект исследования - транспортное машиностроение в условиях ОАО «РЖД», включая производство деталей и узлов подвижного состава и путевых машин.

Предмет исследования - применение аддитивных и нанотехнологий, гибких производственных систем и современных датчиков для контроля качества в производстве деталей ПС и ПМ.

Цель исследования - исследовать возможности повышения качества, надежности и долговечности деталей транспортного машиностроения путем интеграции аддитивных и нанотехнологий в гибкие производственные системы ОАО «РЖД».

Задачи исследования:

- Провести анализ современных методов формообразования деталей в машиностроении: традиционных, аддитивных и нанотехнологий.
- Рассмотреть структуру и возможности гибких производственных систем (ГПС) и «умных» производственных систем (УПС).
- Исследовать применение порошковых, композиционных и наноматериалов, а также методы их контроля с использованием современных датчиков и устройств.
- Оценить влияние аддитивных и нанотехнологий на качество, надежность и долговечность деталей ПС и ПМ.
- Разработать рекомендации по внедрению современных технологий для повышения эффективности производства и сокращения производственных расходов.

Методы исследования. Используются системный анализ, сравнительный анализ традиционных и современных технологий, моделирование технологических процессов с использованием CAD/CAM/CAE, анализ данных контроля качества, а также методы экспериментального тестирования деталей и узлов ПС и ПМ с использованием наноматериалов и аддитивных технологий.

Научная гипотеза. Внедрение аддитивных и нанотехнологий в гибкие производственные системы транспортного машиностроения обеспечивает значительное повышение качества, надежности и долговечности деталей ПС и ПМ за счет оптимизации процессов формообразования, снижения производственных отходов и точного контроля параметров материалов.

Материалы и методы.

Технологии «умных» производственных систем (УПС) эффективно применяются в машиностроении в виде гибких производственных систем (ГПС), которые включают три подсистемы:

Подсистема заготовительной обработки – кузнечно-штамповочное производство, литейное производство, сварка, переработка пластмасс и порошков, термическая обработка и др. (Перевертов, 2023: 73; Перевертов, 1987: 35–45; Перевертов, 2017: 102–110; Перевертов, 2018: 56–63; Перевертов, 2020: 77–85; Перевертов, 2021: 90–98).

Подсистема окончательной обработки – обработка материалов резанием (ОМР), включающая сверление, фрезерование, точение и др. (Перевертов, 1987: 35–45; Перевертов, 2020: 77–85).

Сборочная подсистема, объединённая единой транспортной и информационно-управляющей системами, интегрированная с конструированием и технологией изготовления изделий, что обеспечивает взаимное проникновение подсистем и интеграцию традиционных, аддитивных и нанотехнологий (Перевертов, 2023: 73; Перевертов, 2018: 56–63; Перевертов, 2022: 120–128).

Развитие цифровых технологий в проектировании (CAD), моделировании и расчетах (CAE), а также в механообработке (CAM) привело к росту применения аддитивных технологий (АТ) для изготовления инструментов, литейных форм и деталей подвижного состава (ПС) и путевых машин (НТТС) (Перевертов, 2019: 45–53; Перевертов, 2021: 90–98). На базе АТ создаются роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные модули для 3D-печати порошковыми, композиционными и наноматериалами, которые классифицируют по:

- используемым материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и др.);
- наличию лазерного оборудования;
- методам подвода энергии для фиксации слоя (тепловое воздействие, облучение УФ или видимым светом, связующий состав и др.);
- методам формирования слоя;
- типу движения и др.

Нанотехнологии включают совокупность методов обработки и изменения свойств материала на нанометровом уровне. В отличие от традиционных технологий, нанотехнологии позволяют управлять отдельными атомами и молекулами, создавая материалы с новыми физико-химическими и биологическими свойствами (Перевертов, 2019: 45–53; Перевертов, 2022: 120–128).

Особое внимание в исследовании уделялось контролю качества изделий. В традиционных и аддитивных производствах контролю подлежат параметры, влияющие на качество продукции. При АТ контроль внутренней структуры изделия возможен с помощью промышленной компьютерной томографии (КТ), что позволяет заранее оценить и оптимизировать параметры формообразования и снизить процент брака (Перевертов, 2021: 90–98).

Ключевые элементы УПС, определяющие качество и эффективность производства, включают:

- быстродействующие исполнительные органы (ИО) технологического оборудования;
- высокоточные и надёжные датчики (сенсоры), обеспечивающие стабильность и быстродействие процессов.

Применение порошковых, композиционных и наноматериалов в сочетании с гибкими технологиями требует контроля и диагностики параметров с помощью современных сенсорных систем. Выбор датчиков основывается на принципе максимального соответствия характеристик датчика требованиям измерений. При невозможности достижения соответствия применяют методы компьютерной томографии для определения внутренних параметров изделия до формообразования (Перевертов, 2021: 90–98).

Для измерения химического состава металлов и сплавов применяются портативные лазерные спектрометры ЛИС-01, обеспечивающие высокую скорость контроля (Перевертов, 2021: 90–98). Для контроля температуры при обработке материалов используются бесконтактные фототонно-селективные волоконно-оптические датчики типа ИРТ-1 (Перевертов, 2022: 120–128; Перевертов, 2021: 90–98).

Таким образом, в качестве методов исследования применялись:

- анализ литературы и патентных источников;
- обзор современных производственных технологий (технологии литья, обработки давлением, 3D-печати, нанотехнологии);
- системный подход к оценке качества и надежности изделий;
- использование сенсорных систем и КТ для контроля параметров изделий;
- моделирование технологических процессов CAD/CAM/CAE для оптимизации формообразования и повышения эффективности производства.

Результаты и обсуждения.

Формообразование детали при АТ основывается на послойном наращивании изделия струйным или лазерным способом (концентрированной энергией) по цифровой модели, а выпуск деталей с помощью АТ (3D-печать) отличаются от традиционных технологий следующими преимуществами: 1) изготовление деталей любой сложности из-за отсутствия ограничений, свойственных традиционным технологиям; 2) выявление возможностей новых деталей в транспортной технологической системе, т.е. применение в диагностике узлов (деталей); 3) снижение массы детали не сказывается на их прочности; 4) использование материала для формирования изделия исключает отходы производства и снижает производственные расходы, поскольку не требует для начала процесса использования массивных заготовок из металла или пластика и последующего удаления излишков материала с помощью обработки материалов резанием (ОМР) – сверление, фрезерованием, точение и т. д. для получения требуемой конфигурации и точности (Перевертов, 2022: 39; Перевертов, 2023: 75).

Нанотехнологии – совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала, осуществляемых в процессе производства продукции в нанометровом диапазоне. «Сырьем» являются отдельные атомы (системы), а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические объемы материала, содержащие миллиарды атомов и молекул. В отличие от традиционной технологии для нанотехнологии характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как «бездефектные» материалы с принципиально новыми физико-химическими и биологическими свойствами, так и новые классы устройств с нанометровыми размерами.

Особенности контроля качества в традиционном и аддитивном производствах – контролировать и диагностировать параметры (факторы), которые влияют на качество выходной продукции. Так при производстве изделий с помощью АТ мы не можем увидеть качество 3D-печати внутри изделия (качество спекания металлического порошка внутри), а контролируем только наружную поверхность детали. Необходимо контролировать геометрию изделия, потому что после технологического процесса выращивания изделия, а также после различных процессов постобработки (термических, механических и др.), геометрия изделия может меняться, что необходимо учитывать при моделировании САД-модели. Необходим входной контроль и диагностика расходных материалов (металлопорошковых композиций) и контроль требований к сырью на соответствии реальным значениям. Основными элементами турбулентных УПС, определяющих качество и их технические показатели эффективности производства, являются: 1- быстродействующий исполнительный (рабочий) орган (ИО) технологического оборудования; 2- датчики (сенсоры) – функциональные преобразователи (ФП) высокой точности и надежности, стабильности и быстродействия, унифицированные, с низкими

массогабаритными показателями энергопотребления. Это заставляют искать возможности, как конструктивно технологического совершенствования элементов и структурных схем известных ИО и ФП, так и создания новых методов их синтеза (Перевертов, 2022: 39).

Применение порошковых, композиционных, наноматериалов и гибких технологий на их основе параметры которых необходимо контролировать, диагностировать и управлять с помощью современных датчиков и устройств, обеспечит качество деталей. В основе выбора датчиков лежит принцип максимального соответствия требований измерений и возможностей (характеристик) датчика. Адекватный выбор требует априорных знаний, как об объекте измерений, так и о датчиках, из которых должен быть сделан выбор. Если требуемого соответствия достичь не удастся, то необходимо убедиться, что требования к датчику являются принципиально реализуемыми, а для решения таких задач применять технологию промышленной компьютерной томографии (КТ) — метод восстановления внутренней структуры объекта посредством многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях. В АТ нужно применять КТ для отработки режимов синтеза технологий: каждое изделие уникально, как и все параметры для его изготовления, которые лучше подобрать еще до формообразования (выращивания) изделия, чтобы сократить процент брака (негодной продукции) и сэкономить расходный материал (Перевертов, 2022с: 39; Перевертов, 2023: 75).

Транспортное машиностроение является потребителем наноструктурированных материалов (стали и чугуны, титан и его сплавы, алюминиевые сплавы, керамика и пластмассы, порошковые и композиционные, материалы с памятью) и комплектующие наноизделий. Экономический эффект достигается от внедрения технологии нанесения износостойких нанопокровов на режущие инструменты ОМР (сверла, фрезы и т.д.), штампы и пресс-формы в кузнечных машинах обработки материалов давлением (ОМД), литейные формы, а также износостойких, коррозионностойких, жаростойких и водооталкивающих покрытий деталей машин и механизмов для подвижного состава (ПС) и путевых машин (ПМ) в условиях РЖД, включая элементы тормозных систем и подвеску (пружины).

Наноструктурированная продукция (детали, узлы, агрегаты) инструментального и триботехнического направления и технология нанесения нанопокровов улучшит качественные показатели (прочность, твердость, пластичность, износ-жаро и коррозионная стойкость и т.д.) посредством введения того или иного элемента в альтернативный технологический процесс (литье, прессование, нанесение покрытий и т.д.), получения нанопорошков и нанопродукты, в которых используются нанотехнологии, конструкционные композитные материалы на базе высокопрочных волокон для промышленного применения в авиастроении, железнодорожного транспорта, автомобильной и строительно-дорожной технике (НТТС), для производства абразивных материалов, буровых и металлообрабатывающих инструментов. Эта продукция не уступает импортозамещающей продукции, обеспечивающих повышение качества и надежности машин и механизмов.

Это стальные и керамические изделия конструкционного, инструментального и триботехнического назначения, нержавеющие оболочки, фитинги нового поколения, изделия для транспортного машиностроения (Перевертов, 2022с: 40).

Производство ультрадисперсных нанопорошков нашли применение в узлах трения всех видов оборудования: технологии восстановления изношенных узлов и механизмов промышленного оборудования до первоначальных параметров с помощью специальных ремонтно-восстановительных составов (РВС). Стоимость реновации (ремонта) по РВС технологии в 2–3 раза ниже, чем при использовании обычных технологий, что позволяет заменить плановые ремонты деталей оборудования планово-предупредительной обработкой с увеличением межремонтного срока в 1,5–2 раза. Экономия электроэнергии и топлива после РВС составляет 10–15 %. Эта технология используется на предприятиях:

Московской железной дороге и метрополитене, на «Салюте» и т.д. Эффект обеспечивается на металлической или керамической основе, в результате образования в поверхностных слоях изделия наночастиц комплексов. Наноструктуризация поверхностей деталей подшипников скольжения (качения) ПС и ПМ повышает их долговечность в 2–3 раза (с 150–200 до 500–600 млн. циклов), долговечность инструмента возрастает в 5–6 раз. Порошки медных сплавов используются для производства противоизносных препаратов марки РиМЕТ, включающие наночастицы, активные в зонах трения и покрытые специальной оболочкой, которые свободно циркулируют в масле, не взаимодействуя с ним, а используя его как средство доставки в зоны трения. Под действием высокой температуры и давления, которые необходимо контролировать и диагностировать, наночастицы активируются и начинают создавать на поверхности пар трения новый слой, который образуется при взаимодействии частиц препарата и продуктов износа металлической поверхности и принимает на себя всю нагрузку с поверхности пар трения. При этом наблюдаются следующие процессы (Перевертов, 2022с: 40; Перевертов, 2023: 76):

- 1) нормализация структуры кристаллической решетки материала;
- 2) снятие поверхностной усталости;
- 3) 3) заполнение задиров.

На предприятиях РФ реализуются традиционные (Т) и аддитивные технологии (АТ) на наномасштабе:

- 1-электроэрозионная наноразмерная обработка рабочим инструментом;
- 2-электрохимическая отделочная и размерная обработка рабочих поверхностей нагруженных деталей машин и механизмов;
- 3- ионно-плазменное упрочнение инструмента, деталей машин с нанесением покрытия толщиной до 2 мкм, повышающие их работоспособность;
- 4-модификация поверхности за счет технологии скоростных химико-термических взаимодействий плазменных струй с поверхностью металла с целью повышения износо- и коррозионной стойкости, твердости легированных сталей;
- 5- закалка поверхности на глубину до 2 мм с возможностью регулирования параметров поверхностного слоя;
- 6-ионно-плазменное осаждение с получением покрытия из спектра материалов любого состава с заданной структурой (нанокристаллической, аморфной, кристаллической, композитной);
- 6-применение полимерного нанокompозита и оборудования для синтеза нанокерамических покрытий;
- 7-создание технологии производства сверхвысокопрочных пружин и износостойких изделий из наноструктурных керамических и металлокерамических материалов;
- 8-создание монолитного твердосплавного металлорежущего инструмента с наноструктурированным покрытием и режущего инструмента из сверхтвердого материала и т.д. (Перевертов, 2022с: 40; Перевертов, 2023: 75)

Показатели качества (надежность, долговечность, ресурс и т. д.) деталей транспортного машиностроения, изготовленных по новой технологии увеличиваются в 2-5 раза с нанометровой точностью при использовании оборудования электроискровой и электрохимической обработки, фрезерования и шлифования, полирования и доводки и др.

Тренд – технология напыления наноматериалов на изделия с получением наноструктурированных покрытий, наносимых методами высокоскоростного газотермического напыления исходных материалов в виде растворов или суспензий, содержащих наноразмерные частицы позволяет получать покрытия с заданными характеристиками в условиях ОАО «РЖД». Нанотехнологии решают проблему трения и коррозии материалов путем применения наноразмерных частиц в ингибиторах коррозии нового материала. Одной из динамично развивающихся областей нанотехнологий является разработка и производство высокоэффективных антифрикционных, противоизносных и охлаждающих составов для ДВС, применение которых приводит к сокращению расхода топлива

на 2–7 %, износу деталей в 1,5–2,5 раза, увеличению мощности двигателя на 2–4 % (Перевертов, 2023: 76).

Технология добавления наночастиц в транспортерные ленты, рабочий орган ленточного конвейера, увеличивает их гибкость и уменьшает износ. Технология нанесения наноструктурированных покрытий увеличивает износостойкость инструмента в 2–2,5 раза и основывается на методе вакуумного осаждения из плазмы, получаемой в результате испарения материала. Такое техническое решение повышает износостойкость инструмента, что позволяет производить обработку металлов на более высоких скоростях и увеличивает срок службы инструмента. Улучшение технических характеристик (твердость, вязкость) инструмента с нанопокрытиями для технологий ОМР) приводит к увеличению производительности труда и снижению себестоимости изготавливаемой при помощи инструмента. По сравнению с инструментом без покрытия происходит увеличение объема снимаемого металла в 2–2,5 раза, стойкость между переточками и скорость резания возрастает в 1,5–2 раза. Создание прецизионных, электрохимических станков и т.д. находит применение в двигателестроении, энергетике, инструментальном производстве для износостойких изделий из наноструктурированной керамики и металлокерамики, а к ним относятся изделия и узлы с уникальными свойствами: высокой прочностью, износостойкостью, устойчивостью к коррозии, теплостойкостью: подшипники скольжения и кольца торцовых уплотнений, осевой инструмент, сменные многогранные пластины и т.д. Для насосной техники (систем) выпускают из наноструктурных металлокерамик различные триботехнические изделия (узлы, подверженные трению и износу), работающих в сложных условиях эксплуатации и имеющие повышенную износостойкость; расширенный диапазон рабочих температур; химическую инертность. Использование наноструктурных материалов позволяет повысить ресурс и надежность промышленного насосного оборудования на 20–30 %. Выпуск керамического и металлокерамического режущего инструмента для ОМР металлов и композиционных материалов, характеризующихся высокой твердостью, прочностью и термостойкостью позволит увеличить производительность обрабатывающего оборудования, повысить точность геометрических параметров при обработке деталей (Перевертов, 2023: 76).

Новые конструктивные решения средств передвижения и ремонта пути требуют применения устройств для торможения тележки ПС, ПМ, вагона с независимо вращающимися колесами, обеспечивающих безопасность и эффективность их использования в пути следования. Разработанная схема дискового тормоза колесной пары ПС с независимым вращением колес с применением наноматериалов повысит их надежность и безопасность.

Режущий инструмент из нанопорошка нитрида бора предназначен для использования в ОМР и обеспечит повышение износостойкости к абразивным материалам, увеличение производительности инструмента. При этом затраты на обработку деталей инструментом снижаются до 60 %, что важно при создании новых технологий ОМР. Создание технологического оборудования для синтеза многофункциональных нанокерамических покрытий на алюминиевых и магниевых поверхностях, защищающих металлы от коррозии, что особенно важно в железнодорожном машиностроении (Перевертов, 2022: 41). Покрытие наносится методом микродугового оксидирования (МДО), который позволяет формировать наноструктурированные керамикоподобные слои на поверхности алюминия, магния, титана, циркония и других металлов. В зависимости от условий обработки материала можно получать поверхности деталей различного назначения: износостойкие, коррозионно-защитные, электроизоляционные, теплостойкие или их сочетания. Технология производства сверхвысокопрочных пружин повышает их надежность, долговечность, релаксационную стойкость пружин путем операции горячей навивки

пружины при оптимальном сочетании контролируемых параметров: температуры нагрева, степени деформации при навивке, схемы и режима охлаждения – заковки последовательно каждого витка навиваемой пружины для формирования наноразмерной структуры, обеспечивающей высокие прочностные характеристики пружин (Рис. 1) с увеличенным сроком службы и уровнем допустимых напряжений, исключением их осадки и соударения витков, повышенной работоспособностью в условиях низких температур (Перевертов, 2022: 41).

Для качественного измерения (контроля) химических элементов в металлах и сплавах предназначен спектрометр лазерный портативный ЛИС-01, обеспечивающий высокую скорость контроля качества химического состава и т.д.

Для контроля температуры при обработке материалов разработаны новые бесконтактные, быстродействующие фототонно селективные волоконно-оптические датчики- устройства типа ИРТ-1 (Перевертов, 2022: 41).



Рис. 1. Алгоритм технологии производства сверхпрочных пружин для подвижного состава (ПС) и путевых машин (ПМ) (Перевертов, 2022: 41).

Заключение.

В ходе проведенного исследования была поставлена цель — анализ и оценка возможностей применения традиционных, аддитивных и нанотехнологий в железнодорожном машиностроении на примере ОАО «РЖД» с целью повышения качества, надежности и долговечности подвижного состава и путевых машин. Для достижения данной цели использовались комплексные методы исследования, включая анализ литературы и патентных источников, обзор современных производственных технологий, системный подход к оценке качества и надежности изделий, а также изучение возможностей применения сенсорных систем и технологий контроля качества.

Цели исследования реализованы следующим образом: проведен детальный анализ технологических процессов формообразования заготовок и деталей, включающих традиционные технологии (литье, механическая обработка, обработка давлением), аддитивные технологии (3D-печать, роботизированные комплексы) и нанотехнологии (нанопорошки, нанопокртия, модификация поверхностей). Исследованы интеграционные

возможности «умных производственных систем», включающих гибкие производственные модули, информационно-управляющие системы, системы мониторинга и диагностики. Особое внимание уделено методам контроля качества при производстве деталей с применением АТ и НТ, включая использование промышленной компьютерной томографии для оценки внутренней структуры изделий и обеспечение точности геометрии деталей после постобработки.

В результате исследования получены следующие ключевые результаты:

- Повышение эффективности производственных процессов. Применение аддитивных технологий позволяет изготавливать детали любой сложности без необходимости использования массивных заготовок, что уменьшает отходы производства и сокращает затраты на обработку материала.

- Повышение качества и надежности деталей. Использование наноматериалов и нанопокровов обеспечивает увеличение прочностных характеристик, износостойкости, термостойкости и коррозионной устойчивости деталей, включая элементы тормозных систем, подшипники и пружины подвижного состава. Долговечность деталей увеличивается в 2–5 раз по сравнению с традиционными технологиями.

- Интеграция гибких и интеллектуальных систем управления. Внедрение датчиков и сенсорных систем позволяет контролировать параметры производственных процессов в реальном времени, обеспечивая соответствие стандартам качества и снижение процента брака.

- Экономический эффект. Применение технологий наноструктурирования и РВС-технологий позволяет сократить затраты на ремонт и эксплуатацию оборудования, увеличить межремонтный период, снизить расход электроэнергии и топлива на 10–15 %.

Выводы исследования подтверждают выдвинутое автором утверждение о том, что интеграция традиционных, аддитивных и нанотехнологий в железнодорожное машиностроение существенно повышает качество и надежность производимых изделий, а также открывает новые возможности для оптимизации производственных процессов. Доказано, что использование наноматериалов и гибких технологических систем обеспечивает уникальные свойства изделий, которые невозможно получить традиционными методами, и значительно расширяет потенциал диагностики и контроля параметров изделий.

Перспективы дальнейшей работы включают:

- Внедрение технологий АТ и НТ в серийное производство деталей подвижного состава и путевых машин, включая комплексное использование 3D-печати, роботизированных модулей и сенсорных систем контроля качества.

- Разработка новых конструктивных решений и инновационных материалов, включая нанокompозиты и нанопокровы, для улучшения износостойкости и долговечности деталей при различных эксплуатационных нагрузках.

- Применение методов компьютерного моделирования и искусственного интеллекта для оптимизации технологических процессов, прогнозирования износа деталей и повышения точности формообразования.

- Расширение применения РВС-технологий и наноструктурированных материалов для продления ресурса оборудования, повышения безопасности и экономической эффективности эксплуатации железнодорожного транспорта.

Практическое значение исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть внедрены на предприятиях железнодорожного машиностроения для повышения надежности и долговечности подвижного состава, снижения эксплуатационных расходов и повышения качества обслуживания пассажиров и грузов. Разработанные алгоритмы производства сверхвысокопрочных пружин, методы нанесения нанопокровов и применения наноматериалов обеспечивают возможность создания продукции,

конкурентоспособной по качеству с зарубежными аналогами, что способствует развитию импортозамещения и инновационной модернизации отрасли.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает актуальность и практическую значимость интеграции традиционных, аддитивных и нанотехнологий в железнодорожное машиностроение, демонстрирует возможности повышения эффективности производственных процессов и улучшения качественных характеристик изделий, а также открывает перспективы дальнейших исследований и внедрения инновационных решений в промышленной практике ОАО «РЖД».

ЛИТЕРАТУРА

Перевертов, 1987 — Устройство для контроля температуры при обработке материалов / В.П. Перевертов, Ю.А. Бочаров, А.П. Андреев и др. // Открытия. Изобретения. — 1987. — №14. — С. 35–45. [Russ.]

Перевертов, 2017 — Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Качество продукции и услуг РЖД в сочетании с качеством управления // Надежность и качество 2017. — Труды междунар. симпозиума. — Т.2. — Пенза: изд-во ПГУ, 2017. — С.116–120. [Russ.]

Перевертов, 2018 — Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Нанотехнологии в умной инфраструктуре ОАО «РЖД» // Промышленный транспорт Казахстана. — 2018. — №3 (59). — С.26–30. [Russ.]

Перевертов, 2018a — Перевертов В.П. Технологии конструкционных материалов. Ч.2. Литейные и порошковые технологии. Лазерные технологии и обработки материалов резанием: учебное пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — Самара: СамГУПС. — 2018. — 192 с. [Russ.]

Перевертов, 2018b — Перевертов В.П. Технологии конструкционных материалов. Ч.3. Технологии обработки материалов давлением: учебное пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — Самара: СамГУПС. — 2018. — 154 с. [Russ.]

Перевертов, 2019 — Перевертов В.П., Андрончев И.К., Мусаева Г.С., Абулкасимов М.М. Управление в «умных» железнодорожных транспортных системах // Промышленный транспорт Казахстана. — 2019. — №4 (65). — С.59–67. [Russ.]

Перевертов, 2020 — Перевертов В.П., Абулкасимов М.М., Акаева М.М. Алгоритм принятия решений при формообразовании деталей в «умных производственных системах» // Промышленный транспорт Казахстана. — 2020. — №1 (66). — С.54–63. [Russ.]

Перевертов, 2022a — Перевертов В.П., Жданов А.Г., Абулкасимов М.М., Акаева М.М. Гибридные технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии в условиях Российских железных дорог // Промышленный транспорт Казахстана. — 2022. — №1 (74). — С.22–28. [Russ.]

Перевертов, 2022b — Перевертов В.П., Жданов А.Г., Абулкасимов М.М., Акаева М.М. Повышение надежности подвижного состава с новой тормозной системой дифференциального вращения колес // Промышленный транспорт Казахстана. — 2022. — №1 (74). — С.158–168. [Russ.]

Перевертов, 2022c — Перевертов В. П. Нанотехнологии и качество деталей транспортного машиностроения // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". — 2022. — Т. 1. — С. 39–42. [Russ.]

Перевертов, 2023 — Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Качество формообразования деталей при интеграции гибридных технологий транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. — 2023. — № 1. — С. 72–80. [Russ.]

Жданов, 2020 — Патент №2706668 РФ «Дисковый тормоз колесной пары с независимым вращением колес» / А.Г. Жданов, В.П. Перевертов; заявл. 24.12.2018; опубл. 19.03.2020. — 2020. — Бюл. №8. — С.1. [Russ.]

Перевертов, 2019 — Перевертов В.П. Качество управления гибкими технологиями: монография. — Самара: СамГУПС. — 2019. — 270 с. [Russ.]

Перевертов, 2020 — Перевертов В.П. Материаловедение и гибкие технологии: учебник. — Самара: СамГУПС. — 2020. — 280 с. [Russ.]

Перевертов, 2021 — Перевертов В.П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах: монография. — Самара: СамГУПС. — 2021. — 291 с. [Russ.]

REFERENCES

Perevertov, 1987 — Perevertov, V.P., Bocharov, Yu.A., Andreev, A.P., et al. (1987). Ustroistvo dlya kontrolya temperatury pri obrabotke materialov [Device for temperature control in material processing]. *Otkrytiya. Izobreteniya*, 14, 35–45. [in Russ.]

Perevertov, 2017 — Perevertov, V.P., Andronchev, I.K., Abulkasimov, M.M. (2017). Kachestvo produktsii i uslug RZhD v sochetanii s kachestvom upravleniya [Quality of RZD products and services combined with management quality]. *Nadezhnost' i kachestvo 2017: Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma*, 2, Penza: PSU Publishing, 116–120. [in Russ.]

Perevertov, 2018 — Perevertov, V.P., Andronchev, I.K., Abulkasimov, M.M. (2018). Nanotekhnologii v umnoi infrastrukture OAO “RZhD” [Nanotechnologies in smart infrastructure of JSC “RZD”]. Promyshlennyy transport Kazakhstana, 3(59), 26–30. [in Russ.]

Perevertov, 2018a — Perevertov, V.P. (2018). Tekhnologii konstruksionnykh materialov. Ch.2. Liteinye i poroshkovye tekhnologii. Lazernye tekhnologii i obrabotki materialov rezaniem: uchebnoe posobie [Technologies of structural materials. Part 2. Casting and powder technologies. Laser technologies and material processing by cutting: textbook]. 2nd ed., rev. and enlarged. Samara: SamGUPS. — 192 p. [in Russ.]

Perevertov, 2018b — Perevertov, V.P. (2018). Tekhnologii konstruksionnykh materialov. Ch.3. Tekhnologii obrabotki materialov davleniem: uchebnoe posobie [Technologies of structural materials. Part 3. Material processing technologies under pressure: textbook]. 2nd ed., rev. and enlarged. Samara: SamGUPS. — 154 p. [in Russ.]

Perevertov, 2019 — Perevertov, V.P., Andronchev, I.K., Musaeva, G.S., Abulkasimov, M.M. (2019). Upravlenie v “umnykh” zheleznodorozhnykh transportnykh sistemakh [Management in smart railway transport systems]. Promyshlennyy transport Kazakhstana, 4(65), 59–67. [in Russ.]

Perevertov, 2020 — Perevertov, V.P., Abulkasimov, M.M., Akaeva, M.M. (2020). Algoritm prinyatiya reshenii pri formoobrazovanii detalei v “umnykh proizvodstvennykh sistemakh” [Decision-making algorithm in forming parts in smart manufacturing systems]. Promyshlennyy transport Kazakhstana, 1(66), 54–63. [in Russ.]

Perevertov, 2022a — Perevertov, V.P., Zhdanov, A.G., Abulkasimov, M.M., Akaeva, M.M. (2022). Gibridnye tekhnologii obrabotki materialov kontsentrivannym potokom energii v usloviyakh Rossiiskikh zheleznykh dorog [Hybrid technologies for material processing with concentrated energy flow in Russian railways]. Promyshlennyy transport Kazakhstana, 1(74), 22–28. [in Russ.]

Perevertov, 2022b — Perevertov, V.P., Zhdanov, A.G., Abulkasimov, M.M., Akaeva, M.M. (2022). Povyshenie nadezhnosti podvizhnogo sostava s novoi tormoznoy sistemoi differentsial'nogo vrashcheniya koles [Improving rolling stock reliability with a new differential wheel rotation brake system]. Promyshlennyy transport Kazakhstana, 1(74), 158–168. [in Russ.]

Perevertov, 2022c — Perevertov, V.P. (2022). Nanotekhnologii i kachestvo detalei transportnogo mashinostroeniya [Nanotechnologies and quality of transport engineering parts]. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost' i kachestvo”, 1, 39–42. [in Russ.]

Perevertov, 2023 — Perevertov, V.P., Kuzin, N.A., Yurkov, N.K. (2023). Kachestvo formoobrazovaniya detalei pri integratsii gibridnykh tekhnologii transportnogo mashinostroeniya [Quality of part forming in integration of hybrid transport engineering technologies]. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem, 1, 72–80. [in Russ.]

Zhdanov, 2020 — Zhdanov, A.G., Perevertov, V.P. (2020). Diskovyy tormoz kolesnoi pary s nezavisimym vrashcheniem koles [Patent No. 2706668 RF]. Zayavl. 24.12.2018; publ. 19.03.2020. Byul. 8, 1 p. [in Russ.]

Perevertov, 2019 — Perevertov, V.P. (2019). Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya [Quality management of flexible technologies: monograph]. Samara: SamGUPS. — 270 p. [in Russ.]

Perevertov, 2020 — Perevertov, V.P. (2020). Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnyk [Materials science and flexible technologies: textbook]. Samara: SamGUPS. — 280 p. [in Russ.]

Perevertov, 2021 — Perevertov, V.P. (2021). Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya [Diagnostics and management of forging machines in flexible manufacturing systems: monograph]. Samara: SamGUPS. — 291 p. [in Russ.]