## УДК 621

### В. Перевертов1, М. Абулкасимов2, Г. Афанасьев2, М. Акаева3

1Самарский государственный университет путей и сообщения, Самара, Россия

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

Россия

3Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан [E-mail:abilkk@mail.ru](mailto:abilkk@mail.ru)

## НАНОМАТЕРИАЛЫ И СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО

**МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу оценке применения наноматериалов в гибридных технологиях при обработке деталей транспортного машиностроения. Предложены и рассмотрены способы повышения качества и надежности тормозных систем и сверхпрочных пружин и т.д. с учетом контроля и диагностики параметров материалов и нонотехнологий на их основе.

**Ключевые слова.** Наноматериалы, детали, традиционные и аддитивные технологии, качество и надежность, контроль и диагностика.

### Введение.

Транспортная система ОАО «РЖД» предполагает мобильность и маневренность как всех видов подвижного состава (ПС) и путевых машин (ПМ), так и системы в целом при соблюдении наличия необходимых резервов пропускной и провозной способности. На рост грузооборота ПС производственной продукции влияет качество, безопасность, надежность. Технологические процессы формообразования заготовок в машиностроении по методу их исполнения принято подразделять на **традиционные** (**ТТ**) и **аддитивные** технологии (**АТ**), **нанотехнологии** (**НТ**): 1) ***осаждение***; 2) ***литье***; 3) ***формование***; 4) ***гальванопластика***; 5) ***обработка материалов давлением***; 6) ***механическая обработка***

***материалов резанием***; 7) ***электрофизическая*** *и* ***электрохимическая обработка***; 8) ***сборка*** – технологический процесс, при котором происходит образование разъемных и неразъемных соединений, составных частей заготовки или изделия путем навинчивания, сварки, пайки, клепки, склеивания и т.д.; 9) **аддитивные технологии (АТ) –** технологии изготовления детали (изделия) по данным цифровой модели методом послойного добавления материала; 10) **нанотехнологии** [ 9-11] .

### Материалы и методы.

Технологии «умных» производственных систем (УПС) эффективно применяются в машиностроении в виде гибких производственных систем (ГПС), которая состоит из трех подсистем: 1-заготовительной обработки - кузнечно-штамповочное, литейное, сварочное, переработка пластмасс и порошков, термическое производство и т.д.); 2- окончательной обработки – обработка материалов резанием (ОМР); 3-сборочной, объединенных единой транспортной и информационно-управляющей системами, интегрально связанной с конструированием и технологией изготовления изделий, что создает условия для взаимного проникновения подсистем и интеграции традиционных, аддитивных и нанотехнологий [ 2- 7, 9-1 3 ].

Развитие цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE) и механообработки (CAM) вызвало рост аддитивных технологий (АТ) для изготовления разнообразных инструментов и литейных форм, деталей НТТС и ПС. На основе АТ создаются роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные модули для «печати» (3D-принтеры) порошковыми, композиционными и наноматериалами, которые классифицируют:1) по применяемым материалам (жидкие, **сыпучие**, полимерные, **металлопорошковые** и т.д.); 2) по наличию лазерного оборудования; 3) по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым излучением, посредством связующего состава и т.д.; 4) по методам формирования слоя; 5) по типу движения и т.д.

### 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.

**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 [1-11].

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 CAD- 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 [1-13].

Применение порошковых, композиционных, наноматериалов и гибких технологий на их основе [7- 13], 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 удается, 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.

Транспортное машиностроение является потребителем наноструктурирован-ных материалов (стали и чугуны, титан и его сплавы, алюминиевые сплавы, керамика и пластмассы, порошковые и композиционные, материалы с памятью) и комплектующие наноизделий [4-13]. Экономический эффект достигается от внедрения технологии нанесения износостойких нанопокрытий 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, коррозионостойких, 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 нанопокрытий улучшит качественные показатели (прочность, твердость, пластичность, износо- 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.

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 нанофазных комплексов [12-16]. 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: 1) нормализация структуры кристаллической решетки материала; 2) снятие поверхностной усталости; 3) заполнение задиров.

На предприятиях РФ реализуются традиционные (Т) и аддитивные технологии (АТ) на наноуровне: 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); 7- применение полимерного нанокомпозита и оборудования для синтеза нанокерамических покрытий; 8-создание технологии производства сверхвысокопрочных пружин и износостойких изделий из наноструктурных керамических и металлокерамических материалов; 9-создание монолитного твердосплавного металлорежущего инструмента с наноструктурированным покрытием и режущего инструмента из сверхтвердого материала и т.д..

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. [ 1- 13].

Тренд – технология напыление 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 %.

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.

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 [8, 10] 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. 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 [1–6, 12, 13]. 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 – закалки последовательно каждого витка навиваемой пружины для формирования наноразмерной структуры, обеспечивающей высокие прочностные характеристики пружин (рисунок 1) с увеличенным сроком службы и уровнем допустимых напряжений, исключением их осадки и соударения витков, повышенной работоспособностью в условиях низких температур.

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. [13-16].

Для контроля температуры при обработке материалов разработаны новые бесконтактные, быстродействующие фототонно селективные волоконно-оптические датчики- устройства типа ИРТ-1 [7- 13].



Рисунок 1. Алгоритм технологии производства сверхпрочных пружин для подвижного состава (ПС) и путевых машин (ПМ).

### Выводы.

1. На железных дорогах РФ непрерывно растет объем грузовых и пассажирских перевозок, для выполнения которого требуется повышать скорости ПС и их надежность для обеспечения качества услуг РЖД на основе применения порошковых и композиционных материалов и гибких технологий, включая наноматериалы, параметры показателей

которых необходимо контролировать с помощью современных датчиков и устройств. В основе выбора датчиков для обеспечения измерений лежит принцип максимального соответствия требований измерений и возможностей (характеристик) датчика.

1. В основе технологии производства сверхвысокопрочных пружин железнодорожного транспорта, повышающих надежность, долговечность и релаксационную стойкость пружин лежит операция горячей навивки пружины при оптимальном сочетании контролируемых параметров: температуры нагрева, степени деформации при навивке, режима охлаждения – закалки последовательно каждого витка навиваемой пружины. В результате формируются наноразмерные субструктуры, обеспечивающие высокие прочностные характеристики пружин с увеличенным сроком службы и уровнем допустимых напряжений, исключением их осадки и соударения витков, повышенной работоспособностью в условиях низких температур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Качество продукции и услуг РЖД в сочетании в качеством управления // Надежность и качество 2017. – Труды междунар. симпозиума. – Т.2. – Пенза: изд-во ПГУ, 2017. – С. 116–120.
2. Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Нанотехнологии в умной инфраструктуре ОАО «РЖД» // Промышленный транспорт Казахстана. – 2018. – № 3 (59). – С. 26–30.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. А.С. №1303207 Устройство для контроля температуры при обработке материалов

/В.П. Перевертов, Ю.А. Бочаров, А.П. Андреев и др. // Открытия. Изобретения. – 1987. –

№14

1. 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 Бюл.

№8.

1. Перевертов В.П. Качество управления гибкими технологиями: монография. – Самара: СамГУПС, 2019. – 270 с.
2. Перевертов В.П. Материаловедение и гибкие технологии: учебник. – Самара: СамГУПС, 2020. – 280 с.
3. Перевертов В.П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах: монография. – Самара: СамГУПС, 2021. – 291 с.