

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.3.049.77

doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-5

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ ДИАГНОСТИКИ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В. П. Перевертов¹, А. Г. Жданов², Н. А. Кузин³, В. Н. Новикова⁴, Н. К. Юрков⁵

^{1, 2, 4} Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

³ Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ vperevertov@yandex.ru, ² zhdanov1965@mail.ru, ³ sputnik1985nk3y@mail.ru,

⁴ novikova@samgups.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Термин «оптическая когерентная томография» появился много десятилетий назад в работах, посвященных расширению возможностей низкокогерентной рефлектометрии для визуализации внутренней структуры мутных сред. Этот термин, несмотря на то, что он не совсем соответствует общепринятой концепции томографии (последнее восстановление изображения путем решения обратной математической задачи), в настоящее время признан во всем мире. Целью исследования является анализ методов диагностики наноматериалов в гибридных технологиях формообразования деталей в транспортной инженерной системе (газотурбинные моторвагонные поезда, изготовленные из новых материалов). *Материалы и методы.* Анализ методов диагностики показал, что часть известных методов непригодна, другая – требует адаптации к наноматериалам, а значительная часть может быть определена только с помощью новых методов. *Результаты и выводы.* Показано, что использование лазерных, ультразвуковых, волоконно-оптических систем диагностики наноматериалов и сплавов в гибридных технологиях формообразования деталей в системе высокоскоростного подвижного состава позволит снизить инвестиционные и эксплуатационные расходы высокоскоростных железных дорог, повысить надежность при сохранении энергетических и динамических характеристик поездов по сравнению с подстанциями с дизельными электростанциями и электропоездами.

Ключевые слова: высокоскоростной транспорт, диагностика, контроль, датчики, технологии, композиты, сплавы, наноматериалы

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

Для цитирования: Перевертов В. П., Жданов А. Г., Кузин Н. А., Новикова В. Н., Юрков Н. К. К проблеме повышения надежности устройств диагностики наноматериалов в гибридных технологиях // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 53–61. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-5

ON THE PROBLEM OF INCREASING THE RELIABILITY OF NANOMATERIAL DIAGNOSTIC DEVICES IN HYBRID TECHNOLOGIES

V.P. Perevertov¹, A.G. Zhdanov², N.A. Kuzin³, V.N. Novikova⁴, N.K. Yurkov⁵

^{1,2,4} Samara State University of Railway Engineering, Samara, Russia

³ Moscow Automobile Institute (Technical University), Moscow, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ vperevertov@yandex.ru, ² zhdanov1965@mail.ru, ³ sputnik1985nk3y@mail.ru,

⁴ novikova@samgups.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The term "optical coherence tomography" appeared many decades ago in works devoted to expanding the capabilities of low-coherence reflectometry for imaging the internal structure of turbid media. This term, despite not exactly matching the accepted concept of tomography (layer-by-layer image restoration by solving an inverse mathematical problem), is now recognized throughout the world. The purpose of the study is to analyze methods for diagnosing nanomaterials in hybrid technologies for forming parts in the transport engineering system (gas turbine motor-car trains made from new materials). *Materials and methods.* Analysis of diagnostic methods has shown that some of the known methods are unsuitable, others require adaptation to nanomaterials, and a significant part can only be determined using new methods. *Results and conclusions.* The work shows that the use of laser, ultrasonic, fiber-optic diagnostic systems for nanomaterials and alloys in hybrid technologies for forming parts in a high-speed rolling stock system will reduce investment and operating costs of high-speed railways, increase reliability while maintaining power and dynamic characteristics trains compared to substations with diesel power plants and electric trains.

Keywords: high-speed transport, diagnostics, control, sensors, technologies, composites, alloys, nanomaterials

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

For citation: Perevertov V.P., Zhdanov A.G., Kuzin N.A., Novikova V.N., Yurkov N.K. On the problem of increasing the reliability of nanomaterial diagnostic devices in hybrid technologies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):53–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-5

На основе системного подхода к анализу эволюции развития технологий и создания умных производственных систем (УПС), составными элементами которой являются гибкие производственные системы (ГПС), модули (ГПМ) (рис. 1), робототехнологические комплексы, рассмотрены вопросы диагностики наноматериалов, композитов, сплавов и т.д. для гибридных технологий формообразования деталей ГТД на основе лазерной, ультразвуковой и волоконно-оптической техники.

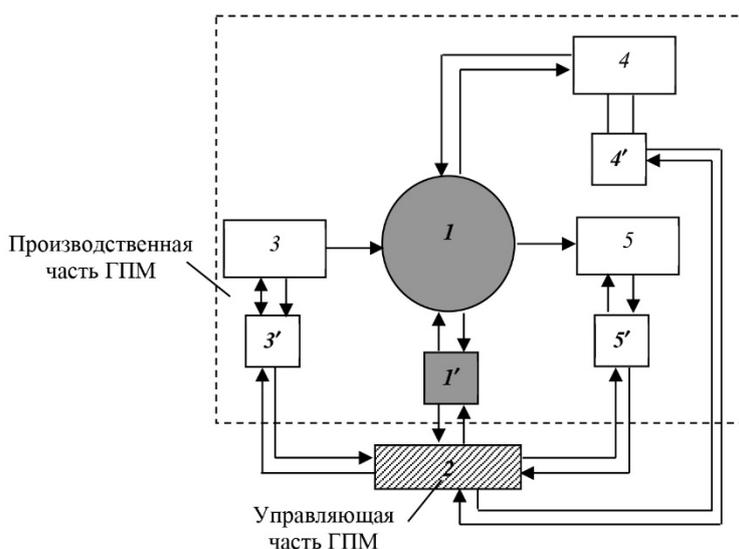


Рис. 1. Структурно-функциональная модель гибкого производственного модуля обработки материалов давлением: 1 – технологическое оборудование – винтовой пресс, молот и т.п.; 1' – система управления технологическим оборудованием; 2 – система управления ГПМ; 3 – устройство (робот) подачи заготовок (УПЗ); 3' – система управления УПЗ, устройство (робот) подачи штампового инструмента (УПШИ); 4 – система управления УПШИ; 5 – устройство (робот) подачи поковок (УПП); 5' – система управления УПП

Трендом индустрии XXI в. являются аддитивные технологии (АТ): «послойное сплавление (спекание) порошков из разных материалов и сплавов, включая композиционные и нанокристаллические, позволяющее в автоматизированном цифровом режиме строить трехмерные изделия по компьютерной модели; сократить время и затраты на получение изделия; изучать технологию послойного синтеза (диагностика) металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композитов; внедрить производительные лазерные, плазменные и ионные системы для спекания и сплавления металлопорошковых композиций; создать на основе новых датчиков системы контроля, диагностики и интеллектуального управления гибридными технологиями (традиционные и аддитивные технологии), обеспечивающих высокое качество и надежность транспортной железнодорожной системы» [1, 2].

Основным элементом системы подвижного состава (ПС) является силовая установка: дизельная, газогенераторная, газодизельная, газотурбинная. В газотурбинных поездах (систем) основой является газотурбинный двигатель (ГТД), изготовленный из новых материалов и сплавов [3–13].

Анализ строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) для перевозки пассажиров и грузов показал, что риском инвестиционных проектов является длительный срок окупаемости, надежность и безопасность железнодорожного подвижного состава, что необходимо учитывать планы развития смежных видов транспорта: скоростных автомагистралей, авиационного сообщения [4, 5].

Создание мотор-вагонных поездов, работающих на газотурбинных двигателях (ГТД) и электрической передаче переменного-постоянного тока, обеспечит сокращение сроков окупаемости дорог. Эксплуатационный режим силовых установок высокоскоростных поездов характеризуется работой на номинальной мощности, ключевую роль в движении приобретают требования малого веса и аэродинамической формы высокоскоростного ПС, что позволит заменить электропоезда автономными газотурбинными мотор-вагонными поездами в грузовом движении, оснащенных системами диагностики параметров ГТД. Преимущества применения ГТД [4, 5] заключаются в улучшении управляемости поездом, повышении разгонных и тормозных характеристик, безопасности движения, энергоэффективности данного вида тяги, росте пропускных способностей железных дорог. Сравнивая мощность созданного в России газотурбовоза ГТh1 – 8500 кВт с суммарной мощностью 10-вагонного высокоскоростного электропоезда «Сапсан», возможно создание автономного мотор-вагонного поезда с несколькими ГТД, сопоставимого по мощности мотор-вагонному поезду электрической тяги. Компонировка силовой установки турбопоездов с ГТД должна включать: кабину управления – силовую установку – газовый баллон – прицепные вагоны и т.д. [4, 5, 14].

При оценке методов контроля и диагностики в области нанотехнологий в системе скоростного транспортного (железнодорожного) машиностроения для ВСМ необходим экспертный анализ методов с концептуальными признаками:

- 1) проектирование технологий диагностики как параметров ГТД, так и транспортной системы (ВСМ) в целом;
- 2) разработка алгоритма выбора технологических датчиков, включая интеллектуальные датчики (ИД) для технологий искусственного интеллекта, основы производственных систем УПС;
- 3) контроль и диагностика технологий в наномасштабном диапазоне при гибридных технологиях на основе концентрированных источников энергии [1–3, 6–12].

Также проблема возникает и в отношении новых материалов, сплавов, нанокомпозитов в системе ГТД, выделении из них относящихся не только по наномасштабу, но и обладающих свойствами выделяющими их наноэффектами в сравнении с традиционными материалами, имеющих более высокие характеристики [1, 2, 6–13].

Несмотря на затраты на их разработку и сложные технологические операции в нанодиапазоне, на совершенствование измерительной и диагностической системы (техники), необходим диагностический контроль параметров и оценка требуемых эффектов.

В настоящее время существуют методы диагностики и методики исследования физических и физико-химических параметров и характеристик твердотельных и молекулярных структур [1–3, 6–8, 13].

Получение наноструктурных систем и новых наноструктурированных материалов с заданными свойствами ставит и новые **диагностические задачи**, для решения которых требуется адаптация к этим задачам традиционных методов (оборудования, датчики, исполнительные органы), а также

развитие новых методов исследования и анализа свойств и процессов, присущих объектам нанометровой геометрии [1–3, 6, 9].

Анализ методов диагностики показал, что часть известных методов непригодна, другая – требует адаптации к наноматериалам, а значительная часть характеристик может быть определена только с помощью новых методов, определяющих свойства веществ в наносостоянии. Методы нанодиагностики должны быть неразрушающим и давать информацию не только о структурных свойствах нанобъектов, но и об их электронных свойствах с атомным разрешением [1–3, 9, 13].

Для разработки нанотехнологий необходимо контролировать и диагностировать атомные и электронные процессы, оптические, магнитные, механические и другие свойства нанобъектов. Невозможность выполнения этих требований приводит к использованию комплекса методов диагностики скоростных транспортных нанобъектов, среди которых выделим основные группы [3]:

1) **электронная микроскопия высокого разрешения** обеспечивает визуализацию структуры нанобъектов с атомным разрешением на основе различных модификаций электронной микроскопии, обеспечивающих проведение химического анализа нанобъектов, включая поверхностно-чувствительные методы, которые являются единственным источником получения информации о внутренней структуре материала;

2) **методы сканирующей электронной микроскопии** приближаются к атомному разрешению, получению информации без разрушающего воздействия на исследуемые объекты с получением информации о химическом составе нанобъектов, их электрических, оптических и других свойствах;

3) **методы электронной томографии** применяются для получения информации об объеме нанобъектов;

4) **сканирующая туннельная микроскопия**, являющаяся поверхностно-чувствительным методом визуализации атомной структуры твердых тел при проведении спектроскопических исследований с атомным разрешением при повышенных и пониженных температурах, использование других методов зондовой микроскопии с возможностью манипулирования (моделирования) на уровне отдельных атомов делает эти методы важнейшими инструментом для нанотехнологии и нанодиагностики;

5) **рентгенодифракционные методы** дают информацию об атомной структуре нанобъектов без их разрушения;

6) **методы электронной спектроскопии для химического анализа материалов и сплавов;**

7) **методы фотоэлектронной и инфракрасной спектроскопии;**

8) **методы фотолюминесценции** с повышенной разрешающей способностью полезны при диагностике нанобъектов;

9) **методы диагностики, встроенные в технологию** и учитывающие специфику транспортных нанобъектов и их характерные размеры, являются частью развития **высоких технологий** получения и анализа свойств наноструктурных материалов изделия.

Формирование комплексных методов практической диагностики вызвано технологическими задачами получения наноструктур и создания на их основе поколения электронных и оптических устройств (транзисторов, лазеров и др.) с физико-химическими свойствами, не входящую в область стандартных представлений о свойствах вещества.

Качественный уровень исследований возможен только на современной экспериментальной базе на основе многофункциональных комплексов датчиковой системы, позволяющих интенсифицировать процесс при их проведении за счет их высокой загрузки, повышающих эффективность его использования, способных выполнять любые задачи данного профиля [1–6, 9–14].

В основе алгоритма выбора технологических датчиков для обеспечения измерений параметров ГТД лежит принцип максимального соответствия требований измерений и возможностей (характеристик) датчика, что требует знаний об объекте измерений и о датчиках, из которых должен быть сделан выбор. Если требуемого соответствия нет, то необходимо убедиться, что требования к датчику являются принципиально реализуемыми, а затем приступить к разработке (поиску) датчика.

Алгоритм реализации **принципа максимального соответствия требований и возможностей** сводится к следующему:

1. Формулируются исходные данные: диапазон измерения параметра и агрегатное состояние объекта измерения. Результатом является совокупность датчиков определенного назначения, основанных на разных принципах преобразования, диапазон работы которых включает в себя требуемый

диапазон измерений. На всех этапах выбора датчика является выполнение требований данного измерения.

2. Обоснование выбора мест измерений параметра – экстремальность параметра в данном месте; представительность для описания общей картины процессов на объекте; корреляция данного параметра с другими параметрами, измерение которых намечается, доступность размещения датчика и рассмотрение альтернативных реализаций измерения требуемого параметра в данном месте.

3. Выбираются датчики для измерений данного параметра с чувствительными элементами с сосредоточенными параметрами.

4. Из выбранных датчиков отбираются работоспособные в эксплуатационных условиях с учетом требований как общеклиматических (температура окружающей среды, давление, влажность и т.д.), механических (вибрации, удары, линейные и угловые ускорения и т.д.), так и общесистемных специальных требований (агрессивность среды, температура и давление среды, цикличность и многообразие воздействий, проникающая радиация и т.д.). Совокупное воздействие всех факторов на датчик существенно жестче, чем раздельное воздействие каждого фактора. Отбираются датчики, принцип преобразования в которых обеспечивает необходимое метрологическое качество.

5. Выбор датчиков по динамическим характеристикам на соответствие динамике измеряемого параметра. Динамическая погрешность датчиков должна соответствовать допустимым значениям. В случае несоответствия должна быть рассмотрена возможность введения корректирующих поправок в результате измерений, которая предполагает априорные знания о динамике процесса и динамических характеристиках выбранного датчика, включая кратковременность исследуемого процесса. Точность и динамичность находится в постоянном противоречии с его механической и метрологической надежностью.

6. Выбор датчиков по принципу системной совместимости. Если в результате отбора остаются альтернативные варианты датчиков, то для их выбора используется принцип системной совместимости. Измерения проводятся как многопараметрические, так и отдельными средствами (датчики), которые комплектуются в информационно-измерительные системы на основе единства принципа преобразования в используемых датчиках (минимальное число принципов преобразования) [1, 2, 4–8, 14].

Особенности контроля качества в аддитивном производстве деталей машин ГТД газотурбовозов [4, 5] – это параметры, которые влияют на качество продукции:

1. Мы не можем увидеть качество 3D-печати внутри изделия. Мы можем контролировать наружную поверхность, но не качество спекания металлического порошка внутри.

2. Всегда необходимо контролировать саму геометрию изделия, потому что после процесса выращивания изделия, а также после различных процессов постобработки (термических, механических и др.) геометрия изделия может меняться, что необходимо учитывать и компенсировать при моделировании САД-модели.

3. Потребность во входном контроле расходных материалов (металлопорошковых композиций).

Для решения таких задач применяется технология промышленной компьютерной томографии (КТ) – метод восстановления внутренней структуры объекта посредством многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях.

В начале технологии изготовления изделий в аддитивном производстве нужно применять КТ для отработки режимов синтеза, так как каждое изделие уникально, как и все параметры для его изготовления, их лучше подобрать еще до выращивания изделия, чтобы сократить процент негодной продукции (брак) и сэкономить расходный материал, обнаружить дефекты или пустоты в образце при текущих режимах синтеза и при необходимости их скорректировать. После изготовления детали ГТД, несмотря на заранее подобранные режимы для синтеза, необходимо выполнить ее полный контроль, чтобы выявить возможные дефекты, приводящие к отказам. После проведения КТ были обнаружены и локализованы пустоты, что критично при эксплуатации изделия; обнаружить и провести исследования по воздействию механической нагрузки на изделие. Необходим как контроль параметров внутри изделия, так и контроль внешней геометрии (линейно-угловые размеры, отклонения формы – цилиндричность, соосность и т.п.). На геометрию влияют режимы построения детали, расположение изделия внутри камеры построения 3D-принтера. После выращивания 3D-модели обязательным этапом в аддитивном производстве является термическая обработка, вызванная деформацией геометрии изделия. КТ позволяет отработать все необходимые режимы на этих этапах, чтобы в итоге получилась модель, отвечающая всем геометрическим параметрам.

Аддитивные технологии (АТ) позволяют уменьшить влияние человеческого фактора на качество получаемых изделий, поскольку изготовление производится в автоматизированном режиме обработки технологическими датчиками, включая интеллектуальные, повышает качество за счет получения заготовок по конфигурации близкой к размерам конечного изделия [1–3, 6–14].

Отличительной **особенностью** интеллектуальных датчиков ИД является **цифровая** обработка сигнала непосредственно с выхода первичного функционального преобразователя (ФП). Это гарантирует высокую точность и стабильность его характеристик во всех допустимых диапазонах измерений, а также низкую чувствительность к внешним помехам, позволяет одновременно с результатами измерения передавать данные для диагностики и мониторинга. Цифровая обработка сигнала и возможность модернизации программного обеспечения, позволяют реализовать различные функции преобразования контролируемых величин, с дальнейшим совершенствованием характеристик и выполняемых функций датчика. Передача измеренной величины происходит по последовательному каналу связи в цифровом коде. Ввод сигнала в автоматических системах управления технологическими процессами ГПМ на промышленных компьютерах может осуществляться через стандартный СОМ-порт или через шину USB. Наличие модификаций с выходным сигналом 4–20 мА и 0–5 В позволяет использовать ИД в составе систем сбора информации с аналоговыми каналами или для замены аналоговых датчиков температуры типа ИРТ 4, 5–13.

Стандарт IEEE P1451.1 определяет смешанный интерфейс (рис. 2), в котором с обычным сигналом аналогового датчика используется цифровой канал доступа к электронной спецификации TEDS, встроенной в датчик в целях самоидентификации. В обычном режиме работы выходной сигнал такого датчика является аналоговым. При поступлении от пользователя специальной команды датчик начинает передавать цифровую информацию. Передача цифровых данных осуществляется по той же паре проводников, при помощи которой подается напряжение питания и которая используется для передачи выходного высокочастотного аналогового сигнала. По окончании цифровой передачи линия связи вновь подключается к аналоговому выходным цепям датчика [2, 9–14].

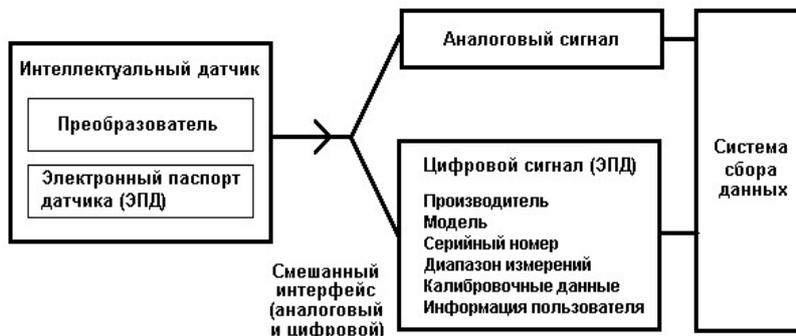


Рис. 2. Смешанный интерфейс TEDS-датчиков

Реализация этого стандарта IEEE P1451.1 позволит отказаться от традиционной практики учета использования датчиков, снизить затраты, связанные со сбором данных, их проверкой и анализом в системах и т.д., применяющихся в промышленных условиях. Система, оборудованная интеллектуальным датчиком, автоматизирует этот процесс, считывая его параметры по цифровому каналу с чипа ЭПД, позволяет реализовать автоматическое конфигурирование датчика и упростить его согласование с другой электронной аппаратурой. Датчики TEDS сами определяют себя в системе, не нужно следить за тем, к какому каналу подключен тот или иной датчик [1, 2, 9, 13, 14].

Заключение

1. Формирование комплексных методов практической нанодиагностики материалов деталей ГТД вызвано технологическими задачами получения наноструктур и создания на их основе электронных и оптических устройств (лазеров и др.) с физическими, физико-химическими свойствами, не входящую в область стандартных представлений о свойствах вещества.

2. Анализ аддитивных технологий 3D- (4D-печать) послойного синтеза металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композиций формообразования деталей скоростного железнодорожного транспорта (газотурбинные поезда) показал тренд внедрения в

промышленность высокопроизводительных лазерных, плазменных и ионно-плазменных технологических систем для спекания и сплавления металлпорошковых «умных» композиций, оснащенных системами диагностического (интеллектуального) управления технологиями, обеспечивающих надежность оборудования и качество продукции.

3. Инфраструктура инновационной деятельности ОАО «РЖД» развивается на основе создания технопарков, основными задачами которых являются повышение: эффективности использования научного оборудования высококвалифицированными специалистами; качества исследований и образования путем формирования исследовательских комплексов, отвечающих мировым стандартам ИСО по техническим и эксплуатационным характеристикам; квалификации сотрудников с разработкой новых методов и методик научных исследований «Индустрия наносистем и материалов», «Нанотехнологии и наноматериалы», « Датчики (интеллектуальные)» и выполнении прикладных исследований вузов; а также проведение симпозиумов инновационной деятельности.

4. Реализация стандарта IEEE P1451.1 (ИСО) в транспортных железнодорожных системах, оборудованных интеллектуальным датчиком, позволит автоматизировать технологический процесс, считывая его параметры по цифровому каналу с чипа и реализовать автоматическое конфигурирование датчика, упростив его согласование с другой электронной аппаратурой системы.

Список литературы

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. Алферов Ж. И., Копьев П. С., Сурис Р. А. [и др.]. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3–13.
4. Зайцев А. А., Троицкий П. С. Мотор-вагонные грузовые электропоезда – альтернатива локомотивной тяге. Сравнение и анализ // Мир транспорта. 2019. № 17. С. 72–81. doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-72-812
5. Буйносов П. А., Лаптев С. И. Организация обслуживания и ремонта газотурбовозов ГТ1h // Вестник УрГУПС. 2018. № 3. С. 43–55.
6. 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.
7. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Андрончев И. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95.
8. Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Классификация наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 70–77.
9. Перевертов В. П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах : монография. Самара : СамГУПС, 2021. 291 с.
10. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Система диагностирования и технического обслуживания НТТС и ПС в условиях РЖД // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 93–95.
11. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Романенко А. А. Нанотехнологии и качество деталей транспортного машиностроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 39–42.
12. Жданов А. Г., Перевертов В. П. Повышение надежности тормозной системы подвижного состава // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 2. С. 128–130.
13. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Кузин Н. А., Цыганова С. А. К вопросу диагностики наноматериалов в гибридных технологиях формообразования деталей в системе машиностроения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 447–449.
14. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации : учебник. М. : ИНФРА-М, 2023. 365 с.

References

1. Perevertov V.P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya = The quality of management of flexible technologies: monograph*. Samara: SamGUPS, 2019:270. (In Russ.)
2. Perevertov V.P. *Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik = Materials science and flexible technologies : textbook*. Samara: SamGUPS, 2020:280. (In Russ.)
3. Alferov Zh.I., Kop'ev P.S., Suris R.A. et al. Nanomaterials and nanotechnology. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technology*. 2003;(8):3–13. (In Russ.)

4. Zaytsev A.A., Troitskiy P.S. Motor-wagon freight electric trains – an alternative to locomotive traction. Comparison and analysis. *Mir transporta = The world of transport*. 2019;(17):72–81. (In Russ.). doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-72-812
5. Buynosov P.A., Laptev S.I. Organization of maintenance and repair of GT1h gas turbine locomotives. *Vestnik UrGUPS = Bulletin of the UrGUPS*. 2018;(3):43–55.
6. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. The quality of forming parts when integrating hybrid technologies of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):72–80. (In Russ.)
7. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Andronchev I.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming machine-building parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):85–95. (In Russ.)
8. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Classification of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):70–77. (In Russ.)
9. Perevertov V.P. *Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya = Diagnostics and control of forging machines in flexible production systems: monograph*. Samara: SamGUPS, 2021:291. (In Russ.)
10. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. The system of diagnostics and maintenance of NTTS and PS in the conditions of Russian Railways. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:93–95. (In Russ.)
11. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Romanenko A.A. Nanotechnology and quality of parts of transport engineering. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:39–42. (In Russ.)
12. Zhdanov A.G., Perevertov V.P. Improving the reliability of the braking system of rolling stock. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;2:128–130. (In Russ.)
13. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Kuzin N.A., Tsyganova S.A. On the issue of diagnostics of nanomaterials in hybrid technologies of forming parts in the mechanical engineering system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:447–449. (In Russ.)
14. Shishov O.V. *Programmiruemye kontrollery v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii: uchebnik = Programmable controllers in industrial automation systems : textbook*. Moscow: INFRA-M, 2023:365. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Петрович Перевертов

кандидат технических наук, доцент,
 профессор кафедры наземных транспортно-
 технологических средств,
 Самарский государственный университет
 путей сообщения
 (Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)
 E-mail: vpervertov@yandex.ru

Андрей Геннадьевич Жданов

кандидат технических наук, доцент,
 доцент кафедры наземных транспортно-
 технологических средств,
 Самарский государственный университет
 путей сообщения
 (Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)
 E-mail: zhdanov1965@mail.ru

Николай Андреевич Кузин

студент,
 Московский автодорожный институт
 (технический университет)
 (Россия, г. Москва, Ленинградский пр-кт 64)
 E-mail: sputnik1985nk3y@mail.ru

Valeriy P. Perevertov

Candidate of technical sciences, associate professor,
 professor of the sub-department
 of land transport and technological facilities,
 Samara State University of Transport
 and Communications
 (2V Svobody street, Samara, Russia)

Andrey G. Zhdanov

Candidate of technical sciences, associate professor,
 associate professor of the sub-department
 of land transport and technological facilities,
 Samara State University of Transport
 and Communications
 (2V Svobody street, Samara, Russia)

Nikolai A. Kuzin

Student,
 Moscow Road Institute (Technical University)
 (64 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)

Вера Николаевна Новикова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры наземных транспортно-
технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)
E-mail: novikova@samgups.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Vera N. Novikova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of land transport and technological facilities,
Samara State University of Transport
and Communications
(2V Svobody street, Samara, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 10.08.2023

Поступила после рецензирования/Revised 26.10.2023

Принята к публикации/Accepted 20.11.2023