

КЛАССИФИКАЦИИ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРАДИЦИОННЫХ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В. П. Перевертов¹, Н. А. Кузин², Н. К. Юрков³

¹ Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

² Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Системный подход применяется к анализу эволюции развития технологий и создания умных производственных систем. *Материалы и методы.* Показано, что аддитивные технологии – это технологии 3D (4D)-печати изделий с помощью послойного лазерного (плазменного, ионного и т.д.) сплавления и/или спекания порошковых материалов, в том числе и наноматериалов. Предложена классификация порошковых наноматериалов, предназначенных как для традиционных, так и для аддитивных технологий формообразования деталей с составными элементами. Показано, что для эффективного производства изделий с помощью 3D- и 4D-печати (технологий) необходима система диагностического управления концентрированными потоками энергии технологического оборудования. Альтернативой традиционным подходам являются «умные» производства, ранее называемые гибкими производственными системами. *Результаты и выводы.* Оценивается возможность использования «умных» производств в решении проблем создания производственной инфраструктуры ОАО «РЖД», предназначенной для мелкосерийного производства/ремонта подвижного состава.

Ключевые слова: качество, контроль, датчики, технологии традиционные и аддитивные (3D-печать), наноматериалы и «умные» материалы

Для цитирования: Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Классификации наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 70–77. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-8

CLASSIFICATIONS OF NANOMATERIALS FOR TRADITIONAL AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE SYSTEM OF TRANSPORT ENGINEERING

V.P. Perevertov¹, N.A. Kuzin², N.K. Yurkov³

¹ Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia

² Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

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

Abstract. *Background.* The systems approach is applied to the analysis of the evolution of technology development and the creation of smart production systems. *Materials and methods.* It is shown that additive technologies are technologies for 3D (4D) printing of products using layer-by-layer laser (plasma, ion, etc.) fusion and/or sintering of powder materials, including nanomaterials. A classification of powder nanomaterials is proposed for both traditional and additive technologies for shaping parts with constituent elements. It is shown that for the efficient production of products using 3D and 4D printing (technologies), a system of diagnostic control of concentrated energy flows of technological equipment is needed. An alternative to traditional approaches is "smart" production, previously called flexible production systems. *Results and conclusions.* The possibility of using "smart" industries in solving the problems of creating the production infrastructure of Russian Railways for small-scale production/repair of rolling stock is assessed.

Keywords: quality, control, sensors, traditional and additive technologies (3-D printing), nanomaterials and smart materials

For citation: Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Classifications of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):70–77. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-8

Аддитивные технологии (АТ) – это технологии АМ (АФ) или 3D (4D)-печать послойного лазерного (плазменного, ионного и т.д.) сплавления – спекания порошковых материалов, включая композиционные и нанокристаллические материалы, позволяющие в автоматизированном цифровом режиме строить трехмерные изделия по компьютерной модели, сокращающие время и затраты на получение изделия, устраняющие дефекты, приводящие к отказам и уменьшающие трудоемкость обработки материалов, называют «технологией 5-го промышленного уровня» [1–6].

Для эффективного производства изделий с помощью 3D- и 4D-печати (технологий) необходима система диагностического управления концентрированными потоками энергии технологического оборудования, оснащенная быстродействующими бесконтактными датчиками (сенсорами) и исполнительными органами – основных элементов УПС [4–7]. Анализ работ по изучению АТ послойного синтеза металлических, полимерных, металлокерамических и нанопорошковых композиций формообразования деталей (заготовок) показал тренд исследований: внедрение в промышленность высокопроизводительных лазерных и плазменных, ионных энергетических технологических систем для спекания и сплавления металлопорошковых композиций, оснащенных бесконтактными, быстродействующими датчиками, основы систем контроля, диагностики и адаптивного (интеллектуального) управления альтернативными (гибридными) технологиями, обеспечивающих надежность оборудования и качество продукции (деталей, узлов, агрегатов) в условиях УПС [4–9].

Общим требованием к порошковым материалам для технологий АМ (АФ)-машин является **сферическая форма частиц**, обеспечивающая компактную укладку частиц порошка в определенный объем, а также «текучесть» порошковой композиции с минимальным сопротивлением в системах подачи порошкового материала. **Методы получения порошковых материалов** разделяют на **физико-химические** и **механические**. К **физико-химическим** относят методы, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья, при этом химический состав и структура конечного продукта – порошковый материал – существенно отличается от исходного материала. **Механические методы** обеспечивают производство порошкового материала из сырья без изменения химического состава с помощью размолла в **мельницах**, а также **диспергирование (атомизация)** процесса. Частицы порошков, получаемых путем размолла, имеют неправильную форму и содержат примеси и продукты износа и применяют в традиционных технологиях формообразования деталей.

Порошковые материалы (порошки) – сыпучие материалы с размером частиц до 1,0 мм – классифицируют по **размерам частиц** (диаметр d):

- 1) **нанодисперсные** : $d < 0,001$ мкм;
- 2) **ультрадисперсные**: $d = 0,01–0,1$ мкм;
- 3) **высокодисперсные**: $d = 0,1–10$ мкм;
- 4) **мелкие**: $d = 10–40$ мкм;
- 5) **средние**: $d = 40–250$ мкм;
- 6) **крупные**: $d = 250–1000$ мкм [8].

В аддитивных FM (АМ) технологических машинах используются порошки различного фракционного состава с определенным перечнем материалов. Отсутствие стандартов на порошковые материалы для АТ и методов оценки качества (контроль и диагностика) свойств материалов, затрудняет их применение из-за **анизотропии**, возникающей при послойном принципе создания детали.

Одним из трендов развития машиностроения и материаловедения является **разработка** новых порошковых **наноматериалов** и гибких технологий их **получения** и **обработки** [1–7, 10, 11], создания на их основе программируемых материалов и композитов.

К **наноматериалам** относят дисперсные и объемные (массивные) материалы, содержащие структурные элементы (зерна, кристаллиты, блоки, кластеры), геометрические размеры которых не превышают 100 нм, и обладающие новыми свойствами, наличие которых обеспечивает появление качественно новых механических, химических, физических свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов [1–7, 10–14], функциональных и эксплуатационных характеристик. **Любые преобразования вещества на нанометровом уровне** составляют **нанотехнологии**, обеспечивающие возможность путем контроля создавать наноматериалы, а также осуществлять их интеграцию в надежно функционирующие сложные, управляемые динамические системы [2, 4–7, 9]. В отличие от традиционной технологии для нанотехнологии характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них «бездефектные» материалы с принципиально новыми физико-химическими и биологически-

ми свойствами, новые классы устройств с характерными нанометровыми размерами. Анализ АТ позволяет выделить в ней ряд важнейших направлений:

- 1) **молекулярный дизайн**;
- 2) **материаловедение** (создание «бездефектных» высокопрочных материалов);
- 3) **приборостроение** (создание сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых и магнитных микроскопов, миниатюрных сверхчувствительных датчиков, нанороботов и т.д.);
- 4) **электроника** (конструирование нанометровой элементной базы для ЭВМ – нанопроводов, транзисторов, выпрямителей, дисплеев и т.д.);
- 5) **оптика** (создание и синтез систем с нанолазерами);
- 6) **гетерогенный катализ**;
- 7) **медицина**;
- 8) **трибология** (определение связи наноструктуры материалов и сил трения для изготовления пар трения);
- 9) **управляемые ядерные реакции**.

Классификация наноматериалов для сложных систем представляет собой совокупность классификации наноматериалов 1 рода (по основным категориям) и классификации 2 рода (структура наноматериалов по кристаллитам).

Классификация наноматериалов 1 рода по основным категориям:

1 категория – материалы твердых тел, размеры которых в трех координатах не превышают 100 нм. К ним относятся наноразмерные частицы (нанопорошки), нанопроволоки и нановолокна, пленки толщиной менее 100 нм, которые могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких их слоев (для пленки), т.е можно классифицировать как наноматериалы с малым числом структурных элементов или наноматериалы в виде наноизделий.

2 категория – материалы в виде изделий с размером 1 мкм...1 мм (проволоки, фольга) и их можно классифицировать как наноматериалы с большим числом структурных элементов (кристаллитов), или **наноматериалы в виде микроизделий**;

3 категория – объемные наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (мм), состоящие из большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и являющихся поликристаллическими материалами с размером зерна 1...100 нм, которые условно можно разделить на две группы. В **группу 3.1** входят однофазные материалы, структура и химический состав которых изменяется по объему материала только на атомном уровне [3–8] и которые находятся в неравновесном состоянии (в состоянии стекла). К **группе 3.2** относятся микроструктурно неоднородные материалы, состоящие из наноразмерных элементов (кристаллитов, блоков) с различной структурой и составом на основе сложных металлических сплавов. **Вторая и третья категории** наноматериалов являются **нанокристаллическими** или **нанофазными материалами** [10].

К **четвертой категории** относятся порошковые композиционные материалы (КМ), содержащие в своем составе компоненты из наноматериалов, отнесенные к **первой категории** (композиты с наночастицами и/или нановолокнами, изделия с измененным ионной имплантацией поверхностным слоем или тонкой пленкой) и **второй категории** (композиты, упрочненные волокнами и/или частицами с наноструктурой, материалы с модифицированным наноструктурным поверхностным слоем или покрытием), а также КМ со сложным использованием нанокомпонентов. **Классификация наноматериалов 2 рода по кристаллитам** содержит свойства (признаки), которые определяются характером распределения, формой и химическим составом кристаллитов (наноразмерных элементов), из которых они состоят (табл. 1).

По **форме кристаллитов** наноматериалы можно разделить на:

- 1) слоистые (пластинчатые);
- 2) волокнистые (столбчатые);
- 3) равноосные [3, 10–13].

Толщина слоя, диаметр волокна и размер зерна составляет порядка < 100 нм.

По **химическому составу** кристаллитов и их границ наноматериалы можно классифицировать на четыре группы [1–3, 10–13]:

1) наноматериалы, у которых химический состав кристаллитов и границ раздела одинаков (однофазные): чистые металлы с нанокристаллической равноосной структурой и слоистые поликристаллические полимеры;

2) материалы, у которых химический состав кристаллитов различен, но границы являются идентичными по химическому составу;

- 3) наноматериалы, у которых как кристаллиты, так и границы имеют различный химический состав;
- 4) наноматериалы, в которых наноразмерные частицы, волокна, слои распределены в матрице, имеющей другой химический состав.

Основные методы получения нанокристаллических материалов для АТ представлены на рис. 1.

Таблица 1

Основные типы структуры наноматериалов [1–3, 5, 6, 11]

Характер распределения	кристаллитное			матричное
	состав кристаллитов и границ одинаковый	состав кристаллитов различен при одинаковом составе границ	состав и кристаллитов и границ различный	
Химический состав				кристаллиты распределены в матрице другого состава
Форма кристаллитов:				
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

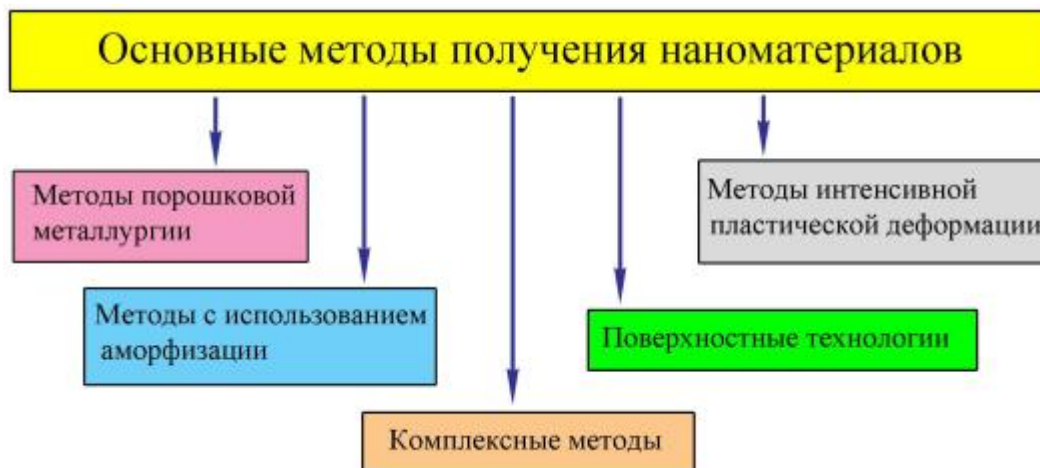


Рис. 1. Основные методы получения наноматериалов

Методы порошковой металлургии позволяют получить порошковые материалы с управляемыми характеристиками: механическими, магнитными, технологическими и др., а изделия из них используются в транспортном машиностроении:

- 1) механическое измельчение металлов в вихревых, вибрационных и шаровых мельницах и т.д.;
- 2) распыление расплавов жидких металлов в среде инертных газов для эффективного очищения расплава от многих примесей при высокой производительности и экономичности процесса;

- 3) электролитический метод;
- 4) специальные порошки, получаемые осаждением, науглероживанием, термической диссоциацией летучих соединений (карбонильный метод) и другими способами [4–9].

Методы с использованием аморфизации позволяют получать аморфные металлические сплавы, являющиеся новым перспективным материалом путем сверхбыстрого охлаждения материала из газообразного, жидкого или ионизированного состояния. Существуют методы получения аморфных сплавов [13]:

- 1) высокоскоростное ионно-плазменное и термическое напыление материала на охлаждаемую жидким азотом на подложку позволяет получать слои толщиной до 5 мм;
- 2) химическое или электролитическое осаждение ионов металлов на подложку;
- 3) оплавление тонких поверхностных слоев деталей лазерным лучом;
- 4) лазерная обработка смеси порошков при быстром отводе тепла от расплава;
- 5) закалка из жидкого состояния и т.д.

Методы позволяют получать аморфные сплавы [13] при производстве лент, фольг и проволок толщиной до 100 мкм и шириной до 200 мм. Возможность получения аморфного состояния определяется химическим составом и скоростью охлаждения [3, 13, 14]. Аморфное состояние сплавов является метастабильным, поэтому после аморфизации часто проводят отжиг, в процессе которого частично происходит переход к более стабильному нанокристаллическому состоянию аморфизирующихся сплавов. Для получения аморфного состояния проводят предварительную обработку (высокоскоростная закалка) заготовок: объемно-аморфизирующихся сплавов на основе железа, возможно получение нанокристаллической или аморфно-нанокристаллической структуры непосредственно при закалке расплава со скоростью охлаждения немного ниже критической скорости образования аморфного состояния [3, 7–14]. Для получения наноструктуры используется контролируемая кристаллизация сплавов из аморфного состояния при термообработке [14], получение нанокристаллической структуры путем инициации процессов кристаллизации в процессе деформирования аморфного материала.

Методы получения наноструктурных материалов (рис. 2) с использованием интенсивной пластической деформации (ИПД) относятся к обработке материалов давлением (ОМД) и основаны на пластической деформации с большими степенями деформации в условиях высоких давлений, когда происходит сильное измельчение микроструктуры в металлах и сплавах до наноразмерного диапазона [3, 10, 11]. Методом ИПД кручения под высоким давлением измельчается структура материала после деформации образца. Образование ультрамелкозернистой структуры с размером зерен 100–200 нм (рис. 2,а) определяется условиями деформации – давлением, температурой, скоростью деформации и видом обрабатываемого материала. Метод равноканального углового прессования (рис. 2,б), основанный на использовании деформации сдвигом, формирует ультрамелкозернистую структуру в диапазоне от 200 до 500 нм [10].

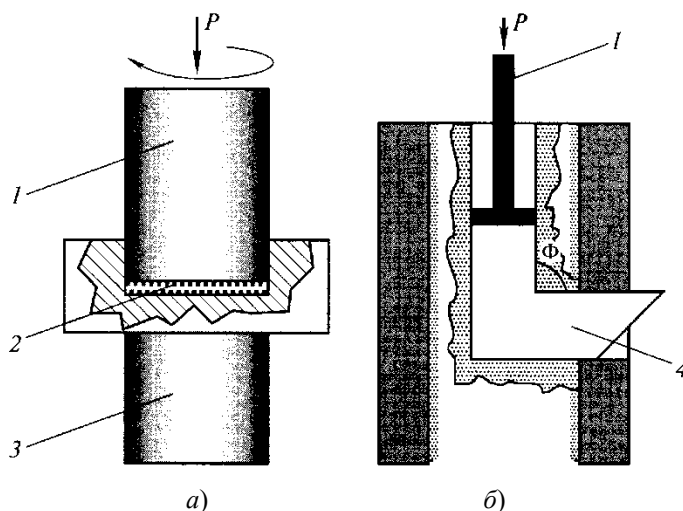


Рис. 2. Схема методов интенсивной пластической деформации (ИПД): а – метод кручения под высоким давлением; б – метод равноканального углового прессования; 1 – верхний пуансон; 2 – образец; 3 – нижний пуансон; 4 – заготовка

Разрабатываются методы ИПД на КШМ ударного действия (молоты, винтовые прессы) и специальная прокатка, которые должны отвечать требованиям:

- 1) формирования ультрамелкозернистых структур для качественного изменения свойств материалов;
- 2) обеспечения стабильности свойств наноматериала;
- 3) отсутствия механических повреждений и трещин.

Наноструктурные материалы содержат в структуре большое количество границ зерен, формирующих их необычные физические и механические свойства, высокую прочность и уникальную пластичность. Методы получения наноматериалов с использованием технологий обработки поверхности материалов путем создания на поверхности материалов модифицированных слоев рассматриваются как методы нанотехнологии, так как позволяют создавать наноразмерные и наноструктурные слои на поверхности материалов, композиционные материалы с наноконпонентами, а в ряде случаев и наноматериалы в виде нано- и микроизделий. Данные методы можно подразделить на две группы: технологии, основанные на физических и химических процессах. Среди наноориентированных технологий обработки поверхности перспективными являются ионно-вакуумные технологии нанесения покрытий. Полученные слои отличаются высокой адгезией, а температурное воздействие на материал основы минимальное. Размер кристаллитов в пленках, полученных по технологиям вакуумного нанесения, может достигать 1–3 нм [8, 14].

Комплексные методы получения наноматериалов используются последовательно (параллельно) в разных технологиях, рассмотренных ранее.

Синтез компьютерного моделирования и материаловедения позволил создавать программируемые умные материалы на основе наноматериалов, из которых изготавливаются изделия, способные к самоорганизации, изменяя при этом свои форму и свойства (функции) при воздействии энергии (световой, тепловой и т.д.), благодаря тому, что в них запрограммированы определенные свойства, реализуемые технологией четырехмерной (4D) печати. Технология 4D-принтер является подвидом аддитивных технологий (АТ) для создания самосборных технологических систем на основе программируемых наноматериалов и включает алгоритм 4D-печати:

- 1) 3D-принтер создает объект путем послойного распределения материала;
- 2) на выходе мы получаем изделие нужной конфигурации;
- 3) в этом особенность 4D-печати – напечатанные таким образом изделия (также создаются слой за слоем) могут через определенный промежуток времени менять свои форму и свойства под действием энергии;
- 4) изделия, изготовленные технологией 4D-принтером из программируемых материалов, могут собирать (выстраивать) себя сами, превращать одни изделия в другие или менять их свойства по мере надобности с помощью освоенных технологий – 3D-принтеров [4–6].

Разработка программируемых умных материалов на основе наноматериалов позволит создать роботизированные микроскопические системы с помощью 4D-печати, способных менять свою форму и функции. Если в процессе объединения технологии 4D-печати и наноматериалов в объект (изделие) внедрить «умные» материалы, то на выходе получатся многофункциональные наноконпози́ты, способные изменять свои свойства при воздействии на них электромагнитных волн (ультрафиолетовое излучение). В ходе эволюции таких материалов появится новый класс датчиков для встраивания в технические системы контроля и диагностики параметров микротехнологий. Технология 3D-принтера позволяет «вырастить» изделие, способное менять свои формы, функции и назначения. Для этого нужно «заложить» в управляющие программы аддитивного оборудования данные о свойствах программируемых материалов и о трансформациях, которые должны произойти с «выращенным» изделием.

Заключение

1. Анализ аддитивных технологии 3D (4D)-послойного синтеза металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композиций формообразования деталей показал тренд внедрения в промышленность высокопроизводительных лазерных, плазменных и ионно-плазменных технологических систем для спекания и сплавления металлопорошковых «умных» композиций, оснащенных системами контроля, диагностики и адаптивного (интеллектуального) управления технологиями, обеспечивающих надежность оборудования и качество продукции в условиях УПС.

2. Классификация наноматериалов является основой создания контролируемых технологий программируемых порошковых материалов, использование которых в технологиях 4D-печати позволит создавать самосборные технологические системы (датчики, роботы) в транспортных системах, имеющих специальные свойства: антифрикционные детали узлов трения приборов и машин, конструкционные и электротехнические детали для электронной и радиотехнической промышленности.

Список литературы

1. URL: <http://nanodigest.ru/stati/entciklopediia-nanotekhnologii>
2. URL: <http://www.museion.ru/prev.pdf>
3. Алымов М. И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. М. : МИФИ, 2005. 52 с.
4. Перевертов В. П. Качество управления гибкими технологиями : монография. Самара : СамГУПС, 2019. 270 с.
5. Перевертов В. П. Материаловедение и гибкие технологии : учебник. Самара : СамГУПС, 2020. 230 с.
6. Перевертов В. П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах : монография. Самара : СамГУПС, 2021. 291 с.
7. Перевертов В. П., Андрончев И. К. Технологические возможности концентрированных потоков энергии для формообразования деталей машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 71–83.
8. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Пиганов М. Н. Методика расчета быстродействующего исполнительного органа КШМ с системой диагностического управления // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 40–49.
9. 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.
10. Новые материалы / под ред. Ю. С. Карабасова. М. : МИСИС, 2002. 736 с.
11. Головин Ю. И. Введение в нанотехнологию. М. : Машиностроение, 2003. 112 с.
12. Алымов М. И. Механические свойства нанокристаллических материалов. М. : МИФИ, 2004. 32 с.
13. Конструкционные материалы / под ред. Б. Н. Арзамасова. М. : Машиностроение, 1990. 688 с.
14. Ковнеристый Ю. К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе // Металловедением и термическая обработка. 2005. № 5. С. 199–219.

References

1. Available at: <http://nanodigest.ru/stati/entciklopediia-nanotekhnologii>
2. Available at: <http://www.museion.ru/prev.pdf>
3. Alymov M. I. *Metody polucheniya i fiziko-mekhanicheskie svoystva ob'emnykh nanokristallicheskikh materialov = Methods of obtaining and physico-mechanical properties of bulk nanocrystalline materials*. Moscow: MIFI, 2005:52. (In Russ.)
4. Perevertov V.P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya = Quality of management of flexible technologies : monograph*. Samara: SamGUPS, 2019:270. (In Russ.)
5. Perevertov V.P. *Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik = Materials science and flexible technologies : textbook*. Samara: SamGUPS, 2020:230. (In Russ.)
6. 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.)
7. Perevertov V.P., Andronchev I.K. Technological capabilities of concentrated energy flows for shaping machine-building parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):71–83. (In Russ.)
8. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Piganov M.N. Methodology for calculating a high-speed executive body of a KSM with a diagnostic control system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):40–49. (In Russ.)
9. 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.)
10. Karabasov Yu.S. (ed.). *Novye materialy = New materials*. Moscow: MISIS, 2002:736. (In Russ.)
11. Golovin Yu.I. *Vvedenie v nanotekhnologiyu = Introduction to nanotechnology*. Moscow: Mashinostroenie, 2003:112. (In Russ.)

12. Alymov M.I. *Mekhanicheskie svoystva nanokristallicheskih materialov = Mechanical properties of nanocrystalline materials*. Moscow: MIFI, 2004:32. (In Russ.)
13. Arzamasov B.N. (ed.). *Konstruktsionnye materialy = Structural materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1990:688. (In Russ.)
14. Kovneristy Yu.K. Volumetrically amorphizing metal alloys and nanostructured materials based on them. *Metallovedeniem i termicheskaya obrabotka = Metallovedenii i heat treatment*. 2005;(5):199–219. (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, 2 В)
E-mail: vperevertov@yandex.ru

Николай Андреевич Кузин

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

Valeriy P. Perevertov

Candidate of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of ground
transportation and technology tools,
Samara State University of Railway Transport
(2 V Svobody street, Samara, Russia)

Nikolai A. Kuzin

Student,
Moscow Road Institute (Technical University)
(64 Leningradsky avenue, Moscow, 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 29.05.2021

Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2021

Принята к публикации / Accepted 14.09.2021