

Научная статья
УДК 629.4:778.64
doi: 10.46684/2687-1033.2024.3.297-303

Аддитивные технологии — новый вектор в производстве и ремонте подвижного состава

Е.Н. Кузьмичев¹, Д.Н. Никитин^{2✉}, Е.А. Дроздов³

^{1,2,3} Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС); г. Хабаровск, Россия

¹ accord@festu.khv.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7182-9260>

² rain238@yandex.ru✉

³ drozd-1671@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5487-4924>

АННОТАЦИЯ

Проанализировано влияние четвертой промышленной революции, известной как Индустрия 4.0, на современное промышленное производство и жизнь общества. Представлены основные преимущества Индустрии 4.0, такие как повышение производительности и безопасности труда, разработка новых продуктов и материалов, а также увеличение конкурентоспособности продукции. Особое внимание уделяется аддитивным технологиям (АТ) и их роли в современном инжиниринге в рамках концепции Индустрии 4.0.

Изложены методы АТ, их классификация по материалам и методам производства, а также применение в различных отраслях промышленности. Представлен пример успешного использования аддитивных технологий АО «Научно-производственная корпорации «Уралвагонзавод», где с помощью 3D-принтеров создаются формы и стержни для отливки деталей с высокой скоростью и качеством.

Рассмотрен проект внедрения 3D-принтеров в сервисные депо дирекции моторвагонного подвижного состава компании ОАО «РЖД» с акцентом на экономические и временные выгоды от использования АТ. Концепция внедрения АТ в обслуживание и ремонт подвижного состава предполагает создание опорных депо по сети железных дорог компании ОАО «РЖД».

Показана значимость подготовки высококвалифицированных специалистов в области АТ и необходимости разработки образовательных программ для подготовки будущих работников, способных решать сложные задачи по созданию и применению новых промышленных технологий. Особое внимание уделяется синергетическим подходам в образовании для сочетания обучения с научной деятельностью и создания инновационных технологических решений.

Ключевые слова: Индустрия 4.0; аддитивные технологии; 3D-печать; селективное спекание; селективное плавление; ремонт; подвижной состав

Для цитирования: Кузьмичев Е.Н., Никитин Д.Н., Дроздов Е.А. Аддитивные технологии — новый вектор в производстве и ремонте подвижного состава // Техник транспорта: образование и практика. 2024. Т. 5. Вып. 3. С. 297–303. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.3.297-303>.

Original article

Additive manufacturing — a new vector in the production and repair of rolling stock

Evgenii N. Kuzmichev¹, Dmitry N. Nikitin^{2✉}, Evgeny A. Drozdov³

^{1,2,3} Far Eastern State Transport University (FESTU); Khabarovsk, Russian Federation

¹ accord@festu.khv.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7182-9260>

² rain238@yandex.ru✉

³ drozd-1671@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5487-4924>

ABSTRACT

The influence of the fourth industrial revolution, known as Industry 4.0, on modern industrial production and social life is analyzed. The main advantages of Industry 4.0 are presented, such as increasing productivity and occupational safety, developing new products and materials, as well as increasing the competitiveness of products.

© Е.Н. Кузьмичев, Д.Н. Никитин, Е.А. Дроздов, 2024

Special attention is paid to additive technologies and their role in modern engineering within the framework of the Industry 4.0 concept.

The methods of additive technologies, their classification by materials and production methods, as well as their various applications in various industries are described in detail. An example of the successful use of additive technologies is presented on the example of JSC Uralvagonzavod Scientific and Production Corporation, where molds and rods for casting parts with high speed and quality are created using 3D printers.

The project of introducing 3D printers into the service depots of the directorate of motor car rolling stock of JSC Russian Railways is considered, with an emphasis on the economic and temporary benefits from the use of additive technologies. The concept of introducing additive technologies in the maintenance and repair of rolling stock involves the creation of support depots on the railway network of JSC Russian Railways.

In conclusion, the importance of training highly qualified specialists in the field of additive technologies and the need to develop educational programs to train future employees capable of solving complex tasks of creating and applying new industrial technologies is presented. Special attention is paid to synergetic approaches in education to combine learning with scientific activity and the creation of innovative technological solutions.

Keywords: Industry 4.0; additive technologies; 3D printing; selective sintering; selective melting; repair; rolling stock

For citation: Kuzmichev E.N., Nikitin D.N., Drozdov E.A. Additive manufacturing — a new vector in the production and repair of rolling stock. *Transport technician: education and practice*. 2024;5(3):297-303. (In Russ.). <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.3.297-303>.

ВВЕДЕНИЕ

Мы являемся свидетелями и участниками четвертой промышленной революции, часто называемой Индустрия 4.0, которая подразумевает новые подходы к промышленному производству, основанные не только на повсеместном внедрении информационных технологий в производство и масштабной автоматизации бизнес-процессов, а также использовании искусственного интеллекта во всех сферах жизни людей¹. Ключевыми преимуществами четвертой промышленной революции являются: повышение производительности, безопасности работников за счет сокращения рабочих мест с опасными условиями труда, принципиально новые продукты и материалы, рост конкурентоспособности продукции, а также многое другое.

Главное отличие Индустрии 4.0 от остальных заключается в том, что она меняет не только производство, но жизненный уклад — экономику, взаимоотношения между людьми. В какой-то степени происходит переосмысление того, что значит быть человеком. На наших глазах новые методы и технологии, такие как роботизация, интернет вещей (IoT), 3D-печать, искусственный интеллект, технологии виртуальной и дополненной реальности, биоинженерия и нейротехнологии становятся частью современного повседневного существования [1].

Согласно концепции развития Национальной технологической инициативы РФ в направлении новых производственных технологий, а также общей тенденции цифровизации производства, мы наблюдаем преобразования и в инженерной деятельности. Особенно ярко это проявляется в области аддитивных технологий (АТ). Это касается и современного инжиниринга в рамках концепции Индустрии 4.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Остановимся подробнее на методах АТ. В недалеком прошлом, 10–15 лет назад, АТ применялись преимущественно в высокотехнологических продвинутых отраслях промышленного производства, а именно — автомобильной, авиационной и космической, а также в точном приборостроении и инновационной медицине.

В эпоху современной экономики время, которое затрачивается на производство товара, является одним из важнейших факторов успеха или полного провала бизнеса. Даже качественно произведенный товар может оказаться невостребованным, если к моменту выхода новой продукции на рынке будут присутствовать подобные товары конкурентов. Поэтому все больше направлений промышленности начинают активно осваивать технологии

¹ Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». URL: https://www.hse.ru/data/2013/07/08/1288942930/FCP_Research.pdf

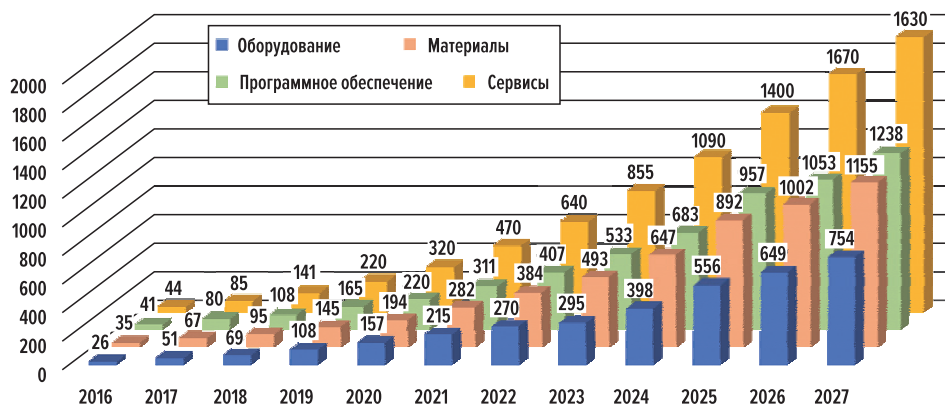


Рис. 1. Тенденция развития рынка аддитивных технологий в промышленной отрасли 2016–2027 гг.

аддитивного производства. Их чаще используют научно-исследовательские организации, архитектурные и конструкторские бюро, дизайн-студии и частные лица для творчества или в качестве хобби.

Ведущий поставщик данных отраслевого анализа и прогнозирования рынка для индустрии аддитивного производства компания SmarTech Analysis в своем исследовании рынка сообщает, что растущее внедрение АТ в промышленную отрасль к 2027 г. принесет 2 млрд долл. общей прибыли, включая возможность годового дохода в размере 975 млн долл. от продаж аддитивного оборудования, рынок которого ежегодно будет расти (рис. 1) [2, 3].

Прогнозы различных аналитических центров в сфере развития и внедрения современных технологий в промышленном секторе экономики разных стран показывают, что вектор развития АТ будет постепенно меняться, т.е. произойдет снижение применения технологий в области прототипирования при одновременном увеличении роли технологий в производстве функциональных компонентов и инструментов (рис. 2) [4–6].

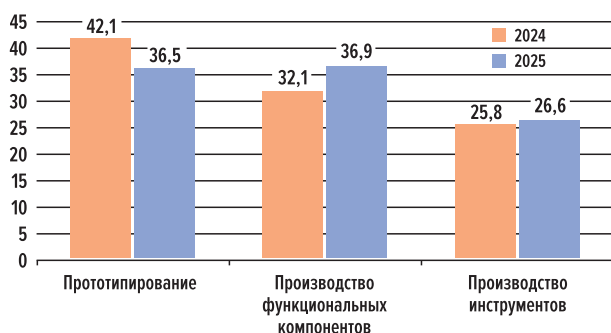


Рис. 2. Прогнозы развития рынка аддитивных технологий за 2024–2025 гг.

Аддитивные технологии можно условно классифицировать по исходным материалам для производства (металлические, неметаллические), а также по виду исходного материала (жидкие, сыпучие, листовые, волокнистые), способу формирования слоя и методам отверждения или фиксации слоя [7–9]. В стандарте ASTM F2792-12a аддитивные технологии подразделяют на две основные категории: процессы, в которых формирование изделий производится в толще порошка (Powder Bed Fusion); и процессы, предполагающие подачу строительного материала (порошок, проволока) непосредственно в зону расплавления (Directed Energy Deposition) [10, 11]. К первой категории относятся такие процессы, как селективное лазерное спекание (Selective Laser Melting — SLM), ко второй — селективное электронно-лучевое плавление (Electron Beam Melting — EBM). Для установок данной категории распространено название Powder Bed Deposition (PBD). Российские стандарты, регламентирующие классификацию АТ (подобно ASTM F2792-12a) — это ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения» и ГОСТ Р 57589-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования»².

Применение АТ многогранно, актуально и зависит от поставленных конкретных производственных задач. Каждая из АТ имеет свои особенности, преимущества и недостатки [12].

Анализ современного состояния 3D-технологий для производства объемных металлических изделий [13, 14] показывает, что для изготовления точных деталей малых размеров экономически оправданно применение лазерных технологий

² ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.

(например, SLM). Для производства крупногабаритных деталей актуальными остаются сварочные технологии (которые по современной классификации также относят к аддитивным).

Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру подачи материала и энергии. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий [15–17]. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств готового изделия.

Аддитивное производство постепенно становится локомотивом развития современной промышленности, благодаря ему меняется структура промышленности и экономики: развивается экологичное «зеленое» производство, уменьшается площадь загрязнения, появляются инновационные варианты утилизации. Анализ процессов 3D-печати деталей в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций, позволяют за счет создания ажурной конструкции формировать у изделий абсолютно уникальные физико-механические свойства, сочетающие высокую твердость, прочность и упругость. Таким образом, при использовании АТ в отличие от других методов промышленного производства формируются свойства изделия не из-за свойств материала, а именно посредством технологии его получения [18–20]. Применение 3D-печати позволяет создавать облегченные, так называемые ажурные конструкции, обеспечивая необходимые прочностные характеристики изделия.

При этом комплексное использование методов контроля и диагностики процесса аддитивного производства дает возможность производить изделия локально непосредственно на месте, что существенно сокращает время производства требуемых деталей и позволяет нивелировать влияние простоев в ремонте.

Использование АТ в условиях новой концепции развития сервисного обслуживания подвижного состава (ПС) позволит не только сократить время нахождения в ремонте, но и значительно повысит жизненный цикл ПС.

В качестве примера применения АТ при производстве ПС можно привести успешный опыт АО «Научно-производственная корпорации “Уралвагонзавод”». В рамках диверсификации производства с помощью 3D-принтера на предприятии изготавливаются опытные формы и стержни для от-

ливки деталей перспективных образцов техники. Применение АТ обеспечивает высокоскоростную печать песчаных форм для отливок различных размеров. Так, создание деталей и сборочных единиц (ДСУ) автосцепного устройства занимает всего около 16 ч. Все отпечатанные литейные формы имеют достаточную прочность, высокую точность исполнения и качество, что позволяет не только экономить металл при отливке готового изделия, но и исключает механическую обработку после литья.

На предприятии успешно используется 3D-принтер, выполняющий печать высокопрочным ABS-пластиком. Оборудование используется для изготовления негативов, литейной оснастки, пресс-форм, а также технологических приспособлений и наглядных макетов из пластика. Для создания цифровой модели ДСУ автосцепного оборудования на основе технологий современного реверс-инжиниринга используются высокотехнологичные системы оптического 3D-сканирования.

Группа компаний 2050.Digital для своих базовых заказчиков АО «Трансмашхолдинг» и ГК «ЛокоТех» предлагает изготовление неотчетливых (это не значит неважных — инспектор-приемщик Центра технического аудита РЖД может посчитать отсутствие таких элементов важным и не выпустить локомотив на линию) пластиковых элементов конструкции всех серий локомотивов и прочего ПС: от всевозможных кнопок, ручек, держателей, втулок, креплений до уникальных элементов интерьера кабины локомотива.

Следует отметить и проект внедрения 5-осных 3D-принтеров Epit 5.1 в сервисные депо (СД) дирекции моторвагонного подвижного состава (МВПС) ОАО «РЖД». По оценкам экспертов применение 3D-печати при обслуживании МВПС ОАО «РЖД» только по четырем закупочным позициям (пыльник гасителя колебаний, шестерня мотор-редуктора стеклоочистителя, ручка крана машиниста, крыльчатка подогревателя жидкости двигателя) может дать экономию в 12,5 млн руб. в год. Предполагается, что при использовании 3D-печати не будет необходимости закупать новый узел целиком, так как ряд его компонентов можно будет напечатать в депо.

Дополнительно сократятся сроки поступления деталей в работу: если поставка по закупочной процедуре составляет до 6 месяцев, то 3D-печать позволяет изготавливать их за 1–3 дня.

Концепция внедрения АТ в технологический процесс обслуживания МВПС предполагает создание опорных депо, в которых будет разработана технология изготовления новых деталей, остальные депо будут осуществлять производство на местах на основе готовых программ из единой цифровой библиотеки, пополняемой на основе обратной связи о поломках. ОАО «РЖД» готово

оснастить 3D-принтерами все депо Центральной дирекции моторвагонного подвижного состава до конца 2024 г.

Сейчас предпринимаются попытки создания облачных сервисов — платформ, на которых будут встречаться заказчики и исполнители. Такие платформы существуют на западных рынках, а с развитием рынка потребность в них возникнет и в России. Задача — привлечь профессиональных производителей с самыми разными компетенциями в 3D-печати (определенные материалы, размеры и характеристики, география) и дать им работу. А заказчикам пользование платформой должно дать уверенность в том, что деталь будет изготовлена в срок и с требуемым качеством. В своем идеальном планируемом состоянии подобная платформа должна обеспечить «беспроводной» контакт между заказчиком, например снабженцем депо в Мурманске, и владельцем 3D-принтера. Заказчик находит в каталоге необходимую запчасть, нажимает на кнопку «Выбрать» и этим действием фактически запускает процесс печати.

3D-принтинг состоит из нескольких этапов. Нужна готовая 3D-модель, либо деталь нужно сканировать, потом с ней работает дизайнер, программа вырисовывает ее, задавая параметры для принтера. Далее за нее принимается еще один дизайнер, аддитивный. Его задача — подготовить процедуру печати, определить оптимальное положение детали на печатном столе и создать оптимальную систему поддержек (это справедливо лишь для ряда самых распространенных технологий, таких как FDM, к примеру).

В начавшемся процессе печати есть масса критических параметров — износ сопла, состояние кинематики, соответствие материала поставленной задаче, скорость подачи материала, температура. И наконец, этап постобработки — удаление поддержек, отделение от стола, финишная обработка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования можно заключить, что АТ ведут к:

- расширению применения. АТ, которые ранее использовались в основном в высокотехнологичных отраслях, теперь активно осваиваются различными направлениями современной промышленности, включая научные исследования, архитектуру, дизайн и даже хобби;
- экономическому потенциалу. По данным компании SmarTech Analysis, к 2027 г. ожидается, что АТ принесут 2 млрд долл. общей прибыли с годовым доходом от продаж аддитивного оборудования в размере 975 млн долл.;
- изменению вектора развития. Прогнозы указывают на снижение использования АТ для прототипирования и увеличение их роли в производстве функциональных компонентов и инструментов;
- подготовке кадров. Для подготовки высококвалифицированных кадров в области АТ необходима разработка и реализация перспективных образовательных программ инженерного профиля;
- локализации производства. Аддитивное производство позволяет создавать изделия непосредственно на месте, что сокращает время производства и минимизирует простои в ремонте, повышая жизненный цикл оборудования;
- инновационным сервисам. Развитие АТ способствует созданию облачных сервисов, которые соединяют заказчиков и производителей, обеспечивая быстрое и качественное изготовление запчастей и компонентов.

Эти выводы подчеркивают важность АТ в современной промышленности и их влияние на экономику, производственные процессы и сервисное обслуживание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства / пер. с англ. И.В. Шишковского. М.: Техносфера, 2016. 646 с.
2. Ford S., Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 137. Pp. 1573–1587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150
3. Conner B.P., Manogharan G.P., Martof A.N., Rodomsky L.M., Rodomsky C.M. et al. Making D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services // *Additive Manufacturing*. 2014. Vol. 1–4. Pp. 64–76. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.005
4. Дежина И.Г. и др. Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад. М.: Дело, 2015. 271 с.
5. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // *Эксперт*. 2015. № 28 (951). С. 48–51. EDN UBDOQP.
6. Карпова Т. Будущее здесь и сейчас // *Аддитивные технологии*. 2020. № 1. С. 5–7.
7. Wong K.V., Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing // *ISRN Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2012. Pp. 1–10. DOI: 10.5402/2012/208760

8. Константинов В.В., Соколов Ю.А. Оборудование для аддитивного производства // Аддитивные технологии. 2020. № 2. С. 11–17.

9. Колчанов Д.С. Разработка оборудования и технологии выращивания изделий методом селективного лазерного плавления порошков нержавеющей стали: дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 138 с.

10. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. 223 с. EDN YIMDKR.

11. Антонов Ф. Аддитивные технологии для композитных материалов // Аддитивные технологии. 2019. № 3. С. 18–23.

12. Осолков А.А., Матвеев Е.В., Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Кротова Е.Л. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20. № 3. С. 90–105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11. EDN YGHHLV.

13. Попович А.А., Суфияров В.Ш., Разумов Н.Г., Борисов Е.В., Масайло Д.В. и др. Материалы и аддитивные технологии. Современные материалы для аддитивных технологий. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. 204 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2id21-30. EDN EMFVSD.

14. Смулов И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2 (14). С. 11–22. EDN TONSTV.

15. Cunningham V., Schrader Ch.A., Young J.T. Navy Additive Manufacturing: Adding Parts, Subtracting Steps. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2015. 79 p. DOI: 10.21236/ada632470

16. Папаядью С. Formnext-2019: давайте напечатаем будущее // Аддитивные технологии. 2020. № 1. С. 17–21.

17. Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Т. 3. № 1 (87). С. 42–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666. EDN YTUUCT.

18. Коротеев А.О. Особенности формирования микро-структуры при аддитивной дуговой наплавке материалов системы легирования Al-Si // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции. 2022. С. 182. EDN VTTKJZ.

19. Рудской А.И., Полович А.А. Новые материалы и аддитивные технологии. Опыт СПбПУ Петра Великого // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 14-й Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию порошковой металлургии Беларуси. 2020. С. 65–75. EDN LNVTFE.

20. Низовцев В.Е., Климов Д.А., Ступеньков М.И., Бредихина Е.Н., Бортников А.Д. Перспективы применения аддитивных технологий изготовления деталей и узлов из керамических композиционных материалов // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы IV Международной конференции. 2018. С. 299–306. EDN XMVSYX.

REFERENCES

1. Gibson Ya., Rosen D., Stocker B. *Additive manufacturing technologies*. Moscow, Technosphere, 2016;646. (In Russ.).

2. Ford S., Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2016;137:1573-1587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150

3. Conner B.P., Manogharan G.P., Martof A.N., Rodomsky L.M., Rodomsky C.M. et al. Making D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*. 2014; 1-4:64-76. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.005

4. Dezhina I.G. et al. *New production technologies: a public analytical report*. Moscow, Delo, 2015;271. (In Russ.).

5. Kablov E.N. Russia on the intellectual resources market. *Expert*. 2015;28(951):48-51. EDN UBDOQP. (In Russ.).

6. Karpova T. The future is here and now. *Additive Technologies*. 2020;1:5-7. (In Russ.).

7. Wong K.V., Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*. 2012;2012:1-10. DOI: 10.5402/2012/208760

8. Konstantinov V.V., Sokolov Yu.A. Equipment for additive manufacturing. *Additive Technologies*. 2020;2:11-17. (In Russ.).

9. Kolchanov D.S. *Development of equipment and technology for growing products using selective laser melting of stainless steel powders: dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2018;138. (In Russ.).

10. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylyina I.N. *Additive technologies in mechanical engineering*. St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2013;223. EDN YIMDKR. (In Russ.).

11. Antonov F. Additive technologies for composite materials. *Additive Technologies*. 2019;3:18-23. (In Russ.).

12. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product. *Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science*. 2018;20(3):90-105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11. EDN YGHHLV. (In Russ.).

13. Popovich A.A., Sufiyarov V.Sh., Razumov N.G., Borisov E.V., Masailo D.V. et al. *Materials and additive technologies. Modern materials for additive technologies*. St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2021;204. DOI: 10.18720/SPBPU/2id21-30. EDN EMFVSD. (In Russ.).

14. Smurov I.Yu., Konov S.G., Korbán D.V. On the introduction of additive technologies and production in the domestic industry. *Materials Science News. Science and Technology*. 2015;2(14):11-22. EDN TONSTV. (In Russ.).

15. Cunningham V., Schrader Ch.A., Young J.T. *Navy Additive Manufacturing: Adding Parts, Subtracting Steps*. Monterey, California, Naval Postgraduate School, 2015;79. DOI: 10.21236/ada632470

16. Papadyuk S. Formnext-2019: let's print the future. *Additive Technologies*. 2020;1:17-21. (In Russ.).

17. Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;3(1):(87):42-52. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666. EDN YTUUCT.

18. Koroteev A.O. Features of microstructure formation during additive arc surfacing of materials of the Al-Si alloying system. *Materials, equipment and resource-saving technologies: materials of International Scientific and Technical conference*. 2022;182. EDN VTTKJZ. (In Russ.).

19. Rudskoy A.I., Popovich A.A. *New materials and additive manufacturing. Experience of Peter the Great St. Petersburg*

polytechnic university. New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding: materials of the 14th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 60th anniversary of powder metallurgy in Belarus. 2020;65-75. EDN LNVTFE. (In Russ.).

20. Nizovtsev V.E., Klimov D.A., Stupen'kov M.I., Bredikhina E.N., Bortnikov A.D. Prospects for the application of additive manufacturing technologies for parts and assemblies made of ceramic composite materials. *Additive technologies: present and future: proceedings of the IV International Conference*. 2018;299-306. EDN XMVSYX. (In Russ.).

Об авторах

Евгений Николаевич Кузьмичев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техно-сферной безопасности; **Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС)**; 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47; РИНЦ ID: 7926-4352, Scopus: 57190972498, ResearcherID: AAB-7982-2022, ORCID: 0000-0001-7182-9260; accord@festu.khv.ru;

Дмитрий Николаевич Никитин — кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта железных дорог; **Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС)**; 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47; РИНЦ ID: 9911-3510; rain238@yandex.ru;

Евгений Александрович Дроздов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры транспорта железных дорог; **Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС)**; 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47; РИНЦ ID: 3992-1728, Scopus: 57194453684, ResearcherID: AAB-7784-3045, ORCID: 0000-0001-5487-4924; drozd-1671@mail.ru.

Bionotes

Evgenii N. Kuzmichev — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety; **Far Eastern State Transport University (FESTU)**; 47 Serysheva st., Khabarovsk, Russian Federation; ID RSCI: 7926-4352, Scopus: 57190972498, ResearcherID: AAB-7982-2022, ORCID: 0000-0001-7182-9260; accord@festu.khv.ru;

Dmitriy N. Nikitin — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Railway Transport; **Far Eastern State Transport University (FESTU)**; 47 Serysheva st., Khabarovsk, Russian Federation; ID RSCI: 9911-3510; rain238@yandex.ru;

Evgeny A. Drozdov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Transport; **Far Eastern State Transport University (FESTU)**; 47 Serysheva st., Khabarovsk, Russian Federation; ID RSCI: 3992-1728, Scopus: 57194453684, ResearcherID: AAB-7784-3045, ORCID: 0000-0001-5487-4924; drozd-1671@mail.ru.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Николаевич Никитин, rain238@yandex.ru.

Corresponding author: Dmitriy N. Nikitin, rain238@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 19.02.2024; одобрена после рецензирования 14.05.2024; принята к публикации 28.07.2024.

The article was submitted 19.02.2024; approved after reviewing 14.05.2024; accepted for publication 28.07.2024.