

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169



КОНЦЕПЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПРИ АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Хомяков Н.В.

Российский технологический университет «Московский институт радиотехники, электроники и автоматики»,
Москва, Россия

Аннотация. В современном мире с развитием цифровых технологий компаниям необходимо поддерживать достаточный уровень конкурентоспособности для сохранения востребованности на рынке. В связи с этим задачей каждого предприятия становится усовершенствование своих процессов для повышения качества продукции и сокращения отходов производства. Одним из инструментов грядущей цифровизации является аддитивное производство, которое, в отличие от субтрактивного производства, позволяет добиться большей кастомизации и меньших трудозатрат. Целью данной работы является изучение возможности интеграции цифрового двойника в процесс аддитивного производства для повышения качества выпускаемой продукции. Обеспечение качества является одной из основных задач аддитивного производства. Меры по обеспечению качества в процессе производства и, в частности, проверка качества готовых деталей требуют много времени и средств. Большинство существующих подходов к обеспечению качества были разработаны для традиционных методов производства, таких как фрезерование или токарная обработка, и оптимизировались с течением времени. Из-за уникальных характеристик процесса эти подходы нелегко применить к аддитивному производству. Новизна заключается в разработке концепции виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника в аддитивном производстве. В результате представлен подход виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника в аддитивном производстве, описана концепция цифрового двойника и определен сценарий использования для обеспечения качества изделий. Изученная концепция может использоваться в качестве одного из возможных решений для реализации целостного подхода к обеспечению качества по всей технологической цепочке аддитивного производства.

Ключевые слова: цифровая трансформация, Индустрия 4.0, 3D-печать, аддитивная технология, цифровой двойник

© Хомяков Н.В., 2024

Для цитирования

Хомяков Н.В. Концепция виртуального контроля качества деталей при аддитивном производстве на основе цифрового двойника // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 163-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

A CONCEPT OF PART QUALITY VIRTUAL CONTROL IN ADDITIVE MANUFACTURING BASED ON A DIGITAL TWIN

Khomyakov N.V.

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. In the modern world, with the development of digital technologies, companies need to maintain a sufficient level of competitiveness to remain relevant in the market. Therefore, a crucial task for every enterprise is to improve their processes to enhance the product quality and reduce production waste. One of the tools of the upcoming digitalization is additive manufacturing, which, unlike subtractive manufacturing, provides for greater customization and lower labor costs. The aim of this study is to explore the possibility of integrating a digital twin into the additive manufacturing process to enhance the quality of the produced goods. Quality assurance is one of the key tasks in additive manufacturing. Measures for quality assurance in the production process and, particularly, the inspection of the quality of finished parts, require a significant amount of time and resources. Most existing approaches to quality assurance have been developed for conventional manufacturing methods such as milling or turning and have been optimized over time. However, these approaches are not easily applicable to additive manufacturing due to unique characteristics of the process. Originality lies in developing the concept of part virtual control based on the digital twin in additive manufacturing. As a result, the article presents an approach to part virtual control based on the digital twin in additive manufacturing, describes the concept of the digital twin, and defines a usage scenario for ensuring the product quality. The concept under study can be used as one of the possible solutions for implementing a holistic approach to quality assurance throughout the technological chain of additive manufacturing.

Keywords: digital transformation, Industry 4.0, 3D printing, additive technology, digital twin

For citation

Khomyakov N.V. A Concept of Part Quality Virtual Control in Additive Manufacturing Based on a Digital Twin. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 163-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169>

Введение

Технологии аддитивного производства (АП) прошли путь от прототипирования до полноценной технологии, позволяющей производить функциональные детали конечного использования из различных материалов. Благодаря преимуществам перед традиционным субтрактивным производством, таким как проектирование изделий любой конфигурации и массовая кастомизация, аддитивное производство получило распространение во многих отраслях промышленности [1-4]. Помимо значительных преимуществ по сравнению с традиционными производственными технологиями, более широкому распространению аддитивного производства в отрасли препятствует ряд проблем. Обеспечение качества является одной из основных задач аддитивного производства [5, 6]. В связи с уникальными характеристиками процесса и проблемами аддитивного производства для развития технологии необходимы новые целостные подходы к обеспечению качества.

Концепция цифрового двойника – это один из многообещающих подходов к цифровизации технологической цепочки аддитивного производства. Некоторые из проблем применения аддитивных технологий можно решить путем внедрения цифрового двойника. Он имеет большой потенциал, особенно в обеспечении качества. Поэтому в данной статье

предлагается концепция виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника.

Обеспечение качества в аддитивном производстве

Поддержание единообразия в аддитивном производстве оказалось сложной задачей, поскольку незначительные изменения в процессе, материале или геометрии могут повлиять на конечные свойства детали [5, 6]. Примерами технологических параметров, влияющих на производственный процесс, являются мощность лазера, геометрические свойства профиля интенсивности лазерного луча и стратегия сканирования. Эти параметры оказывают существенное влияние на поведение материала в процессе аддитивного производства. Из-за того, что процессы зачастую индивидуализированы, документация процесса АП и особенно документирование достигнутого качества деталей имеет важное значение для отслеживания и контроля производства [6].

Например, перед выпуском всех новых деталей космического аппарата требуется сертификат технической готовности к летным испытаниям или сертификат соответствия, чтобы обеспечить максимально возможный уровень безопасности в безвоздушном пространстве. В процессе выпуска проверяется выполнение основных правил. Однако эти правила не адаптированы к изготовлению деталей аддитивным способом. Поскольку АП все чаще приводит к созданию биони-

ческих, то есть тонких, решетчатых конструкций, чередующихся с полостями, что значительно отличается от традиционных типов конструкции, большое значение начинает иметь новое регулирование сертификации изделий и отдельных единиц [6].

Чтобы обеспечить высокое качество деталей, изготовленных с помощью аддитивного производства, требования к качеству должны учитываться во всей технологической цепочке. Пример технологической цепочки селективного лазерного спекания на подложке на предприятии аэрокосмической отрасли приведен в [7, 8]. Авторы разделяют меры по обеспечению качества на автономное тестирование (offline) и оперативный мониторинг (online) процесса. Автономные испытания начинаются с квалификации металлического порошка, которая включает в себя контроль химического состава, размера частиц, формы и распределения по фракциям, а также максимального уровня загрязнения газами. Параметры оборудования, такие как мощность лазера, состав инертного газа и скорость сканирования, измеряются и контролируются в процессе производства. Затем готовая деталь проверяется на точность размеров с помощью измерений геометрических форм, а на наличие дефектов – с помощью неразрушающего контроля. Кроме того, во время каждой сборки изготавливаются испытательные образцы, которые анализируются на предмет металлографических свойств и свойств материала [7, 8].

Этот пример показывает необходимость в дальнейшем развитии обеспечения качества в аэрокосмической отрасли. Стандарт DIN SPEC 17071, опубликованный в 2019 году, представляет собой первую комплексную справочную информацию по теме обеспечения качества в АП [8, 9]. В нем говорится, что отдельные компоненты обеспечения качества, включающие персонал, документацию и инфраструктуру, определяют семь соответствующих областей в технологической цепочке: деятельность по обеспечению качества; подготовка данных; управление качеством сырья; предварительная обработка, связанная с системой; управление процессом; системная постобработка; постобработка для конкретной детали.

Для каждой области стандарт рекомендует критерии для процессов аддитивного производства, характеристики качества и факторы технологической цепочки для включения в собственную концепцию обеспечения качества. Однако он не дает никаких рекомендаций для

реализации. Именно здесь цифровой двойник может помочь в удовлетворении потребностей в качестве одного из возможных решений для реализации целостного подхода к обеспечению качества по всей технологической цепочке аддитивного производства.

Цифровой двойник

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделия. Общие положения», цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделиями его составными частями. И пусть многие авторы дают разные определения цифровых двойников, все они сходятся в главном понятии: цифровой двойник – это цифровое представление физического продукта или процесса [10-12]. Однако не существует универсального цифрового двойника (архитектуры) для всех физических объектов. Специфика каждого цифрового двойника зависит от конкретного случая использования. По мнению некоторых авторов, цифровой двойник состоит из двух основных элементов – цифровой модели и цифровой тени [10].

Цифровая модель содержит информацию о геометрии детали и поведенческие модели продукта или системы, которая была получена в ходе разработки продукта и подготовлена для использования в цифровом двойнике. Цифровая тень представляет собой данные об эксплуатации, состоянии или процессе физического двойника, собранные с конкретного экземпляра продукта [14].

Таким образом, цифровая модель представляет всю информацию о разработке продукта, одинаковую для всех экземпляров продукта, а цифровая тень представляет уникальные данные датчиков для каждого экземпляра продукта.

Применительно к аддитивному производству цифровая модель представляет всю информацию, касающуюся этапов проектирования и цифровых этапов предварительной обработки, которая включает в себя размещение, создание поддержки и нарезку. В то время, как цифровая тень представляет информацию, собранную в процессе производства, такую как температура, интенсивность лазерного излучения, скорость сканирования или высота слоя, а также постобработку и оценку, например, данные измерений при контроле размеров (рис. 1).

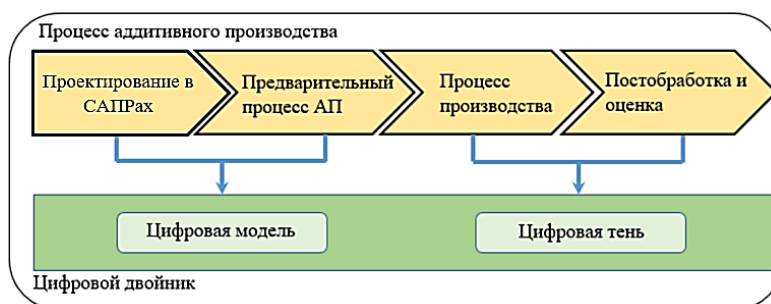


Рис. 1. Отображение этапов процесса АП в цифровой модели и цифровой тени

Fig. 1. Stages of the additive manufacturing process in a digital model and digital shadow

Существуют различные преимущества цифровых двойников для аддитивного производства, такие как сокращение времени выхода на рынок, минимизация дорогостоящих проб и ошибок при оптимизации физических деталей, обнаружение дефектов и сокращение срока сертификации продукции [13]. Чтобы использовать эти преимущества, необходимо рассмотреть следующие базовые аспекты: сбор данных с помощью датчиков, передача данных в цифровой двойник, представление данных в цифровом двойнике и обратная связь с физическим двойником с помощью исполнительных механизмов [6, 12, 14, 15].

Вариант применения

Обычно различные этапы цепочки аддитивного процесса, показанной на рис. 1, выполняются разными работниками. Инженер-конструктор выполняет САД-проектирование, инженер-технолог отвечает за предварительную цифровую обработку, характерную для АП, а один или несколько операторов станков выполняют и контролируют процесс производства, последующую обработку и оценку. Таким образом, чтобы сократить расход ресурсов на проверку деталей вручную и с помощью традиционных средств и методов измерений, а также упростить документирование для оценки соответствия, предлагаемый цифровой двойник должен будет прямо или косвенно взаимодействовать с этими работниками.

Жизненный цикл цифрового двойника проходит разные этапы в зависимости от варианта его использования. Цифровой двойник для продукта и цифровой двойник технологического процесса преследуют разные цели и должны удовлетворять разным требованиям. Для случая виртуального контроля деталей цифровые двойники анализируют четыре стадии жизни изделия: проектируемый экземпляр; изделие в сборе; продукт после обработки; продукт, прошедший контроль качества.

Информация со всех четырех этапов должна быть представлена в цифровом двойнике. Спроектированное изделие характеризуется моделями разработки продукта, например геометрической моделью или моделью конечных элементов, а также дополнительной информацией, например требованиями. Согласно определению авторов научных статей, такая информация относится к цифровой модели [14]. Когда изделие изготавливается на 3D-принтере (АП-станке), оно находится на этапе сборки изделия, характеризующимся цифровой моделью и данными датчиков, полученными в процессе производства и представленными в цифровой тени. В этот момент создается новый экземпляр цифрового двойника для конкретного изделия. Стадия «изделие после обработки» достигается после завершения постобработки конкретной детали. Информация о ней добавляется в цифровой двойник соответствующего экземпляра изделия. После оценки качества данного образца вся информация о нем документируется в цифровом двойнике, и наступает стадия оценки качества продукции.

Существующая технологическая цепочка АП, по-

казанная на рис. 1, нуждается в усовершенствовании для обеспечения возможности виртуального контроля деталей и анализа данных по конкретной детали. На рис. 2 показан процесс аддитивного производства с виртуальным контролем деталей на основе цифрового двойника. Цифровой двойник будет взаимодействовать с различными пользователями и смежными системами. Инженер-конструктор должен настроить виртуальный контроль детали (ВКД) в соответствии с требованиями изделия, выбрав параметры анализа и допустимые значения. Затем приложение для ВКД (например, siemens nx) рекомендует модели анализа на основе моделей, имеющихся в цифровом двойнике. В процессе производства собираются данные. ВКД использует эти данные в качестве входных для аналитических моделей, выполняет анализ и визуализирует результаты. Неисправные детали будут выделены для дальнейшей проверки персоналом, после чего будет предоставлена информация о типе выявленного несоответствия.

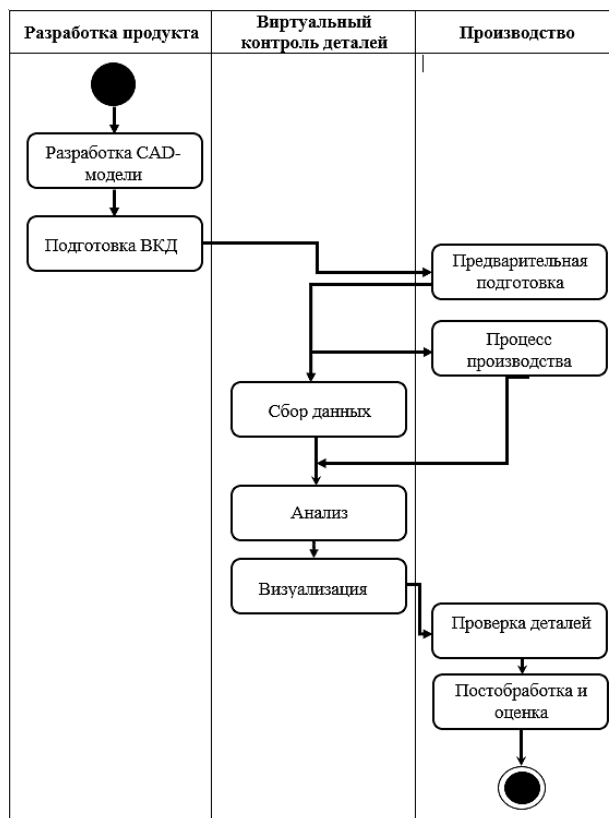


Рис. 2. Процесс производства с интегрированным ВКД
 Fig. 2. A manufacturing process with integrated part virtual control

Реализация концепции

Для реализации виртуального контроля деталей необходимо определить общую архитектуру цифрового двойника и адаптировать ее к случаю использования, описанному в разделе выше. Базовая структура с компонентами цифровой модели и цифровой тени остается неизменной. Объединение данных обоих

компонентов позволяет проводить ВКД, как показано на рис. 3. Информация, полученная в ходе предварительной обработки и представляющая целевое состояние детали, сравнивается с данными датчиков, полученными в ходе производственного процесса и представляющими фактическое состояние детали.

Для точного представления целевого состояния детали необходимо использовать информацию, полученную при разработке изделия, которая зависит от систем управления данными об изделии (УДИ) и данными моделирования (УДМ). Примерами такой информации являются геометрические модели и САЕ-модели. Кроме того, для представления целевого состояния необходимы модель слоя и параметры процесса, определенные в программном обеспечении предварительной обработки. Фактическое состояние детали представлено данными датчиков и технологического процесса, собранными во время производства в АП-станке. Сбор данных осуществляется цифровым двойником АП-машины, предварительно обрабатывается и передается цифровому двойнику детали.

Для обеспечения ВКД сначала необходимо настроить параметры проверки, затем провести анализ и в итоге визуализировать результат. В процессе настройки необходимо определить уровень сложности и объем анализа, выбрать подходящую модель анализа, которую инженер-конструктор приводит в соответствии с требованиями к детали.

Простейшая модель анализа сравнивает заданные и измеренные параметры процесса, например температуру, скорость и мощность лазера. Второй тип аналитических моделей позволяет рассчитать параметры, которые невозможно измерить напрямую с помощью аналитических моделей. Примером такого анализа является расчет глубины ванны расплава при селективном лазерном сплавлении металла. Наиболее

сложный тип анализа использует численные или статистические модели в сочетании с собранными данными датчиков для прогнозирования механических, тепловых или других свойств изготавливаемой детали. Результаты этих расчетов затем сравниваются с целевым значением для проверки требований к детали и заданных свойств детали.

Модели анализа могут отображать различные характеристики детали. Они могут относиться ко всему объему детали (например, состав инертного газа, температура в объеме детали), к одному слою (например, высота слоя, стратегия сканирования), к одному проходу лазера (например, скорость) или к одной точке (например, температура сплавления, мощность луча лазера). Эти различные аспекты должны быть представлены в структуре данных, лежащих в основе цифрового двойника. Для отражения различных характеристик может подходить модель данных, основанная на вокселях, которая будет исследована в будущей работе.

Заключение

В данной статье представлены подход и концептуальный проект виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника в аддитивном производстве. Описана концепция цифрового двойника и определен сценарий использования для обеспечения качества изделий.

Предложенная концепция пока носит общий характер и требует более детальной проработки. В дальнейшем планируется определить подходящую модель данных для цифрового двойника, разработать методическую основу для конфигурирования виртуального контроля деталей и проверить эти новые концепции и методы на примере прототипической реализации.

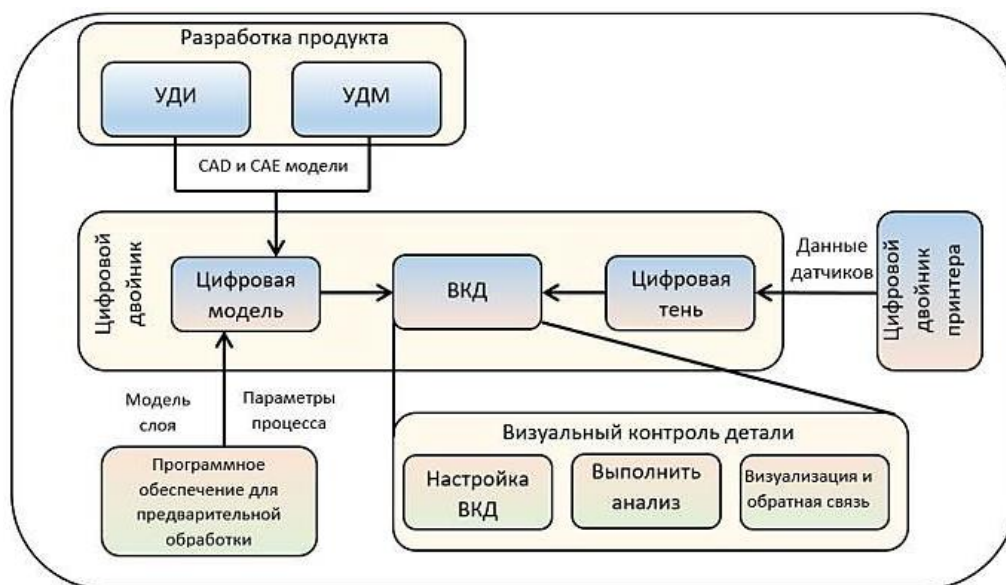


Рис. 3. Концептуальная архитектура виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника
Fig. 3. Conceptual architecture of part virtual control based on a digital twin

Список источников

- Егоров К.Н., Егорова С.А., Петрякова В.Г. Аддитивные технологии в медицине: области и технологии применения, преимущества, недостатки и перспективы развития // Перспективы развития науки в современном мире: сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, Уфа, 29 июня 2021 года. Уфа: ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2021. С. 21-41.
- Тенденции развития экономики России на фоне общемировых трендов в условиях четвертой промышленной революции / Спешилова Н.В., Андриенко Д.А., Рахматуллин Р.Р., Спешилов Е.А. // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10. №6. С. 44.
- Бочкарева А.В. 3D-технологии в образовательной сфере высших учебных заведений // European Scientific Conference: сборник статей V Международной научно-практической конференции. Пенза, 30 июля 2017 года. В 3 ч. Ч. 3. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. С. 169-171.
- Разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере / Ерошенко В.О., Малькова М.Ю., Задранов А.Н., Мещеряков А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 82-92. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92
- Разработка модели обеспечения качества при проектировании, изготовлении, испытании изделий авиационно-космической техники / Загидуллин Р.С., Митрошкина Т.А., Садыков О.Ф. и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №12. С. 27-33.
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften // Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen: Stellungnahme (Additive manufacturing – developments, opportunities and challenges: Position statement). Halle (Saale), München, Mainz, 2020.
- Bamberg J., Dusel K.-H., Satzger W. Overview of additive manufacturing activities at MTU aero engines // AIP Conference Proceedings. 2015, vol. 1650, no. 1, pp. 156-163.
- Effect of organic impurity in additive manufactured Ti-6Al-4V / Kerstin Winkler, Husam Ahmad, Andre Danzig, Philipp Gloetter, Frank Schubert, Guntram Wagner, Lothar Kroll // Additive Manufacturing Letters. 2023, vol. 5, pp. 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100116>.
- DIN SPEC 17071:2019-12. Additive Fertigung – Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren (Additive manufacturing – Requirements for quality assured processes at additive manufacturing centres); Text in German and English. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2019, 59 p. DOI: 10.31030/3119149
- WiGeP-Positionspapier: «Digitaler Zwilling» (WiGeP Position Paper: "Digital Twin") / Stark R., Anderl R., Thoben K.-D., Wartzack S. // ZWF. 2020, no. 115 (special), pp. 47-50.
- Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. №131. С. 430-432.
- Хомяков Н.В. Бережливость 4.0. Влияние инструментов Индустрии 4.0 на бережливое производство // Вестник Санкт-Петербургского университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. №3. С. 68-75.
- Building digital twins of 3D printing machines / DebRoy T., Zhang W., Turner J., Babu SS. // Scripta Materialia. 2017, no. 135, pp. 119-124.
- Безруких Д.И., Чернышова Ю.А. Применение технологий цифровых двойников и аддитивных технологий при разработке ракетных двигателей // Молодые учёные в решении актуальных проблем науки: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Красноярск, 20-21 апреля 2023. Красноярск, 2023. С. 1436-1438
- Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration / Anderl R., Haag S., Schützer K., Zancul E. // Information Technology. 2018, no. 60(3), pp. 125-132.

References

- Egorov K.N., Egorova S.A., Petryakova V.G. Additive technologies in medicine: areas and technologies of application, advantages, disadvantages and development prospects. *Perspektivy razvitiya nauki v sovremenom mire: sbornik nauchnykh statey po materialam VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects for the development of science in the modern world: Collection of scientific articles based on proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference]. Ufa, June 29, 2021. Ufa: LLC Scientific Publishing Center Bulletin of Science, 2021, pp. 21-41. (In Russ.)
- Speshilova N.V., Andrienko D.A., Rakhmatullin R.R., Speshilov E.A. Trends in the development of the Russian economy against the backdrop of global trends in the conditions of the fourth industrial revolution. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Eurasian Scientific Journal]. 2018;10(6):44. (In Russ.)
- Bochkareva A.V. 3D technologies in the educational field of higher educational institutions. European Scientific Conference: collection of articles of the 5th International Scientific and Practical Conference. Part 3. Penza, July 30, 2017: in 3 parts, part 3. Penza: Science and Enlightenment (Individual Entrepreneur Gulyaev G.Yu.), 2017, pp. 169-171. (In Russ.)
- Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V. Development of a model for printing turbine blades on a 3D printer. *Vestnik Magni-*

- togorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):82-92. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92
5. Zagidullin R.S., Mitroshkina T.A., Sadykov O.F., et al. Development of a quality assurance model in designing, manufacturing, testing of aerospace technology products. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences]. 2019;(12):27-33. (In Russ.)
 6. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen: Stellungnahme (Additive manufacturing – developments, opportunities and challenges: Position statement). Halle (Saale), München, Mainz, 2020.
 7. Bamberg J., Dusel K.-H., Satzger W. Overview of additive manufacturing activities at MTU aero engines. AIP Conference Proceedings. 2015;1650(1):156-163.
 8. Kerstin Winkler, Husam Ahmad, Andre Danzig, Philipp Gloetter, Frank Schubert, Guntram Wagner, Lothar Kroll. Effect of organic impurity in additive manufactured Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing Letters*. 2023;5:100-116. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100116>
 9. DIN SPEC 17071:2019-12. Additive Fertigung – Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren (Additive manufacturing – Requirements for quality assured processes at additive manufacturing centres). Text in German and English. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019, 59 p. DOI: 10.31030/3119149
 10. Stark R., Anderl R., Thoben K.-D., Wartzack S. WiGeP-Positionspapier: «Digitaler Zwilling» (WiGeP Position Paper: "Digital Twin"). ZWF. 2020;(115(special)):47-50.
 11. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. Digital twins in the aerospace industry: an object-oriented approach. *Trudy MAI* [Proceedings of Moscow Aviation Institute]. 2023;(131):430-432. (In Russ.)
 12. Khomyakov N.V. Lean 4.0. Impact of Industry 4.0 tools on lean manufacturing. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 4: Promyshlennyye tekhnologii* [Vestnik of Saint Petersburg University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies]. 2023;(3):68-75. (In Russ.)
 13. DebRoy T., Zhang W., Turner J., Babu SS. Building digital twins of 3D printing machines. *Scripta Materialia*. 2017;135:119-124.
 14. Bezrukikh D.I., Chernyshova Yu.A. Application of digital twin technology and additive technologies in the development of rocket engines. *Molodye uchenye v reshenii aktualnykh problem nauki: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Young scientists in solving current problems of science: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists]. Krasnoyarsk, April 20-21, 2023. Krasnoyarsk, 2023, pp. 1436-1438. (In Russ.)
 15. Anderl R., Haag S., Schützer K., Zancul E. Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration. *Information Technology*. 2018;(60(3)):125-132.

Поступила 11.01.2024; принята к публикации 18.03.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 11/01/2024; revised 18/03/2024; published 27/06/2024

Хомяков Никита Васильевич – аспирант кафедры электроники, Российский технологический университет «Московский институт радиотехники, электроники и автоматики», Москва, Россия.
Email: xomyakov_1997@mail.ru.

Nikita V. Khomyakov – postgraduate student of the Electronics Department, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia.
Email: xomyakov_1997@mail.ru.