

About the author:

GOLUBEVA Elena Borisovna – Postgraduate Student of the Department of Occupational Safety and Ecology, Tver State Technical University, Tver. E-mail: golubeva_eb@tvz.ru

УДК 669.018.44

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

**Е.А. Раткевич, А.Ю. Лаврентьев,
Р.М. Антонов, С.А. Лютов**

© Раткевич Е.А., Лаврентьев А.Ю.,
Антонов Р.М., Лютов С.А., 2025

***Аннотация.** Проанализированы существующие методы неразрушающего контроля качества металлических изделий, выполненных с помощью технологий аддитивного производства. Показаны актуальность и эффективность применения вышеназванных методов.*

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, лазерное сканирование, обеспечение качества, неразрушающий контроль, конструкционная сталь, порошковый материал, селективное лазерное плавление, термическая обработка, магнитошумовой метод, контактно-динамический метод.*

Технологии аддитивного производства эволюционировали от прототипов до полноценного метода, позволяющего изготавливать детали, функционирующие в различных материалах. Благодаря своим преимуществам по сравнению с традиционным субтрактивным производством, таким как возможность проектирования изделий любой формы и массовая кастомизация, аддитивное производство стало популярным в различных отраслях промышленности [1]. Однако его более широкому внедрению мешают, несмотря на значительные плюсы рассматриваемого производства, определенные проблемы.

Обеспечение качества – один из ключевых элементов в области аддитивного производства. Для дальнейшего развития технологии необходимы новые комплексные подходы к контролю качества. Поддержание стабильности в аддитивном производстве представляет собой сложную задачу, так как даже незначительные изменения в

процессе, используемых материалах или геометрии могут существенно повлиять на конечные характеристики изделия.

Цель работы – обзор применяемых методов контроля качества металлических изделий, полученных с применением аддитивных технологий.

Селективное лазерное плавление (СЛП) представляет собой одну из самых популярных технологий аддитивного производства, способную удовлетворить растущие потребности промышленности. Данное плавление – это способ производства металлических изделий, основанный на послойном расплавлении порошка с помощью лазера. Установка для СЛП обычно включает два бункера: один для подачи порошка, другой для формирования детали. В начале процесса бункер с порошком поднимается и порошок наносится на платформу. Затем лазер сканирует слой, сплавляя частицы согласно CAD-модели. Этот процесс повторяется до завершения детали. После окончания работы излишки порошка удаляются, а модель извлекается для дальнейшей термической обработки. С целью предотвращения окисления используют во время плавления камеры с защитной атмосферой, обычно заполненные аргоном. Неиспользованный порошок можно перерабатывать, добавляя 30 % нового материала для обеспечения стабильных свойств готовой детали.

В работе [2] рассматривается пример селективного лазерного плавления из порошка конструкционной стали 28Х3СНМВФА. Показано, что на структуру и свойства образцов влияют скорость сканирования (чем выше скорость, тем ниже удельная энергия, имеют место недостаточное плавление частиц материала и увеличение пористости); шаг штриховки (чем меньше шаг, тем ниже пористость); мощности лазерного излучения (мощность выше, ванна расплава шире, пористость ниже). Однако рост удельной энергии также приводит к образованию трещин, причем преобладают горизонтальные трещины, т. е. происходит расслоение материала. Авторы также подобрали оптимальные параметры плавления, позволяющие достичь оптимального соотношения производительности и пористости при отсутствии трещин и несплавлений: мощность лазерного излучения $P = 250$ Вт, скорость сканирования $v = 722,5$ мм/с, шаг штриховки $t = 92$ мкм, высота слоя $h = 40$ мкм.

В работе [3] прописано, что была использована технология послойной плазменной металлизации из сплава алюминия АМг5. Плавление и распыление проволоки производились плазменной дугой постоянного тока прямой полярности и прямого действия. В качестве плазмообразующего и защитного газа применялся аргон. Исследовалась макроструктура полученного металла. Между слоями наблюдались отсутствие границ, зерна разного размера; фаза Al_3Mg_2 выделилась как по границам зерен, так и внутри. В материале возникли неравномерно распределенные поры, объемная доля пор составила 3,26 %. Материал

обладал невысокой прочностью и пластичностью, но хорошо обрабатывался резанием. Последующая термообработка (высокотемпературный отжиг при 535 °С) позволила выровнять микроструктуру по форме и размерам и получить равноосные зерна, частично растворить твердую фазу Al_3Mg_2 . Несколько снизилась пористость (до 2,12 %), до 108 МПа повысился предел прочности, незначительно увеличилась пластичность (до 1,5 %). Таким образом, была показана технологическая возможность аддитивного формирования изделий, поддающихся дальнейшей механической и термообработки.

Авторы [4] исследовали процессы деформации и разрушения при пластическом деформировании изделий, полученных из сплава НП-30ХГСА по технологии аддитивного электродугового выращивания, или WAAM. В результате образцы, вырезанные вдоль направления наплавки, продемонстрировали большие значения предела текучести $\sigma_{0,2}$, оказались способны выдерживать большую деформацию δ по сравнению с образцом, вырезанным поперек направления наплавки. Были изучены изменения микротвердости образцов в процессе деформации. Авторы [4] объясняют это перераспределением внутренних напряжений, а также последующим наклепом и увеличением плотности дислокаций. При деформации выше 8 % начиналось разрушение материала образца, вырезанного поперек направления наплавки, и выше 10 % в образце, вырезанном вдоль направления наплавки.

Процессы лазерного плавления сопровождаются значительными температурными градиентами в области обработки, что приводит к возникновению высоких остаточных напряжений в готовых деталях. Это, в свою очередь, может снижать точность размеров и механические свойства изделий. Дефекты, такие как пористость, шероховатость поверхности и образование оксидного слоя, негативно сказываются на механических характеристиках. Прогнозирование температурного распределения в зоне лазерной обработки дало возможность оптимизировать параметры: мощность лазера, скорость и расстояние между штрихами. Нависающие поверхности подвержены перегреву, особенно вблизи отверстий, и должны обрабатываться с использованием режимов с меньшим тепловложением. Кроме того, различные стратегии сканирования также воздействуют на ожидаемое распределение температуры в объеме порошка во время сплавления.

Процесс производства изделий с применением аддитивных технологий часто приводит к возникновению и увеличению неоднородности свойств, анизотропии, остаточных напряжений, пористости и других дефектов. В связи с этим значительно возросла необходимость в неразрушающем контроле качества продукции, изготовленной с помощью аддитивных методов [5].

Методы контактного неразрушающего контроля традиционно включают средства визуально-измерительного контроля: лупы, угольники, штангенциркули, щупы, угломеры, специальные и универсальные шаблоны, микрометры и др. Перечисленные средства обычно используют для контроля геометрии простых деталей, однако для оценки деталей, имеющих сложную геометрию, использование перечисленных средств не позволяет обеспечить заданную точность измерений и получить карту отклонений облака точек от CAD-модели.

В работе [6] для оценки геометрических характеристик деталей, изготовленных по технологии 3D-печати, применялся бесконтактный метод лазерного сканирования. С достаточно высокой точностью (стандартное отклонение составило 0,154 мм) были оценены с помощью технологии послойного наплавления (Fused Filament Fabrication, или FFF) параметры переходника системы кондиционирования и вентиляции самолета из такого неметаллического материала, как полиэфирамид Ultem 9085.

В качестве неразрушающего контроля качества образцов, полученных с использованием аддитивной технологии, может использоваться исследование магнитных свойств. В работе [7] исследуется применимость магнитошумового метода, сочетающего в себе магнитный метод эффекта Баркгаузена и контактно-динамический метод измерения твердости материала. Показано, что оба метода обладают высокой чувствительностью к отожженным и нормализованным трехмерным образцам и их отбраковке. Авторы утверждают, что метод магнитошумового контроля, в отличие от твердометрии, которая в основном ориентирована на фазово-структурные изменения, обладает дополнительной чувствительностью к литевым образцам благодаря своей селективности к различным контролируемым параметрам. Несмотря на то, что микроструктуры литых и нормализованных трехмерных образцов по результатам рентгеноструктурного анализа имеют много общего, магнитошумовой метод может быть применен как один из физических способов оценки качества и контроля термообработки 3D-образцов на этапе их производства, включая разработку видов, режимов и сортировку образцов.

В работе [8] представлены результаты изучения свойств материала, полученного благодаря применению технологии селективного лазерного спекания порошка AISI 316L (аналога 03X16H15M3). Авторы выполнили целый комплекс исследований. Проводились химический анализ для установления состава металла, оценка механических свойств металла в вертикальном и горизонтальном направлении в соответствии с ГОСТ 1497-84. Микроструктуру металла после этапов термической обработки анализировали, используя снимки с увеличением от 100 до 500 раз.

В патентах [9, 10] авторы осуществили томографический контроль плотности изготовленных образцов. Разработан способ получения деталей из конструкционной стали 38Х2МЮА и жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ с помощью технологии СЛП. Согласно результатам исследований, объем пустот составил менее 0,000 5 % от объема образцов. В работе нет подробного описания примененного метода томографии.

В статье [11] авторы описывают исследования точности и стабильности изготовления секций сопловых аппаратов турбины методом СЛП с использованием контрольных карт качества. Контроль секций соплового аппарата турбины ГТД, изготовленной по аддитивной технологии, производился на координатно-измерительной машине HERA 15.10.9. Допуск формы профиля теоретических сечений пера в диаметральном выражении $\pm 0,2$ мм.

В работе [12] авторы провели комплекс исследований образцов, полученных селективным лазерным спеканием. Химический анализ металлопорошковой композиции установили на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA LMN с катодом LaB6 (РЭМ) и системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced AZtec Energy. Исследование механических свойств образцов производилось на установке ИР 5113-100-11в соответствии с ГОСТ 11701-84 на стандартных образцах длиной 48 мм, шириной рабочей части 3 мм и толщиной 2 мм, с незначительно заполированной поверхностью образцов. Металлографические исследования осуществлялись на оптическом металлографическом микроскопе «Метам ЛВ-32» со встроенной телевизионной камерой. Авторам удалось выявить мелкие поры, несплавления между слоями, а также морфологию структуры.

Процесс производства металлических изделий с использованием аддитивных технологий имеет свои особенности: готовые изделия могут демонстрировать выраженные неоднородности, шероховатости, анизотропию, остаточные напряжения, а также сложную микроструктуру и текстуру. К ним могут добавляться дефекты, такие как микротрещины, поры и несплошности, которые дополнительно зависят от видов и режимов последующих термических, механических и термомеханических обработок. Эти факторы могут изменять структуру и физико-механические свойства материалов, что создает дополнительные препятствия для внедрения последних, поэтому в процессе производства и после его завершения необходимо проводить неразрушающий контроль и мониторинг качества изделий. Из-за наличия множества особенностей у производства материалов с помощью аддитивных технологий вопрос обеспечения качества становится особенно актуальным. Требуется применять различные физические методы неразрушающего контроля.

Каждый цикл аддитивного производства должен включать как текущий, так и выходной контроль качества.

В научной литературе выделяют две ключевые задачи: неразрушающего контроля изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий, т. е. выявления и идентификации дефектов, возникающих в процессе синтеза этих изделий; контроля их качества в соответствии с нормативными требованиями. Для решения этих задач предлагается использовать ультразвуковые, вихретоковые, рентгеновские, капиллярные и магнитные методы, включая магнитошумовой метод на основе эффекта Баркгаузена. Исследования показывают эффективность ультразвукового метода для выявления поверхностных трещиноподобных дефектов. Представлены результаты оценки пористости и качества поверхности с использованием рентгеновских и акустических методов. Однако большинство из этих методов имеет ограничения, что подчеркивает необходимость разработки новых или комбинированных подходов к контролю качества изделий, полученных по аддитивной технологии [4, 7].

Библиографический список

1. Разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере / В.О. Ерошенко, М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов, А.В. Мещеряков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 1. С. 82–92.
2. Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28Х3СНМВФА / Д.С. Колчанов, А.А. Дренин, А.О. Денежкин, Л.А. Шустова, С.Р. Сафиуллин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 10 (751). С. 79–88.
3. Перспективы применения высокопроизводительной плазменной металлизации для аддитивного формирования изделий из алюминиевых сплавов / Д.С. Белинин, Ю.Д. Щицын, С.Д. Неулыбин, П.С. Войнов, М.В. Пичкалев, Р.Г. Никулин, С.Г. Никулина, К.П. Карунакар // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2024. Т. 26. № 4. С. 49–56.
4. Оценка и диагностирование структурной деградации сплава Нп-30ХГСА, полученного методом WAAM с использованием нейросетевой модели / М.С. Аносов, С.А. Манцеров, Н.С. Ключкова, А.М. Михайлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 4. С. 171–180.
5. Звягинцев А.О. Фокусировка лазерно-сканаторного модуля СЛМ-принтера с помощью системы оптического контроля // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24. № 3. С. 64–70.

6. Ворошилин А.П., Рожков В.Н., Ухов П.А. Использование лазерного сканирования для неразрушающего контроля качества деталей, изготовленных по технологии 3D-печати // Качество. Инновации. Образование. 2021. № 2 (172). С. 20–28.

7. Бусько В.Н., Крень А.П., Ланцман Г.А. Неразрушающий контроль качества термообработки стальных образцов, полученных аддитивной технологией, магнитошумовым методом // Приборы и методы измерений. 2022. Т. 13. № 3. С. 228–236.

8. Калинин А.В., Кашенкова А.В. Исследование структуры и механических свойств сплава AlSi 316L, полученного методом селективного лазерного спекания порошковых компонентов // Металознавство та термічна обробка металів. 2018. № 1 (80). С. 30–33.

9. Способ получения деталей из конструкционной стали 38Х2МЮА технологией селективного лазерного сплавления: пат. 2812102 С1 Российская Федерация. № 2023111516 / Смелов В.Г., Хаймович А.И., Вдовин Р.А., Алексеев В.П., Кяримов Р.Р., Балякин А.В., Кокарева В.В.; заявл. 03.05.2023; опубл. 22.01.2024. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2812102C1/ru> (дата обращения: 23.03.2025).

10. Способ получения деталей из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ технологией селективного лазерного сплавления: пат. 2824784 С2 Российская Федерация. № 2023102911 / Смелов В.Г., Хаймович А.И., Вдовин Р.А., Алексеев В.П., Кяримов Р.Р., Балякин А.В., Кокарева В.В.; заявл. 08.02.2023; опубл. 13.08.2024. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2824784C2/ru> (дата обращения: 23.03.2025).

11. Исследование точности и стабильности изготовления секций соплового аппарата турбины методом селективного лазерного сплавления на основе контрольных карт качества / В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, А.В. Агаповичев, В.В. Кокарева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 5 (97). С. 28–35.

12. Кяримов Р.Р., Смелов В.Г., Алексеев В.П. Исследование структуры и механических свойств образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления из металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ-159 (ХН58МБЮ) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 4 (114). С. 36–46.

QUALITY CONTROL OF ADDITIVE MANUFACTURING OF METAL PRODUCTS

**E.A. Ratkevich, A.Y. Lavrentiev,
R.M. Antonov, S.A. Lyutov**

Abstract. *The existing methods of non-destructive quality control of metal products made using additive manufacturing technologies are analyzed. The relevance and effectiveness of the above-mentioned methods are shown.*

Keywords: *additive technologies, 3D printing, laser scanning, quality assurance, non-destructive testing, structural steel, powder material, selective laser fusion, heat treatment, magneto-noise method, contact-dynamic method.*

Об авторах:

РАТКЕВИЧ Екатерина Алексеевна – кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры прикладной физики, менеджер по работе со студентами центра содействия трудоустройству выпускников, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: ekrasavina26@gmail.com

ЛАВРЕНТЬЕВ Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и материаловедения, директор центра содействия трудоустройству выпускников, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: lavr_ay@mail.ru

АНТОНОВ Роман Максимович – аспирант кафедры технологии металлов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: bda@mail.ru

ЛЮТОВ Сергей Алексеевич – аспирант кафедры технологии металлов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: bda@mail.ru

About the authors:

RATKEVICH Ekaterina Alekseevna – Candidate of Chemical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Applied Physics, Manager of the Center for Promotion of Employment for Graduates, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ekrasavina26@gmail.com

LAVRENTEV Alexey Yurevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Materials Science, Director of the Center for Promotion of Employment for Graduates, Tver State Technical University, Tver. E-mail: lavr_ay@mail.ru

ANTONOV Roman Maksimovich – Postgraduate Student of the Department of Metal Technology and Materials Science, Tver State Technical University, Tver. E-mail: bda@mail.ru

LYUTOV Sergey Alekseevich – Postgraduate Student of the Department of Metal Technology and Materials Science, Tver State Technical University, Tver. E-mail: bda@mail.ru

УДК 005.6

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Д.В. Розов, Д.А. Фролова, А.И. Коновалов,
И.С. Комаров, М.В. Прошина**

© Розов Д.В., Фролова Д.А., Коновалов А.И.,
Комаров И.С., Прошина М.В., 2025

***Аннотация.** Рассмотрены ключевые инструменты управления качеством, их применение в контексте предприятий железнодорожного машиностроения. Перечислены основные проблемы использования малыми предприятиями системы IRIS. Предложена методика их преодоления.*

***Ключевые слова:** управление качеством, инструмент, система, менеджмент, IRIS, предприятия, железнодорожное машиностроение, отрасль, производственный процесс.*

Введение

Современная отрасль железнодорожного машиностроения сталкивается с жесткими требованиями к качеству продукции и оптимизации производственных процессов. Конкуренция на международных рынках и чувствительность клиентов к надежности и безопасности железнодорожного транспорта становятся драйверами внедрения новых методов управления качеством. Важным аспектом выступает интеграция систем данного управления с современными стандартами, такими как система IRIS (сокращение от International Railway Industry Standard), которая предназначена для обеспечения высокой степени надежности и безопасности на всех этапах жизненного цикла продукции.

Цели системы менеджмента качества предприятий железнодорожной отрасли – обеспечение выпуска качественной продукции и предоставление безопасных услуг по перевозке в соответствии с установленными требованиями и ожиданиями потребителей [3]. Однако