

Мараховский Даниил Алексеевич, бакалавр
Уфимский университет науки и технологий
Marakhovskiy Daniil Alekseevich
Ufa University of Science and Technology

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ: ТЕХНОЛОГИИ, ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ADDITIVE MANUFACTURING OF METAL PARTS: TECHNOLOGIES, DEFECTS AND QUALITY CONTROL

Аннотация. Рассмотрены основные технологии аддитивного производства металлических деталей и факторы, определяющие их качество. Проанализированы характерные дефекты, включая пористость, несплавления, трещины, остаточные напряжения и повышенную шероховатость. Показана роль контроля исходного порошка, параметров процесса, внутрипроцессного мониторинга, рентгеновской компьютерной томографии и последующей обработки в обеспечении стабильных свойств изделий.

Abstract. The main technologies of metal additive manufacturing and the factors determining part quality are considered. Typical defects including porosity, lack of fusion, cracking, residual stresses and high surface roughness are analyzed. The role of feedstock control, process parameters, in-process monitoring, X-ray computed tomography and post-processing in ensuring stable part properties is shown.

Ключевые слова: Аддитивное производство, металлический порошок, порошковое сплавление, дефект, пористость, контроль качества.

Keywords: Additive manufacturing, metal powder, powder bed fusion, defect, porosity, quality control.

Введение

Аддитивное производство формирует изделие непосредственно по цифровой трехмерной модели путем последовательного добавления материала. В отличие от традиционной механической обработки, где требуемая геометрия получается удалением припуска, аддитивный подход позволяет создавать внутренние каналы, решетчатые структуры и сложные формы с меньшим количеством сборочных операций. ISO/ASTM 52900:2021 закрепляет базовую терминологию и классификацию процессов аддитивного производства [1]. Для металлических деталей наиболее значимы процессы сплавления материала в порошковом слое и направленного энергетического воздействия.

Преимущества сложной геометрии сопровождаются высокой чувствительностью результата к параметрам процесса. Качество детали формируется на протяжении всей технологической цепочки: от свойств порошка и подготовки цифровой модели до стратегии сканирования, атмосферы рабочей камеры, тепловой истории, термообработки и финишного контроля. NIST отмечает, что для широкого промышленного применения металлических аддитивных технологий критичны измерение свойств исходных материалов, мониторинг процесса и квалификация готовых изделий [3, 4]. Цель статьи – рассмотреть основные технологии изготовления металлических деталей, характерные дефекты и методы обеспечения качества.

Основные технологии металлической 3D-печати

При powder bed fusion тонкий слой металлического порошка распределяется по рабочей платформе, после чего выбранные области локально сплавляются лазерным или электронным пучком. Затем платформа смещается на толщину слоя, наносится новая порция порошка, и цикл повторяется. Такой подход обеспечивает высокую геометрическую детализацию и широко используется для деталей сложной формы. Лазерное сплавление порошкового слоя требует стабильного распределения порошка и контролируемой защитной атмосферы, поскольку отклонения слоя и загрязнение могут непосредственно отражаться на формировании ванны расплава.



В процессах directed energy deposition материал – порошок или проволока – подается непосредственно в зону воздействия источника энергии. Метод удобен для нанесения материала на существующую деталь, ремонта и создания крупных элементов, однако обычно обеспечивает меньшую точность поверхности по сравнению с порошковым слоем. Отдельную группу составляет binder jetting, при котором порошок локально связывается жидким связующим, а необходимая плотность достигается на последующих стадиях удаления связующего и спекания. Каждый процесс имеет собственную цепочку рисков, поэтому термин «металлическая 3D-печать» не должен рассматриваться как единая технология с одинаковыми свойствами результата.

Требования к проектированию также отличаются от традиционного производства. Ориентация детали влияет на количество поддержек, тепловой отвод, точность нависающих участков и свойства материала по направлениям. ISO/ASTM 52910:2018 содержит требования и рекомендации, учитывающие специфику проектирования для аддитивного производства [2]. Следовательно, конструкторская модель должна разрабатываться с учетом выбранного процесса, а не просто передаваться на печать после создания для механической обработки или литья.

Характерные дефекты и причины их образования

Одним из наиболее распространенных классов дефектов металлических аддитивных деталей является пористость. Непровар между соседними дорожками или слоями может возникать при недостаточном энергетическом воздействии, избыточной скорости сканирования или неблагоприятном расстоянии между дорожками. Такие несплошности часто имеют неправильную форму и относятся к дефектам типа lack of fusion. Другой механизм связан с газом, находящимся в частицах порошка или захваченным расплавом; возникающие поры обычно имеют более округлую форму. Обзор NIST показывает, что форма, размер и происхождение пор существенно зависят от материала и параметров процесса [3].

При чрезмерной локальной энергии возможны нестабильность ванны расплава и образование дефектов, связанных с глубоким проплавлением. Высокие температурные градиенты и быстрое охлаждение формируют остаточные напряжения, которые способны приводить к короблению, отрыву от платформы и трещинообразованию. Для сплавов, чувствительных к горячим трещинам, выбор стратегии сканирования и теплового режима становится особенно важным. В результате свойства определяются не только химическим составом, но и микроструктурой, формирующейся при многократных циклах нагрева и охлаждения.

Отдельной проблемой является поверхность. Послойное построение создает ступенчатость на наклонных гранях, а частично сплавленные частицы увеличивают шероховатость. Каналы и внутренние полости могут быть труднодоступны для механической обработки. Поэтому деталь, соответствующая заданной внешней геометрии после печати, не обязательно готова к эксплуатации: критические поверхности часто требуют фрезерования, шлифования, полирования или иной финишной обработки.

Контроль исходного материала и процесса

Качество начинается с исходного порошка. Важны химический состав, распределение частиц по размерам, форма, текучесть, содержание влаги и загрязнений. Повторное использование порошка после цикла печати требует установленной процедуры просева, хранения и контроля, поскольку свойства партии могут изменяться. Стабильность порошкового слоя влияет на поглощение энергии и повторяемость плавления, поэтому входной контроль материала является частью технологической дисциплины, а не вспомогательной операцией.

Следующий уровень – контроль параметров оборудования. Мощность и фокусировка источника энергии, скорость сканирования, толщина слоя, расстояние между дорожками, состояние оптики, калибровка системы перемещения и содержание кислорода в камере

должны находиться в заданных пределах. NIST развивает измерительные стенды для исследования powder bed fusion, связывая метрологию лазерного воздействия, распределение порошка и синхронные измерения с характеристиками получаемого материала [4]. Такая постановка показывает, что повторяемость аддитивного процесса требует контроля не одного параметра, а согласованной системы измерений.

Внутрипроцессный мониторинг использует камеры, пирометрию и регистрацию излучения зоны плавления. Он помогает выявлять нарушения распределения порошка и локальные аномалии, но сигнал датчика не всегда равнозначен дефекту готовой детали. Поэтому мониторинг должен подтверждаться последующей верификацией и статистикой.

Контроль готового изделия и постобработка

После изготовления применяются размерный контроль, металлография, механические испытания и методы неразрушающего контроля. Для анализа внутренних пор и сложных пространственных несплошностей особенно полезна рентгеновская компьютерная томография, позволяющая получить трехмерное представление внутренней структуры без разрушения детали. Ее ограничения связаны с размерами изделия, плотностью материала, требуемым разрешением и временем измерения. Для крупногабаритных компонентов контроль может дополняться ультразвуковыми и другими методами.

Термическая обработка применяется для уменьшения остаточных напряжений и формирования требуемой микроструктуры. Для ряда ответственных деталей используется горячее изостатическое прессование, которое способно уменьшать внутреннюю пористость при одновременном воздействии высокой температуры и давления. При этом постобработка не должна рассматриваться как способ исправить любой нестабильный процесс печати. Если причиной дефекта является систематическое несплавление или загрязнение порошка, первоочередной задачей остается устранение причины на этапе изготовления.

Квалификация технологии требует прослеживаемости от версии цифровой модели и партии порошка до параметров построения, термообработки и результатов контроля. Такая документация переводит аддитивное производство из режима единичного прототипирования в воспроизводимый промышленный процесс.

Заключение

Аддитивное производство металлических деталей дает широкие возможности формообразования, но предъявляет повышенные требования к управлению процессом. Типичными проблемами являются пористость, несплавления, трещины, остаточные напряжения и шероховатость. Качество обеспечивается контролем порошка, оборудования и параметров построения, мониторингом, постобработкой и проверкой готового изделия. Поэтому надежность определяется управляемостью всей технологической цепочки и подтвержденной воспроизводимостью свойств.

Список литературы:

1. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary.
2. ISO/ASTM 52910:2018. Additive manufacturing – Design – Requirements, guidelines and recommendations.
3. Kim F. H., Moylan S. P. Literature Review of Metal Additive Manufacturing Defects. NIST Advanced Manufacturing Series 100-16. 2018. DOI: 10.6028/NIST.AMS.100-16.
4. National Institute of Standards and Technology. Powder Bed Fusion: Additive Manufacturing Research Areas. NIST.
5. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. 3rd ed. Springer, 2021

