УДК: 658.5.012.7

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Давыдова А.В. – студентка гр. МСмоз-241, II курс
Научный руководитель: Короткова Л.П., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,
Россия, г. Кемерово

Влияние параметров аддитивного производства на результаты неразрушающего контроля металлических изделий является комплексной проблемой, определяющей возможность внедрения этих технологий в ответственные отрасли промышленности. Ключевые технологические параметры, такие как мощность лазера, скорость сканирования, стратегия сканирования, толщина слоя и ориентация детали, формируют не только геометрию изделия, но и его внутреннюю структуру, определяя наличие и характер дефектов, которые, в свою очередь, влияют на сигналы методов неразрушающего контроля [1;2].

Энергетические параметры процесса селективного лазерного сплавления, объединяемые в понятие плотности энергии, напрямую определяют природу основных дефектов. При недостаточной плотности энергии возникает явление несплавления, характеризующееся образованием протяженных неправильной формы пор с острыми краями, которые являются концентраторами напряжений и значительно снижают усталостную прочность изделия. При избыточной плотности энергии происходит ключевание с образованием сферических пор, которые могут объединяться в крупные кластеры, а также возможно испарение легирующих элементов и увеличение остаточных напряжений [1;3].

Стратегия сканирования, например, вращение вектора сканирования на определенный угол между слоями, влияет на распределение термических полей и остаточных напряжений. Неправильно выбранная стратегия может привести к локализованному перегреву и образованию трещин по границам зерен. Ориентация изделия в камере построения влияет на теплоперенос и определяет необходимость поддержек. Зоны контакта с поддержками часто характеризуются повышенной шероховатостью, наличием непроваров и остаточными частицами порошка, что создает дополнительные задачи для неразрушающего контроля [4;8].

Толщина слоя определяет разрешение по вертикали и производительность. Меньшая толщина способствует лучшему качеству поверхности и меньшей вероятности образования крупных пор, но увеличивает общее время построения и количество термических циклов,

воздействующих на материал. Все эти факторы формируют специфическую для аддитивного производства картину дефектов, которая существенно отличается от дефектов в традиционных материалах, что требует адаптации существующих методов неразрушающего контроля [2;4].

Рентгеновская компьютерная томография является одним из наиболее эффективных методов контроля внутренних дефектов в АП-изделиях. Сферические поры от ключевания дают четкий контраст и хорошо детектируются, тогда как плоскостные дефекты непроваров могут оставаться невидимыми, если их ориентация совпадает с направлением рентгеновских лучей. Шероховатость поверхности, вызванная неоптимальными параметрами сплавления и влиянием поддержек, создает значительные шумовые артефакты на томограммах, затрудняя идентификацию приповерхностных дефектов. Неоднородная плотность материала, микропоры и колебания химического состава, вызванные локальными перегревами, создают фоновый структурный шум, снижая чувствительность метода и вероятность обнаружения мелких критических дефектов [5].

Ультразвуковой контроль, особенно импульсный эхо-метод, сталкивается с проблемами сильного рассеяния и затухания сигнала на неоднородной мелкозернистой микроструктуре АП-изделий. Анизотропия акустических свойств, обусловленная слоистой структурой и текстурой кристаллизации, приводит к зависимости скорости ультразвука и коэффициента затухания от направления распространения волны относительно оси построения. Для корректной интерпретации данных требуются специализированные настроечные образцы и алгоритмы обработки сигналов. Дефекты типа несплавления, имеющие выраженную ориентацию, могут давать сильный эхо-сигнал при перпендикулярном падении ультразвукового луча и практически не детектироваться при другой ориентации, что требует применения многокоординатного сканирования [6].

Вихретоковый контроль чувствителен к изменению электропроводности и магнитной проницаемости, которые в АП-изделиях могут варьироваться из-за неоднородности микроструктуры и остаточных напряжений. Локальные изменения химического состава создают помехи для детектирования поверхностных дефектов, таких как трещины. Шероховатость поверхности искажает распределение вихревых токов, снижая точность измерений и увеличивая вероятность ложных срабатываний [3;6].

Капиллярный контроль, несмотря на свою простоту, также сильно зависит от параметров производства. Шероховатая поверхность удерживает пенетрант, создавая фоновую засветку, которая маскирует индикаторы от реальных мелких трещин. Остаточные напряжения могут влиять на раскрытие поверхностных дефектов, делая их более или менее заметными для пенетранта, что добавляет переменную в интерпретацию результатов [7;8].

Для повышения эффективности неразрушающего контроля необходима интеграция данных о технологических параметрах построения каждой конкретной детали в процесс анализа результатов НК. Это позволяет перейти

от универсальных методик контроля к адресным, целенаправленным проверкам зон повышенного риска, сформированных на основе моделирования термических процессов и анализа данных мониторинга. Зоны с резким изменением сечения или границы надвисев, где высока вероятность образования непроваров, должны контролироваться с повышенным вниманием, с применением томографии в специфических ракурсах или многоосевого ультразвукового сканирования [2;4;9].

Параметры аддитивного производства и методы неразрушающего контроля неразрывно связаны причинно-следственными отношениями. Технологические режимы печати выступают как ключевой фактор, формирующий специфическую “сигнатуру” изделия для средств НК. Эта сигнатура проявляется в уникальном распределении дефектов, характерной микроструктуре и уровне остаточных напряжений, которые напрямую влияют на результаты всех методов контроля — от рентгеновской томографии до капиллярной дефектоскопии [5;6;10].

Эффективный контроль качества АП-изделий невозможен без глубокого понимания технологического процесса, который их породил. Перспективным направлением является развитие интегрального подхода, объединяющего цифровизацию производства, синхронизацию данных и разработку адаптивных методик НК. Создание цифровых двойников позволяет прогнозировать зоны потенциального дефектообразования. Привязка параметров печати к результатам контроля позволяет строить корреляционные модели. Адаптивные методики НК включают целенаправленное обследование критических зон с использованием специализированных режимов и алгоритмов обработки сигналов, учитывающих анизотропию свойств АП-материалов [1;2;3].

Только комплексный подход, стирающий границу между технологом и дефектоскопистом, обеспечивает необходимый уровень надежности и безопасности аддитивно произведенных компонентов, открывая путь к их массовому применению в самых ответственных отраслях промышленности [2;4;7;10].

Список литературы:

1. Григорьев С.Н., Соболькова Л.В., Терехов С.В. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на структуру и свойства изделий из жаропрочных никелевых сплавов // Литейное производство. – 2020. – № 5. – С. 28-33.

2. Зленко М.А., Попович А.А., Сутурин С.А., Борисов Е.В. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 400 с.

3. Миляев А.Н., Казаковцев П.В., Орлов М.Р. Неразрушающий контроль изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления: проблемы и решения // Дефектоскопия. – 2022. – № 8. – С. 15-25.

4. Попович А.А., Сутурин С.А., Борисов Е.В., Маслов Л.Б. Влияние ориентации в рабочей камере и стратегии сканирования на формирование дефектов в изделиях из нержавеющей стали 316L, полученных методом SLM // Цветные металлы. – 2019. – № 10. – С. 84-90.

5. Скороходов В.Н., Григорьев М.В., Колодин А.В. Применение рентгеновской компьютерной томографии для контроля качества аддитивно произведенных металлических изделий // Контроль. Диагностика. – 2021. – № 4. – С. 44-52.

6. Тарасов С.Ю., Рубин Г.Ш., Орлов М.Р. Особенности ультразвукового контроля изделий, изготовленных с использованием технологий аддитивного производства // Датчики и системы. – 2020. – № 3. – С. 18-24.

7. Шишковский И.В. Аддитивное производство функционально-градиентных изделий и конструкций: состояние и перспективы // Успехи химии. – 2018. – Т. 87, № 9. – С. 827-850.

8. Яковенко И.А., Дементьев В.Б., Петров П.А. Влияние режимов лазерной наплавки на формирование дефектов в изделиях из титанового сплава ВТ6 // Сварка и диагностика. – 2023. – № 1. – С. 36-41.

9. ГОСТ Р 57558-2017. Установки аддитивного производства. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 15 с.

10. Сборник трудов VII Международной научно-технической конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» / Под ред. А.А. Поповича. – СПб: СПбПУ, 2022. – 564 с.