

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В СФЕРЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ANALYSIS OF PROSPECTS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL IN ADDITIVE TECHNOLOGIES

А.В. Прокопов, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель генерального директора по научно-метрологической работе ННЦ “Институт метрологии”, г. Харьков

А.И. Шлома, инженер 1-й категории ННЦ “Институт метрологии”, г. Харьков



А.В. Прокопов



А.И. Шлома

Обсуждаются проблемы применения неразрушающих методов контроля в метрологическом обеспечении развивающихся в настоящее время аддитивных технологий. Рассматриваются варианты формирования метрологической прослеживаемости методов неразрушающего контроля применительно к таким технологиям.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, аддитивные технологии, метрология.

The problems of using the non-destructive control methods in metrological support of currently developing additive technologies are discussed. The options of establishing the metrological traceability of non-destructive control methods for such technologies are considered.

Keywords: non-destructive control, additive technologies, metrology.

Сегодня мир стоит на пороге шестого технологического уклада (технологический уклад — характерный уровень развития производительных сил). Его контуры уже начинают складываться в развитых странах мира: в США, Японии, КНР и др., и характеризуются нацеленностью на развитие и применение наукоёмких (часто называемых высокими) технологий, к числу которых относятся так называемые аддитивные технологии.

Аддитивное производство (additive manufacturing) представляет собой класс перспективных технологий производства деталей сложной формы с использованием трехмерной компьютерной модели путем последовательного (как правило, послойного) нанесения материала — в противоположность так называемому вычитающему производству (например, традиционной механической обработке).

Процессы, используемые в аддитивном производстве (АП), определяются состоянием применяемых материалов [1]:

- жидким (полимеры) — стереолитография, послойная наплавка, струйная печать;
- порошкообразным (полимеры, керамика) — 3D-печать, селективное лазерное спекание, селективная лазерная плавка;
- порошкообразным (металлы) — прямое лазерное спекание металлов, электронно-лучевая плавка, прямое нанесение металлов, точное лазерное формование;
- твердым (полимеры, металлы, керамика, композиционные материалы) — послойное изготовление объектов из листового материала (листы), произвольное экструзионное формование (проволока) [1].

В развитых странах уже существует специальная программа развития аддитивных технологий [2, 3], реализацией которых активно занимаются как на-

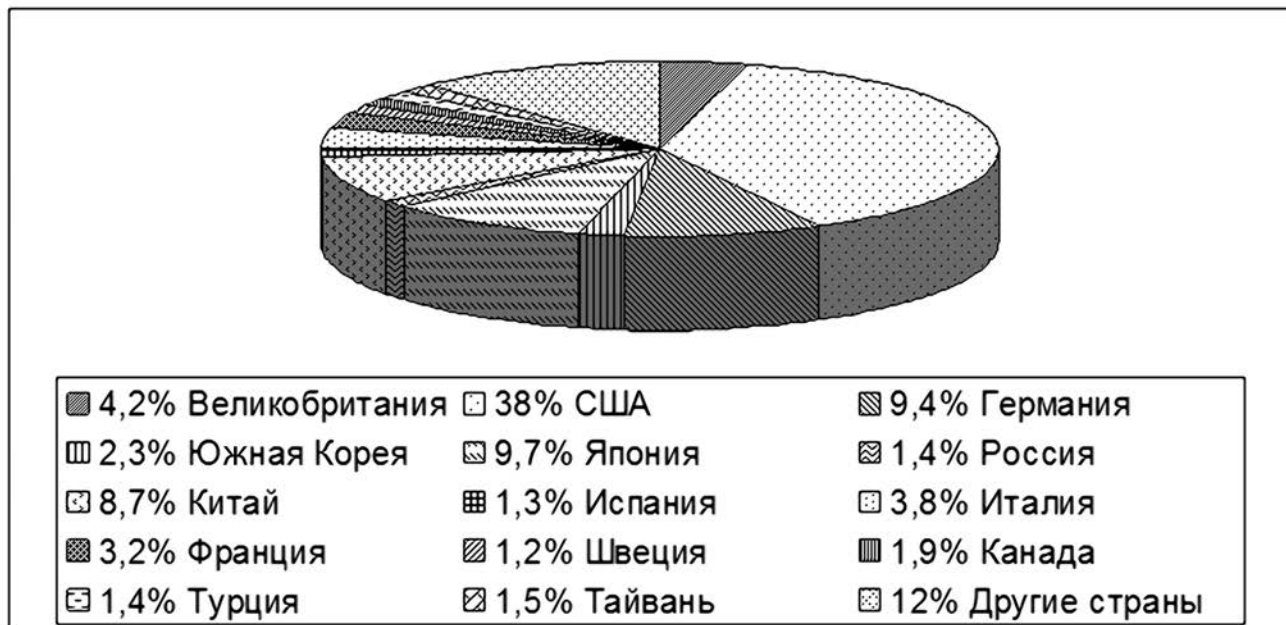


Рис. 1. Распределение количества установленного аддитивного оборудования по странам мира [1]

учно-исследовательские, так и отдельные производственные организации.

Мировой рынок аддитивных технологий с 2010 по 2014 гг. прирастал в среднем на 27 % в год и достиг объема в 3 млрд долларов, из которых примерно 40 % приходится на оборудование и материалы, а 60 % — на инжиниринговые услуги (разработка математических моделей, технологий и синтез деталей). Распределение количества установленного аддитивного оборудования по странам мира показано на рис. 1 [1]. По полученным оценкам объем аддитивного производства к 2021 г. может составить от 10 до 30 млрд долларов.

Среди проблем, решение которых повысит эффективность использования потенциала, заложенного в АП, важное место занимают вопросы метрологии. Обеспечение повышенных требований к качеству поверхностей и внутренней структуры, а также к точности изготавливаемых деталей является обязательным условием для широкого внедрения процессов АП в различные производственные циклы. Решение этих проблем естественным образом связано с развитием метрологического обеспечения контроля технических производств и качества продукции АП. В планах наиболее развитых в части освоения АП стран мира с этой целью предусмотрено использование методов неразрушающего контроля. В ряде развитых в научно-техническом и экономическом отношении стран уже разработаны целые программы развития метрологии для аддитивных технологий. Среди них можно отметить программу США “Real-Time Monitoring and Control of Additive Manufacturing Processes” [4]. Соответствующие работы проводятся в рамках программ NIST, EMPIR. В ряде работ [5–7] обсуждаются идеи следующего поколения методов, касающихся контроля качества компонентов, сформированных при помощи аддитивного оборудования.

Общий метод аддитивного производства прост: устройство для нанесения и выравнивания слоя порошка снимает слой порошка с питателя и равномерным слоем распределяет его по поверхности подложки. После чего лазерный луч сканирует поверхность данного слоя порошка и путем оплавления или спекания формирует изделие. По окончании сканирования порошкового слоя платформа с изготавливаемым изделием опускается на толщину наносимого слоя, а платформа с порошком поднимается, и процесс нанесения слоя порошка и сканирования повторяется (рис. 2).

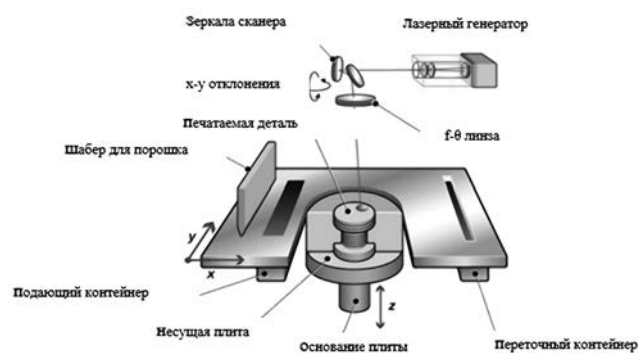


Рис. 2. Аддитивный метод производства с использованием лазерного излучения

Как видно из данного описания, процесс подразумевает нагрев и остывание наращиваемого материала, следовательно, производимая деталь испытывает температурные напряжения, которые могут привести к поводке изделия или к образованию трещин. Конечно, управление технологией процесса формирования детали и применение всевозможных легирующих добавок может снизить риск образования дефектов, однако риск их возникновения все равно останется, следовательно,

возникает вопрос об оперативном контроле качества производимой продукции (рис. 3).

В рамках программы исследований в области аддитивного производства учеными Национальной лаборатории Лоуренса Ливермора (США) был всесторонне изучен процесс послойного сплавления порошка [8]. Опубликованные ими результаты позволяют указать причину возникновения дефектов, характерных для данного метода производства, а также выделить наиболее опасные из них.

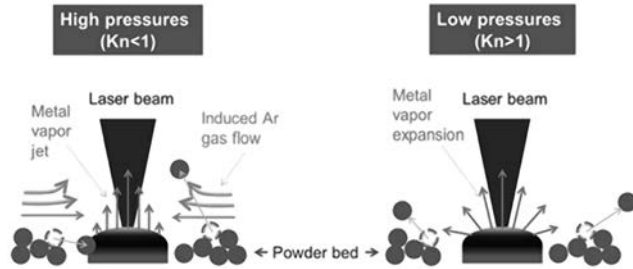


Рис. 3. Причина возникновения дефектов при послойном сплавлении порошка [8]

Данный эффект вызывает перепады высоты полученной дорожки и образование пористости в застывшем металле (рис. 4).

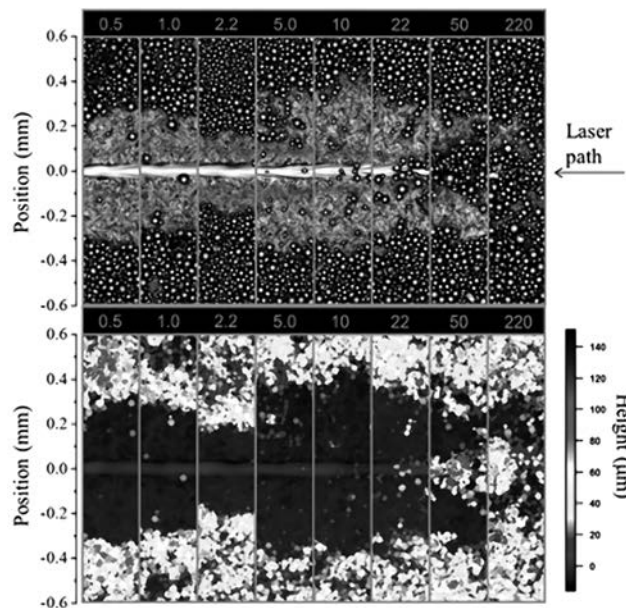


Рис. 4. Характерные дефекты при послойном сплавлении порошка [8]

Как видно из рис. 4, отклонение по высоте может достигать до 100 мкм.

Также для данного метода производства характерен эффект так называемой обнаженной зоны, который напрямую зависит от эффекта, описанного выше, и мощности лазерного излучения (рис. 5).

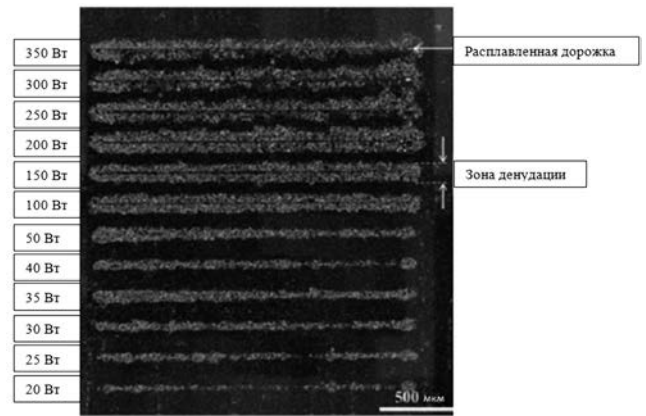


Рис. 5. Общий вид результата при послойном сплавлении порошка при различной мощности лазерного пучка [8]

Таким образом, могут возникать пустоты, связанные с плавлением при сильном испарении или неполном плавлении порошка, оказывающие значительное и отрицательное воздействие на механические свойства, такие как усталость.

Учитывая то, что аддитивное производство подразумевает создание сложных структур, развитие методов неразрушающего контроля (НК) можно считать одним из важнейших направлений контроля качества на этапах изготовления, испытаний и эксплуатации. Представляет интерес проведение анализа возможностей методов НК для АП, на основе которого можно сформировать требования к дальнейшему развитию таких методов применительно к АП.

Так как в АП используются разные материалы, то был проведен [9] анализ эффективности применения методов НК по отношению к четырем видам материалов по пятибалльной шкале (см. таблицу).

В таблице выделяются восемь основных методов неразрушающего контроля, которые основаны на различных физических эффектах, положенных в основу систем обнаружения дефектов.

Объекты контроля	Вид НК							
	Радиационный	Ультразвуковой	Оптический	Магнитный	Капиллярный	Тепловой	Вихретоковый	Радиоволновой
Неферромагнитные материалы	5	5	4	0	0	0	4	0
Ферромагнитные материалы	5	5	4	4	4	0	4	0
Диэлектрики	5	4	4	0	4	3	0	5
Соединения	5	5	0	5	4	3	3	0

Как видно из таблицы, для рассмотренных материалов на данный момент предпочтение отдается оптическим, радиационным и ультразвуковым методам.

Введение систем НК применительно к АП тесно связано с необходимостью повышения требований к точности и достоверности результатов дефектоскопирования. Так, в проекте EMPIR [3] требования к точности НК ~9 мкм, что характерно для трехкоординатных систем измерения.

Однако для повышения точности и достоверности НК в АП недостаточно только улучшать метрологические характеристики отдельных приборов. Рост сложности используемых систем, технологических процессов и разнообразие материалов требуют подробного анализа существующих и перспективных методов НК, их оптимального применения на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Рассмотрим более подробно три метода, получивших наивысшие оценки согласно вышеприведенной таблице.

Ультразвуковая спектроскопия

Под термином “ультразвуковая спектроскопия” обычно понимается использование явлений, связанных с дифракцией света, обусловленной периодическими изменениями плотности среды

при распространении в ней ультразвуковых колебаний, однако этот термин также применим и к методам анализа частотных составляющих сигналов, используемых в ультразвуковой дефектоскопии.

Корректный учет зависимости от свойств среды характеристик распространения ультразвуковых колебаний способствует повышению информативности контроля.

Метод ультразвуковой спектроскопии имеет потенциал для развития и уже сейчас видно, как минимум, два пути его совершенствования. Один из них состоит в накоплении практического опыта путем сравнения спектров большого числа выявленных дефектов с результатами вскрытия последних, что в совокупности с бурно развивающейся компьютерной техникой даст возможность накопления большого числа характерных спектров в форме базы типовых сигналов, по которой можно будет оценивать характер неизвестных дефектов [5]. Другое направление заключается в дальнейшем усовершенствовании аппаратуры, применяемой для ультразвуковой спектроскопии [7].

Возможная схема прослеживаемости к некоторым первичным эталонам (на основе передачи единицы длины и скорости распространения продольных ультразвуковых волн) представлена на рис. 6 на примере эталонных средств, имеющихся в Украине.

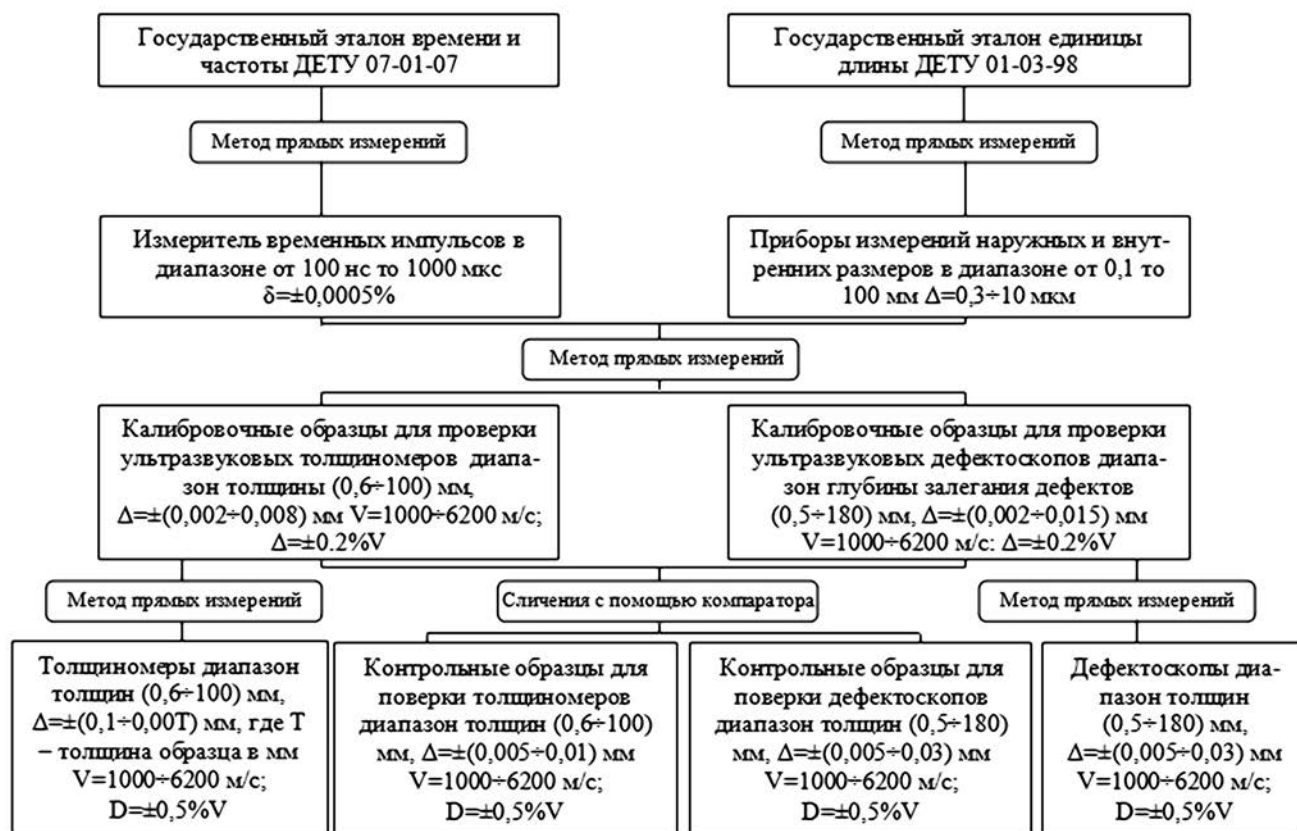


Рис. 6. Возможная схема прослеживаемости к первичным эталонам единиц длины, времени и частоты

Нейтронная радиография

Нейтронная радиография — разновидность радиографического метода. Ее преимущество заключается в легкости интерпретации изображений и способности выявлять относительно малые изменения толщины и плотности материала. Недостатки ее также присущи обычной радиографии, например, невозможность надежно обнаружить трещины с малой протяженностью в направлении радиационного пучка и неспособность давать подробную информацию о качестве соединений (пайки, клепки, склейки). При использовании зависимости ослабления потока нейтронов от атомного номера материала поглотителя в этом случае оказывается возможным получение удовлетворительного изображения места соединения [7].

Нейтронная радиография занимает особое место среди других методов НК. В настоящее время ее использование ограничено применением к специальным проблемам и специальными организациями, располагающими источниками нейтронов (в большинстве случаев, реакторами). Однако ясно, что методы радиографии, использующие безреакторные источники нейтронов, привлекают к себе внимание все большего круга исследователей. Использование этих источников уже демонстрировалось. В будущем следует ожидать расширения использования нейтронной радиографии в промышленности, использующей аддитивные технологии.

Идея структурной схемы передачи единицы длины в радиографии состоит в привязке имеющейся структурной схемы ДСТУ 4087–2001 [10] к статистической информации ослабления уровня излучения при проходе через определенную толщину определенного материала, что в перспективе может дать прослеживаемость к единице длины.

Оптические методы

Оптический метод НК является наиболее простым и отработанным, при этом имеет потенциал для дальнейшего увеличения его точности, а также отлаженную структуру прослеживаемости к первичным эталонам ДСТУ 3741:2015 [11].

Комбинация трех вышеперечисленных методов неразрушающего контроля, учитывая возможности их развития, может стать одним из актуальных направлений развития метрологического обеспечения контроля качества аддитивной продукции.

Необходимо отметить, что применение вышеуказанных методов неразрушающего контроля возможно для технологий, где пригодны приведенные точностные характеристики контроля дефектов. Для повышения точности и расширения диапазона применимости подобных методов требуются специальные исследовательские программы, аналогичные программам, принятым

Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) США.

Выводы

Для планирования и осуществления соответствующих работ по метрологическому обеспечению АП целесообразной является организация технических комитетов (ТК) стандартизации, которые могут детализировать подобные работы в своих программах.

Данные программы должны быть направлены на:

- развитие общих принципов науки измерений для подтверждения качества продукции аддитивного производства;

- разработку стандартов, регламентирующих метрологические операции в сфере аддитивных технологий,

а также:

- расширение возможностей существующих стандартных методов для определения характеристик металлических порошков и механических свойств металлических деталей для разработки новых специфических для аддитивного производства методов определения характеристик для количественной оценки качества и уникальных атрибутов материалов;

- метрологическое обеспечение измерений в режиме реального времени параметров процесса, таких как температуры бассейна расплава, микроструктуры материала, размеров деталей и параметров качества отделки поверхности.

В заключение следует подчеркнуть, что поскольку метрология является неотъемлемой частью аддитивных технологий, актуальной остается задача разработки адекватных методик метрологического обеспечения, которые не просто позволят перекрыть текущие потребности имеющихся технологий, но и заложить основы для обеспечения стандартов качества, которые с освоением технологий более высокого уровня также будут возрастать.

Список литературы

1. Михайлов Ю. М. Перспективы использования аддитивных технологий в оборонно-промышленном комплексе // Оборонный комплекс РФ: состояние и перспективы развития: федеральный справочник. Т. 11. Москва: Центр стратегического партнерства, 2015. С. 124–130.
2. Приказ Федерального округа по техническому регулированию РФ от 01.09.2015 № 1013 о создании ТК по стандартизации “Аддитивные технологии”.
3. EMPIRE call 2014 — industry and research potential srt-i05. Metrology for additive manufacturing

- production assurance [Электронный ресурс]. URL: https://msu.euramet.org/industry_2014/SRTs/SRT-i05.pdf
4. Real-Time Monitoring and Control of Additive Manufacturing Processes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nist.gov/programs-projects/real-time-control-additive-manufacturing-processes>
 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nist.gov/el/isd/sbm/msam.cfm>
 6. Нежмаков П.И., Прокопов А.В. Об актуальных задачах метрологии в сфере аддитивных технологий // Украинський метрологічний журнал. 2016. № 3. С. 4–6.
 7. Методы неразрушающих испытаний. Физические основы, практические применения, перспективы развития / под ред. Р. Шарпа; пер. с англ. под ред. Л.Г. Дубицкого. Москва: Мир, 1972. 495 с.
 8. Manyalibo J. Matthews, Gabe Guss, Saad A. Khairallah, Alexander M. Rubenchik, Philip J. Depond, Wayne E. King. Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes. Lawrence Livermore National Laboratory, 7000 East Avenue, Livermore, CA 94550, USA. Acta Materialia. Vol. 114, 1 August 2016, pp. 33–42.
 9. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: уч. пособ. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 243 с.
 10. ДСТУ 4087–2001. Метрологія. Державна повітряна схема для засобів вимірювань поглинутої дози, потужності поглинутої дози рентгенівського та гамма-випромінень. Київ, 2002. 7 с.
 11. ДСТУ 3741:2015. Метрологія. Державна повітряна схема для засобів вимірювання довжини. Київ, 2015. 26 с.
- Статья рекомендована к публикации доктором технических наук, профессором Ю.Ф. Павленко*