ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70242— 2022

Аддитивные технологии

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ И МАТЕРИАЛА

Общие рекомендации по проектированию и изготовлению

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Обществом с ограниченной ответственностью «Русатом — Аддитивные технологии» (ООО «РусАТ») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 182 «Аддитивные технологии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 августа 2022 г. № 714-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к стандарту АСТМ Ф3413—19 «Руководство по аддитивному производству. Проектирование. Прямой подвод энергии и материала (ASTM F3413—19 «Guide for Additive Manufacturing — Design — Directed Energy Deposition», MOD) путем внесения дополнительных положений структурных элементов, которые выделены вертикальной линией, расположенной на полях напротив соответствующего текста, и дополнительных положений, выделенных в тексте курсивом, направленных на учет сложившейся отечественной практики в области аддитивных технологий. В стандарт не включены отдельные структурные элементы и положения, которые являются справочными и/или не содержат информацию, необходимую для включения в настоящий стандарт. Оригинальный текст элементов, не включенных в основную часть настоящего стандарта, приведен в дополнительном приложении ДА.

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5) и для увязки с наименованиями, принятыми в существующем комплексе национальных стандартов

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 1
4 Сокращения 2
5 Технологические и конструктивные особенности изделий, изготовленных при помощи прямого подвода энергии и материала 2
5.1 Общие положения 2
5.2 Варианты изготовления деталей 3
5.3 Размер детали 6
5.4 Типовые преимущества процесса прямого подвода энергии и материала 7
5.5 Типовые недостатки процесса прямого подвода энергии и материала 8
5.6 Экономия материала, экономическая и временная эффективность 8
5.7 Типы конструктивных элементов 9
5.8 Ограничения при изготовлении конструктивных элементов 11
5.9 Точность размеров, формы и положения 13
5.10 Процесс подготовки изделия к изготовлению методом прямого подвода энергии и материала . . 14
5.11 Качество данных и представление 14
5.12 Процессы прямого подвода энергии и материала 15
6 Общие рекомендации по проектированию и изготовлению для процесса прямой подачи энергии и материала 15
6.1 Общие положения 15
6.2 Материал и конструкционные характеристики 16
6.3 Поддерживающие структуры 17
6.4 Ориентация построения, многоосевая наплавка и положение подложки/рабочей поверхности . 18
6.5 Поверхности 26
6.6 Последующая обработка 26
6.7 Проектирование элементов конструкции 27
7 Экономическая оценка 28
Приложение ДА (справочное) Оригинальный текст невключенных структурных элементов 30

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аддитивные технологии

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ И МАТЕРИАЛА

Общие рекомендации по проектированию и изготовлению

Additive technologies. Manufacturing of metal parts by directed energy deposition. General recommendations for design and manufacture

Дата введения — 2022—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на процесс прямого подвода энергии и материала и содержит общие рекомендации по проектированию и изготовлению металлических изделий.

Основные принципы, приведенные в настоящем стандарте, также применимы к другим процессам аддитивного производства при условии учета их особенностей и характерных свойств процесса.

Примечание — В настоящем стандарте рассмотрены только отдельные рекомендации по изготовлению, имеющие важное значение при проектировании изделия, предназначенного для производства с применением прямого подвода энергии и материала. Описание всех положений организации аддитивного производства с использованием процесса прямого подвода энергии и материала не является целью настоящего стандарта.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 57558 ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения

ГОСТ Р 59585 (ИСО/АСТМ 52921:2013) Аддитивные технологии. Системы координат. Общие положения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по *ГОСТ Р 57558*, а также следующие термины с соответствующими определениями:

Издание официальное

3.1 **система с пятью осями и более** (5+ axis system): Система прямого подвода энергии и материала с пятью или более осями *перемещения печатающей головки или синтезируемой детали*.

3.2 **порошковая наплавка** (blown powder): Реализация системы прямого подвода энергии и материала, использующая наплавочное сопло, в котором при помощи транспортирующего газа осуществляется подача порошкового материала в ванну расплава.

3.3 **коэффициент использования материала**; КИМ: Соотношение массы готовой детали к общей массе материала, использованного для изготовления изделия.

Примечание — Применяемый в АСТМ Ф3413—19 англоязычный термин «buy-to-fly ratio» соответствует терминологии, используемой в авиационной отрасли, и отражает соотношение потребности в сырье и конечной массы изделия, которая является составляющей полетной массы. В настоящем стандарте указанный англоязычный термин заменен на термин «коэффициент использования материала», применяемый в отечественной практике. Необходимо учитывать, что коэффициент использования материала обратно пропорционален коэффициенту «buy-to-fly ratio».

3.4 **направление наплавки** (deposition axis): Направление, в котором осуществляют наплавку валиков.

3.5 **гибридные системы** (hybrid system): Аддитивные установки, имеющие как модули для аддитивных технологических процессов производства, так и модули для процессов механической обработки.

Примечание — В случае процессов прямого подвода энергии и материала данный термин, как правило, обозначает, что к аддитивному процессу добавлены процессы механической обработки изделия.

3.6 **выступ** (overhang): Участок поверхности детали, поднимающийся (выдающийся) относительно других поверхностей.

3.7 **симметричное построение (симметричная конфигурация построения)** (symmetric build, symmetric build configuration): Построение, при котором две детали формируют на противоположных сторонах подложки, как правило, чередуя стороны после каждого слоя (*за счет переворота закрепленной за торцевые поверхности подложки на 180º*).

3.8 **траектория перемещений** (tool path): Набор векторов перемещения печатающей головки при изготовлении детали.

3.9 **проволочная наплавка** (wire-fed): Реализация системы прямого подвода энергии и материала с использованием в качестве сырья проволоки.

3.10 **печатающая головка** (deposition head): Устройство, обеспечивающее нанесение материала на поверхность построения.

4 Сокращения

В настоящем стандарте использованы следующие сокращения:

АП — аддитивное производство;

ГИП — горячее изостатическое прессование;

КИМ — коэффициент использования материала;

AMF — формат файлов аддитивного производства;

PBF — синтез на подложке;

STL — формат файлов представления информации о поверхностях трехмерного объекта.

5 Технологические и конструктивные особенности изделий, изготовленных при помощи прямого подвода энергии и материала

5.1 Общие положения

Оптимизация конструкции изделия *с целью обеспечения максимальной технологичности изготовления* должна проводиться с учетом конкретных характеристик применяемого производственного процесса. Примеры особенностей процессов АП, которые следует принимать во внимание на этапах проектирования и планирования процессов, перечислены в 5.2—5.12. Для металлических изделий необходимо учитывать вид сырья (порошковое или проволочное сырье), вид источников энергии (лазер-

ный луч, электронный луч, электрическая дуга, *плазма*), а также использование нескольких различных видов операций последующей обработки, таких как механическая обработка или обработка давлением.

Примечание — Например, использование в качестве сырья проволоки позволяет изготавливать детали со стенками под гораздо большим углом по сравнению с порошком и иметь другие технологические особенности, которые необходимо учитывать при оптимизации детали.

Прямой подвод энергии и материала включает ряд процессов АП и по сравнению с традиционными производственными процессами предоставляет дополнительные варианты реализации установленных требований. Процесс прямого подвода энергии и материала может сократить время и затраты на производство, а также повысить функциональность изделий.

Прямой подвод энергии и материала используют при выполнении одной из следующих задач:

- изготовление деталей с окончательной формой или близкой к окончательной форме;
- изготовление конструктивных элементов на заготовках, полученных традиционными методами;
- модификация поверхности для защиты от износа и коррозии;
- восстановительный ремонт изношенных и поврежденных металлических изделий.

Процессы прямого подвода энергии и материала различают в зависимости от типа сырья (металлопорошковая композиция, проволока), источника энергии (лазерный луч, электронный луч, дуга, плазма), количества источников энергии и конструкции установки. Варианты реализации процесса прямого подвода энергии и материала приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Варианты реализации процесса прямого подвода энергии и материалов

Конструкция	Источник энергии	Сырье
Промышленный робот с пятью осями или более. Портальная конструкция	Лазерный луч. Электронный луч. Дуга. *Плазма*	Металлопорошковая композиция. Проволока

Некоторые виды процессов включают субтрактивные технологии обработки деталей для достижения окончательного размера изделий. В отдельных случаях для отслеживания в реальном времени различных показателей процесса, таких как температура или размер ванны расплава, используют один или несколько датчиков. Для всех процессов прямого подвода энергии и материала изготовление проводят на платформе построения или подложке, которая представляет собой материал, заготовку, деталь или компонент, имеющие поверхность, на которую наносят материал (*возможно нанесение материала на множество поверхностей в рамках одного технологического процесса*).

Процессы прямого подвода энергии и материала, как и многие процессы АП, представляют собой только один этап в технологической цепочке производства. После проектирования и планирования производства выполняют подготовку построения и непосредственно изготовление детали. *Для обеспечения необходимых размеров и качества поверхности применяют последующую механическую обработку детали, для получения конечных свойств материала — ГИП и термообработку. В отдельных случаях перед началом механической обработки необходимо провести первичную термообработку для снятия внутренних напряжений.* Также на различных этапах технологической цепочки может быть проведен контроль. *Проведение контроля после изготовления изделия является обязательным. Как правило, после синтеза изделия контролируют пористость изделия и его геометрические характеристики, далее после механической обработки — геометрические характеристики, после термической обработки и, при необходимости, ГИП — механические свойства на образцах свидетелях.*

5.2 Варианты изготовления деталей

Существует широкий диапазон возможных вариантов изготовления детали при помощи прямого подвода энергии и материала, связанных с параметрами построения, фиксацией детали, ориентацией детали, включением подложки в деталь и степенями свободы системы прямого подвода энергии и материалов. Возможные варианты изготовления зависят от того, какую из четырех задач, перечисленных в 5.1, необходимо решить.

5.2.1 Параметры построения и фиксации детали

Для задач, связанных с построением элементов на существующей детали, модификацией поверхности или ремонтом, варианты изготовления ограничены в большей степени, чем при изготовлении

деталей с окончательной формой или близкой к окончательной форме. В первом случае существующая деталь должна быть ориентирована и закреплена таким образом, чтобы упростить эффективное нанесение металла и достичь поставленных целей. Рекомендации для данных случаев приведены в разделе 6.

При изготовлении деталей с окончательной формой или близкой к окончательной форме доступно большее количество вариантов. Например, для цилиндрического фланца (см. рисунок 1) ориентация очевидна — деталь должна быть ориентирована так, чтобы фланец был параллелен подложке. Далее приведены несколько конфигураций построения, описанных в следующих подразделах.

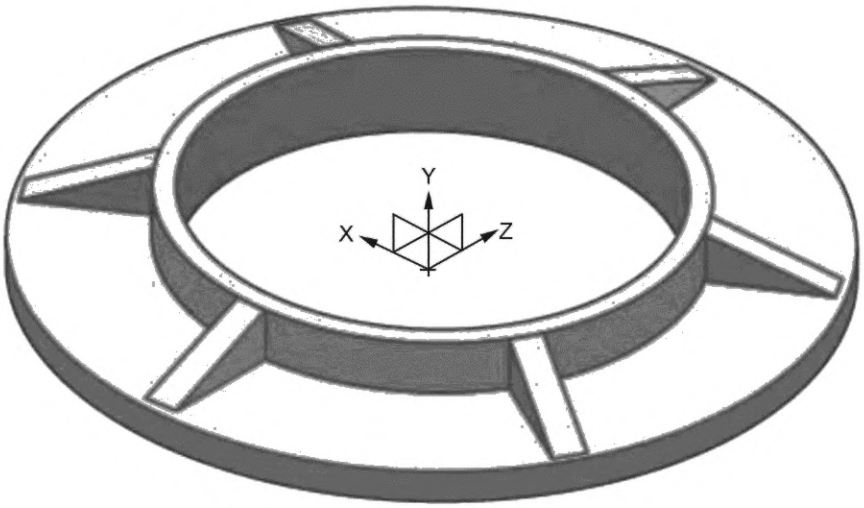


Рисунок 1 — Цилиндрический фланец

5.2.2 Включение подложки в состав детали

При изготовлении детали платформу построения используют как подложку, на которой изготавливают деталь. Распространенной практикой является включение подложки в состав детали таким образом, чтобы подложка формировала плоскую стенку. *При включении подложки в состав детали необходимо использовать подложку из аналогичного материала*. Пример включения подложки в состав детали приведен на рисунке 2, фланец получают вырезанием из подложки после формирования на ней цилиндрического элемента и треугольных ребер.

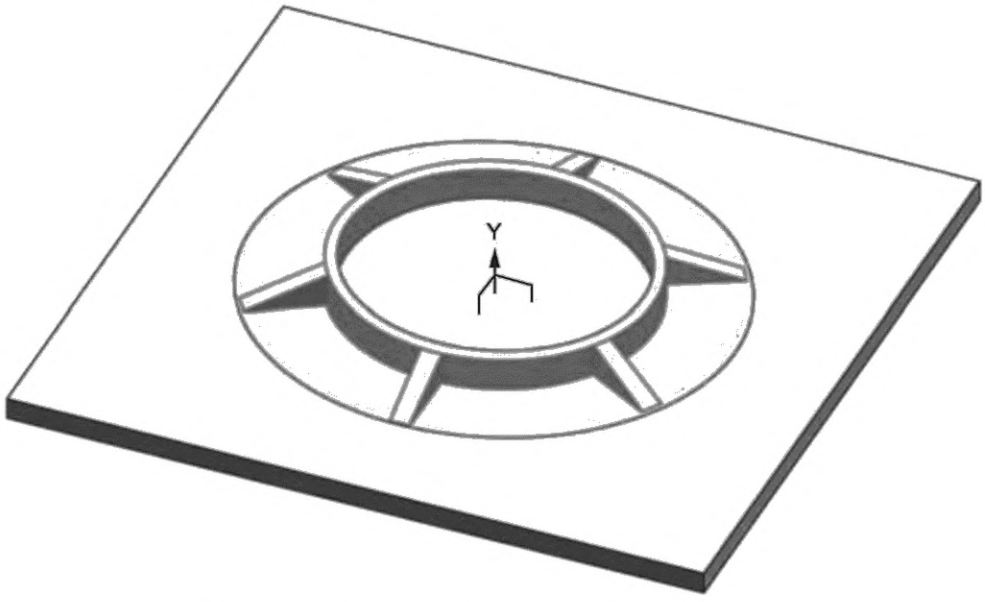


Рисунок 2 — Пример включения подложки в состав детали

5.2.3 Симметричная конфигурация построения

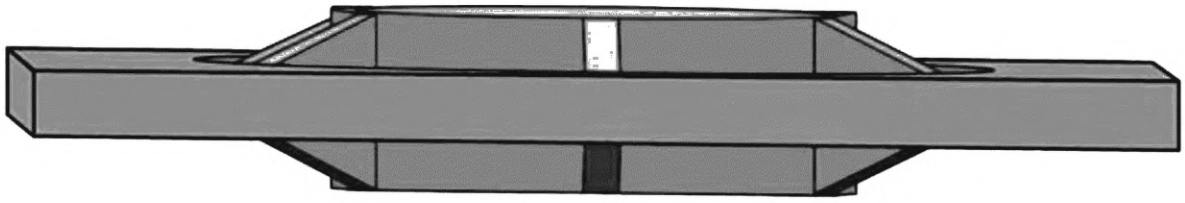
Возможно использование симметричной конфигурации построения, когда две детали строят одновременно на противоположных сторонах подложки. В этом случае подложку периодически переворачивают на 180° для попеременного построения слоев детали на двух поверхностях.

Симметричные конфигурации построения используют для того, чтобы компенсировать тепловые деформации, вызванные остаточными напряжениями. Частота переворачивания зависит от формы и размера детали. Во избежание дефектов, связанных с нагревом, для отдельных больших деталей подложку необходимо переворачивать несколько раз за слой, в то время как для других деталей достаточно переворачивать после каждого слоя. В некоторых случаях перед переворотом подложки можно изготовить несколько слоев.

Симметричные конфигурации построения не находят широкого применения, так как требуют специализированных поворотных механизмов платформы построения и соответствующих объемов рабочей камеры установки. Также возможное удаление части подложки и ее замена для следующего процесса изготовления могут быть экономически нецелесообразными.

Использование симметричной конфигурации построения не исключает необходимости термической обработки детали.

На рисунке 3 приведена симметричная конфигурация построения с толстой подложкой, образующей фланец для обеих деталей, которую для разделения деталей необходимо разрезать пополам.

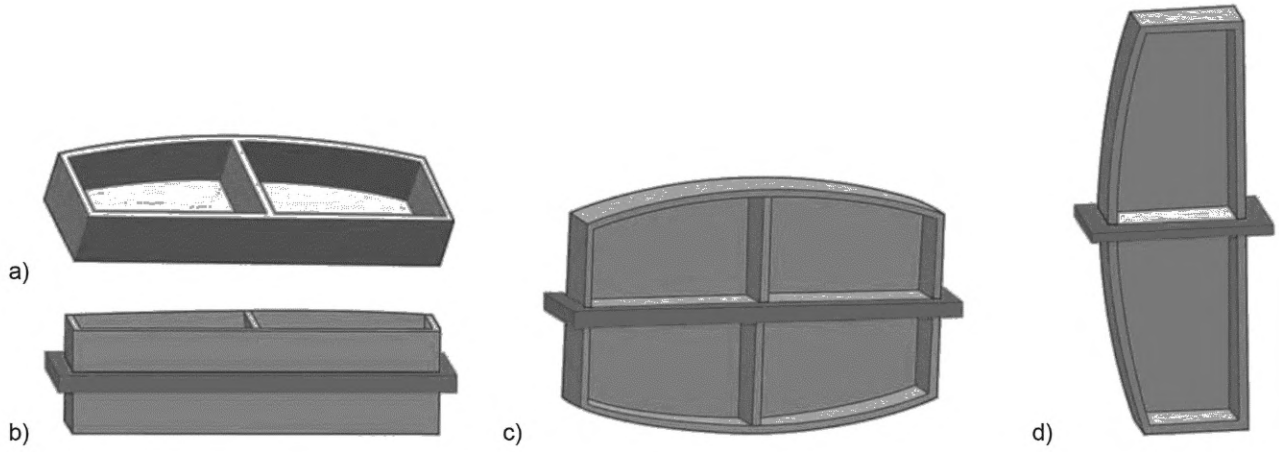


Примечание — Целесообразность применения симметричной конфигурации построения во многом зависит от геометрии детали и применяемого оборудования.

Рисунок 3 — Симметричная конфигурация построения

Подробная информация о способах удержания и фиксации детали приведена в 6.4.6.

На рисунке 4 приведена корпусная деталь с центральным ребром.



a) корпусная деталь; b)—d) варианты симметричной конфигурации построения

Рисунок 4 — Варианты конфигурации построения для корпусной детали

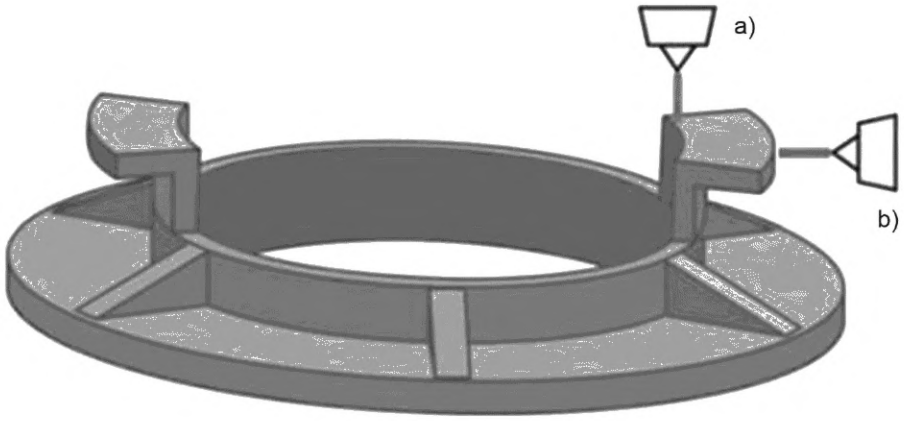
В данном случае возможны дополнительные варианты построения, так как любая из стенок или ребер может быть встроена в подложку, также можно применить различные варианты симметричной конфигурации построения.

5.2.4 Степени свободы систем прямого подвода энергии и материала

Система прямого подвода энергии и материала включает в себя управляющий модуль, контролирующий относительное перемещение между печатающей головкой и изготавливаемой деталью или элементом. Систему перемещения характеризуют количеством степеней свободы между соплом, подающим материал, и деталью, и тем, как эти степени свободы распределены между соплом и деталью. Типичные конфигурации установки прямого подвода энергии и материала, не использующие робот-манипулятор для перемещения печатающей головки или подложки и детали, имеют три оси движения или более. Трехосевые системы обычно обеспечивают три направления перемещения в координатах *x*, *y* и *z* (см. *ГОСТ Р 59585*). Пятиосевые системы имеют возможность дополнительных поворотов для изменения относительной ориентации печатающей головки и детали, которая может быть обеспечена благодаря изменению положения печатающей головки или подложки и детали. При симметричной конфигурации построения деталей, приведенных на рисунках 3 и 4, подложку переворачивают после каждого слоя с целью уравновешивания остаточных напряжений во время построения. В случае использования робота-манипулятора доступно пять степеней свободы или более. При использовании робота-манипулятора и отдельного поворотного стола для вращения подложки и детали обеспечивается до восьми степеней свободы.

5.2.5 Формирование выступов

Существует несколько подходов к изготовлению деталей с выступами. Для поддержки выступа при изготовлении детали могут быть использованы поддерживающие структуры. Применение систем с пятью осями и более значительно снижает необходимость поддерживающих структур за счет возможности переориентации детали относительно печатающей головки. Описанная переориентация приведена на рисунке 5.



a) расположение печатающей головки при горизонтальной ориентации детали;
b) расположение печатающей головки при вертикальной ориентации детали

Рисунок 5 — Преимущество использования системы с пятью и более осями для изготовления невертикальных элементов

Горизонтальную ориентацию детали [a)] используют при изготовлении вертикальных выступов; вертикальную ориентацию детали — для изготовления горизонтальных выступов [b)].

При изготовлении детали рекомендуется использовать вертикальное положение печатающей головки относительно поверхности. По этой причине для изготовления горизонтального выступа необходимо переориентировать деталь [см. рисунок 5, b)], чтобы обеспечить вертикальное положение печатающей головки.

Руководство по изготовлению и использованию технологических поддерживающих элементов приведено в разделе 6, возможности ориентации печатающей головки — см. 5.8.4.

5.3 Размер детали

Размер детали ограничен рабочей камерой/областью построения установки прямого подвода энергии и материала и существенно зависит от конструкции установки. Установки прямого подвода энергии и материала портальной конструкции или с перемещающимися подложками могут иметь ра-

бочий объем, измеряемый несколькими метрами. Значительную роль в ограничении размера детали имеет управление тепловым процессом. Возможность возникновения трещин и деформации приводит к изменению размера деталей, что становится причиной появления брака и дополнительных экономических затрат на доработку или повторное изготовление детали. Таким образом, это необходимо учитывать при оценке стоимости изготовления, в особенности для деталей большого размера.

Важным фактором, который необходимо учитывать, является экономическая целесообразность применения прямого подвода энергии и материала для больших деталей. Для систем с порошковой наплавкой на стоимость и качество изготовления деталей значительно влияет повторное использование порошка. Если повторное использование порошка не допускается, весь остаточный порошок утилизируют. Остаточным называют порошок, поданный в зону нанесения, но не использованный при построении детали. Количество остаточного порошка может составлять от 30 % до 50 % (*в некоторых случаях — от 10 % до 80 %*) от общего количества использованного порошка. Процессы проволочной наплавки менее подвержены влиянию этого фактора.

5.4 Типовые преимущества процесса прямого подвода энергии и материала

Процессы прямого подвода энергии и материала могут быть эффективны при изготовлении и ремонте деталей за счет перечисленных далее факторов:

a) для процессов прямого подвода энергии и материала применимо большое количество материалов. Как правило, можно использовать любые свариваемые металлические сплавы в виде порошка или проволоки. Так как исходный материал плавится по мере его нанесения, системы прямого подвода энергии и материала могут иметь более мощные лазеры *(или лазеры с большей плотностью мощности*) или источники электронного луча по сравнению с системами PBF, что позволяет использовать более широкий диапазон исходных материалов;

b) для одной детали можно использовать несколько материалов. Это легко достижимо путем подачи нескольких порошков в наплавочное сопло для систем порошковой наплавки или нескольких проволок в случае систем с проволочной наплавкой или применения одновременно печатающей головки для проволочной и порошковой наплавок. Благодаря этой возможности можно изготавливать функционально-градиентные материалы и биметаллические конструкции;

c) за счет глубокого и полного проплавления исходного материала технологически проще получить заданные механические свойства детали по сравнению с процессами синтеза на подложке;

d) заданные свойства детали могут быть достигнуты путем изменения технологических режимов процесса даже для одного и того же материала;

e) характеристики процесса могут быть выборочно настроены путем локальной настройки параметров процесса, влияя на свойства материалов, характеристики поверхности;

f) возможность изготовления детали целиком, локальных элементов, нанесения покрытий и ремонта при помощи одной установки;

g) достижима высокая производительность (*до 4 кг/ч*);

i) процессы прямого подвода энергии и материала применимы для крупногабаритных деталей;

j) изготовление деталей и элементов может быть выполнено на подложках произвольной формы. Широкие возможности ориентации печатающей головки по отношению к поверхности детали позволяют осуществлять восстановительный ремонт и изготовление элементов детали в любой плоскости построения;

h) могут быть изготовлены детали близкой к окончательной форме *(необходимо учитывать, что, как правило, необходима минимальная финишная механическая обработка в сравнении с традиционными методами изготовления)*;

l) широкие возможности проектирования по сравнению с традиционными производственными процессами, особенно при использовании систем с пятью и более осями. При проектировании следует учитывать необходимость дополнительных этапов обработки;

m) может быть произведен широкий спектр сложных геометрических форм, таких как:

1) формы произвольной геометрической конфигурации,

2) топологически оптимизированные конструкции для уменьшения массы и оптимизации функциональных свойств детали,

3) внутренние элементы, хотя необходимо иметь в виду доступность при проведении механической обработки поверхности;

n) могут быть исключены процессы построения и соединения за счет объединения деталей, что потенциально может привести к проектированию единой детали;

o) высокий уровень готовности технологий (TRL) и уровень готовности производства (MRL);

p) сокращение времени выполнения производственных операций для некоторых деталей (в зависимости от конструкции), по сравнению с традиционной обработкой металлических заготовок;

q) уменьшение количества отходов для некоторых деталей (в зависимости от конструкции) по сравнению с традиционной обработкой заготовки;

r) некоторые установки прямого подвода энергии и материала имеют возможность механической обработки, позволяя реализовать гибридное аддитивно-субтрактивное производство (т. е. гибридные системы);

s) сырье для прямого подвода энергии и материала, как правило, дешевле *и доступнее* порошков для синтеза на подложке. Как правило металлопорошковые композиции для прямого подвода энергии и материала имеют больший размер частиц. *Доступен более широкий ассортимент сталей и сплавов в виде проволоки по сравнению с ассортиментом порошкового сырья;*

t) для систем проволочной наплавки процессы прямого подвода энергии и материала безопаснее в эксплуатации, чем системы синтеза металлического порошка на подложке, поскольку в процессе не используют мелкие порошки;

u) возможность изготовления в условиях невесомости при помощи использования проволочной наплавки, электронного луча и вакуума.

5.5 Типовые недостатки процесса прямого подвода энергии и материала

При проектировании следует учитывать определенные ограничения, связанные с процессами прямого подвода энергии и материала и приведенные далее:

- возможную усадку, остаточное напряжение и деформацию из-за локальных температурных перепадов;
- прямой подвод энергии и материала, который приводит к более низкому качеству поверхности и большую волнистость поверхности по сравнению с синтезом металлических порошков на подложке лазерным лучом;
- более высокую шероховатость поверхности, характерную для систем порошковой наплавки по сравнению с синтезом на подложке лазерным лучом;
- сложность деталей, которая может быть ограничена в зависимости от системы прямого подвода энергии и материала, особенно для установок с тремя степенями свободы;
- необходимость механической обработки при использовании процессов прямой подачи энергии и материала для изготовления деталей, близкой к окончательной форме;
- необходимость учитывать дополнительный материал в виде припуска на механическую обработку при применении стратегии изготовления детали, близкой к окончательной форме. Заданные геометрические допуски могут быть достигнуты с помощью прецизионной постобработки;
- планирование процесса может быть сложным, особенно для деталей со сложной геометрией, при изготовлении которых используют преимущества систем с пятью и более осями или гибридных систем;
- возможность появления анизотропности характеристик материала, которую необходимо учитывать при планировании процесса и для определения необходимости постобработки;
- трудоемкое прогнозирование прочностных характеристик деталей, большой комплекс исследований и испытаний при разработке технологий изготовления детали;
- в процессе подготовки построения может потребоваться включение дополнительных элементов конструкции детали и крепежа, что может привести к увеличению времени производственного цикла по сравнению с временем при синтезе на подложке;
- часто возможность повторного использования порошков ниже по сравнению с синтезом на подложке.

5.6 Экономия материала, экономическая и временная эффективность

Эффективность построения при помощи прямого подвода энергии и материала с точки зрения затрат материала и времени во многом зависит от ориентации построения, расположения подложки и последовательности построения. Доступны различные критерии оптимизации в зависимости от запланированного количества изделий.

Для сравнения эффективности различных вариантов построения и сравнения эффективности прямого подвода энергии и материала с традиционными производственными процессами используют КИМ.

На эффективность использования материалов влияют перечисленные далее факторы:

- для снижения количества наплавляемого материала подложку часто включают в конечную деталь. Данную возможность необходимо учитывать для того, чтобы повысить эффективность применения материалов. Следствием этого является то, что процессы прямого подвода энергии и материалов часто используют для выполнения элементов на деталях, изготовленных традиционным способом, тогда как традиционные производственные процессы привели бы к трудностям или чрезмерным затратам;
- возможность построения на обеих сторонах подложки из-за значительного количество тепла, которое вызывает остаточные напряжения;
- стратегии включения подложки в деталь и использования симметричных построений оказывают значительное влияние на выбор подходящей ориентации построения. Кроме того, разработчик может изменить конструкцию изделия, чтобы включить подложку, обеспечить симметричность конструкции и другие аспекты ориентации построения при проектировании детали, чтобы добиться экономии материала, экономической и временной эффективности;
- эффективность использования материала зависит от размера частиц порошка, диаметра проволоки, размера пятна, создаваемого источником энергии. Для того чтобы увеличить эффективность использования материала, размер пятна должен быть больше, чем диаметр *газопорошковой струи в фокальной плоскости* или диаметр проволоки;
- на этапе проектирования необходимо учитывать планирование и оптимизацию траектории перемещений печатающей головки. Оптимизированная траектория перемещений печатающей головки позволит обеспечить равномерное распределение тепла, чтобы микроструктура материала была гомогенизирована, а остаточные напряжения снижены;
- если необходимо изготовить большое количество единиц изделия, то пространство построения следует использовать как можно эффективнее. Детали должны быть ориентированы таким образом, чтобы минимизировать количество требуемых запусков построения. Если одни и те же детали ориентированы по-разному для более эффективного использования пространства, т. е. в результате получается конструкция, располагающая изделия под разными углами, то механические свойства могут варьироваться от детали к детали. При расположении деталей на подложке важно учитывать управление нагревом и охлаждением.

Примечание — Расположение нескольких деталей на подложке целесообразно в случае деталей маленького размера и при ожидании охлаждения наплавленных слоев. В обратном случае расположение нескольких деталей на одной подложке из-за холостых проходов печатающей головки (подводов) уменьшает производительность, увеличивает риск брака, усложняет электроэрозионную обработку;

- многие детали (особенно детали, спроектированые без учета особенностей процессов прямого подвода энергии и материала) требуют определенной ориентации, чтобы минимизировать использование поддерживающих структур и обеспечивать правильное построение. Поэтому изделия, предназначенные для аддитивного производства, должны быть спроектированы *с учетом их ориентации в пространстве при изготовлении. Ориентация построения должна быть установлена при проектировании и указана в технической документации на изделие;*
- оптимизированная траектория перемещений печатающей головки позволяет свести к минимуму простои установки и другие факторы неэффективности технологического процесса;
- проектировщики должны учитывать эффекты накопления тепла и охлаждения при проектировании деталей и их компоновке, особенно когда они влияют на время ожидания и другие задержки.

5.7 Типы конструктивных элементов

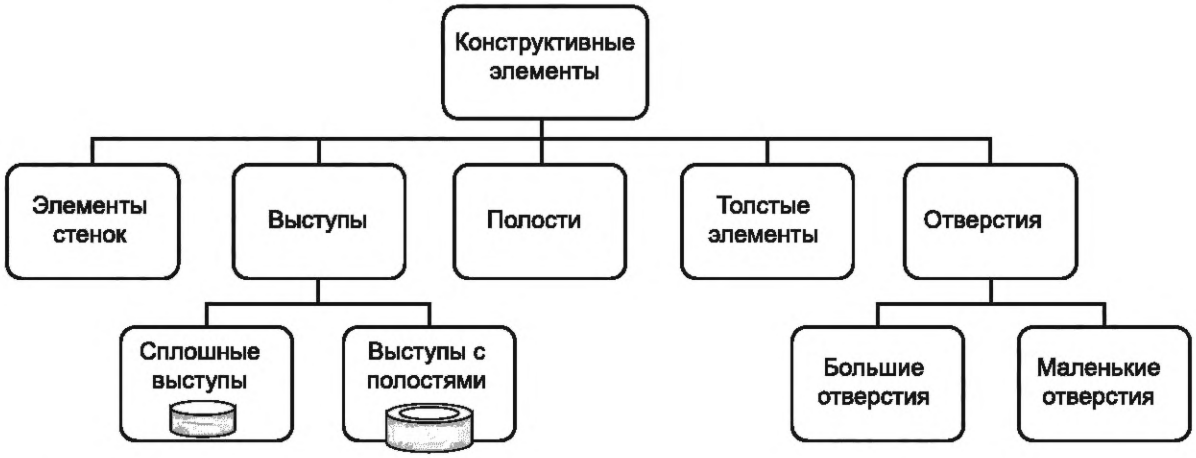
5.7.1 Общие положения

Конструктивные элементы предназначены для обозначения типовых форм, с помощью которых проектируют детали. Они также известны как элементы формы или геометрические элементы.

При включении подложки в конечную деталь поверхность раздела между нанесенным материалом и подложкой должна включать в себя галтели для того, чтобы минимизировать накопление напряжений и избежать отслоения нанесенного материала от подложки, поэтому проектировщику следует выбирать правильный радиус для галтели, при этом учитывая необходимость минимизировать использование материала.

5.7.2 Иерархия конструктивных элементов

Для прямого подвода энергии и материала большинство конструктивных элементов можно представлять как типы стенок. Элемент стенки можно рассматривать как геометрическую область с большим соотношением сторон, где толщина элемента мала по сравнению с его длиной и высотой. Толщину стенки обычно составляют один или несколько наплавочных валиков материала. Помимо стенок во многих деталях, изготовленных прямым подводом энергии и материала, присутствуют и другие типы элементов, такие как выступы, толстые элементы, полости и отверстия. Основные виды конструктивных элементов приведены на рисунке 6.



Примечание — Минимальный размер стенки зависит от вида оборудования и сырья.

Рисунок 6 — Верхние уровни иерархии конструктивных элементов

Элементы стенок достаточно разнообразны и рассмотрены в 5.7.3. Выступы обычно представляют собой выступающие цилиндрические элементы, которые могут быть сплошными или полыми (их можно рассматривать как короткую закрытую стенку). Толстыми элементами могут быть короткие, но широкие стенки, которые, будучи объемными, могут принимать самые разные формы. Полости — это полые элементы, которые встречаются в стенах или толстых секциях и которые часто добавляют в деталь для снижения массы или обеспечения зазора для других деталей при изготовлении. Отверстия — полые внутренние элементы, выходящие на поверхность. Различие между большими и маленькими отверстиями заключается в наличии возможности выполнить отверстие во время процесса прямого подвода материала (большое отверстие) или это будет осуществлено при проведении последующей операции, такой как сверление, штамповка или механическая обработка (маленькое отверстие).

5.7.3 Элементы стенок

Классификация элементов стенок приведена на рисунке 7.

Элементы стенок можно разделить на стенки, пересечения стенок и соединения стенок. Пересечение стенок возникает, когда две стенки пересекают друг друга. Пересечение стенок является тем участком, где наплавляется много материала; наплавка металла происходит дважды на месте пересечения и по этой причине требует особого внимания. Соединение стенок возникает, когда стенки соединяются на ребро. Стенки можно классифицировать на закрытые, поперечное сечение которых представляет собой замкнутый контур, например труба (которая может быть получена с использованием непрерывного осаждения), или открытые, *поперечное сечение которых — это незамкнутый контур*. Стенки можно дополнительно классифицировать по их ориентации (например, вертикальные или наклонные) и по форме.

Изделия, которые будут изготавливать с помощью процессов прямого подвода энергии и материала, обычно проектируют с использованием элементов, показанных на рисунках 6 и 7. Пересечения стенок выделены, чтобы проектировщики знали о сложностях, возникающих при их изготовлении.

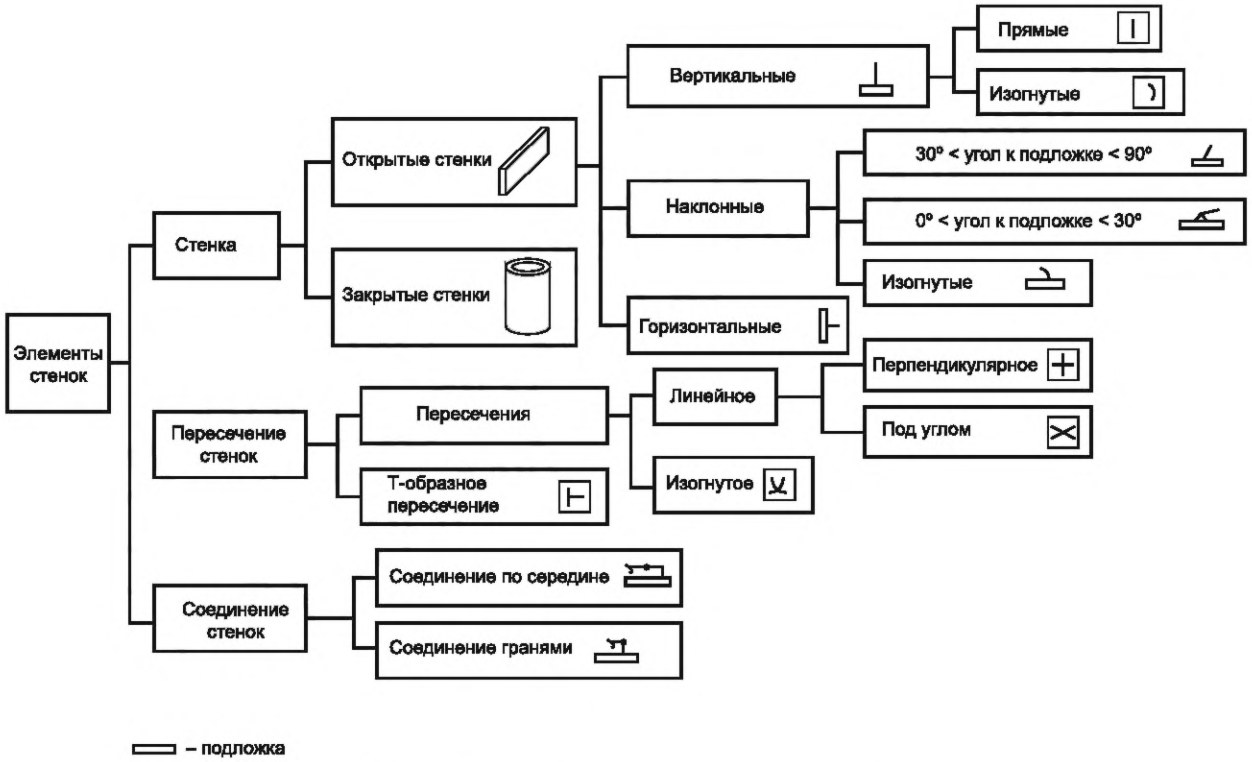


Рисунок 7 — Классификация элементов стенок

5.8 Ограничения при изготовлении конструктивных элементов

Некоторые конструктивные элементы могут иметь потенциальные ограничения технологичности их изготовления. К ним относят выступы, элементы типа «арка» и пересечения стенок. Ограничения технологичности могут быть связаны, например, со ступенчатым эффектом, приводящим к шероховатости поверхности, или с геометрическими характеристиками детали, обуславливающими ограничение доступа печатающей головки.

5.8.1 Выступы

Не все выступы могут быть изготовлены. Возможность выполнения выступа зависит от многих факторов, включая конфигурацию выступа, конструкцию установки прямого подвода энергии и материала и количество степеней свободы, а также конструкцию наплавочного сопла (сопло для систем порошковой наплавки; сварочная горелка для систем с проволочной наплавкой). В случае системы порошковой наплавки чаще всего предпочтительнее повернуть подложку и оставить наплавочное сопло в вертикальном положении. Если невозможно повернуть подложку, на этапе проектирования детали необходимо учитывать максимальный угол наклона сопла. В случае системы проволочной наплавки, как правило, следует повернуть подложку или деталь для того, чтобы получить горизонтальную плоскость построения. Наплавочное сопло можно наклонять под разными углами, не превышающими максимальный угол наклона для данного вида оборудования, во избежание проблем при изготовлении.

При изготовлении выступов необходимо обеспечить отвод тепла, поскольку их характеристики теплопередачи будут отличаться от тех областей в объеме детали, где тепло отводится через подложку. Указанные факторы влияют на достижение заданной геометрической формы и на микроструктуру материала.

5.8.2 Элементы типа «арка»

Элементы типа «арка» — это элементы, которые соединяют только на более поздних этапах процесса построения, образуя единую часть. На этапе проектирования следует учесть, как это соединение будет реализовано. Такие формы, как перевернутая V-образная часть, не является характерной для прямого подвода энергии и материала, так как область вершины, вероятно, будет иметь некоторые ошибки формы. Детали, которые являются стабильными с точки зрения их общей конструкции, могут быть нестабильными в процессе построения (см. рисунок 8).

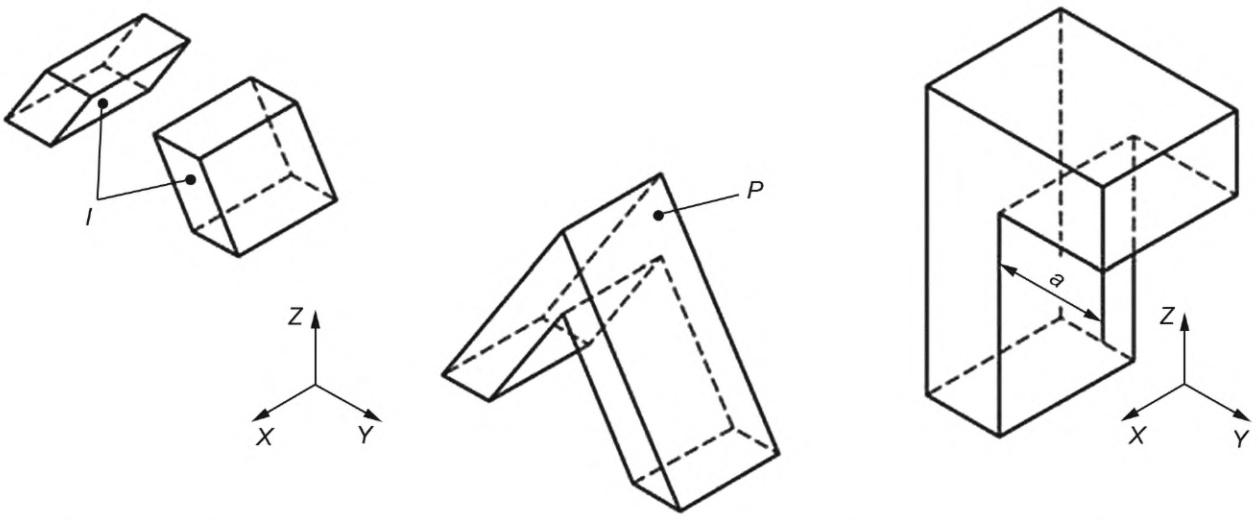


Рисунок 8 — Элементы типа «арка» (слева) и выступ *a* (справа) при объединении в деталь *P* по оси *z*

5.8.3 Пересечение стенок

Как показано на рисунке 7, пересечения стенок являются значимым видом элементов. Если при построении двух пересекающихся стенок используют параметры процесса, одинаковые для всего процесса, около точки пересечения стенок будет нанесено вдвое больше металла, что приведет к образованию приподнятого участка. Параметры процесса могут быть скорректированы, или могут быть использованы альтернативные траектории для компенсации. При проектировании необходимо учитывать, что пересечения стенок могут вызвать проблемы с технологичностью производства изделия.

5.8.4 Ступенчатый эффект

Для обеспечения управлением послойного наращивания трехмерную геометрию детали перед производством преобразуют в серию нанесенных слоев с дискретными шагами в направлении построения. Возникающую ошибку, вызванную отклонениями слоев по сравнению с исходной геометрической формой, описывают как ступенчатый эффект. Степень ступенчатого эффекта во многом зависит от толщины слоя (см. рисунок 9).

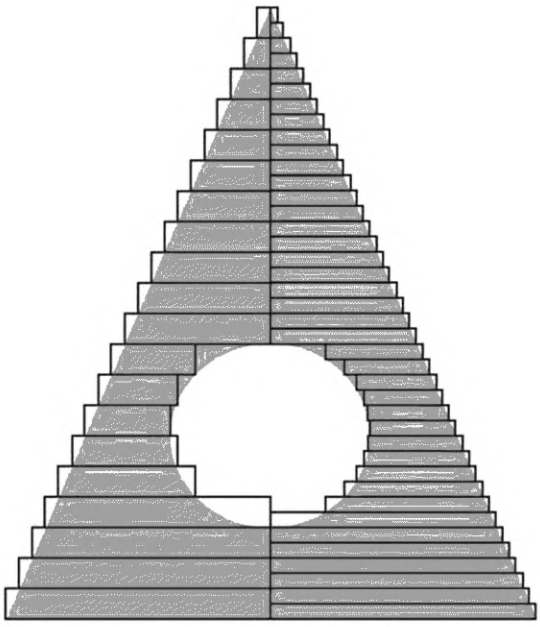
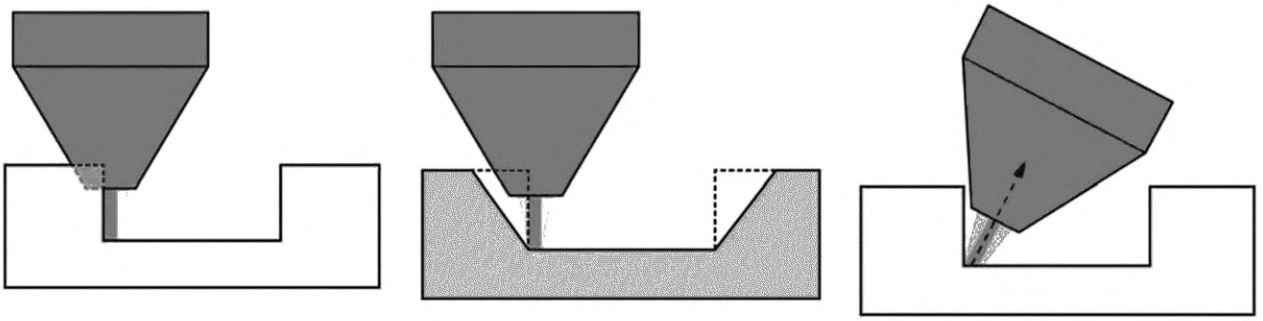


Рисунок 9 — Влияние различной толщины слоя на ступенчатый эффект

Более тонкие слои позволяют уменьшить последующую обработку для достижения желаемого качества поверхности. Следовательно, существует компромисс между скоростью построения, качеством поверхности и необходимой степенью дальнейшей обработки. В некоторых случаях для достижения ожидаемого результата обработка не требуется. Кроме того, при формировании траекторий перемещений печатающей головки можно регулировать толщины слоев для того, чтобы использовать самые большие слои, когда это позволяют локальные требования к форме и качестве поверхности.

5.8.5 Доступность

Проблемы доступности при прямом подводе энергии и материала аналогичны проблемам фрезерования с числовым программным управлением. Ось наплавки требует прямой видимости рабочей поверхности, а также достаточного радиального зазора от оси наплавки для формы печатающей головки (наплавочного сопла или сварочной горелки и дополнительных компонентов). В большинстве случаев направление оси наплавки остается близким к нормали текущей рабочей поверхности. Рисунок 10 иллюстрирует возможные столкновения наплавочного сопла с заготовкой и способы их предотвращения для трехосевых и пятиосевых систем.



a) Столкновение

b) Отсутствие столкновения

c) Способ избежать столкновения с системой с пятью осями или более

Рисунок 10 — Возможные препятствия для процесса прямого подвода энергии и материала

В случае применения трехосевой системы обычно не возникает сложностей с доступностью, поскольку все предыдущие слои будут находиться ниже плоскости траектории перемещений печатающей головки текущего слоя (за исключением некоторых серьезных затруднений с искривлениями). Однако, когда подложка не является простой плоской поверхностью, например в случае ремонта с применением прямого подвода энергии и материала, существует вероятность столкновения печатающей головки с деталью. Для трехосевых установок зазор может быть обеспечен предварительной обработкой до соответствующего угла [см. рисунок 10, *b*)]. Системы с пятью и более осями часто могут обеспечить наиболее оптимальный доступ при ремонте за счет изменения угла наклона поворотного позиционера. Проверка обнаружения столкновений может быть полезной для оценки предлагаемых траекторий перемещений печатающей головки. Для случая систем с пятью и более осями обнаружение столкновений может требовать значительных с точки зрения вычислений ресурсов. Однако некоторые коммерческие программы для создания траекторий перемещений печатающей головки могут выполнять обнаружение столкновений в 2D на основе срезов, что требует гораздо меньше вычислений.

5.9 Точность размеров, формы и положения

В процессе изготовления необходимо контролировать и поддерживать постоянную толщину слоя наплавки, так как даже небольшие отклонения при нанесении значительного количества слоев могут накапливаться, увеличивая такие ошибки. Это приведет к низкой точности размеров или даже к сбоям в процессе. Как правило, невозможно обеспечить допуски и качество поверхности, которые могут быть достигнуты с помощью обычных субтрактивных производственных процессов. По этой причине для выполнения геометрических требований могут потребоваться механическая обработка и другие этапы последующей обработки. Дополнительные этапы могут включать постобработку или обработку в процессе (в случае гибридных систем), чистовую обработку поверхности, термическую обработку или другие операции *в соответствии с документами по стандартизации*.

Необходимо учитывать параметры процесса, которые будут влиять на характеристики конечной детали. Операции изготовления детали и обработки поверхности требуют добавления припуска на об-

работку детали. Кроме того, ориентация построения в некоторой степени определяет достижимый уровень точности. Из-за послойного наращивания может происходить усадка детали, зависимая от направления (анизотропная). Остаточные напряжения и термическая обработка дополнительно рассмотрены в 6.4 и 6.6.

5.10 Процесс подготовки изделия к изготовлению методом прямого подвода энергии и материала

Для использования прямого подвода энергии и материала необходимы трехмерные геометрические данные для представления изготавливаемого компонента.

Процесс подготовки к выращиванию включает в себя следующие стадии:

- анализ исходных требований к конечному изделию (геометрическая форма, точность, обрабатываемые поверхности, припуски на механическую обработку, возможности включения подложки в деталь или возможности декомпозиции на отдельные детали с последующей сборкой);
- на основании исходных требований разрабатывают стратегию изготовления изделия. Результатом является трехмерная модель заготовки(ок), которая(ые) будут изготовлены при помощи прямого подвода энергии и материала;
- на основе созданной трехмерной модели заготовки строят технологическую модель выращиваемой заготовки, которая отличается от твердотельной тем, что она адаптирована для создания управляющего процесса, учитывает деформации, усадку и особенности построения траекторий;
- на основе созданной технологической модели выращиваемой заготовки разрабатывают проект в CAM-системе, включающий траектории перемещения печатающей головки при выращивании отдельных элементов заготовки. Добавляют технологические параметры, проводят симуляцию и постпроцессирование управляющего процесса;
- управляющий процесс загружают на установку, проводят проверку и выращивание заготовки;
- по окончании процесса проводят контроль геометрии выращенной заготовки на соответствие требуемым размерам, установленным в конструкторской документации.

В зависимости от ситуации и доступного программного обеспечения может возникнуть несколько вариантов выполнения процесса. Все чаще в программное обеспечение, предназначенное для решения различных инженерных задач, добавляют модули АП, позволяющие моделировать процессы, прогнозировать остаточное напряжение, прогнозировать искажения, оценивать время построения и распознавать проблемы технологичности. Кроме того, в некоторые из этих программных систем добавлены функции планирования процессов, которые обеспечивают разбиение модели на слои, создание траектории перемещений печатающей головки и возможности генерации кода, что может устранить необходимость в создании нейтральных файлов (не привязанных к определенному программному обеспечению) для обмена данными.

В случае ремонта изделий для рабочих процессов может потребоваться трехмерное представление наплавляемого материала для облегчения планирования траектории перемещений печатающей головки.

5.11 Качество данных и представление

В АП применяют два наиболее распространенных типа нейтральных представлений для обмена данными: контурное представление (такие как STEP и IGES) и представление в виде полигональной модели (представление поверхности в виде набора треугольников). Контурное представление геометрии обычно необходимо преобразовывать в полигональную модель для планирования процесса. Таким образом, при планировании процесса АП, как правило, применяют полигональную модель. Также могут быть использованы другие представления, например воксели или слои. Для гибридных систем обработки можно применять модель представления границ (часто сокращенно B-rep или BREP), чтобы избежать лестничных эффектов в окончательно обработанном компоненте, вызванных преобразованием поверхности в набор треугольников. При описании геометрической модели следует учитывать две существенные характеристики:

- модель должна иметь «замкнутую» поверхность (иногда называемую «водонепроницаемая»). Отсутствие «замкнутости» модели может иметь негативные последствия для системы автоматизированного производства;
- если используют модель представления в виде набора треугольников, разрешение обычно зависит от допуска, часто называемого «высота хорды», которая описывает максимальное отклонение

точки на поверхности детали от грани треугольника. Следовательно, меньшие значения допуска приводят к меньшим отклонениям от фактической поверхности детали. Если разрешение слишком низкое, стороны треугольников, определенных в файле STL, будут видны на готовой поверхности (т. е. будут заметны грани). Однако модели со слишком высоким разрешением требуют большого объема цифрового хранилища, а также будут причиной медленной передачи и обработки с использованием программного обеспечения. Допуск должен быть установлен в соответствии с требованиями, предъявляемыми к продукции процесса прямого подвода энергии и материала.

Наиболее распространенные форматы представления в виде набора треугольников — STL, AMF и 3MF. Файлы STL содержат только геометрию фасетов (координаты вершин и векторы нормалей фасетов), в то время как AMF поддерживает описание другой информации помимо геометрии, например единицы измерения (миллиметры, метры, дюймы), цвета, материалы и решетчатые структуры. Файлы 3MF обладают некоторыми возможностями представления метаданных AMF. Наличие единиц измерений, включенных в файл обмена данными, крайне значимы для передачи информации о размере детали.

5.12 Процессы прямого подвода энергии и материала

Существенным в процессах прямого подвода энергии и материала является уравновешивание подводимого тепла и материала для того, чтобы наплавленный участок имел правильные размер, форму и положение. Типовая установка прямого подвода энергии и материала имеет множество технологических параметров, которые можно регулировать для достижения баланса подвода тепла, подачи материала и скорости движения. Наиболее значимые технологические параметры — мощность источника энергии, скорость подачи материала, скорость перемещения, процент перекрытия наплавочных валиков и толщина слоя.

Для изготовления детали заданной геометрии может быть доступно множество различных технологических планов для достижения определенных форм и характеристик материала. В рамках каждого технологического плана должен быть сгенерирован и выбран конкретный шаблон сканирования. Необходимо учитывать существование потенциально широкого диапазона технологических планов и настроек, доступных для проектирования деталей.

6 Общие рекомендации по проектированию и изготовлению для процесса прямой подачи энергии и материала

6.1 Общие положения

Процесс прямого подвода энергии и материала имеет свои преимущества и недостатки, приведенные в разделе 5. Применение процессов прямого подвода энергии и материала часто предпочтительнее в случае больших деталей с тонкими элементами, такими как стенки, ребра, выступы, которые в ином случае могут привести к значительным затратам времени для изготовления из заготовки. Технология предоставляет некоторые преимущества при сложном конструировании и объединении функций в одной детали, изделиях с внутренней структурой или вырезами и/или элементами, которые не могут быть выполнены при помощи процессов литья, ковки или резки металла.

Процесс прямого подвода энергии и материала может быть применен при ремонте и восстановлении деталей, поскольку он позволяет осуществлять выборочное нанесение металла на существующие подложки. Это также позволяет изготавливать элементы на деталях, изготовленных с использованием обычных производственных процессов. Примером может служить изготовление ребер и выступов на большой цилиндрической кованой детали. Хотя изготовление простой формы поковки с помощью прямого подвода энергии и материала не рентабельно, данный процесс устраняет необходимость в ковке толстого корпуса и значительной механической обработки для достижения заданных характеристик. Процесс прямого подвода энергии и материала также сокращает время изготовления таких компонентов и потенциально исключает единовременные затраты, связанные с дорогими штамповочными операциями. Существенными ограничениями могут быть доступность требуемых материалов, ограниченный размер детали, одобрение технологии для критически значимых приложений, производственные затраты и возможная необходимость в большой постобработке. Для небольших деталей с высокой геометрической сложностью или в тех случаях, когда обширная механическая обработка нежелательна, больше подходит процесс синтеза на подложке.

6.2 Материал и конструкционные характеристики

6.2.1 Исходные материалы

Металлы и сплавы являются наиболее часто используемыми материалами для прямого подвода энергии и материала. Так же, как и в синтезе металлических порошков на подложке, эффективная обработка материалов зависит от множества факторов, таких как свариваемость, температура плавления, теплопроводность, вязкость расплава и поверхностное натяжение расплава. Эти факторы будут влиять на характеристики производимой детали. Для процесса прямого подвода энергии и материала применяют такие материалы, как титан и его сплавы, алюминиево-кремний-магниевые сплавы, сплавы на основе никеля (например, Inconel 718), сплавы на основе кобальта (например, Stellite 21), инструментальные стали, дисперсионно-твердеющие сплавы и другие нержавеющие стали. Возможно применение широкого спектра других материалов, включая тугоплавкие сплавы, медные сплавы, высокоэнтропийные сплавы (например, AlCoCrFeNi), сплавы с памятью формы (SMA, например NiTi), магнитные сплавы (FeCo), пористые металлы, керамика (например, оксид алюминия, диоксид циркония и фосфаты кальция), сплавы на основе магния, металлокерамика (Co-WC), интерметаллиды (γ-TiAl и Fe3Al) и композиты (например, титановая матрица сплава, армированная TiB).

6.2.2 Материалы подложки

Как правило, используют подложку из материала такого же класса, как и материал детали, но это не является обязательным требованием. Материалы подложки могут быть выбраны в соответствии с установленными требованиями при условии, что материал подложки совместим с наносимым материалом.

В некоторых случаях материал подложки может быть блестящим. В таких случаях при необходимости поверхность подложки должна быть обработана для обеспечения нанесения наплавляемого слоя. Одним из примеров обработки поверхности является пескоструйная обработка с последующим обезжириванием алюминия. Проектировщик должен проконсультироваться с инженером-технологом по вопросам выбора материала подложки и подготовки поверхности.

В случае ремонта изделий выбирают наплавляемый материал такого же класса, как и материал ремонтируемого изделия. Для повышения отдельных свойств ремонтируемого изделия (например, коррозионной стойкости, износостойкости и т. п.) выбирают материалы других классов, обеспечивающие требуемые свойства.

6.2.3 Микроструктура

Микроструктура материала деталей, изготовленных с помощью прямого подвода энергии и материала, обычно отличается от микроструктуры литых материалов из-за тепловых характеристик процесса. Например, сочетание небольшой ванны расплава и высоких скоростей движения приводит к высокой скорости охлаждения (до 1000—5000 °C/c), что создает предельно мелкозернистые структуры, которые могут быть на порядок меньше по размеру кристаллитов, чем сопоставимые кованые изделия. Плотность материалов, полученных с помощью прямого подвода энергии и материала, часто выше, следовательно, пористость материала ниже, чем при использовании синтеза на подложке лазерным лучом.

При помощи процесса прямого подвода энергии можно изготавливать детали с плотностью, приближающейся к 100 %. Однако возможно возникновение пор из-за затруднений с материалом, настройками процесса или планированием процесса. Микроструктура в определенной точке детали зависит от ее термической истории, которая является сложной функцией условий процесса, схем сканирования, формы детали и параметров теплопередачи. Диапазон микроструктур, наблюдаемых для каждого материала, обычно широк и специфичен для каждого вида материала.

6.2.4 Механические свойства

Механические свойства, такие как предел текучести, предел прочности на разрыв, усталостная прочность и относительное удлинение, как правило, выше, чем для аналогичных изделий, полученных синтезом на подложке, и могут быть такими же или даже выше, чем у аналогов из литых материалов после постобработки. Часто не требуется ГИП или процесс отжига для выполнения соответствия требованиям к относительному удлинению. Механические свойства зависят от выбранного материала, технологических параметров и формы детали.

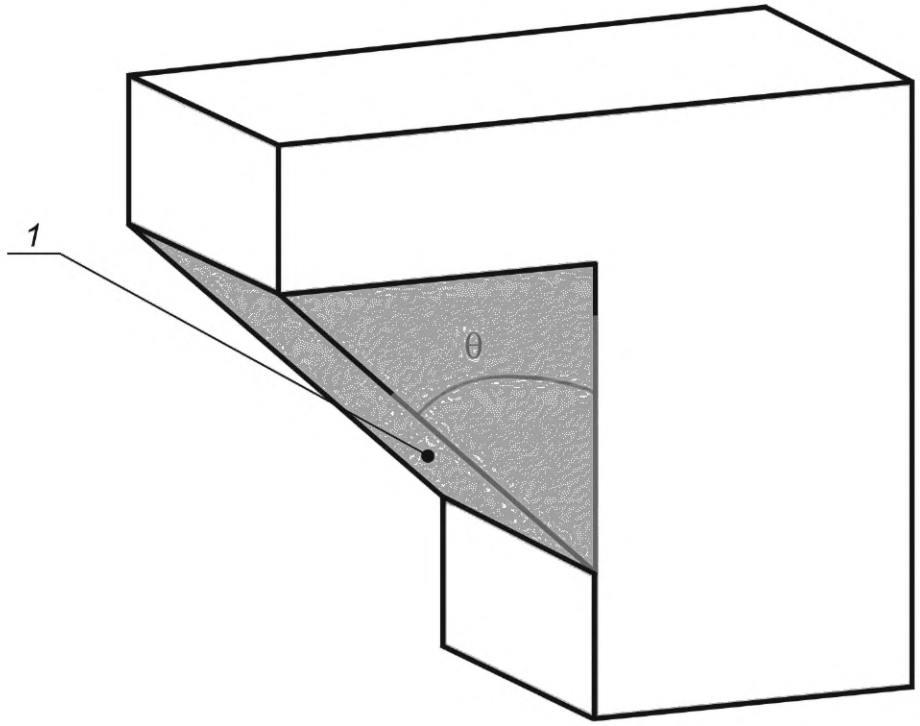
При проектировании необходимо учитывать возможную анизотропию механических свойств, например: снижение временного сопротивления и относительного удлинения в направлении построения z, по сравнению с плоскостью нанесения x—y. Проектировщикам рекомендуется проконсультироваться

с производителем изделия о свойствах конкретного материала и установки прямого подвода энергии и материала и проанализировать влияние анизотропии на конструкцию конкретной детали.

6.3 Поддерживающие структуры

В отличие от синтеза на подложке поддерживающие структуры применяют при изготовлении прямым подводом энергии и материала не так часто. Поддерживающие структуры могут быть использованы для поддержки выступов для трехосевых систем наплавки и обычно не требуются для систем с пятью осями и более или роботизированных систем. Для трехосевых систем поддерживающие элементы применяют только для поддержки выступов, изготовление которых в противном случае было бы невозможно.

Применяемым способом поддержки больших выступов при минимальных расходах материала являются вставки. *Конструкцию вставок выбирают из соображений возможности проведения дальнейшей механической обработки.* Максимальный угол вставки зависит от процесса и оборудования. Он может поддерживать различную геометрию выступов: от углов, слегка отклоняющихся от вертикали, до углов более 90° от вертикали. На рисунке 11 показан пример вставки, используемой для поддержки выступа под углом 90°.

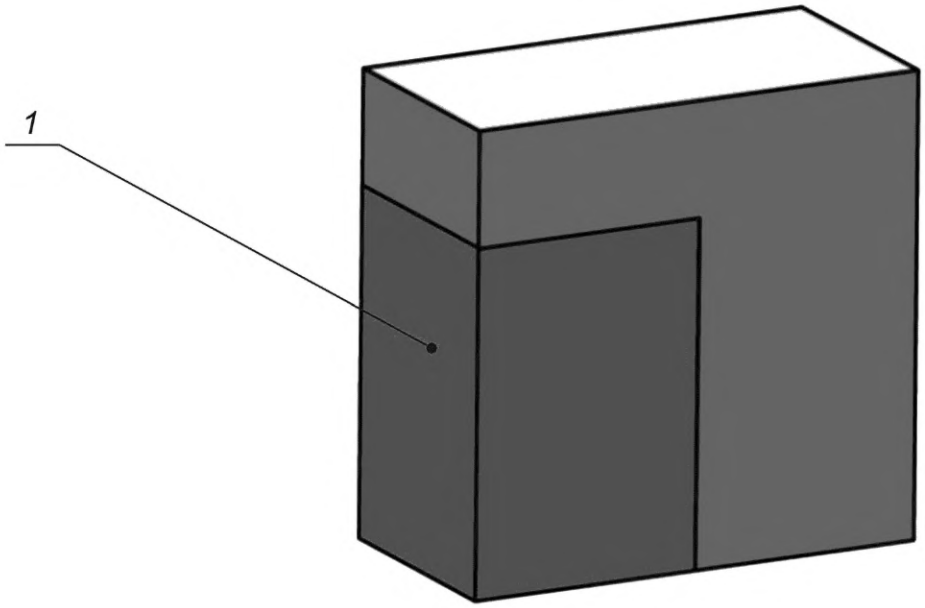


1 — вставка

Рисунок 11 — Пример использования вставки в качестве поддерживающего элемента

На рисунке 11 вставка представляет собой клин с углом $\theta = 45°$. Следует учитывать максимальный угол свеса, который можно реализовать в процессе, так как по мере уменьшения угла свеса необходимо больше материала для изготовления вставки.

В некоторых случаях использование опорных конструкций для вставки может оказаться невозможным. Вместо этого может потребоваться сплошная стена, которая перекрывает весь зазор между выступом и геометрией под ним. Эта опорная стена может быть непосредственно связана с остальной геометрией вокруг, что приведет к минимальным изменениям траекторий перемещений печатающей головки. Другим вариантом является намеренное отделение поддерживающей структуры от остальной части построения в виде отдельной формы и отдельной дорожки траектории перемещений печатающей головки. На рисунке 12 показан пример сплошной стены, поддерживающей выступ под углом 90°. Когда объем под свесом относительно невелик, вместо вставки обычно используют сплошную стенку.



1 — вставка

Рисунок 12 — Пример поддерживающей структуры в виде сплошной стенки

Отрицательным аспектом поддерживающих структур для массивных стенок является необходимость добавления материала, а также время и затраты на их изготовление. Поддерживающие структуры в виде массивных стен обычно используют только тогда, когда отсутствует другой вариант.

6.4 Ориентация построения, многоосевая наплавка и положение подложки/рабочей поверхности

6.4.1 Общие положения

Ориентация построения, использование многоосевой наплавки и положение подложки влияют на стоимость процесса, стабильность процесса и различные характеристики компонентов прямого подвода энергии и материала. Положения, представленные в настоящем подразделе, относятся к изготовлению деталей, ремонту, восстановлению и модификации поверхности. В первом случае металлическая пластина обычно служит платформой построения, а в последних трех случаях существующая деталь обеспечивает поверхность построения. Факторы, которые помогают определить правильную ориентацию и расположение конструкции, приведены в 6.4.2—6.4.4.

6.4.2 Ориентация построения и положение подложки/рабочей поверхности

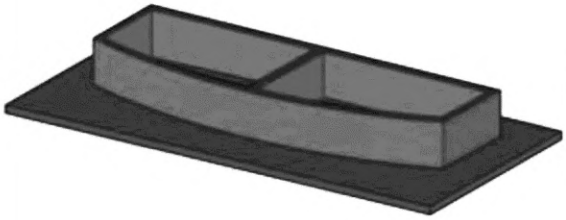
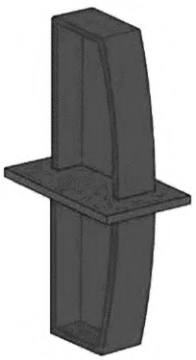
Выбор ориентации построения и положения подложки является важным этапом планирования процесса прямого подвода энергии и материала. Ориентация построения и положение подложки имеют большое влияние на время построения, его сложность, КИМ, необходимость поддерживающих структур, механические свойства и деформацию.

При выборе ориентации построения и положения подложки может быть найден компромисс между КИМ и временем построения из-за учета толщины подложки. Это будет рассмотрено в 6.4.4.

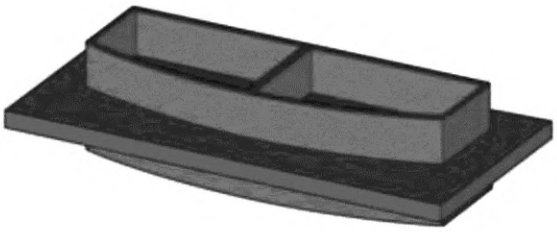
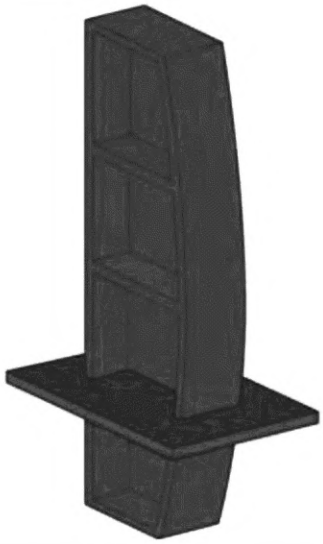
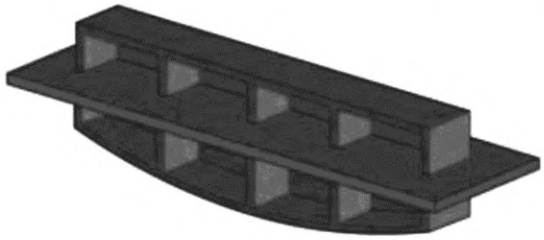
В таблице 2 приведены возможные варианты ориентации построения и расположения подложки для простой детали.

Примечание — Все комментарии, указанные в таблице 2, в значительной степени зависят от материала, конструкции детали, типа выбранного оборудования и порядка обхода печатающей головки.

Таблица 2 — Рекомендации по ориентации построения и расположения подложки для процессов прямого подвода энергии и материалов

Пример	Комментарий
	Широкое построение на внешней стенке Положительные стороны: - максимизация объема подложки в детали; - требуется меньше материала, поэтому время построения сокращается; - отсутствие выступающих деталей; - эффективное использование объема построения. Отрицательные стороны: - более низкий КИМ из-за большой площади подложки, необходимой для удержания заготовки; - более высокий риск деформации, чем в других ориентациях, из-за большей площади соприкосновения детали с подложкой
	Высокое узкое построение на внешней стенке Положительные стороны: - более высокий КИМ из-за уменьшения площади основания, необходимой для удержания заготовок; - меньший риск деформации из-за небольшой площади соприкосновения детали с подложкой. Отрицательные стороны: - выступающие элементы увеличивают сложность построения; - сложности с отводом тепла; - наплавка большего количества материала, следовательно, увеличение времени построения; - сложности поддержки конструкции из-за увеличенной высоты детали
	Симметричное построение Положительные стороны: - сбалансированные остаточные напряжения во время построения снижают риск деформации. Отрицательные стороны: - более сложная двусторонняя наплавка; *- требуются специализированные поворотные механизмы платформы построения;* - выступающие элементы в некоторых случаях увеличивают сложность построения

Окончание таблицы 2

Пример	Комментарий
	Симметричное построение «спина к спине» Положительные стороны: - сбалансированные остаточные напряжения во время построения снижают риск деформации; - необходимость увеличения объема подложки; - меньше наплавляемого материала, поэтому время построения сокращается; - отсутствие выступающих деталей. Отрицательные стороны: - более сложная двусторонняя наплавка; - более низкий КИМ из-за большой площади основания, необходимой для удержания заготовки; - *требуются специализированные поворотные механизмы платформы построения;* - сложные операции по удалению подложки
	Построение на плоской внутренней стенке (не на плоскости симметрии) Положительные стороны: - эффективное использование подложки; - частично симметричное построение. Отрицательные стороны: - несбалансированное построение в верхних слоях детали; - *требуются специализированные поворотные механизмы платформы построения*
	Подложка по центру детали (не связанная с внутренней стенкой) Положительные стороны: - частично симметричное построение снижает риск искривления. Отрицательные стороны: - требуется большее количество материала, чем для других вариантов, следовательно, большее время построения; - *требуются специализированные поворотные механизмы платформы построения*

Общие рекомендации по ориентации построения включают следующие пункты:

- наплавка длинных прямых участков, как правило, приводит к большему искажению, чем наплавка коротких участков. Следовательно, высокие узкие конструкции обычно приводят к меньшим искажениям, чем короткие широкие конструкции. Однако управление процессом может быть сложнее для высоких и узких построений, и могут возникать затруднения с отводом тепла;

- ориентация построения для исключения выступающих элементов может снизить необходимость в поддерживающих структурах и дальнейшей переориентации детали во время построения;

- симметричные конструкции (см. рисунки 3 и 4) в зависимости от конструкции и *порядка обхода* могут уравновесить остаточные напряжения и уменьшить деформацию;

- также могут быть выполнены несимметричные построения с различными частями, построенными на противоположных сторонах подложки. Остаточные напряжения не могут быть полностью сбалансированы, но в этих случаях их можно уменьшить.

Общие рекомендации по размещению подложки:

- включение подложки в конечную деталь может существенно уменьшить объем используемого материала и, следовательно, время построения, а также может упростить построение *(при условии, что дальнейшая механическая обработка возможна и не превышает определенный порог затрат)*;

- выравнивание подложки с плоской внешней стенкой детали может уменьшить объем наносимого материала и обеспечить простое одностороннее построение, но может и привести к деформации;

- выравнивание подложки с центральной плоской стенкой детали может обеспечить симметричное построение, уменьшить объем наносимого материала, но требует более сложного двустороннего построения. Если центральная плоская стенка недоступна, подложку можно выровнять с любой внутренней плоской стенкой, но тем самым уменьшить объем наносимого материала, что увеличит вероятность деформации;

- размещение подложки в центре детали (не совмещенной с внутренней плоской стенкой) может обеспечить симметричную конструкцию, но увеличить объем наносимого материала и, следовательно, привести к более длительному времени построения и более низкому КИМ, чем другие варианты построения;

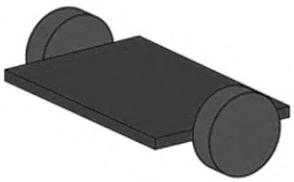
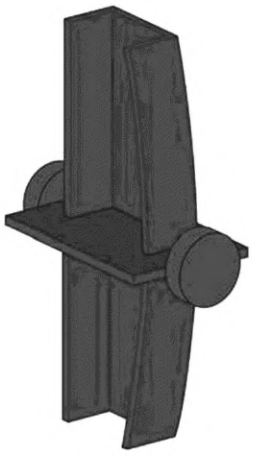
- на рассеивание тепла может влиять ориентация подложки и совмещение с плоскими стенками, что следует учитывать при настройке конструкции.

6.4.3 Многоосевая наплавка

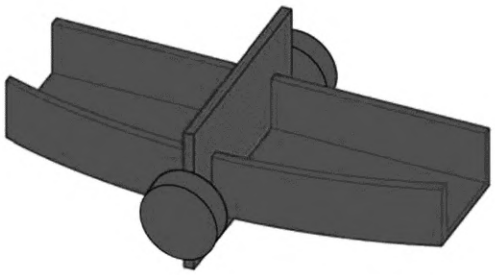
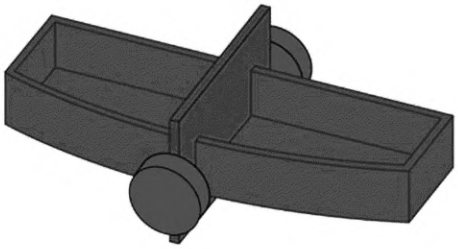
Процесс прямого подвода энергии и материала обычно применяют к детали, установленной на поворотном столе, чтобы ее можно было переориентировать во время наплавки, как показано в таблице 3, хотя возможны и другие конфигурации установки.

Примечание — Пример, приведенный в таблице 3, представлен только для понимания использования поворотного стола, и для данной детали не является наиболее технологичным способом изготовления.

Таблица 3 — Использование поворотного стола для переориентации детали

Примечание	Пример использования
1 Положение подложки на поворотном столе	
2 Построение вертикальной стенки изделия с использованием построения с двух сторон и вращением детали между нанесением слоев	

Окончание таблицы 3

Примечание	Пример использования
3 Переориентация детали для построения задней стенки	
4 Завершение построения с использованием одностороннего нанесения слоев	

Таким образом, детали могут быть построены симметрично с обеих сторон подложки. Деталь также можно переориентировать в процессе построения для изготовления детали под разными углами без использования поддерживающих структур. Переориентация помогает применять подложку как часть окончательного компонента. Следует отметить, что управление теплом на поворотном столе отличается от управления в случае большой пластины на креплении.

6.4.4 Толщина подложки

Выбор толщины подложки — это компромисс между сложностью построения, временем построения и КИМ. Использование более тонкой подложки снижает объем снятия материала, который требуется во время постобработки, но увеличивает сложность построения. Необходимо соблюдать осторожность в случае тонкой подложки, так как это может привести к деформации и короблению. И наоборот, применение более толстой подложки может снизить сложность построения, но увеличить при этом количество удаляемого материала при последующей обработке.

Плюсы и минусы выбора толщины подложки на примере изделия, представленного на рисунке 13, перечислены в таблице 4.

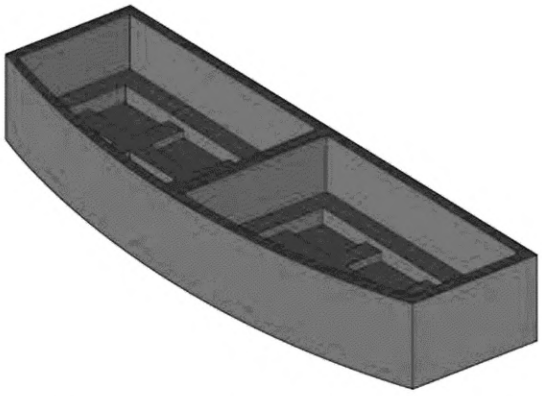
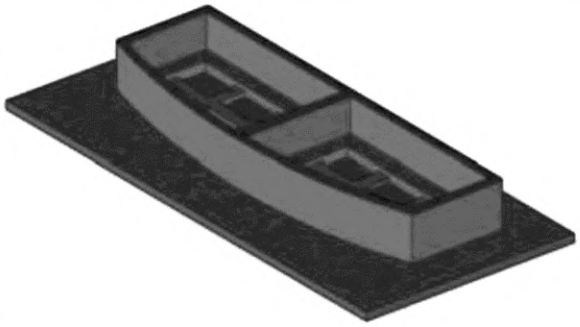
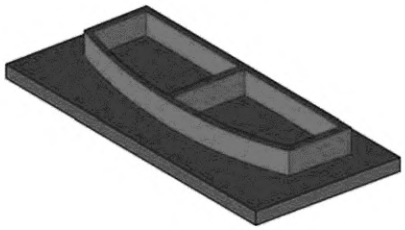


Рисунок 13 — Изделие с мелкими карманами внутри

Таблица 4 — Рекомендации в части толщины подложки

Пример	Примечание
	Тонкая подложка Положительные стороны: - высокий КИМ. Отрицательные стороны: - более сложное построение; - высокий риск искажения и коробления подложки
	Толстая подложка Положительные стороны: - простое построение; - низкий риск искажения и коробления подложки. Отрицательные стороны: - низкий КИМ; - требуется больше операций постобработки

6.4.5 Деформация

Деформация — одна из основных проблем для деталей, изготовленных прямым подводом энергии и материала, поскольку она приводит к негативному изменению геометрии и низкой точности размеров и формы. Для того чтобы избежать искажений, необходимо учитывать следующие рекомендации:

- рассчитывать и оптимизировать ориентацию построения;
- рассчитывать и оптимизировать траектории перемещений печатающей головки для равномерного распределения тепла;
- поддерживать постоянную температуру детали, чтобы минимизировать температурный градиент;
- настраивать параметры процесса в соответствии с геометрией детали;
- использовать предварительный нагрев основания;
- использовать крепление и зажим подложки.

6.4.6 Способы закрепления и удержания детали

При подготовке крепления или удержания детали при построении следует учитывать многие моменты. Подложка для нанесения материала может быть плоской пластиной или существующей частью детали, подлежащей ремонту или предназначенной для нанесения элементов. В любом случае подложку для нанесения материала обычно необходимо зафиксировать на месте, чтобы ограничить движение, вызываемое деформацией. Независимо от деформации плохо закрепленная пластина часто будет двигаться или смещаться во время построения. Удержание и фиксацию часто выполняют с помощью зажимов, которые удерживают опорную пластину на более крупной раме или приспособлении. На рисунке 14 приведен простой пример крепления с помощью боковых прихватов, удерживающих пластину в приспособлении для предотвращения деформации детали за счет обширного зажима.

Данный способ удержания не применим при использовании поворотного стола для симметричных построений.

Существуют и другие способы удержания подложки. Как правило, для трехосевой наплавки, для противодействия остаточному напряжению, вызванному технологическим процессом, используют крепежную пластину. Крепежная пластина часто бывает намного толще, чем опорная пластина. В этом конкретном примере толщина опорной плиты составляет 6,5 мм, а толщина крепежной пластины — 50 мм.

При выборе способа крепления необходимо учитывать планирование траектории перемещений печатающей головки и, аналогичным образом, при подготовке траектории перемещений печатающей головки — возможные столкновения с опорной плитой, зажимами или другими приспособлениями. Как правило, следует избегать высоких креплений или зажимов, чтобы оставалось свободное пространство

для печатающей головки. Зажимы должны быть размещены таким образом, чтобы оставалось достаточно места для размещения синтезируемых элементов на подложке. Траектории перемещений печатающей головки должны быть проверены на пробном прогоне для того, чтобы убедиться в отсутствии сбоев.

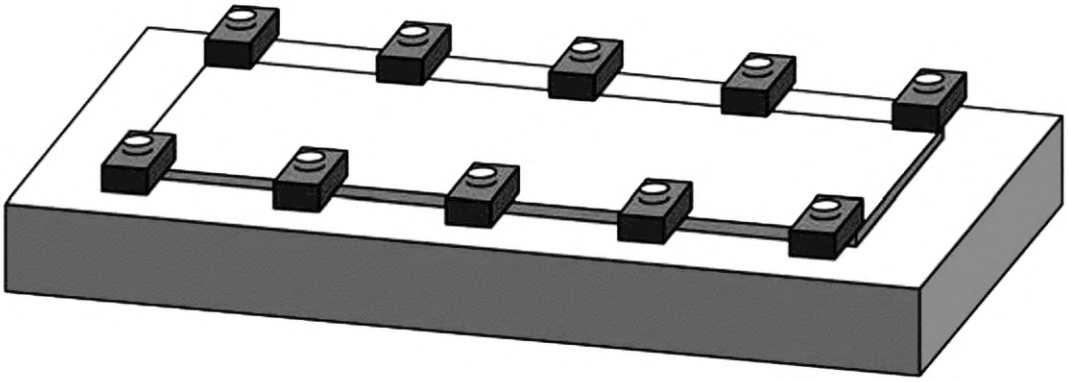


Рисунок 14 — Пример фиксации тонкой подложки при помощи боковых прихватов

Крепления обычно используют для уменьшения сильных искажений, характерных для процессов прямого подвода энергии и материала, как показано на рисунке 14. Крепления, как правило, имеют большие размеры, чтобы противодействовать значительным остаточным напряжениям. Края подложки обычно зажимают или прижимают. На рисунке 14 показан пример того, как это может выглядеть. Подложку часто прижимают к толстой пластине, которая рассчитана на то, чтобы выдерживать большие остаточные напряжения граничащей с ней подложки, вызванные технологическим процессом. Величина остаточного напряжения и деформации зависит от траектории перемещений печатающей головки, конструкции детали, параметров процесса.

После завершения детали пластические деформации могут быть такими, что для снятия зажима потребуется большое усилие. Эти силы иногда вызывают заклинивание болтов, препятствующее их откручиванию. Когда болт застревает, сила, необходимая для его удаления, может превышать предельное напряжение сдвига, что приведет к его деформации. Деформированные болты обычно срезают при снятии зажимов при высоких нагрузках. Перед снятием зажимов часто проводят термообработку.

Зажимы могут быть слишком большими и мешать оборудованию для напыления при движении по траектории перемещений печатающей головки. Существует вероятность недооценить величину возможных искажений из-за предельно высоких напряжений. В этом случае крепежная пластина может деформироваться на несколько миллиметров.

Существуют некоторые компромиссы, связанные с креплением, деформацией и временем построения. В случае детали с длинным и тонким соотношением сторон необходимо размещать ее так, чтобы длинная ось была перпендикулярна или параллельна опорной плите. На рисунках 15 a) и b) продемонстрирована разница между этими двумя способами.

Детали, изготовленные, как показано на рисунке 15 a), часто требуют большего количества зажимов и фиксации, но обычно они требуют меньше времени на построение. Для детали, показанной на рисунке 15 b), как правило, требуется меньше зажимов и креплений. Остаточные напряжения и деформации в таких ситуациях ниже, однако компромиссом для данного способа является более длительное время построения.

При подготовке детали к изготовлению следует учитывать время/стоимость построения, стоимость материалов, стоимость приспособлений и величину напряжений. Важность каждого из этих факторов будет варьироваться в зависимости от организации и конкретных процессов.

Разные материалы имеют разные тепловые свойства; следовательно, их способность проводить и накапливать тепло может значительно отличаться. Это имеет важное значение для распределения температуры по детали, а также по монтажным и крепежным пластинам во время изготовления.

Способ крепления образца может косвенно влиять на микроструктуру детали и, таким образом, на механические свойства. Большие металлические пластины и зажимы могут служить радиатором. Одна и та же деталь, изготовленная при помощи разных способов крепления, может иметь разную микроструктуру. Это также следует учитывать при подготовке детали и выборе способа ее крепления при изготовлении.

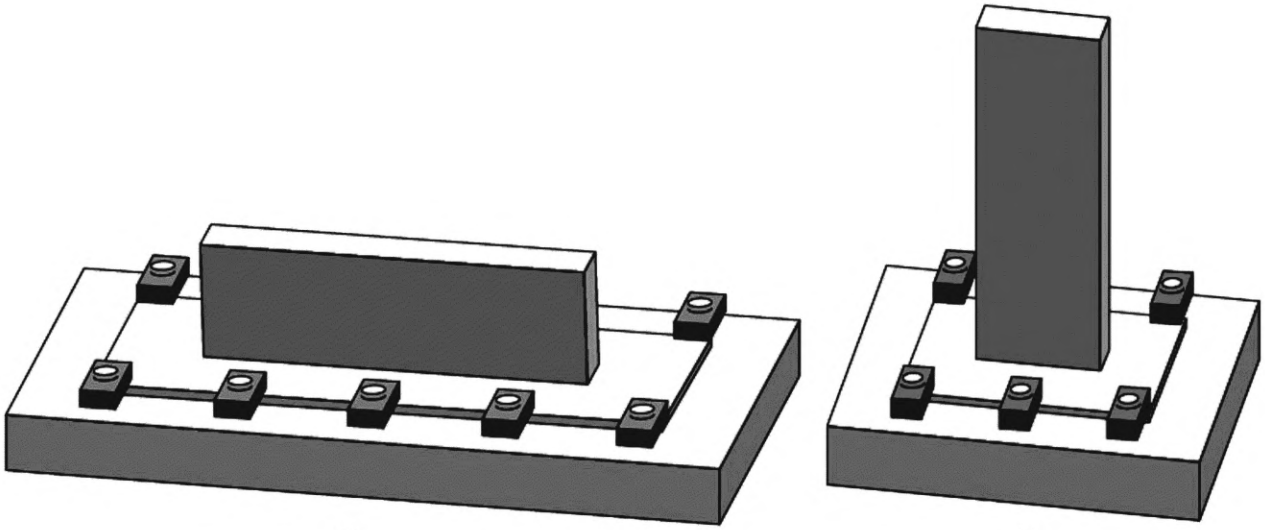


Рисунок 15 — Простая стенка на подложке с длинной стороной, параллельной подложке [a)], и длинной стороной, перпендикулярной к подложке [b)]

В отличие от закрепления на фиксированном столе поворотный стол применяют для четырех- или пятиосевой наплавки. Все процессы прямого подвода энергии и материалов могут быть использованы с фиксированным или поворотным столом. Поворотные столы могут быть разных форм, но, как правило, имеют одну или две оси вращения. На рисунке 16 представлен простой пример одноосевого манипулятора.

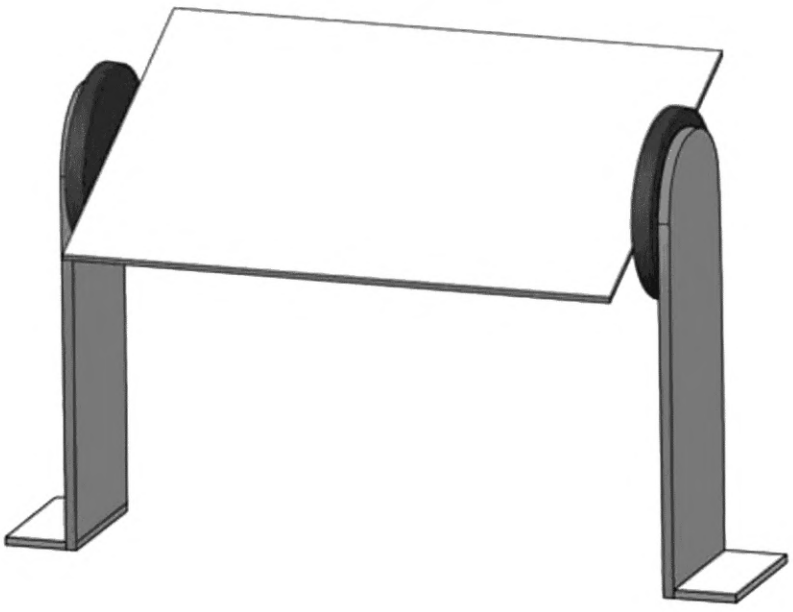


Рисунок 16 — Одноосевой манипулятор изделия

Для крепления детали часто используют дополнительный материал, который применяют только для удержания приспособления и который может быть как предназначен, так и не предназначен для устранения искажений. Дополнительный материал в таких случаях определенным образом прикрепляют к столу или манипулятору.

6.5 Поверхности

Качество поверхности деталей, изготовленных прямым подводом энергии и материала, контролируют в первую очередь толщиной слоя, как и во многих других процессах АП (см. рисунок 9), а также с учетом условий процесса. Профили поверхности имеют округлые валики, где каждый валик представляет собой слой. Типичная толщина слоя в процессах прямого подвода энергии и материала с порошковой наплавкой составляет от *0,2 до 1 мм*, в то время как для систем с проволочной наплавкой слои и валики обычно больше. Для систем с проволочной подачей поверхности, как правило, обладают большей волнистостью (измеряется как *Wa*) и меньшими значениями *Ra* или *Rz* (более гладкие поверхности), чем поверхности, полученные с помощью порошковой наплавки. Для процессов с порошковой наплавкой частично расплавленные частицы порошка могут увеличить шероховатость поверхности. В этом случае значимыми характеристиками поверхностей являются как волнистость, так и шероховатость.

6.6 Последующая обработка

6.6.1 Общие положения

Для достижения конечных характеристик детали часто требуется постобработка. Типовые процессы включают, но не ограничиваются ими, процессы очистки для удаления рыхлого порошкового материала или остатков сварки, термообработку для уменьшения остаточных напряжений и корректировки свойств материала, механическую обработку для достижения конечных размеров детали и обработку поверхности, а также при возможности пескоструйную очистку.

6.6.2 Обработка поверхности

Результирующая шероховатость поверхности (см. 6.5) может не соответствовать требованиям к деталям, подверженным, например, динамическим нагрузкам (усталостной прочности) или гидродинамике. Следовательно, применяют такие процессы, как пескоструйная обработка, механическая обработка или механохимические процессы.

6.6.3 Удаление поддерживающих структур

Поддерживающие структуры при их использовании для изготовления сложного выступа подлежат удалению.

6.6.4 Регулировка геометрических допусков

Процессы прямого подвода энергии и материала часто используют для изготовления изделий с формой, близкой к окончательной, или для ремонта с расчетом на то, что после изготовления для достижения требуемых размеров, допусков и качества поверхности потребуется обработка. В некоторых случаях возможно изготовление изделий окончательной формы. Конкретные указания по точности процессов прямого подвода энергии и материалов сформулировать затруднительно, так как существенно различаются размер, технологии и назначение установок прямого подвода энергии и материала.

Минимальная шероховатость поверхности, которая может быть достигнута с помощью процессов прямого подвода энергии и материала, зависит в основном от толщины слоя, которая связана с размером наплавленного валика. Наиболее соответствующее качество поверхности может быть получено при последующей обработке. Обычно используемые субтрактивные процессы включают механическую обработку, гидроабразивную обработку, галтование, песко-, дробеструйную обработку или электрополирование. Постепенного повышения качества поверхности можно добиться, выполняя перечисленные процессы в определенной последовательности. Для этого должен быть предусмотрен соответствующий припуск на механическую обработку.

6.6.5 Термическая обработка

В зависимости от материалов, процесса прямого подвода энергии и материала и других параметров, изготовленные детали могут иметь остаточные напряжения, анизотропную микроструктуру, неприемлемые фазовое превращение и механические свойства. Таким образом, необходима термическая обработка для того, чтобы:

- снять остаточные напряжения;
- гомогенизировать микроструктуру;
- сохранить упрочняющие фазы (например, дисперсионно-твердеющие сплавы);
- достичь требуемых механических свойств готовых деталей.

Режим термообработки должен соответствовать документам по стандартизации и/или технической документации на указанный материал.

6.6.5.1 Увеличение относительной плотности материала

Относительная плотность (пористость) оказывает значительное влияние на механические характеристики материала, особенно на усталость и ударную вязкость. В результате процессов прямого под-

вода энергии и материала часто получают детали с высокой плотностью. Пористость может быть обусловлена, например, пористостью исходного сырья, как порошка, так и проволоки. Таким образом, для обеспечения качества необходим контроль порошков или проволоки. Кроме того, пористость детали может быть обусловлена несоблюдением требований к хранению и транспортированию материалов или некорректными параметрами процесса, т. е. для обеспечения качества детали важно использовать требуемые параметры процесса. Для дальнейшего увеличения плотности и механических свойств можно выполнять ГИП или другие вторичные процессы. Если возникают затруднения с относительной плотностью изготовленных деталей, проектировщик должен проконсультироваться с производителем и поставщиком материала для определения причин происходящего.

6.6.5.2 Снижение термически индуцированного остаточного напряжения

Во время процесса прямого подвода энергии и материала метод послойного наращивания в сочетании с боковой усадкой по мере охлаждения каждого отдельного слоя часто создает значительные остаточные напряжения в готовой детали. Перед снятием деталей с подложки необходимо использовать термическую обработку для снятия напряжения. Кроме того, процессы последующей термообработки можно применять для достижения более однородной микроструктуры и механических характеристик.

6.7 Проектирование элементов конструкции

6.7.1 Общие положения

При проектировании типовых геометрических элементов проектировщик должен учитывать конкретные характеристики и возможности предполагаемого процесса прямого подвода энергии и материала.

Для обеспечения точности размеров изделия может быть предпочтительнее использовать механическую обработку, а не изготавливать его с помощью процесса прямого подвода энергии и материала. Эти рекомендации применимы как к отверстиям и полостям, так и к выступающим элементам, таким как ребра или выступы.

6.7.2 Полости

Полость — пустое пространство внутри материала. Применяемой практикой проектирования деталей для прямого подвода энергии и материала является с одной стороны использование возможности изготовления частично закрытых полостей, с другой — избегание включения внутренних (закрытых) полостей. Полости могут быть необходимы по нескольким причинам, включая уменьшение массы или наличие проходов. Изготовление полостей в деталях для прямого подвода энергии и материала технически возможно с учетом следующих соображений:

a) степени свободы при использовании:

1) трехосевой установки прямого подвода энергии и материала: возможность изготовления замкнутой полости определена возможностью изготовления выступа,

2) пятиосевой установки прямого подвода энергии и материала: возможность изготовления определяется возможностью доступа печатающей головки к поверхности нанесения;

b) при применении технологии прямого подвода энергии и материала с порошковой наплавкой полностью закрытые полости могут быть заполнены порошком;

c) доступность для постобработки, такой как обработка с ЧПУ, элементов и поверхностей внутренних полостей будет затруднена или невозможна.

6.7.3 Пазы

Пазы в стенках, подложке или других элементах имеют минимальный размер, связанный с разрешением процесса, которое обычно зависит от размера ванны расплава. Попытки добиться меньшего размера паза, чем ванна расплава, скорее всего, приведут к плавлению через намеченный зазор. В процессах порошковой наплавки в пазах может оставаться порошок. Иногда частицы порошка могут быть на поверхности детали, что требует последующей обработки для их удаления.

Пазы в непрямых стенках могут образовывать выступы. Если используют системы с пятью и более осями или роботизированные системы, материал вокруг паза может быть нанесен при помощи изменения ориентации наплавочной головки. Однако в трехосевых системах прямого подвода энергии и материала нанесение материала вокруг паза может быть затруднено.

6.7.4 Толщина стенки

Минимальная толщина стенок в процессах прямого подвода энергии и материала соответствует диапазону ширины ванны расплава. Часто изготавливают стенки шириной в один наплавленный валик. Во многих процессах прямого подвода энергии и материала толщину стенок можно непрерывно изме-

нять посредством настроек процесса в отличие от экструзии материала и многих других процессов АП, где толщина стенки должна быть целым числом, кратным ширине валика.

Для систем порошковой наплавки ширина наплавочного валика материала и минимальная толщина стенки могут быть 1 мм. Для систем с проволочной наплавкой толщина стенки обычно составляет несколько миллиметров, а ширина отдельных валиков может достигать 10 мм или более. Толстые стенки изготавливают любой произвольной толщиной.

6.7.5 Отверстия

Возможность изготовления отверстия в процессах прямого подвода энергии и материала существенно зависит от ориентации центральной оси отверстия по отношению к оси *z* печатающей головки. Небольшие отверстия или отверстия с осями, не совпадающими с осью *z* системы, часто выполняют при постобработке.

Системы прямого подвода энергии и материала с пятью и более осями технически могут выполнять отверстия, не выровненные по оси z системы. Однако эта возможность зависит от угла наклона оси отверстия. Также необходимо учитывать порядок проведения операций изготовления, от которого зависит возможность доступа печатающей головки. В таких случаях необходима проверка возможности столкновения с помощью CAM-программы.

7 Экономическая оценка

Снижение затрат на производство изделия является одним из основных бизнес-факторов, обеспечивающих внедрение процессов прямого подвода энергии и материала, поэтому первостепенное значение имеет возможность проведения оценки затрат с достаточной степенью точности. С точки зрения калькуляции затрат на основе видов деятельности удобно идентифицировать все операции, связанные с производством деталей, классифицировать их как единовременные или повторяющиеся и определять затраты на них. Затем ресурсы, необходимые для этой деятельности, можно классифицировать как постоянные или переменные затраты. Единовременные затраты обычно включают действия, выполняемые один раз перед изготовлением деталей, такие как планирование процесса и подготовка к построению. Конкретные мероприятия могут включать:

- оценку технологичности;
- создание предварительной формы;
- создание технологической формы;
- моделирование остаточного напряжения и оценку деформаций;
- конструкцию крепления;
- моделирование движения и обнаружение столкновений;
- подготовку оборудования;
- настройку установки;
- пробный прогон.

Периодические затраты — это затраты, связанные с производством деталей и возникающие для каждой произведенной детали. Конкретные мероприятия могут включать:

- подготовку материалов;
- обеспечение защитной среды (если используется);
- непосредственно нанесение материала;
- контроль качества (промежуточный и окончательный);
- изготовление и испытание образцов-свидетелей;
- термическую обработку;
- другую постобработку (снятие с опорной плиты, обработку и т. д.).

Постоянные затраты включают приобретение оборудования и накладные расходы на оборудование, в то время как переменные затраты — материалы, расходные материалы, электроэнергию и т. д. Они должны быть определены количественно, а затем соответствующим образом объединены для оценки стоимости компонента или партии.

Помимо массы наносимого материала во время построения детали на стоимость влияют и другие факторы, наиболее значимыми из которых являются следующие:

- время изготовления: чем быстрее происходит изготовление детали, тем меньше времени используется установка и соответственно тем ниже стоимость;
- КИМ: чем ближе деталь к окончательной форме, тем меньше материала для наплавки и меньше механической обработки и тем ниже стоимость;

- стоимость оборудования: более низкая стоимость установки приводит к более низкой почасовой ставке и более низкой стоимости деталей (за счет более низкой амортизации оборудования);

- стоимость материалов.

Следует учитывать прогнозирование времени, необходимого для построения детали и готовность программы для установки. Если управляющая программа процесса отсутствует, время можно оценить, разделив массу изделия на производительность установки в определенном режиме (при условии, если указан *технологический режим*). Затем полученный результат необходимо умножить на коэффициент, который учитывает время, включающее вспомогательные операции, не добавляющие ценности, такие как перемещения между различными участками детали, промежуточный контроль качества и т. д. Если программа уже доступна, то время построения можно легко вычислить, зная длину траекторий перемещений печатающей головки и соответствующие скорости движения печатающей головки.

Впоследствии, если для получения окончательной формы потребуется операция механической обработки, могут быть приняты установленные методы оценки стоимости механической обработки.

После того как проанализирован и подтвержден опыт нескольких производств, «удельная стоимость нанесения» может быть получена путем деления общей стоимости партии (включая повторяющиеся и единовременные элементы) на общую массу нанесенного материала. Это помогает быстро оценить стоимость построения новой детали путем умножения удельной стоимости осаждения на его массу. Однако следует проявлять осторожность, поскольку данный подход является приблизительным.

При выборе наиболее оптимального варианта необходимо учитывать другие переменные. Например, укладка длинной детали вертикально, а не горизонтально, может привести к более длительному времени наплавки и более высокой стоимости, связанной с почасовой оплатой станка, но при этом позволит получить меньше деформации и остаточных напряжений, что снизит стоимость последующей обработки. Точно так же может быть выбрана более толстая опорная пластина, чтобы вместить большую часть всего компонента. С одной стороны, это приведет к увеличению затрат на обработку, с другой стороны — может снизить риск деформации, упростить обработку, сократить время наплавки и в конечном итоге привести к снижению стоимости в целом. Аналогичные соображения приведены в 6.4.6.

Приложение ДА
(справочное)

Оригинальный текст невключенных структурных элементов

ДА.1 Вступление

Технология прямого подвода энергии и материала (DED) включает процессы АП, в которых сфокусированная тепловая энергия используется для сплавления материалов по мере их осаждения, подробное описание которых приведено в Руководстве F3187, и предлагает дополнительные возможности производства. Прямой подвод энергии и материала позволяет сократить временные и финансовые затраты на производство, а также повысить функциональность деталей. Обычно прямой подвод энергии и материала используют для выполнения одной из следующих задач: изготовление деталей с окончательной формой или близкой к окончательной форме, а также конструктивных элементов на деталях, обработанных традиционным способом, модификация поверхности (плакирование) для защиты от износа и коррозии или восстановительный ремонт металлических деталей при помощи добавления металла к сломанной или изношенной детали.

Процессы прямого подвода энергии и материала различают в зависимости от таких параметров, как тип сырья (проволока или порошок), источник энергии (лазер, электронный луч, дуга, плазма), количество источников энергии и конструкция установки. Некоторые реализации включают субтрактивные процессы обработки деталей для достижения окончательных размеров изделий. Также возможно использование одного или нескольких датчиков для отслеживания в реальном времени различных показателей процесса, таких как температура или размер ванны расплава.

Практический опыт показывает сильные и слабые стороны традиционных, давно применяемых производственных процессов, таких как процессы резки, соединения и придания формы (например, путем механической обработки, сварки или литья), и то, что их необходимо должным образом учитывать на этапе проектирования и при выборе производственного процесса. Что касается прямого подвода энергии и материала и аддитивных технологий в целом, инженеры-конструкторы и инженеры-производители имеют ограниченный опыт. Отсутствие ограничений, характерных для традиционных процессов, при использовании прямого подвода энергии и материала дает проектировщикам и производителям большую степень свободы, что требует понимания как возможностей, так и ограничений процесса.

Настоящее руководство по проектированию представляет руководство по различным технологиям прямого подвода энергии и материала, предоставляя информацию о типичных характеристиках изделий, получаемых в результате прямого подвода энергии и материала, обеспечивая понимание причин возникновения этих характеристик, связанных с процессами, а также возможностей и ограничений процессов. Приведенная информация позволяет использовать возможности прямого подвода энергии и материала, проектировать с учетом существующих ограничений и избегать недостатков процесса. Этот документ дополняет требования общего руководства по проектированию ИСО/АСТМ 52910 и руководства по проектированию сплавов в порошковой подложке для металлических и полимерных материалов ИСО/АСТМ 52911-1 и ИСО/АСТМ 52911-2, а также другие руководства по проектированию для конкретных процессов, которые находятся в стадии разработки. Кроме того, руководство учитывает общее описание прямого подвода энергии и материала, приведенное в руководстве F3187.

ДА.2

1.1 Настоящий стандарт также содержит обзор сложившейся практики использования процесса прямого подвода энергии и материала.

1.2 Настоящий стандарт разработан в соответствии с международно признанными принципами стандартизации, установленными в решении о принципах разработки международных стандартов, руководства и рекомендациях, выпущенного комитетом по техническим барьерам Всемирной Торговой Организации.

ДА.3

4.1 Символы

Таблица 1

Символ	Обозначение	Единица измерения
Ra	Среднеарифметическое отклонение профиля (1, 2)*	мкм
Rz	Наибольшая высота профиля (1, 2)*	мкм
Wa	Среднеарифметическое отклонение профиля волнистости	—
θ	—	градусы

ДА.4

4.2 В настоящем стандарте использованы следующие обозначения:

AM (additive manufacturing): аддитивное производство;

AMF (additive manufacturing file format): формат файла аддитивного производства;

BTF (buy-to-fly): соотношение массы закупленного материала к конечной массе изделия, которая является составляющей полетной массы;

DED (directed energy deposition): прямой подвод энергии и материала;

DED-LB (laser based DED): прямой подвод энергии и материала с лазерным лучом;

DED-EM (electron-beam-based DED): прямой подвод энергии и материала с электронным лучом;

DOF (degree of freedom): степень свободы;

HIP (hot isostatic pressing): горячее изостатическое прессование;

PBF (powder bed fusion): синтез на подложке;

PBF-LB (laser-based powder bed fusion): синтез на подложке лазерным лучом;

PBF/M — (laser-based powder bed fusion of metals): синтез металлического порошка на подложке с лазерным лучом;

STL (stereolithography): формат стереолитографии или язык для описания тесселяции поверхности.

ДА.5

5.6 В авиакосмической промышленности эффективность использования материалов оценивают коэффициентом buy-to-fly, который определяют, как отношение массы материала, закупленного для производства детали, к массе готовой детали.

Так как усадка во время охлаждения оказывает наибольшее влияние в направлении осаждения, можно использовать стратегию симметричного нанесения, при которой нанесение слоев осуществляют поочередно на каждой стороне подложки, вращая ее между слоями. Это уравновешивает накопление остаточных напряжений и сводит к минимуму риск деформации во время производственного процесса. В случае изделий без подходящей плоскости симметрии можно построить два изделия вплотную друг к другу для того, чтобы получить почти симметричную конструкцию.

ДА.6

5.10 Цифровой рабочий процесс обычно включает создание 3D-модели в системе автоматизированного проектирования (CAD) на основе твердотельного моделирования, преобразование ее в одно или несколько нейтральных представлений для обмена данными и загрузку представления в программное обеспечение с целью подготовки построения для выполнения планирования процесса и создания исполняемого файла построения.

Следует обратить внимание на то, что это быстро меняющаяся область, поэтому дизайнеры извлекут выгоду, постоянно обновляя предложения программного обеспечения АП.

ДА.7

5.11 Читатель может обратиться к Руководству F3187 для получения дополнительной информации о процессах DED, переменных процесса и спецификациях процесса, а также к ИСО/АСТМ 52904 по характеристикам процесса для металлических PBF для соответствия критическим приложениям.

ДА.8

6.1.2 Испытания при проектировании

Требования к оптимизации детали отличаются в зависимости от материала, установки и поставщика услуг, таким образом оптимизация детали может быть ограничена спецификой процессов изготовления. Во многих случаях одним из этапов проектирования должно быть практическое испытание функций детали.

Общее руководство по проектированию, ИСО/АСТМ 52910, содержит множество аспектов проектирования, которые проектировщик должен принять во внимание, включая способы использования продукта, устойчивости, бизнеса, геометрии, свойств материалов, коммуникации и специфических для процесса тем.

ДА.9

6.2.2 В процессах прямого подвода энергии и материала возможно использование сырья, предназначенного для других производственных процессов. Металлический порошок можно приобрести у поставщиков сырья для прямого подвода энергии и материала, а также у поставщиков сырья для синтеза на подложке. Поскольку металлические порошки могут значительно различаться у разных поставщиков, к выбору следует подходить с осторожностью. Гранулометрический состав, морфология, химический состав, чистота, твердость, характеристики поверхности, горючесть и текучесть — это те примеры характеристик исходного порошка, которые следует учитывать при выборе. Для процессов проволочной наплавки сварочная промышленность предлагает широкий ассортимент металлической проволоки, которую производят в соответствии со стандартами на материалы.

ДА.10

6.2.4 Из-за заявленной сложности и специфического для материала характера микроструктур проектировщикам рекомендуется проконсультироваться со своими поставщиками материалов и производителями деталей по конкретным рекомендациям.

ДА.11

6.3 В некоторых случаях при трехосевом нанесении используют керамические детали или другие материалы для поддержки выступов. При таком подходе керамическая вставка служит поверхностью построения для выступа, способной выдерживать высокие температуры процесса нанесения. В 6.6.3 рассмотрено удаление опорных конструкций.

ДА.12

6.6.3 Как обсуждалось в 6.3, детали, производимые с помощью процессов прямого подвода энергии и материалов, часто не имеют опорных структур. В некоторых случаях для поддержки выступа или элемента используют керамические вставки. Эти вставки следует удалить, часто путем механической обработки, а затем выполнить чистовую обработку детали для достижения требуемых размеров и качества поверхности.

ДА.13

8 Примеры применения процесса прямого подвода энергии и материала

8.1 Образец тонкостенной детали

Изделие, показанное на рисунке А.1, представляет собой пример изготовления детали при помощи процесса прямого подвода энергии и материала с лазерным источником энергии и использованием проволоки в качестве сырья.

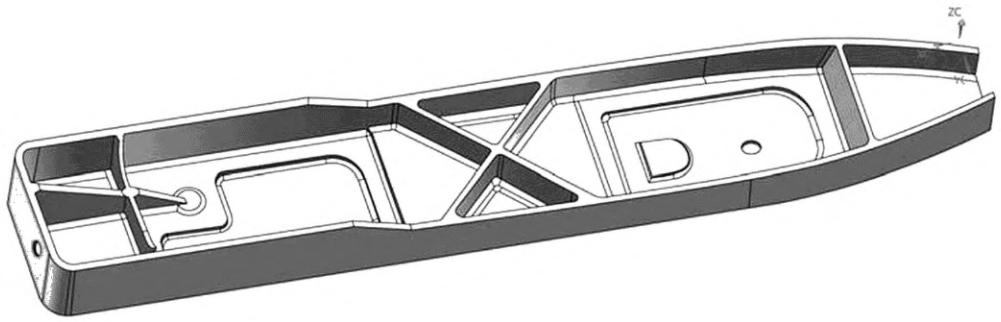


Рисунок А.1 — Пример изделия с тонкими стенками и несколькими элементами

Деталь содержит типовые особенности и размеры, характерные для большинства деталей, такие как вертикальные стенки, наклонную стенку, стенки различной высоты, пересечение стенок, карманы, выступы и отверстия. Для справки: деталь имеет длину 1219 мм, высоту 88,9 мм с переходом на высоту 63,5 мм и ширину 203 мм. Толщина стенки составляет 6,35 мм.

ДА.14

8.2 Образец для оценки геометрических способностей систем прямого подвода энергии и материала

Изначально деталь, приведенная на рисунке А.2, использовали для проверки различных процессов прямого подвода энергии и материала, включая порошковую наплавку лазером, проволочную наплавку лазером, проволочную наплавку электронным лучом, проволочную наплавку плазмой и дугой. Эта деталь имеет несколько существенных особенностей, помогающих оценить возможности процесса: стенки, толщина которых меняется в направлении *x*—*y*, небольшой выступ, большое отверстие в горизонтальной стене, вертикальное отверстие и наклонные стенки.

Он также имеет несколько геометрических элементов, таких как пересечение стенок и повороты на 90°, поскольку они часто являются источником пористости при сварке. Различные организации использовали этот образец в качестве тестового: интеграторы установок, разработчики процессов и группы моделирования и симуляции.

Для справки: основание детали имеет длину 412,15 мм и ширину 304,8 мм; высота детали — 127 мм. Вертикальные стенки по периферии, а также самые тонкие ребра и косынки имеют толщину 6,35 мм. Угол передней стенки — 60° от горизонтали.

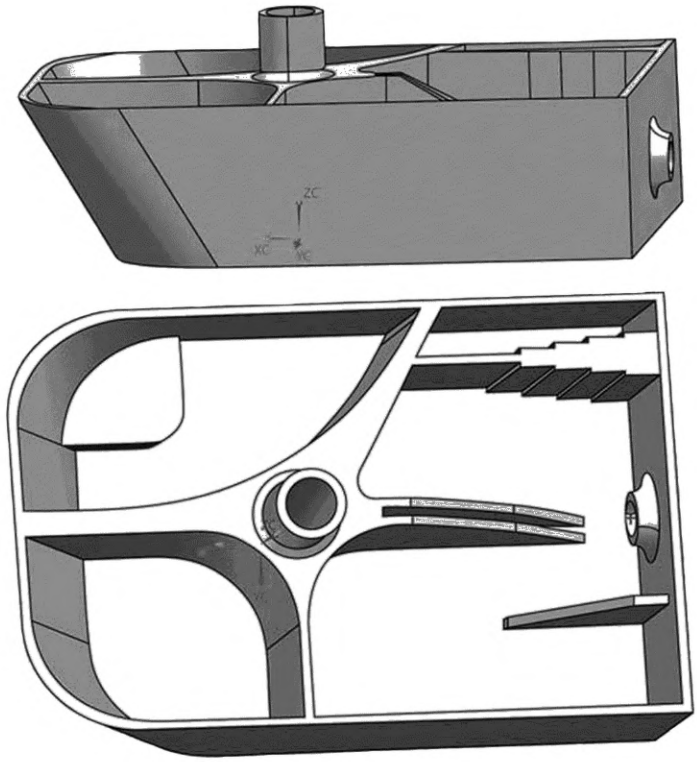


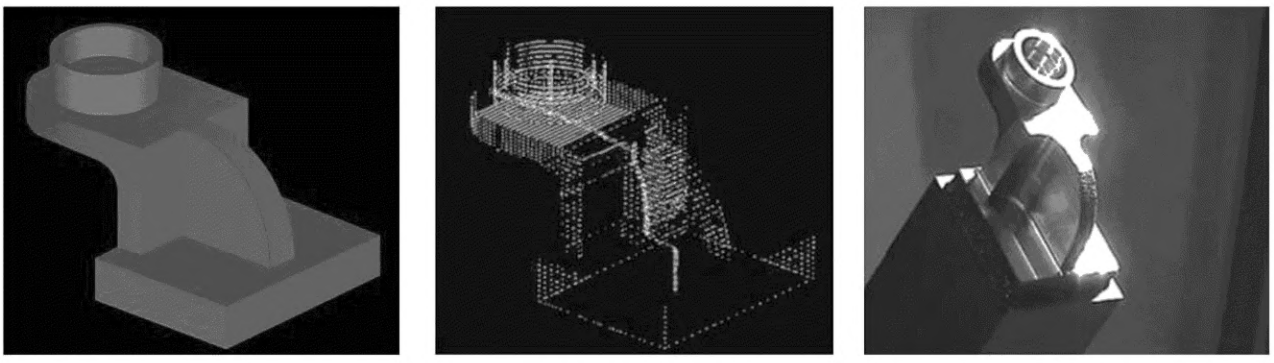
Рисунок А.2 — Образец для оценки геометрических способностей систем прямого подвода энергии и материала

ДА.15

8.3 Пример детали с несколькими направлениями построения

Один из подходов к минимизации или устранению необходимости в опорных структурах в многоосных процессах прямого подвода энергии и материала состоит в том, чтобы разделить компонент на ряд более простых подкомпонентов без выступов.

Разделение на подкомпоненты должно быть выполнено таким образом, чтобы каждый был построен на предыдущем подкомпоненте. Есть много способов добиться такого результата. Пример, показанный на рисунке А.3, разделяет геометрию детали с использованием метода центроидных осей, т. е. путем изменения направления в соответствии с графиком центроидов взаимосвязанных слоев.



a) Требуемая геометрия детали b) Разбиение на слои c) Изготовленная деталь

Рисунок А.3 — Пример седла подшипника, иллюстрирующий деталь, изготовленную с использованием нескольких направлений построения

Как видно на рисунке А.3, b), первым направлением нарезки является направление *z* (снизу вверх), а затем определяется изменение направления нарезки. Направление поворачивается на 90° для создания выступа, что видно из вертикально ориентированных срезов фиолетового цвета. Последняя часть детали, полый цилиндр, сно-

ва строится в направлении z. Изготовленная деталь показана на рисунке А.3, c) после построения на гибридной установке порошковой наплавки.

ДА.16

8.4 Деталь ребра шасси

На рисунке А.4 показаны CAD-модель и фотографии изготовленной детали ребра шасси из сплава Ti-6Al-4V конечной массой 20 кг. Размер детали — примерно 0,5 × 0,5 × 0,3 м. При механической обработке из цельного материала компонент имел бы коэффициент by-to-fly ratio, равный 12, при общей потребности в сырье 240 кг. Деталь построена в университете Крэнфилда с использованием дуговой проволочной наплавки; коэффициент by-to-fly ratio снижен до 2,3, что дало экономию сырья на 194 кг. Необходимо обратить внимание на то, что деталь была изготовлена с использованием симметричного построения с ребрами на обеих сторонах рабочей пластины, как показано на рисунке А.4, c).



a) Изометрический вид детали

b) Изометрический вид детали, изготовленной при помощи проволочной наплавки

c) Деталь, изготовленная с применением симметричного построения

Рисунок А.4 — Ребро подвесного шасси от Ti-6Al-4V

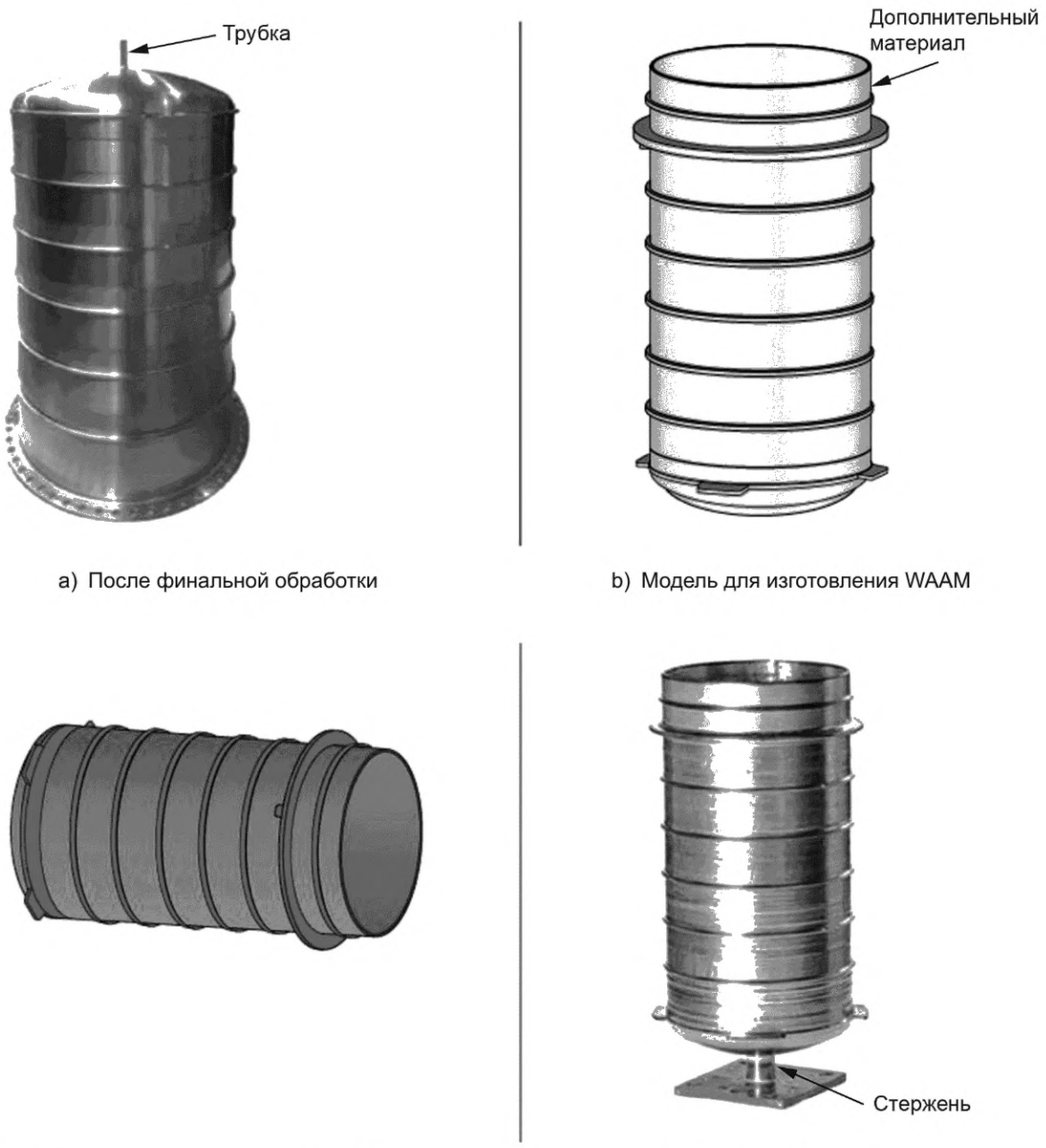
ДА.17

8.5 Сосуд под давлением

На рисунке А.5 показан сосуд высокого давления из Ti-6Al-4V для исследования космоса, также построенный в университете Крэнфилда с помощью технологии WAAM.

Изделие имеет высоту около 1 м и вес 8,5 кг. При традиционном производстве компонент имел бы коэффициент by-to-fly ratio, равный 30. При использовании процесса WAAM сэкономлено более 200 кг Ti-6Al-4V для каждого элемента. Кроме того, достигнуто сокращение общего времени выполнения заказа на 65 % без ущерба для требуемых характеристик. Это дает преимущество также с точки зрения гибкости проектирования, позволяя вносить изменения в соответствии с запросами заказчика на поздней стадии проекта. Благодаря возможности незамедлительно перейти от цифрового чертежа к окончательной структуре и объединению двух отдельных деталей в одну исключена необходимость в поковках с длительным сроком службы и существенно уменьшено количество материала, удаляемого механической обработкой.

Деталь после чистовой обработки показана на рисунке А.5, a). Предварительная форма получена путем наложения обрабатываемой заготовки толщиной 2 мм по периметру [рисунок А.5, b)]. Чтобы обеспечить возможность построения купола, деталь построена с использованием нескольких направлений построения: построение купола началось со стержня и приняло скоординированное движение, т. е. совместное манипулирование антропоморфной рукой и сервопозиционером, совершающим одновременно качающие и вращающие движения. Затем последовало построение главного цилиндра без прерывания спиралевидной траектории движения печатающей головки. Наконец, как только основной корпус завершен, его переориентировали на 90°, а затем на него были нанесены ребра жесткости и основной фланец, т. е. осуществлено нанесение на ранее изготовленные поверхности [см. рисунок А.5, c)]. Заключительная часть построения показана на рисунке А.5, d). Канал в верхней части сосуда [см. рисунок А.5, a)] размещен на стержне, который использовался в качестве подложки. Необходимо обратить внимание на окончательно обработанный сосуд высокого давления, заканчивающийся фланцевым основанием, в то время как на детали, полученной после аддитивного процесса, видно продолжение цилиндрической части после заготовки для фланцевого основания. Дополнительный материал нанесен при таких же условиях, как и условия для основного корпуса сосуда высокого давления, и впоследствии он служил для получения образцов-свидетелей для механических испытаний.



a) После финальной обработки

b) Модель для изготовления WAAM

c) Размещение внешних ребер и фланцев

d) Заготовка после WAAM

Рисунок А.5 — Сосуд под давлением для космических исследований из Ti-6Al-4V, построенный в университете Крэнфилда для Thales Alenia Space

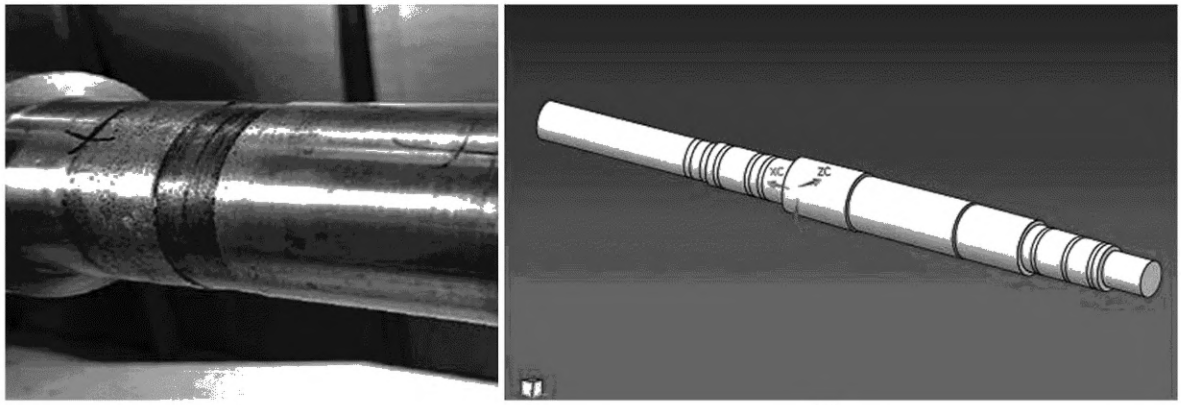
ДА.18

8.6 Восстановление вала

Изношенный вал насоса доставлен в лабораторию BR&T (Boeing Research & Technology) в состоянии, показанном на рисунке А.6, а). Примерно шесть различных участков вала насоса были изношены в точках контакта подшипников. Длина вала — приблизительно 800 мм при максимальном диаметре 66 мм. Поскольку производитель насоса не предоставил чертеж, была разработана CAD-модель, приведенная на рисунке А.6, b). Поскольку технические требования не были установлены, специалисты рекомендовали, чтобы предельное отклонение внешнего диаметра вала оставалось в пределах 0,2 мм от заданных размеров. Для определения материала вала использовали портативный химический рентгенофлуоресцентный анализатор, установивший материал как нержавеющую сталь марки 416.

Поскольку в начале проекта порошок нержавеющей стали 416 не был доступен, в качестве аналогичного мартенситного сплава была выбрана нержавеющая сталь 410. Порошок просеивали до гранулометрического состава от 44 до 177 мкм.

Для того чтобы подготовить поверхности к напылению, необходимо было удалить поврежденный материал. Основная часть повреждений с поверхности была устранена удалением материала поврежденных участков. Материал был удален точением с радиусом 25,4 мм с каждой стороны операции точения. CAD-модель области удаления показана на рисунке А.7. Для очистки поверхность перед нанесением протирали салфеткой, пропитанной ацетоном. Обработанный и подготовленный участок показан на рисунке А.8, a), а участок после АП (после восстановления) показан на рисунке А.8, b). Результат окончательной обработки вала насоса показан на рисунке А.9. В начале и в конце каждого восстановленного участка был обнаружен небольшой дефект, который при пробном нанесении материала сочли незначительным.



a) b)

Рисунок А.6 — Вал подлежит восстановлению: a) пример изношенной области в месте расположения подшипника вдоль вала насоса; b) реконструированная CAD-модель

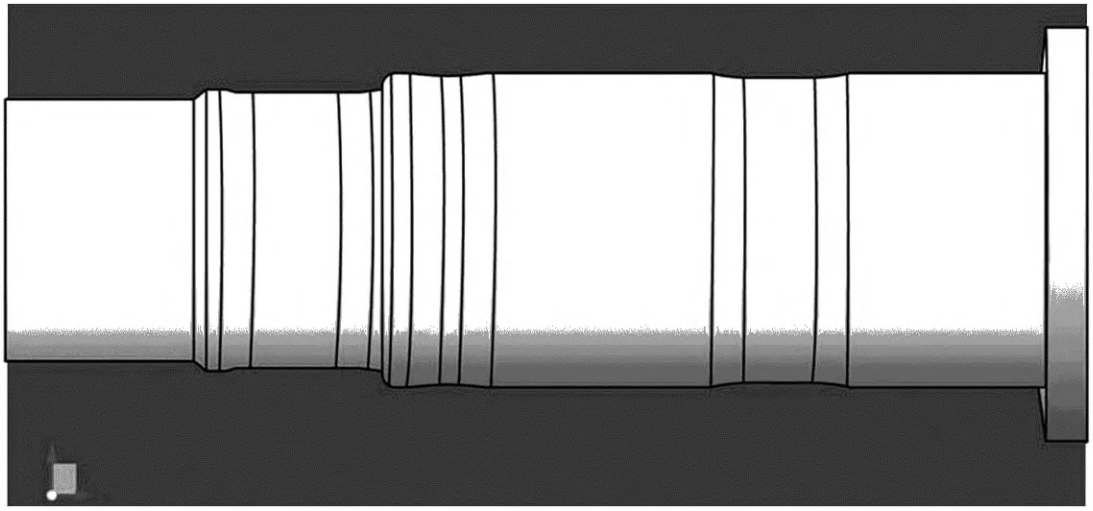
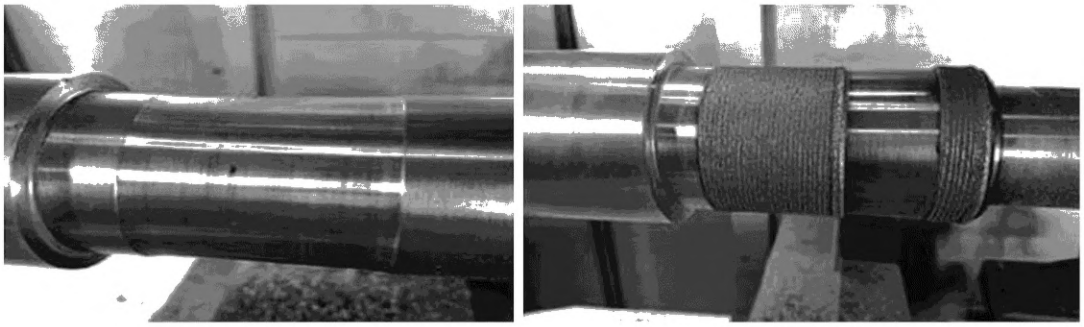
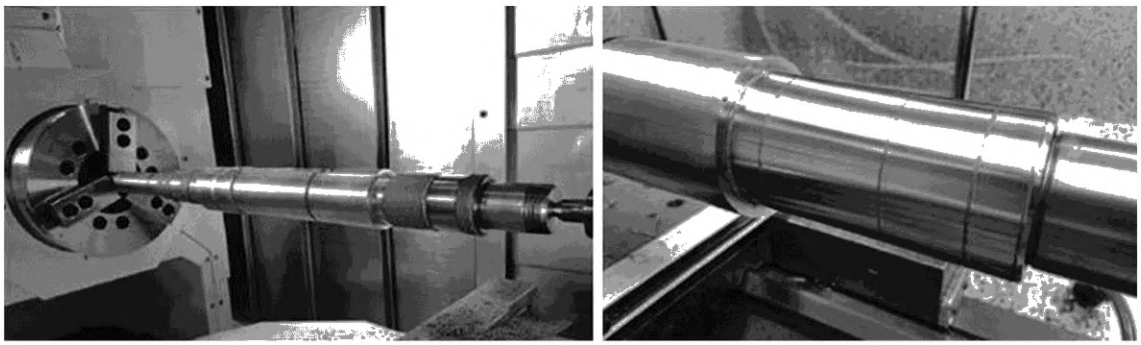


Рисунок А.7 — CAD-изображение нескольких областей вала после предлагаемой механической обработки для подготовки поверхности к восстановлению



a) b)

Рисунок А.8 — Операция механической обработки удаляет поврежденный материал с подложки [a)]; нанесенный для восстановления материал [b)]



a) b)

Рисунок А.9 — Вал насоса после восстановления [a)] и после завершения чистовой токарной обработки [b)]

УДК 669.01:006.354

ОКС 25.040
35.240.50

Ключевые слова: аддитивные технологии, прямой подвод энергии и материала, порошковая наплавка, проволочная наплавка, проектирование, аддитивное производство, восстановление

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 04.08.2022. Подписано в печать 12.08.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,18.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru