

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.04.01 «Машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования»

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Аддитивные технологии изготовления металлических изделий

Обучающийся

В.В. Назаров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

К.т.н., доцент А.Ю. Краснопевцев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	4
1 Теоретические основы аддитивных технологий.....	6
1.1 Определение аддитивных технологий.....	6
1.2 История развития и актуальные тренды в области аддитивного производства.....	8
1.3 Принципы работы аддитивных технологий.....	12
2 Основные разновидности аддитивных технологий в изготовлении металлических изделий.....	16
2.1 Селективное лазерное спекание (SLS): технология и особенности применения.....	16
2.2 Селективное лазерное плавление (SLM).....	22
2.3 Электронное лучевая плавка (EBM): сравнительный анализ с другими методами.....	30
2.4 Прямое лазерное выращивание (DLD) в изготовлении металлических изделий.....	38
3 Разработка рекомендаций по выбору и оценке необходимости внедрения аддитивных технологий в изготовление металлических изделий.....	47
3.1 Влияние аддитивных технологий на экономическую составляющую производства металлических изделий в промышленности.....	47
3.2 Коммерческая модель, оценка стоимости и сравнение с традиционным производством.....	57
3.3 Факторы, помогающие разобраться в выборе АТ.....	62
3.4 Разработка рекомендаций к выбору и применению аддитивных технологий.....	69
Заключение.....	72
Список используемой литературы и используемых источников.....	74

Перечень сокращений и обозначений:

АТ – аддитивные технологии.

SLS – селективное лазерное сплавление.

SLM – селективное лазерное плавление.

EBM – электронно лучевая плавка

DLD – прямое лазерное выращивание.

ПЛВ – прямое лазерное выращивание.

МПК – металлопорошковая композиция.

ГТД – газотурбинный двигатель.

МЭКС – малоэмиссионная камера сгорания.

УП – управляющая программа.

КД – конструкторская документация.

ТП – технологический процесс.

ТЗ – техническое задание.

Введение

Актуальность данной магистерской работы заключается в том, нынешние «традиционные» технологии производства металлических изделий по сравнению с новыми технологиями изготовления в некоторых случаях теряют свою актуальность из-за трудоемкости изготовления, большого количества отходов используемого для изготовления материала, точности размеров, механических свойств получаемых деталей и так далее. В связи с этим у предприятий, изготавливающих металлические изделия возрастает интерес к проблемам использования аддитивных технологий в производстве металлических функциональных изделий из металлических порошков (МПК).

В настоящее время существующие барьеры и преграды, которые препятствуют внедрению аддитивных технологий, начинают все стремительнее угасать, и в связи с этим производству для использования необходима оценка возможности и целесообразности внедрения аддитивных технологий на предприятия включая в себя и проведение экономического анализа, положительных и отрицательных аспектов АТ, рисков, технологических особенностей и других факторов.

Перебрав научную литературу отечественного производства не удастся детально разобраться в вопросе внедрения и использования данных технологий, что отталкивает производственные площадки, которые действительно нуждаются во внедрении аддитивных технологий в свой обиход. Также фактором, который тормозит внедрение на производство в отечественную промышленность является слабая заинтересованность вводить новые процессы и способы на предприятия, так как на это необходимы крупные суммы денег, а изготовление традиционными методами выглядит более оправданным с учетом того, что этот процесс давно отлажен, написаны технологии и на ответственных деталях для внедрения чего-либо нового нужно пройти процесс долгого согласования и отработки на не товарных образцах.

В наше время производственные технологии быстро развиваются, и вносят в промышленность новые возможности и перспективы. Одним из наиболее развивающихся направлений в изготовлении металлических изделий являются аддитивные технологии. Аддитивное производство, открывает новые возможности для работы с сложными геометрическими формами и функциональными деталями, которые ранее не были доступны или экономически не выгодны для исполнения с помощью привычных методов.

Аддитивные технологии в области металлообработки предлагают огромный ряд достоинств, такие как высокая точность изготовления конечного продукта, возможность исполнения неповторимых традиционными методами изделий, уменьшение времени и трудозатрат на производство, а также уменьшение отходов материала во время изготовления. Благодаря этим преимуществам, аддитивное производство становится более распространённым, популярными и все чаще применяется в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, автомобильная, медицинская, и множество других. Также АТ это отличный новый способ, представляющий в своем исполнении прогрессивный подход к производству, несущий в себе внушительный потенциал для того чтобы в различных отраслях промышленности пересмотреть взгляды на изготовление конечных продуктов, и кроме того данный метод дает толчок к развитию новых инновационных методов создания готовых продуктов, а также материалов.

Целью данной магистерской работы является расширение технологических возможностей производства металлических изделий путем внедрения аддитивного производства.

1 Теоретические основы аддитивных технологий

1.1 Определение аддитивных технологий

Аддитивные технологии взяли свое название (от английского Additive Fabrication) - это обобщенное название технологий, которые предполагают изготовление заготовки по заданным параметрам цифровой модели.

Аддитивные технологии, в свою очередь известные как аддитивное производство или лазерное прямое выращивание, по большому счету являются объединением способов изготовления, сформированных с помощью многослойного наложения материала каждого слоя друг на друга по средствам профильных установок. Главным правилом аддитивного производства является изготовление конечного изделия посредством послойного нанесения используемого материала, будь то металлические порошки или жидкое сырье, что и является важным отличием от привычных методов создания продукта путем выточки из заготовки или форменным литьем.

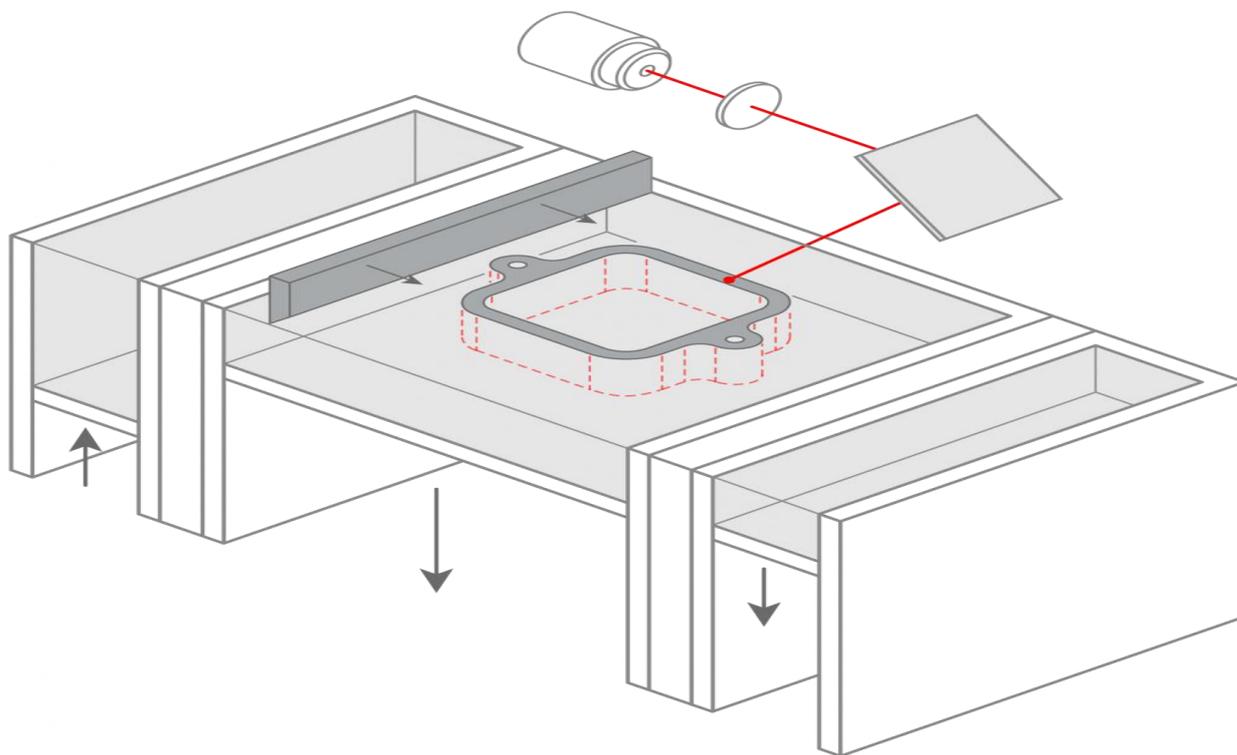


Рисунок 1 – Принципиальная схема аддитивного выращивания

Первостепенным по распространению выделяется метод аддитивного производства называемый 3D-печатью, которая воспроизводится путем многослойного нанесения формируемого материала или посредством

наложения слоев жидкообразного металла на поверхность друг на друга в соответствии с построенной моделью изделия. Этот алгоритм открывает нам возможности для создания моделей непростой геометрической формы и персональным характером.

Ключевое положение аддитивных технологий – это «многослойность». В отличие от общепринятых способов, где изготовление продукта производится посредством выборки лишнего материала из «болванки» или с применением литья по заранее изготовленным формам, аддитивные технологии дают возможность изготавливать модели с помощью наложения материала слоями друг на друга поэтапно. Таким образом с помощью этой технологии возможна значительная экономия материала, сокращение отходов при производстве, а также обеспечение большой гибкости в проектировании и изготовлении.

Одним из важных характеристик аддитивных технологий считается возможность воссоздания индивидуальных изделий, специально сконструированных для конкретных целей с учетом форм и особенностей под требования заказчика. Это позволяет нам открыть большие перспективы и расширить спектр применения в разделе персонального производства под конкретные цели, а также индивидуализировать продукцию для конкретных заказчиков и их целей.

Исходя из этого можно говорить о том, что аддитивные технологии — это отличный новый способ, представляющий в своем исполнении прогрессивный подход к производству, несущий в себе внушительный потенциал для того чтобы в различных отраслях промышленности пересмотреть взгляды на изготовление конечных продуктов, и кроме того данный метод дает толчок к развитию новых инновационных методов создания готовых продуктов, а также материалов.

1.2 История развития и актуальные тренды в области аддитивного производства

Само понятие «аддитивные технологии» имеет долгую и увлекательную историю развития, начиная с самых первых усилий воссоздания образцов до современных прогрессивных методов изготовления. В данном пункте мы рассмотрим историю развития аддитивных технологий, начиная с их зарождения и заканчивая современными заслугами в этой области.

Свое начало аддитивные технологии берут в глубоком прошлом. Одним из первых упоминаний известных примеров аддитивного производства считается технология формирования рисунков и фигур из воска в Древнем Египте. В средние века к данному примеру добавились технологии отливки металлов в формы из песка, которые тоже можно провести в пример как прародителей аддитивных технологий.

В наше же время укрепление аддитивных технологий стало начинаться во второй половине XX века. В 1980-х годах создали и начали внедрение одни из первых производственных аддитивных систем, названные как Selective Laser Sintering (SLS) (селективное лазерное спекание) и Selective Laser Melting (SLM) (селективное лазерное плавление). Данные системы зарекомендовали себя прорывными в производстве образцов и быстрого изготовления заготовок.

По истечению некоторого времени аддитивные технологии стали более доступными их стали широко внедрять в производство и использовать в промышленности. В связи с этим стали появляться новые методы, названные Electron Beam Melting (EBM) (электронно-лучевая плавка) и Direct Metal Laser Sintering (DMLS) (прямое лазерное спекание металлов), с помощью которых стало возможно изготавливать металлические детали, а также конструкции высокой прочности и сложной формы в кратчайшие сроки, по сравнению с стандартными методами изготовления того времени [1].

Из наиболее распространённых тенденций в разделе аддитивного производства можно назвать нижеперечисленные пункты:

Активное внедрение аддитивных технологий в производственные и промышленные процессы передовых компаний.

Разработка и активное развитие новых материалов с обновленными, а соответственно и улучшенными механическими свойствами для работы и развития аддитивного производства во всех его отраслях.

Увеличение зон внедрения, а также применения аддитивных технологий в медицине для создания индивидуализированных имплантатов и протезов различных по сложности изготовления, что позволяет продвигать медицину на новый уровень и воспроизводить то, что ранее казалось невозможным.

Исследование и разработка новых методов масштабирования аддитивного производства для серийного производства в различных областях промышленности.

Внедрение аддитивных технологий в областях с устойчивым развитием, в том числе использование биоразлагаемых материалов и процессов переработки.

Все эти тенденции подводят к тому, что развитие и рост интереса к аддитивным технологиям, а также к их нераскрытому в данный момент до конца потенциалу в области изменения методов изготовления и применения новых возможностей изготовленных образцов в различных отраслях оправдан.

В глобальном плане развитие аддитивных технологий позволит вывести производство высокотехнологичной продукции на новый уровень.

Данные методы производства способны обеспечить проведения исследований разного рода, которые путем традиционного производства были бы не целесообразны, которые будут направлены на оптимизацию производства и расширение технологических возможностей.

Крупнейшими мировыми компаниями аддитивных установок являются:

АО «Лазерные системы» (Россия)

Optomec Inc. (США)

Renishaw plc (Великобритания);

EnvisionTEC Inc. (США, ФРГ);

EOS GmbH (ФРГ);

ExOne (США);

Farsoon High-tech Co., Ltd (КНР);

Sciaky Inc (США);

ООО «Лазеры и аппаратура ТМ» (Россия);

Arcam AB (Швеция);

Realizer GmbH (ФРГ);

Concept Laser GmbH (ФРГ);

Objet Geometries Inc. (США, Израиль);

SLM Solutions Group AG (ФРГ); Voxeljet AG (ФРГ);

Stratasys Ltd (США);

Trumpf GmbH & Co. (ФРГ);

SLM Solutions Group AG (ФРГ);

3D Systems Corp. (США).

До недавнего времени на российском рынке было не так много компаний, изготавливающих оборудование для аддитивного изготовления, но на данный момент в данной отрасли начинает развиваться все больше производителей на территории РФ так как методы аддитивного производства с каждым годом становятся все более актуальными и востребованными.

Таблица 1 – направления применения аддитивных технологий.

Направление	Разделы применения	Плюсы аддитивного производства в конкретном разделе
Промышленное производство металлических изделий	Прототипирование. Изготовление металлических изделий, уменьшение их массы, повышение прочности, возможность изготовления сложных форм	Снижение стоимости изготовления, улучшение прочностных характеристик. Производство индивидуальных изделий, снижение трудоемкости.
Аэрокосмическое	Быстрое прототипирование, производство необходимых компонентов, уменьшение массы и повышение механических характеристик.	Повышение качества, оптимизация изготовления, ускорение изготовления.
Стоматологическое	Зубные протезы, коронки, стоматологические аппараты.	Изготовление индивидуальных изделий под каждого пациента, сокращение времени воспроизведения.
Медицинское	Челюстные имплантаты, протезы, суставы.	Уменьшение времени и стоимости изготовления, удешевление стоимости операций.

1.3 Принципы работы аддитивных технологий

Аддитивные технологии построены на нескольких ключевых факторах, из которых складывается основной процесс изготовления заготовок с помощью слоистого наложения используемого материала. В данном разделе будут рассмотрены основополагающие критерии, без которых не представляется понятие аддитивных технологий, а также не возможна их работа.

В общей цепочке факторов работы технологий выращивания первым пунктом можно выделить слоистое наращивание материала. Данный термин подразумевает под собой, что деталь изготавливается с помощью наложения слоев материала прописанного для каждого изделия своим чертежом или проектом, определенной толщины и объема сверху один на другой в заданной на программируемом оборудовании последовательности поэтапно. Каждый слой начинает свое образование в заданном месте и накладывается точно на предыдущий с помощью ранее созданной оцифрованной модели заготовки, за счет чего в итоге получается добиться точной планируемой геометрии изделия.

Вторым в данной цепочке можно выделить пункт цифрового моделирования с помощью которого создается цифровая модель объекта в которой учитываются габариты и геометрия конечного выращенного изделия. Перед началом выращивания модель объекта создается и проектируется в программе на компьютере, которая учитывает все особенности изготавливаемого изделия, либо же с помощью специального программного обеспечения, CAD (Computer-Aided Design) (автоматизированное проектирование). Данная процедура помогает определить точную форму, размеры, а также иные параметры выращиваемого объекта перед созданием его физической модели из необходимых материалов.

Третьим, но не менее важным положительным фактором аддитивных технологий хотелось бы выделить возможность использовать материал в различных формах, например, таких как порошок, жидкость и даже пластик, но все это конечно зависит от того, какой именно вид производства был

выбран для конкретного изделия. Это безусловно открывает наиболее широкие возможности и разбег мысли для создания объектов, деталей, заготовок и множества других продуктов с различными техническими, а также механическими свойствами и характеристиками.

В один из важных аспектов работоспособности аддитивных технологий также входит и контроль процесса, будь то компьютерное моделирование или же сам процесс выращивания, в каждом из них нужен четкий пооперационный контроль и точность соблюдения намеченного процесса изготовления конечного продукта. Новейшие операционные системы, а также системы искусственного интеллекта помогают обеспечивать наилучшую степень точности и контроля изготовления в процессе производства, именно это позволяет реализовывать изготовление заготовок с наивысшим классом детализации и качества конечной детали.

И пятым, но не менее важным пунктом хотелось бы рассказать о, пожалуй, одном из ключевых факторов работы аддитивного производства, а именно о прочности и надежности конечных изделий. Методы производства бывают разными, их множество, но разработка каждого из них производится с учетом требований к прочности и долговечности каждого изделия индивидуально. Это позволяет создавать высококачественные и соответственно надежные конструкции под все цели и задачи, именно это и выносит аддитивное производство на 5 шагов вперед открывая ему широкое будущее в современном мире по сравнению с технологиями изготовления прошлых лет.

Таблица 2 – Преимущества АТ в сравнении с традиционными технологиями.

Раздел применения	Плюсы использования
Прототипирование	Ускорение прототипирования Скорость изготовления Снижение затрат
Производство деталей, изготовление которых ранее не было доступно	Возможность решения сложных задач Ремонт узлов, которые нельзя восстановить традиционными методами.
Производство малых партий	Минимизация затрат на оснастку для изготовления Экономическая эффективность
Производство кастомных изделий	Новые технические возможности старого оборудования
Производство изделий сложной формы	Быстрое изготовление изделий со сложной геометрией
Единоразовое производство	Производство деталей или оснастки в единственном экземпляре без проектировки и мех обработки

К выбору метода изготовления с помощью аддитивных технологий стоит подходить на основе следующих факторов:

- экономическая составляющая приобретения оборудования и материалов изготовления;
- производительность установки и технические особенности;
- класс шероховатости полученного изделия (как наружной поверхности, так и внутренней);
- технические возможности оборудования и способность воспроизведения мелких деталей;
- точность воспроизведения конечной заготовки;
- нужна ли после изготовления мехобработка;
- структура и прочностные характеристики получаемого объекта;
- доступность материалов для изготовления (порошков);
- ремонтпригодность и наличие зип;
- стоимость первичного обучения персонала для работы с аппаратом;

- 1) Анализ известных методов аддитивного производства, а также существующих материалов.
- 2) Исследование новых возможностей изготовления металлических изделий с помощью аддитивных технологий.
- 3) Сравнение деталей, изготовленных путем аддитивных технологий, с деталями изготовленными традиционными методами.
- 4) Подготовка вывода о необходимости использования аддитивных технологий в изготовлении металлических изделий.

В наше время на производственных предприятиях все чаще применяют аддитивные технологии. Методов аддитивного производства достаточно много, как и материалов для работы с ними. Основными характеристиками АТ являются быстрое прототипирование, изготовление деталей, которое невозможно воспроизводить традиционными методами, производство малых партий заготовок, производство сложных изделий. Исходя из этого аддитивное производство может применяться практически в любой сфере деятельности в зависимости от её потребностей.

Чтоб добиться результата и прийти к поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разобрать теоретические основы аддитивного производства, методику их работоспособности.
- Конкретизировать аддитивное производство в отдельные методы, выявить их специфику, плюсы и минусы.
- Разобрать экономическую модель влияния внедрения на производство, плюсы и минусы.
- Разработать методику просчета коммерческой модели.
- Разработать рекомендации к выбору и применению аддитивных технологий для внедрения в производство металлических изделий.
- Оценить возможности применения аддитивных технологий при изготовлении металлических изделий, а также их способность конкурировать с деталями, изготовленными традиционными методами.

2 Основные разновидности аддитивных технологий в изготовлении металлических изделий

2.1 Селективное лазерное спекание (SLS): технология и особенности применения

«Выборочное (селективное) лазерное спекание (SLS) – один из способов аддитивных технологий, который применяется для изготовления начальной модели конечного продукта и небольшого количества готовой продукции. Данная методика построена на послойном спекании слоев порошка с применением лазера большой мощности. Способ (SLS) иногда ошибочно инициализируют как процесс выборочной лазерной плавки (SLM). Главное отличие заключается в том, что селективное спекание позволяет осуществлять выборочную плавку, которая необходима для спекания материала, в то время как выборочная лазерная плавка представляет собой полную плавку, которая необходима, для изготовления монолитных моделей. Сам способ селективного (выборочного) лазерного спекания (SLS) был спроектирован Карлом Декардом и Джозефом Биманом в Университете Техаса, Остин в середине 1980-х годов. Данный проект финансировался Агентством передовых оборонных исследовательских проектов США (DARPA). В дальнейшем разработчики привлеклись в компанию DTM, созданную для вывода технологии SLS на рынок. Далее в двухтысячных годах DTM выкупила конкурирующая компания 3D-Systems. Последний патент технологии SLS был заявлен 28 января 1997 года. Срок его действия истек 28 января 2014 года, исходя из этого данная технология становится общедоступной. Также похожий способ изготовления запатентовал Р. Ф. Хаусхолдер в 1979 году, но он не смог получить рыночного использования. Сама же технология SLS подразумевает под собой способ использования одного или нескольких лазеров (обычно углекислотных) для спекания порошка до получения спроектированного трехмерного физического объекта (рис. 1)» [28].

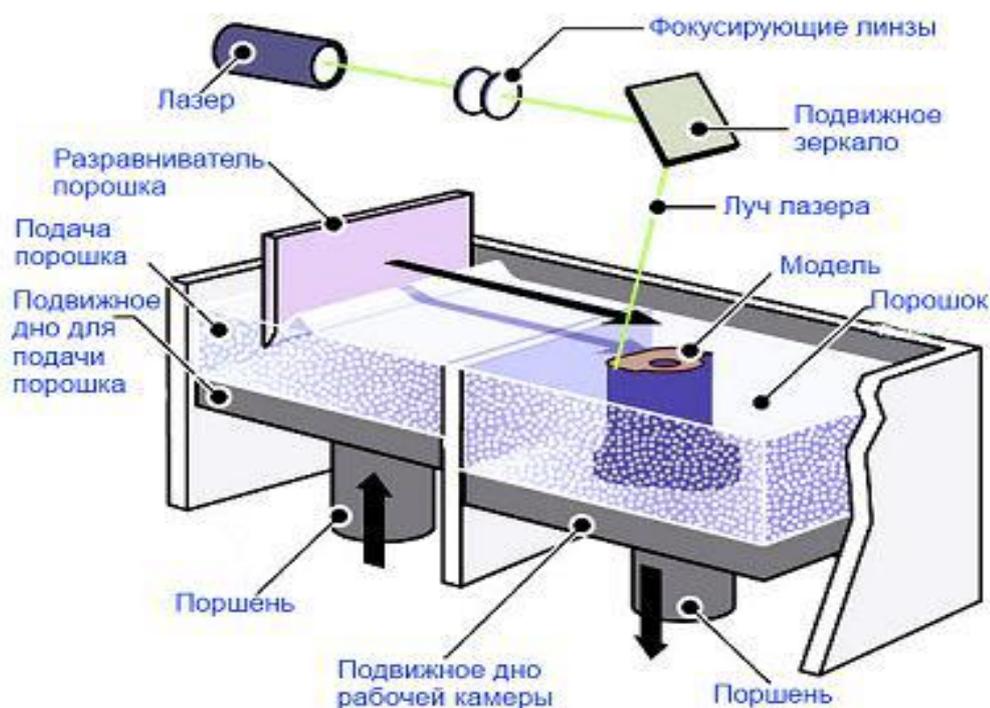


Рисунок 2 – Процесс селективного лазерного спекания

Для изготовления образцов используют пластики, металлы, порошки, керамику или стекло. Для создания заготовки с помощью селективного лазерного спекания на поверхность, подготовленную для выращивания начинается послойное нанесение порошка, который поступает из контейнера, отведенного для подачи, и равномерно распределяется с при помощи устройства, предназначенного для выравнивания подаваемого материала. [12] Далее в ход вступает лазер, луч которого, для наведения направляется движущимися зеркальными элементами и фокусирующей его линзой. По спроектированной заранее 3D-модели сканируется поверхность нанесенного слоя порошка и начинается формирование первичного слоя выращиваемой заготовки с помощью спекания. Таким образом спекание происходит только в тех областях, которые соответствуют текущему срезу и модели задуманного изделия. Когда сканирование завершено подвижная платформа камеры изготовления спускается на величину наносимого слоя материала, тем самым выполняя переход к последующему слою заготовки. Так же между слоями, если это необходимо, на поверхность сканирования добавляется материал (порошок), так как в процессе выращивания он расходуется. Подойдя к

верхней точке цифровой модели, процесс выращивания прекращается, площадка с готовой заготовкой поднимается после чего производится очистка от неиспользованного порошка. Так как плотность и прочность заготовки зависит не от продолжительности облучения, а от максимальной энергии лазера, в основном используются пульсирующие излучатели. Перед нанесением первого слоя порошок разогревается до температуры чуть меньше точки плавления материала, это облегчает процесс спекания. В отличие от таких методов аддитивного производства, как стереолитография, который мы разберем позже или создание модели с помощью послойного наплавления, селективное лазерное спекание не требует построения опорных структур. Навесные части заготовки поддерживаются с помощью стенок из неизрасходованного материала. Такой метод помогает добиваться сложных и практически неограниченных геометрически изготавливаемых моделей [28].

SLS-устройства также могут использовать однородный порошок (как при прямом лазерном спекании металлов), который получают с помощью барабанно-шаровых мельниц, но чаще всего используют композитные гранулы с тугоплавкими ядрами и оболочками из материалов с пониженными температурами плавления. Если сравнить данный метод с другими, то селективное лазерное спекание можно выделить высокой универсальностью с точки зрения подбора расходных материалов. В этот раздел можно включить различные металлы и сплавы (сталь, титан, драгоценные металлы, кобальт-хромовые сплавы и другие), также композиты и даже песчаные смеси. Сам способ селективного лазерного спекания получил широкое применение во всем мире за счет своей способности воспроизводить функциональные детали сложной геометрической формы и высокой прочности, даже несмотря на то, что данный метод изначально создавался как технология для быстрого прототипирования. В настоящее время все чаще технология селективного лазерного спекания стала использоваться для производства небольших партий готовых изделий (рис. 2) [28].



Рисунок 3 – Изделие, полученное методом SLS

«Достаточно неожиданным, но интересным применением SLS стало использование технологии для создания предметов искусства. В то же время твердофазное селективное лазерное спекание имеет ряд недостатков. Так для более полного протекания объемной и поверхностной диффузии, вязкого течения и других процессов, имеющих место при спекании порошка, требуется относительно длительная выдержка под лазерным излучением. Это приводит к длительной работе лазера и малой производительности процесса, что делает этот процесс экономически нецелесообразным. Помимо этого, возникают сложности с поддержанием температуры процесса в интервале между точкой плавления и температурой твердофазного спекания. Преимуществом твердофазного селективного лазерного спекания является возможность использования более широкого круга материалов для изготовления изделий» [28].

На основе всего вышесказанного можно говорить о том, что с помощью данной технологии можно выращивать небольшие изделия с различными физическими свойствами (повышенная прочность, гибкость, термостойкость и другие). [15]

SLS (Selective laser sintering) и SLM (Selective laser melting) Селективное лазерное спекание и селективное лазерное сплавление

Выборочное спекание или сплавление металлических или полимерных порошков при помощи одного или нескольких мощных лазеров.

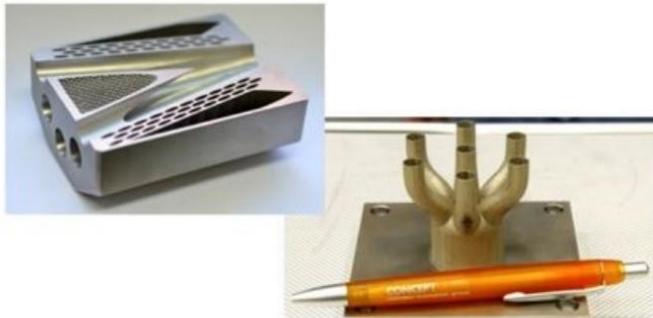


Рисунок 4 – Образцы, выращенные SLS

Изготовленные методом SLS детали не ограничены в области своего применения. Технология предлагает возможность изготовления подвижных механических деталей с большей точностью и прочностью, которые превосходят детали, изготовленные традиционными методами по своим механическим свойствам. Одним из направлений селективного лазерного спекания является создание готовых функциональных изделий небольшого размера.

«Механические свойства образцов, создаваемых данным способом, позволяют использовать их в качестве функциональных деталей. К минусам процесса изготовления на SLS - машине можно отнести время изготовления, обычно оно занимает несколько часов, что в некоторых случаях, в сравнении с традиционным методом в несколько раз медленнее. Но в то же время производство селективным лазерным спеканием не требует разработки и наладки процесса, а также специализированных инструментов и оснастки, в чем и заключаются основные преимущества данного метода. Бесспорно, можно сделать вывод, что без инструментальное производство экономически оправдано только тогда, когда существует нужда в одной или нескольких уникальных деталях, либо, когда изделие требует неповторимой

традиционными методами сложной геометрической формы. В пример таких деталей можно привести образцы для испытаний, оснастку, мелкосерийные изделия, имплантаты» [16].

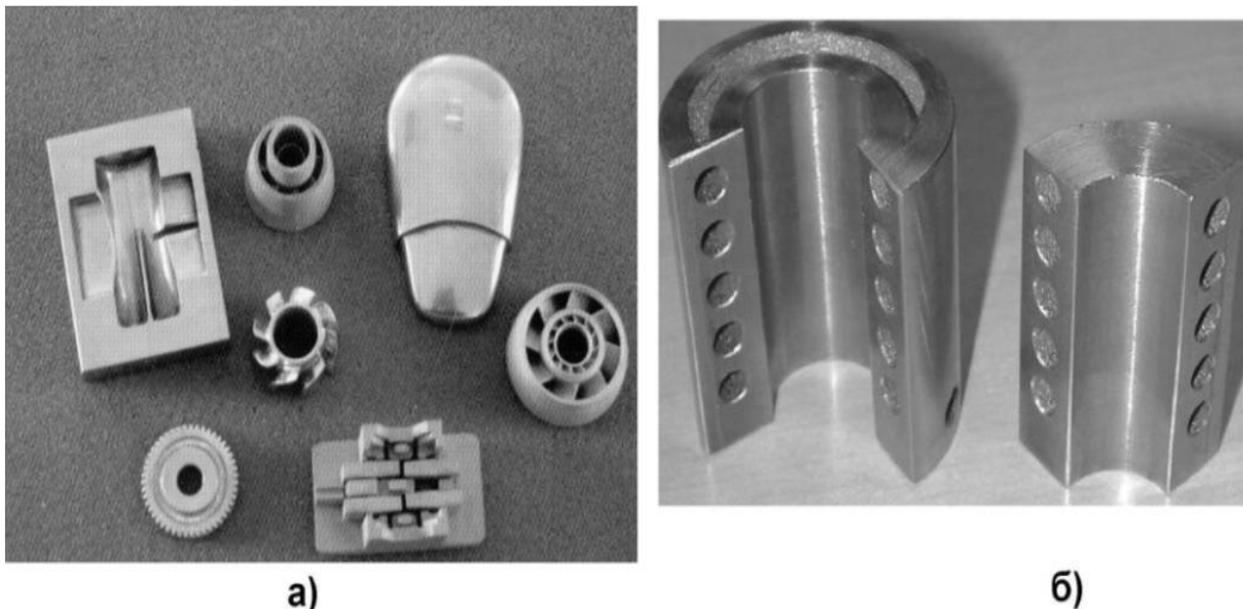


Рисунок 5 – Детали мелкосерийного производства из металлических порошков (а), деталь из металлического порошка со сложной структурой каналов охлаждения (б) [16]

К конкретным примерам применения можно отнести изготовление прототипа медицинского прибора «Зеленый лазер».

Исследователям было необходимо создать устройство, работающее в зеленом диапазоне длин волн с целью реализации прецизионной селективной лазерной фото деструкции сосудистых образований кожи и подкожной клетчатки. [9]

В данной работе при выборе способа изготовления корпуса устройства был применен способ селективного лазерного спекания (SLS), выбор которого обуславливается сложной геометрией корпуса и множеством формовок изнутри, а так же снаружи корпуса, которые в основном предназначены для крепления конструктивных элементов внутри прибора, учитывая вышеизложенные потребности можно сделать вывод о том, что изготовление традиционными методами производства в данном случае неоправданно, и экономически не выгодно так как за этим стоят большие трудозатраты и

сложность проектирования и изготовления как оснастки, так и самой сборной конструкции.

2.2 Селективное лазерное плавление (SLM)

Начало SLM-технологии

Selective Laser Melting (SLM), также известен как селективное (выборочное) лазерное сплавление [20] – технология по своему роду похожа на SLS (Selective Laser Sintering), но этот способ изготовления больше подходит для воспроизведения металлических изделий. Также большим отличием от SLS является сам процесс выращивания, данный способ подразумевает полное расплавление металлического порошка для получения конечного изделия.

«Создание технологии SLM началась в 1995 году с исследовательского проекта в институте лазерных технологий (ILT) Фраунгофера. Основоположниками технологии SLM можно считать исследователей ИЛТ — Вильгельма Майнерса и Конрада Виссенбаха, а также сотрудничавших с ними доктора Дитера Шварце и доктора Матиаса Фокеле. Технология разрабатывалась как один из методов 3D-печати металлических деталей» [27].

После появления данного способа изготовления в первое время, его использование не имело широкого распространения в основном из-за недостаточной мощности лазера, который необходим для плавления порошка, поэтому SLM зачастую не выходил за пределы научных лабораторий. В промышленности же применение технологии SLM началось в 2000-х годах.

В 2010-х годах, когда мощность лазеров, применяемых в SLM установках была значительно увеличена стало возможно выращивать более сложные и габаритные детали.

В настоящее время данная технология быстро развивается и набирает популярность, в связи с этим все больше компаний занимаются продажей, изготовлением и поставками установок для SLM. На Российском рынке это считается одним из самых распространённых технологий печати металлом, так как эта технология позволяет выпускать изделия, превосходящие по своим

характеристикам литейное и металлопрокатное производство. В связи с этим образовались и компании, производящие оборудование, такие как «Лазерные системы» с установками типа M250, M350 (рис.7), компания «Лазеры и аппаратура» с установкой типа МЛ-6, который создан для воспроизведения объемных металлических объектов с применением технологии SLM. В изготовлении металлических изделий на установках подобного вида предоставляется большой выбор порошков из металла, будь то порошок из нержавеющей стали, титана или алюминия (рис. 6). Это дает большой спектр применения технологии в разных сферах. Так же в установках подобного типа как правило присутствует, подогрев зоны выращивания, за счет чего снижаются механические деформации во время наложения слоев.

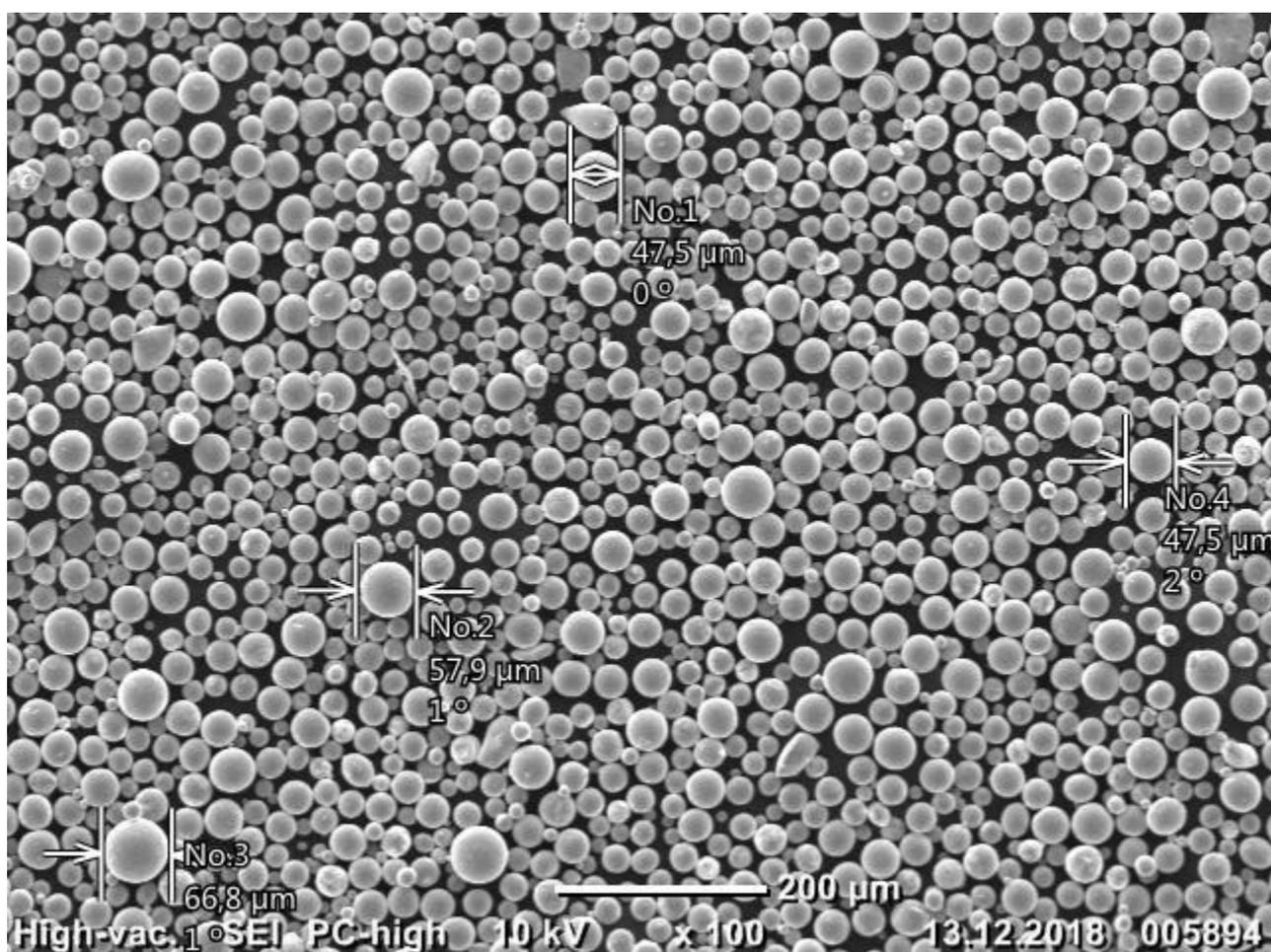


Рисунок 6 - Порошки, полученные методом PREP для аддитивных технологий

Селективное лазерное сплавление (Selective laser melting, SLM) – можно назвать одним из самых сбалансированных методов аддитивного производства в соотношении цена/качество. Данный метод, реализуется за счет лазеров высокой мощности и позволяет создавать 3Д модели путем сплавления металлического порошка. Смысл SLM, как и всех аддитивных технологий заключается в послойном воспроизведении детали, в котором сплавление происходит за счет лазерного излучения.

«Сам процесс выращивания в данном способе начинается с разработки цифровой модели, а в дальнейшем ее разбиения на слои толщиной от 20 до 100 мкм. После, с помощью программного обеспечения, вводятся характеристики и настройки заготовки такие как размеры подложки для работы, мощность лазера, скорость сканирования поверхности с помощью датчиков и.т.д. В дальнейшем данные передаются на так называемый принтер для начала выращивания» [2].

«Из бака, в котором содержится металлический порошок при помощи шнека исходный материал порционно подается в дозатор (рекоутер). Дозатор перемещаясь в горизонтальном направлении доставляет металлический порошок на платформу построения и при помощи силиконового ножа разравнивает его. Излишки металлического порошка попадают в передний и задний баки. После того как слой порошка выравнен в работу вступает лазер и при помощи системы зеркал выборочно сплавляет металлический порошок. При воздействии лазерного излучения порошок нагревается, а при приложении необходимой энергии, плавится образуя жидкую ванну. Затем жидкая ванна быстро затвердевает тем самым образуя фрагмент детали. После того как селективное лазерное сканирование текущего слоя закончено, платформа построения при помощи поршня опускается по оси Z на величину слоя, и насыпается новый слой порошка. Процесс является циклическим и повторяется до тех пор, пока изделие не будет полностью закончено» [2].

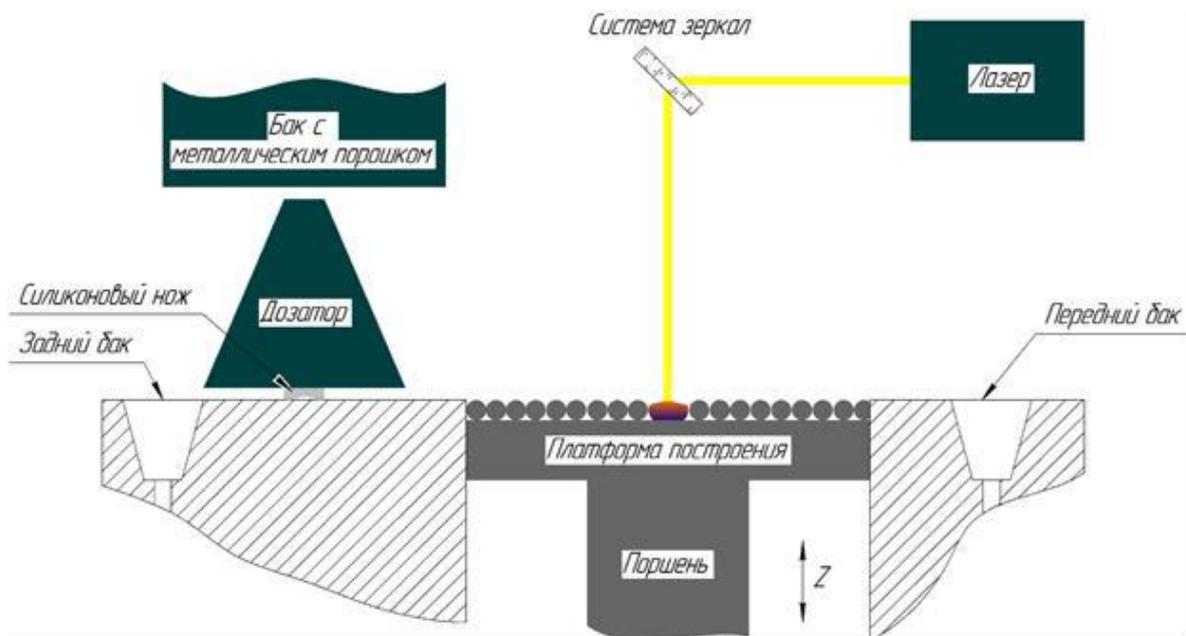


Рисунок 7 – Принципиальная схема технологии

SLM в сравнении с SLS считается более новым и перспективным методом изготовления, так как он обеспечивает полное сплавление частиц и позволяет изготавливать более прочные и надежные детали нежели SLS, в методике которого заложено лишь частичное сплавление порошка, которого простым языком достаточно только для сплавления в единый элемент, но не построения монолитного изделия. Также к значительным плюсам данного метода можно отнести открытое ПО на некоторых установках, по типу M350 от АО «Лазерные системы» (рис. 8).



Рисунок 8 – Общий вид установки M350

Это позволяет вносить свои, особые настройки оборудования для каждого режима и работать с разного типа порошками для изготовления деталей. Отсутствие кислорода по большей мере в камере выращивания позволяет работать даже с такими материалами как титан и.т.д.

«Также стоит отметить, что продукция, производимая по технологии SLM, имеет, как правило, уникальную структуру столбчатого зерна [37], которая необычна для изделий, изготовленных традиционными методами литья иликовки. Готовые детали обладают мартенситной структурой [34]. После термообработки микроструктура изменяется и состоит из более толстых пластинчатых зерен [35], что делает ее похожей на микроструктуру материала в традиционных процессах обработки» [35].

В стенах Калининградского государственного технического университета были проведены исследования в которых сравнивались механические свойства и проверялись прочностные характеристики выращенных образцов с помощью технологии SLM с характеристиками основного металла заявленными заводом изготовителем.

«В качестве исследуемых материалов выбраны образцы типа III по ГОСТ 1497-84 (Металлы. Методы испытаний на растяжение) из стали 316L (ана-лог 03X16H15M3), которые были разбиты на 2 группы по 4 единицы. Первая группа печаталась с вертикальным расположением слоев, вторая – с горизонталь-ным. Синтез производился на установке Concept Laser M2 по технологии SLM/LaserCusing. Внешний вид образцов после испытаний представлен на рис. 9» [10].



Рисунок 9 – Горизонтальный и вертикальный образец после испытаний

«В требованиях STM A240 сказано, что минимальный предел временного сопротивления для проката из стали 316L составляет 485 МПа.

В представленном эксперименте минимальное полученное значение – 632 МПа, что говорит о соответствии изделий, произведенных по технологии SLM, требованиям стандарта ASTM A240. В случае использования рекомендованного предела текучести (170 МПа) и предела временного сопротивления (485 МПа) учет анизотропии прочностных свойств не требуется» [10].

Исходя из данных экспериментов, проведенных в КГТУП, замеров геометрии и требований третьего класса ГОСТ 26645-85 видно, что образцы полученные с помощью SLM не только проходят измерительный контроль без отклонений, но так же обладают большими прочностными характеристиками, чем образцы изготовленные из тех же материалов традиционными методами.

Выводом их исследовательской работы, на основе полученных экспериментальным путем характеристик является то, что SLM вполне подходит для замены традиционной технологии литья и использованием коррозионных сталей с сохранением нормативных прочностных характеристик.

Данное исследование вместе с описанными характеристиками производства процесса и его особенностей помогает нам более подробно разобраться в вопросе аддитивного производства и сделать правильный выбор при подборе метода для специфики каждого изделия.



Рисунок 10 – Пример деталей, изготовленных на оборудовании

Но также как у всего в этом мире, у данного способа есть и недостатки, первым недостатком можно назвать то, что SLM это о достаточно небольших изделиях, так как здесь мы так же упираемся в размеры камеры, в которой происходит процесс выращивания, на данный момент от этого никуда не уйти.

Вторым пунктом можно назвать то, что не получится добиться изделия путем долгого ряда экспериментов и подбора технологических режимов, так как в процессе изготовления используются дорогостоящие материалы. Данный способ перед изготовлением всегда требует проектировки

математической модели, в отличие от традиционных методов изготовления, модель которой нужно разработать как реалистичной, так и простой.

Так же для подбора режима нужно тщательно подбирать материалы для конечного изделия, так как температура плавления при изготовлении часто превышает температура фазового перехода и конечное изделие может просто на просто потерять свои мех свойства.

Помимо всего прочего, как и при любом производстве

К примерам применения можно отнести изготовление заготовок ДСЕ (деталей и сборочных единиц) с помощью технологии селективного лазерного сплавления, так как металлические порошки при правильном использовании достаточно стабильное сырье, поэтому они нашли применение в производстве двигателей, в том числе газотурбинных на оборонных предприятиях РФ.

«На данный момент времени известен способ изготовления деталей послойным лазерным сплавлением металлических порошков жаропрочных сплавов на основе никеля. В качестве металлического порошка в данном способе используется порошок хромсодержащего жаропрочного сплава на основе никеля с содержанием кислорода менее марки ЭП648» [21].

«Изготовление происходит с помощью нанесения слоев порошка на подложку, за счет чего происходит формирование первого слоя детали посредством селективного сплавления порошка лазерным лучом, далее выполняется повтор вышеуказанных операций для формирования последующих слоев детали. После чего проводят горячее изостатическое прессование в среде аргона и термическую обработку полученной детали. Металлический порошок хромсодержащего жаропрочного сплава на основе никеля предварительно подвергают газодинамической сепарации с последующей дегазацией. Процесс сплавления порошка лазерным лучом проводят в защитной атмосфере азота. Перед горячим изостатическим прессованием деталь помещают в среду электрокорунда и стружки титана или титанового сплава таким образом, чтобы деталь и указанная стружка не соприкасались» [21].

Применение данного способа в изготовлении функциональных заготовок ДСЕ зарекомендовал себя положительно, чего нельзя сказать о порошке марки ЭП648.

«Так как недостатком изготовления деталей этим порошком сопровождается высоким содержанием хрома в сплаве, что обуславливает низкую фазовую стабильность и недостаточно высокую длительную прочность синтезированного материала. А также необходимость проведения горячего изостатического прессования (ГИП) с последующим старением сплава» [21].

«Исходя из этого были проведены работы по подбору материала для выращивания Самарским институтом, и даже запатентован метод изготовления. Опытным путем наши коллеги пришли к тому, что лучше всего для изготовления ДСЕ подходит сплав ХН58МБЮ-ИД так как его применение повышает механические свойства заготовок и плотность синтезированного материала за счет применения оптимальных технологических параметров обработки, а также уменьшения уровня остаточных напряжений в заготовках и, как следствие, позволяет добиться высокой точности геометрических размеров и расположения поверхностей с существенным повышением коэффициента использования материала (КИМ) заготовок ДСЕ» [21].

Тем самым опыт наших коллег напрямую коррелирует с исследованием нашей работы и дает понять, что методы аддитивного производства в данное время очень востребованы в современной индустрии производства металлических изделий.

2.3 Электронное лучевая плавка (ЕВМ): сравнительный анализ с другими методами.

ЕВМ (Electron-Beam Melting) – электронно-лучевое плавление – аддитивное технология, при которой слой металлического порошка выборочно сплавляется при помощи электронно-лучевой пушки. [3]

Развитие электронно-лучевой плавки (EBM) имеет свое начало в Швеции конца 20 века, когда инженеры из компании Arcam AB начали исследования в области аддитивного производства металлических деталей.

Свои основы данный метод взял из электронно-лучевой сварки. В технологии электронно-лучевой сварки заложено расплавление сварочного материала в вакуумной или почти вакуумной среде электронными лучами большой мощности. За счет электронного луча происходит быстрое сканирование для формирования зоны плавления и подачи металлической проволоки, отдаленно можно назвать этот процесс моделированием, чтобы потом проволока пошагово попадала в зону плавления по ранее отрисованной модели и создавала слой. Если объяснять простым языком, то луч плавит металлическую проволоку по модели, за счет чего из расплавленного металла образуется слой. Далее каждый слой друг за другом соединяется между собой и получается трехмерный объект.

Эта технология разработана совместно с Массачусетским технологическим институтом (MIT) и «Pratt & Whitney» в 1990-х годах и используется для производства больших дисков турбин.

На этом развитие метода не остановилось и в 1997 году компания Arcam AB представила первый аппарат электронно-лучевой плавки собственного производства, который был доступен производству с коммерческой точки зрения. Аппарат назвали Electron Beam Melting Machine (EBM), что в переводе (электронно-лучевая плавильная машина) и представили, как новый способ для производства металлических деталей высоких прочности и сложной формы.

С течением времени технология EBM продолжала дальше развиваться и совершенствоваться так как считалась новым, перспективным направлением в области аддитивного производства металлических изделий. Важными этапами в ее развитии и дальнейшем продвижении было улучшение качества поверхности изделий за счет доработок программы и технологии, расширение ассортимента доступных материалов по мере развития металлургии и

повышение производительности аппаратов с помощью увеличения их мощности и внедрения новых компонентов..

Сегодня технология электронно-лучевой плавки (EBM) широко применяется в различных отраслях промышленности, включая авиацию, медицину, автомобилестроение и другие. Ее использование позволяет создавать детали с высокой прочностью и сложной геометрией, что делает ее незаменимой для производства высокоточных и критически важных компонентов.

Работоспособность данной технологии в первую очередь построена на вакууме и вакуумных камерах, в данном способе размер изготавливаемых деталей напрямую зависит от размеров камеры, так же создавая еще одну прямую зависимость размера от скорости изготовления, так как чем больше камера, тем дольше в ней создается вакуум.

Как и все технологии аддитивного производства изготовление методом EBM начинается с построения 3D модели, далее модель разбивают на слои указывая их толщину, ширину и направление построения для получения информации о двухмерной плоскости. Далее на рабочую плоскость насыпают небольшой слой порошка и с помощью направления электронного луча производят его сканирование и разогрев. Затем по отсканированным данным металлический порошок слой за слоем плавится в отведенных для построения участках плоскости, в то время как порошок не находящийся в областях сканирования, так и остается в состоянии подогретого предварительного спекания.

После окончания построения каждого слоя и его обработки, платформа на которой находится выращиваемое изделие отдалается от механизма подачи электронного луча на ту высоту, которая ранее была задана программой и соответствует толщине каждого наложенного ранее слоя порошка на изделие. Процесс в виде подачи заданного количества порошка, его предварительный подогрев, плавка по построенной модели, и опускание платформы в конце цикличен, и не прекращается до того момента, пока программа не будет закончена, а изделие не будет построено. После окончания построения в

камере восстанавливают атмосферу (убирают вакуум), далее деталь извлекают из камеры и передают на завершающую мехобработку если это необходимо (очистка от налипшего порошка, срезка и зачистка опор, полировка изделия и.т.д.) В конечном итоге в результате выращивания должна появиться готовая деталь, готовая для установки в агрегат, или отдельный узел механизма или устройства.

К преимуществам технологии электронно-лучевого изготовления можно отнести множество факторов, например, если сравнивать этот метод с технологией электронно-лучевого изготовления, то использование в данном методе электронного луча характеризуется низким коэффициентом отражения, а также большей глубиной спекания.

Луч достаточно точно перемещается с помощью магнитного поля за счет чего значительно ускоряет процесс, а также позволяет выполнять работы с материалами, которые обладают большой температурой плавления и позволяют добиваться более высокой плотности сплавляемых частиц и лучшей эффективностью во время формирования.

Работа технологии в вакуумной среде дает данному способу как плюсы, так и минусы. Вакуум- это более чистая среда изготовления образцов таким способом, так как тепло в нем передается медленнее, что способствует снижению температуры при изготовлении, и как итог наделяет конечный продукт более низкими внутренними напряжениями, так же в вакууме возможно изготовление из высоколегированных порошков.

В процессе формования применяется нагрев порошкового слоя; после формования всей сцены печати происходит медленное охлаждение в камере построения. Изделия отличаются низким внутренним напряжением, что позволяет изготавливать хрупкие и подверженные растрескиванию детали, крупные технические элементы конструкций, тонкостенные изделия и мелкие стержнеобразные пустотелые элементы конструкций.

«После предварительного нагрева и спекания порошковый слой обретает определенную прочность, что позволяет минимизировать использование поддержек для изготавливаемой детали и за счет наслаивания

изделий и изготовления партиями повысить эффективность производства» [24].

В конечном итоге мы получаем изделие высокой плотности и прочности, с характеристиками, превосходящими по своим свойствам образцы, изготовленные из того же материала с применением традиционных технологий.

Также данный метод хорошо подходит для быстрого процесса изготовления деталей больших габаритных размеров, при условии готовности установки, а именно (готовый вакуум). Скорость самого выращивания в данном методе превосходит остальные, так как для сплавления используется высокая энергия электронного луча, что и дает преимущество.



Рисунок 11 – Лопатки газотурбинного двигателя, изготовленные методом ЕВМ

К минусам изготовления с использованием безвоздушной среды можно отнести способы и время ее создания, ведь для воспроизведения вакуума искусственным путем помимо самой установки для изготовления деталей и образцов, в ней должна находиться герметичная камера, в которой этот вакуум

будет создаваться, а также насосы для откачки кислорода перед началом процесса и последующей закачки по его окончанию. Данные факторы в первую очередь значительно влияют на стоимость изготовления для производителя, а в дальнейшем на стоимость закупки для потребителя, будь то частная фирма или же большое предприятие. Наличие насосов и вакуумных камер влияют на габариты установки и ее размещение.

Так же минусом проведения процесса выращивания в безвоздушной среде является наличие газовых молекул, в некоторых случаях их наличие способствует рассеиванию электронного луча. И крайним, но серьезным минусом является рентгеновское излучение, которое создает большую опасность для операторов управляющих установкой.

В каком-то плане страдает и точность, если ставить ее в сравнение с методом SLM точность данной технологии сильно проигрывает, особенно на образцах со сложной внутренней или же внешней геометрией так как луч, которым происходит сплавление имеет большую ширину. Часто после выращивания у образцов, изготовленных данным способом получается грубая структура из-за природы процесса расплавления и затвердевания порошка, что вынуждает прибегать к мех обработке.

Данный метод не универсален и имеет ограничения в доступности материалов для выращивания, учитывая все аспекты оборудования оно считается дорогостоящим и стоимость одной установки может достигать 250 000 долларов, а стоимость материалов от 400 долларов за кг.

В сравнении с технологией DLD где объёмы камер за ту же стоимость будут достигать размеров 800 x 400 x 500 мм. В EBM принтере средний размер камеры 350 x 350 x 380 мм.

Таблица 3 - Сравнение технических характеристик SLM и EBM установок аддитивного производства [29]

Модель	A2X	FS271M
Стоимость, млн. руб	55	28,5
Общие сведения		
Производитель	Arcam AB	Farsoon High-tech Co., Ltd
Страна происхождения	Швеция	КНР
Применение	Промышленный	Промышленный
Технические характеристики/параметры построения		
Технология печати	EBM	SLM
Источник излучения	Электронно-лучевая пушка	Yb-волоконный лазер
Скорость построения, см ³ /ч	55 – 80	5 – 20
Размер области построения, мм	200 · 200 · 380	275 · 275 · 320
Количество лучевых пятен	1 – 100	1
Мощность пучка, Вт	50 – 3500	500
Минимальный диаметр пятна луча, мкм	200	20
Шероховатость готовых изделий	Ra25/Ra35	
Точность построения, мкм	До 130	До 200
Уровень вакуума, мбар	5 · 10 ⁻⁴	-
Защитный газ	Гелий (опционально)	Аргон, азот
Расход защитного газа л/мин	-	~ 3
Скорость сканирования, м/с	8000	15
Гарантированная точность деталей, мм	± 0.13 – ± 0.2	± 0,2
Поддерживаемые материалы	Металлические порошки: Ti6Al4V (Grade 5) Ti6Al4V ELI (Grade 23) Titanium CP (Grade 2) ASTM F75 CoCr IN718	Металлические порошки: 316L, 17-4PH, IN625, IN718, AlSi10Mg Ti6Al4V, Co-Cr, 18Ni300, Cu90Sn10, Ta, W

В подведении итогов сравнения EBM и SLM методов, первым можно выделить то, что аппараты для SLM по ценовой политике позиционируются как более доступные для потребителя, на них можно работать с большим, чем на EBM количеством материалов (порошков). Для работы SLM не требуется защита в виде экранирования, так как в установках такого типа используется менее опасный для оператора источник энергии для сплавления. Важный параметр превосходства конкурента указан в таблице 3, а именно возможность выбора абсолютно любого из доступных материалов (сплавов, порошков) для изготовления.

В свою очередь метод EBM сильно отличается от SLM по своей производительности, а также скорости воспроизведения больших деталей за сравнительно малые промежутки времени, данная характеристика является отличительной и выдвигает технологию вперед относительно конкурентов. Сам способ изготовления в вакууме позволяет добиваться малых внутренних напряжений, за счет чего в некоторых случаях не возникает необходимости производить термообработку после выращивания.

В заключение, технология EBM предлагает значительные преимущества для аддитивного производства металлических конструкций, особенно в областях, требующих высокой прочности и быстрой реализации больших размеров. Однако, как и любая технология, она имеет свои ограничения и недостатки, которые необходимо учитывать при принятии решения о ее использовании.

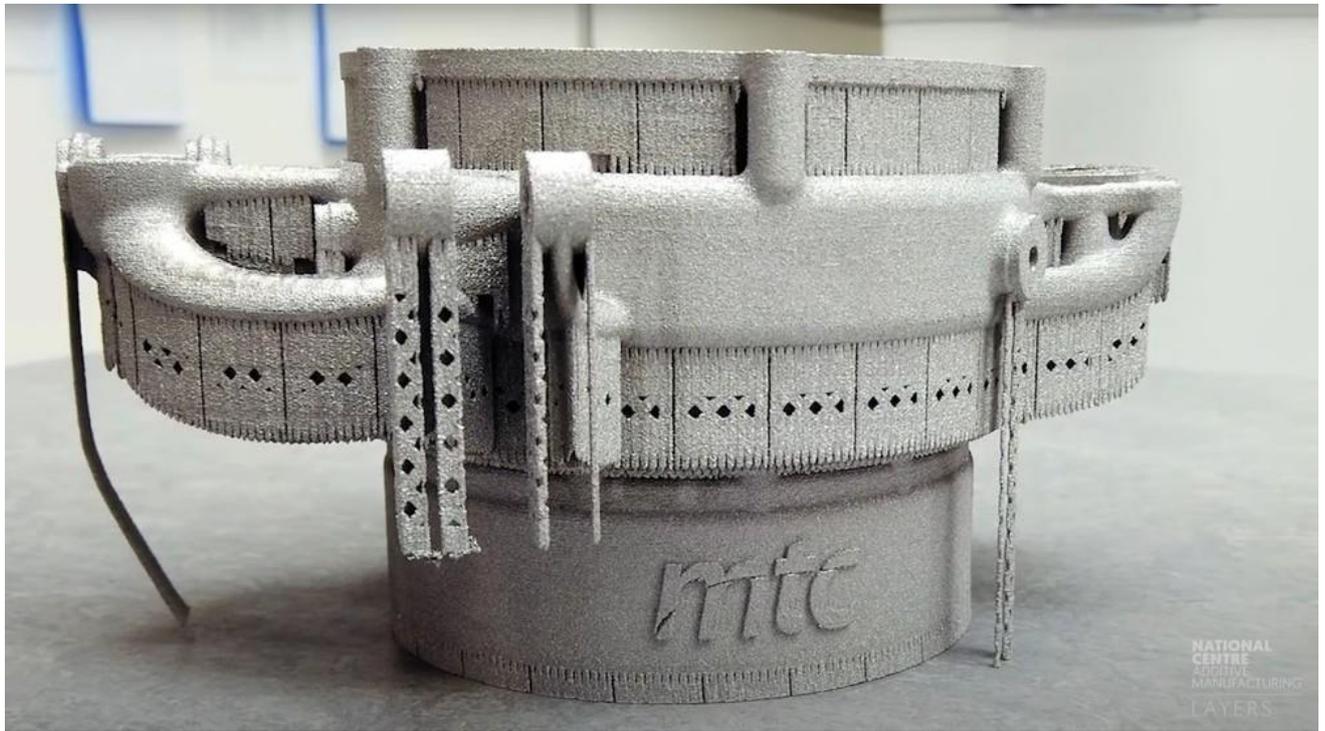


Рисунок 12 – Деталь, выращенная с помощью технологии EBM

2.4 Прямое лазерное выращивание (DLD) в изготовлении металлических изделий.

Технология прямого лазерного выращивания (в дальнейшем ПЛВ или DLD - direct metal deposition) – способ также является ярким представителем аддитивного производства реализован по принципу прямого подвода энергии вместе с материалом в зону выращивания.

Прямое лазерное выращивание является не простым процессом, работоспособность которого напрямую зависит от множества различных факторов и параметров, все они влияют на конечно получаемый результат, связаны они с изготовлением за счет прямого подвода порошка и источника энергии.

Цифровизация производства приводит к сокращению материальных, временных и финансовых затрат. Полная автоматизация процесса позволяет отказаться от вмешательства персонала в процесс и предотвратить дефекты из-за их недостаточной квалификации. Эти преимущества приводят к увеличению эффективности процесса в 10 раз и снижению стоимости изготовления деталей в 3-5 раз. [7]

Таблица 4 – DLD технологические параметры и обозначения.

№	Параметр	Буквенное обозначение	Ед. изм.
1	Ширина трека	T	mm
2	Мощность тепловой установки (лазера)	p	Вт
3	Диаметр пятна контакта	Ø	mm
4	Шаг (высота) слоя	H	mm
5	Расход материала на слой или деталь	G	g/min
6	Скорость вращения	D	%
7	Расход газа для транспорта.	C	л/мин
8	Скорость воспроизведения (выращивания)	V	mm/сек
9	Расход газа в сопле (для защиты)	C	л/мин
10	Скорость вращения (питателя)	S	%

Фундаментальным отличием технологии ПЛВ от традиционных методов металлургии является возможность создания изделий с градиентными свойствами. [25]

«В качестве расходных материалов используются металлопорошковые композиции (МПК) требуемых химических составов, получаемые по технологии центробежного распыления, которое реализуется за счет оплавления торца быстро вращающейся заготовки. Источником нагрева служит луч лазера» [26].

Целью работы [26] являлось исследование качества металлопорошковой композиции из жаропрочного сплава ЭП648 системы Ni—Cr—W—Mo, а также влияния параметров DMD-технологии на структуру и свойства опытных образцов.

В качестве расходного материала использовали МПК с размером частиц 40—150 мкм из жаропрочного сплава ЭП648 производства АО «Композит» (Россия, г. Королев).

Таблица 5 – Режимы прямого лазерного выращивания образцов из сплава ЭП648 [26].

Параметры ПЛВ	Режимы			
	1	2	3	4
Мощность лазерного излучения (ЛИ) P , Вт	1000	1200	1400	1600
Диаметр пятна ЛИ в зоне наплавки, мм	2,7	2,7	2,7	2,7
Расход транспортирующего газа, л/мин	10	10	10	10
Вращение диска питателя, %	90	95	95	95
Вращение устройства перемешивания питателя, %	40	40	40	40
Скорость наплавки v , мм/с	40	40	45	38
Шаг слоя, мм	0,4	0,4	0,4	0,4
Погонная энергия, кДж/м	25	30	31	42

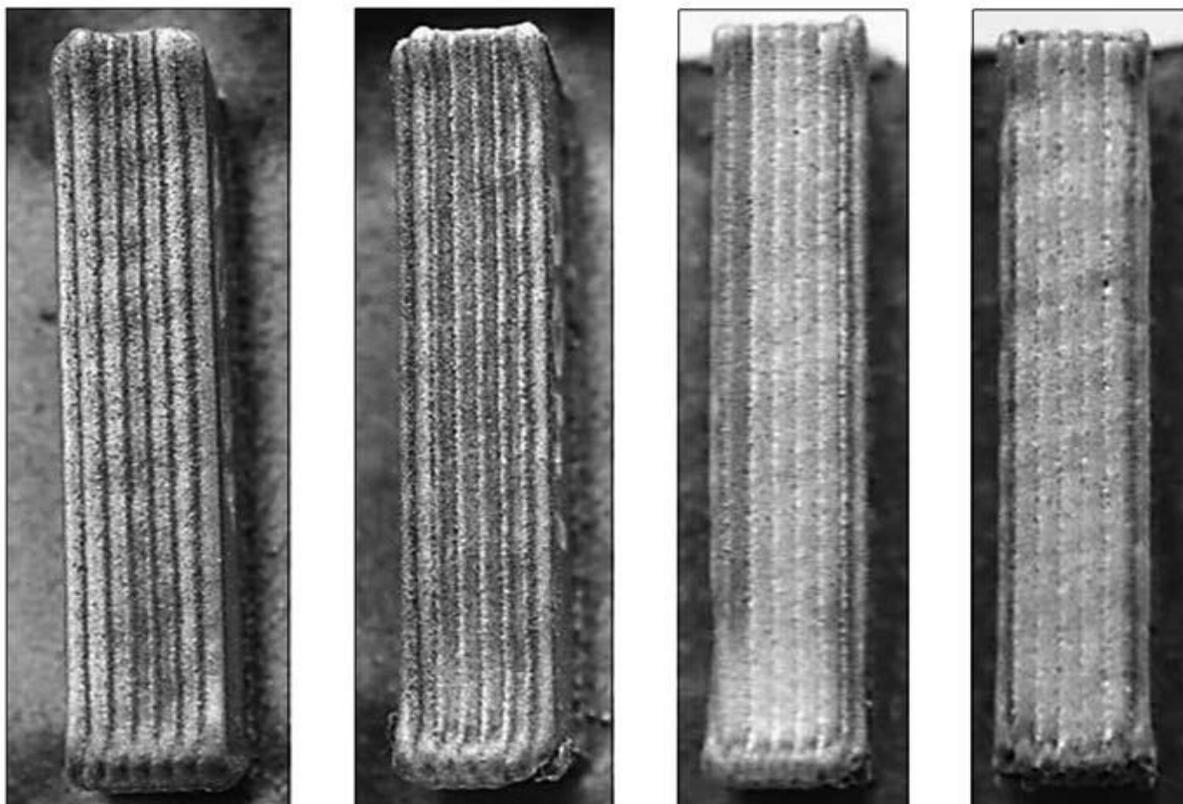


Рисунок 13 – Внешний вид выращенных образцов на 4 различных режимах

«Опытами данной работы установлено, что химический состав, размеры частиц, текучесть, насыпная плотность и влажность исходной МПК из жаропрочного сплава ЭП648 соответствует требованиям ТУ 136-225-2019. Форма частиц — сферическая, с однородной структурой. При визуальном осмотре посторонних включений в МПК не обнаружено» [26].

«При исследовании образцов, полученных методом ПЛВ на разных режимах выращивания, установлено, что наибольшее количество дефектов (скопления мелких усадочных пор и несплавления) имеет образец 1 (мощность ЛИ $P = 1000$ Вт, скорость наплавки $v = 40$ мм/с). При этом дефекты имеют максимальные размеры. Наименьшее количество подобных дефектов выявлено в образцах 3 и 4 ($P = 1400$ и 1600 Вт, $v = 45$ и 38 мм/с соответственно). В этом случае формируется наиболее однородная структура зон лазерной наплавки из-за полного плавления частиц порошка и растекания расплава. В образце 4 ($P = 1600$ Вт, $v = 38$ мм/с) по сечению обнаружены трещины, расположенные по границам субзерен в центре треков. Их образование,

вероятнее всего, связано с перегревом материала из-за повышенной мощности лазерного излучения и накоплением высоких внутренних напряжений от предыдущих выращенных слоев. В микроструктуре всех наплавленных образцов (1—4) просматривается трековая структура, типичная для материалов, полученных методом ПЛВ. Высота треков в образцах находится в интервале значений $0,39 \div 0,44$ мм, а расстояние между соседними треками — $1,67 \div 1,95$ мм. Микротвердость всех полученных образцов практически одинаковая и составляет $270—310$ HV» [26].



Рисунок 14 – Общий вид установки прямого лазерного выращивания

Таким образом из работы Самарского университета, качества получившихся на разных режимах образцов и результатам исследований можно сделать вывод, что технология DLD вполне подходит для работы с жаропрочными никелевыми сплавами по типу ЭП 648, экспериментальным методом был подобран оптимальный режим под номером 3 представленный в таблице 5, который обеспечивает характеристики и структуру соответствующие требованиям ТУ 136-225-2019 режим 3 и сама технология формируют слои без трещин и минимизируют количество и размеры дефектов, а время изготовления деталей будет существенно превосходить традиционные методы производства, что подтверждает успех исследования и эффективность применения технологии в изготовлении газотурбинных двигателей в промышленном масштабе, а также доказывает перспективность применения метода в производстве металлических изделий.

Работа по внедрению аддитивных технологий в лице DLD проводилась и на предприятии «ОДК - Кузнецов», там в силу трудоемкости исполнения встал вопрос альтернативных способов изготовления наружного кожуха «МЭКС», в момент постановки вопроса я работал на предприятии, и мы с коллегами стали изучать варианты воспроизведения кожуха иными путями изучая различную литературу и технические особенности оборудования.

В конечном итоге из оценки технических возможностей и наличия установок на предприятии был выбран способ ПЛВ.

Целью работы являлось определить характеристики и механические свойства образцов полученных с помощью прямого лазерного выращивания с применением порошка ХН50ВМТЮБ (ЭП648) для подбора режимов выращивания заготовок на УТЛВ и рассмотрения целесообразности их изготовления.

Наружный и внутренний кожуха малоэмиссионной камеры сгорания Газотурбинного Двигателя изготавливаются за счет сваривания вместе нескольких раскатных заготовок.

Основным недостатком данной технологии, учитывая использование в КС, трудно деформируемых и весьма дорогостоящих жаропрочных сплавов,

является низкий коэффициент использования материала. Рассматриваемая в данной работе технология ПЛВ позволяет не только увеличить коэффициент использования материала, но и в разы сократить трудоемкость и время изготовления деталей. [17]

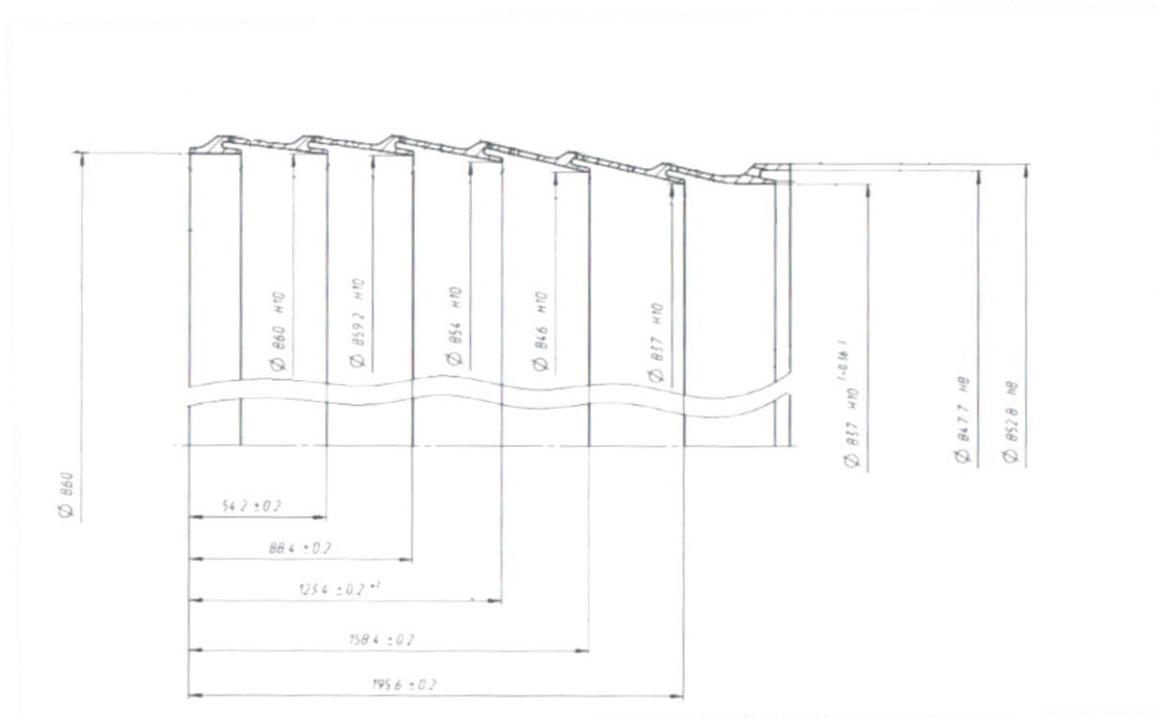


Рисунок 15 - Эскиз кожуха

При использовании базового способа изготовления кожуха время его воспроизведения с учетом всех технологических операций и особенностей составляет примерно 6 месяцев.

Время изготовления кожуха с применением ПЛВ составит 1 месяц, где на выращивание заготовки уходит примерно 90 часов непрерывной работы УТЛВ. Таким образом, аддитивные технологии позволяют сократить один из самых важных ресурсов для предприятия – время изготовления. [17]

Способ выращивания DLD в данном случае был выбран не спроста, так как с помощью него можно быстро воспроизводить масштабные объекты. В данном методе по сравнению с SLM так же страдает точность, но если спроецировать данный способ на производство габаритных изделий без сложных внутренних и наружных форм, то его применение станет в разы эффективнее, чем другие методы аддитивного производства.

Таблица 5 – Технологические параметры DLD.

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения
Мощность лазера 2	P	Вт
Диаметр пятна лазера 3	Ø	мм
Скорость выращивания 8	V	мм/сек
Скорость вращения диска питателя 10	S	%
Скорость вращения мешалки питателя 6	D	%
Расход транспортирующего газа 7	C	л/мин
Расход защитного газа в сопле 9	C	л/мин
Общий расход МПК 5	G	г/мин
Шаг слоя 4	h	мм
Ширина трека 1	t	мм

Первоначальные режимы выращивания подбирались на основании стандартных режимов, рекомендованных производителем установки лазерного выращивания никелевых сплавов – Inconel 625 и 718.

После получения первых результатов эксперимента, основываясь на данных микроструктуры образцов, посредством качественного и количественного анализа дефектов, производилась корректировка режимов и новый эксперимент. При разработке процесса выращивания форма заготовки была оптимизирована таким образом, чтобы стенки заготовки были вертикальными. Для экономии МПК вспомогательная часть выращивается из просеянного вторичного порошка. [17]

Таким образом в процессе данной работы установлено, что метод DLD имеет потенциал для получения крупногабаритных заготовок, проведен анализ образцов по макроструктуре, составлен план эксперимента и разработана укрупненная методика испытания режимов с целью паспортизации.

Исходя из данных работы моих коллег с производства использование технологии прямого лазерного выращивания на примере изготовления кожуха МЭКС позволяет сократить количество технологических операций примерно

в 5-7 раз, а соответственно снизить трудоёмкость и время изготовления, не теряя механических характеристик готового изделия.

Соответственно из приведенных выше примеров можно сделать вывод, что ПЛВ это метод, который может заменить традиционное производство массивных металлических изделий, не теряя механических свойств, в которых не важна точность заготовки до микронов, но важно быстрое воспроизведение объекта и снижение трудоемкости изготовления.

Рассмотрев основные направления аддитивного производства появляется понятие того, что каждый метод стоит выбирать под конкретное направление и конкретные задачи.

Также становится понятно, что самым перспективным, экономически выгодным и сбалансированным методом для аддитивного производства не сильно габаритных деталей со сложной геометрической или внутренней формой и структурой является технология SLM. И вдобавок метод селективного лазерного спекания является ярким представителем быстрого прототипирования. По методу селективного лазерного спекания можно подытожить, что основными направлениями способа являются: прототипы для оценки проекта и работоспособности изделия, модели для дальнейшего производственного процесса, готовые функциональные изделия небольших габаритов. В каждой из этих трех групп технология находит широкое применение. И вдобавок метод селективного лазерного спекания является ярким представителем быстрого прототипирования.

Каждый способ имеет свои достоинства и недостатки в виде технических особенностей, механических свойств, стоимости, шероховатости изготовленной поверхности и т.д.

В конечном итоге аддитивные технологии как вид производства имеет огромные перспективы для еще более глобального внедрения в изготовление металлических изделий создания нового, и улучшения старого.

3 Разработка рекомендаций по выбору и оценке необходимости внедрения аддитивных технологий в изготовление металлических изделий

3.1 Влияние аддитивных технологий на экономическую составляющую производства металлических изделий в промышленности.

Нормативная гибкость технологии, которая дает возможность изменять параметры геометрии конечного изделия, взаимодействие с заказчиками и способность прямого изготовления позволяют выигрывать с помощью уменьшения сроков производства, затрат и уменьшения операций технологического процесса. Даже с учетом потенциала, преимуществ и выгоды процесса АТ могут возникать и трудности, а именно в целесообразности их применения по отношению к мелкосерийному производству так как к конкретным моделям нужно подбирать свою технологию. [31].

Поставщики и производители предлагают множество установок и разновидностей аддитивного производства с множеством отличий в плане используемых материалов, габаритов камеры изготовления, степенью индивидуальности получаемых изделий, а также их механическими свойствами. Это позволяет продавцам представлять свою продукцию с лучшей стороны, соответственно увеличивая спрос на оборудование. Если говорить о индивидуальности и точности в традиционном производстве, то там для создания идентичных заготовок как правило требуется оснастка, формы для отливки, для проектировки и воспроизведения которых также требуется большое количество времени и ресурсов, к тому же для традиционного изготовления помимо оснастки и форм требуется и создание технологического процесса, который необходим для воспроизведения деталей, разработка и появление на свет каждого из пунктов требует больших временных и материальных затрат затрудняя тем самым начало производства, чего нельзя сказать об аддитивном производстве, т.к. эта технология обладает быстрым прототипированием и не нуждается в форме и оснастке.

Финансовая составляющая аддитивного производства на данный момент в большинстве случаев проигрывает традиционному, так как оборудование для производства работ стоит не малых денег, оно имеет большое энергопотребление и порошки, которые чаще всего используются для изготовления также дорогостоящие. Решение уменьшения стоимости материалов для изготовления достаточно простое, для этого на рынке нужно увеличить количество поставщиков и производителей материалов изготовления, с помощью этого будет больше предложений, а соответственно меньше стоимость. Еще одним плюсом для традиционного производства останется производство по давно отработанным технологиям и то, что выращивание с помощью АТ в некоторых случаях может быть не так производительно, как отработанный с годами способ изготовления.

Аддитивное производство имеет ощутимые ограничения, которые отдаляют их от внедрения и применения в повседневных производственных процессах. Связано это с абсолютно разными факторами как экономическими, так и физическими. Об основных недостатках, а также влиянии их на экономику производства поговорим ниже, в таблице 6.

Таблица 6 – несовершенства, ограничения, преимущества аддитивных технологий.

Несовершенства и ограничения применения	Отражение факторов на экономической составляющей
Недостаток предложений на рынке продажи материалов	За счет этого использование смеси материалов становится дорогим и экономически не выгодным к применению для производства т.к. несет за собой доп. расходы.
Ограничение по скорости воспроизведения и объемам камеры построения	Временные затраты, несущее за собой финансовые.
Возможные ошибки построений при проектировке	Несет за собой затраты на длительную пост обработку, как физические так и экономические, в крайних случаях перевыпуск заготовки.
Обучение, опыт, квалификация специалистов для работы с оборудованием	Расходы на обучение персонала, сноска на проценты брака и использование лишних материалов.
Шероховатость поверхности готового изделия, как внутренней, так и внешней	50/50
Эффективность затрат на применение	Неудобство воспроизведения при больших производственных объемах
Достоинства и плюсы применения	Отражение факторов на экономической составляющей
Быстрое и эффективное производство прототипов, элементов и изделий сложной геометрии, высокое качество получаемых изделий	Создание конечного изделия высокого качества нужной формы.
Возможность производства малых партий в короткие сроки, производство единственных версий продукта, минимализация затрат на мехобработку.	Заготовка может быть выстроена под определенные, индивидуальные требования заказчика и воспроизведена только разово.

Помимо достоинств и недостатков существуют еще и факторы адаптации технологий в производстве, к ним относятся технологические, организационные и рыночные направления, все эти направления также стоит изучить перед внедрением АТ в технологические процессы изготовления металлических изделий.



Рисунок 16 – Факторы внедрения аддитивных технологий в производство металлических изделий

Из всего вышеизложенного можно выделить и производственные факторы, которые тоже играют не малую роль для внедрения аддитивных технологий в производство металлических изделий в металлургической промышленности.

Обстоятельства, способствующие организации работ.

Способность получать и использовать технологию в коммерческих целях предприятия или производства.

Заключается в потенциале технических данных технологий и оборудования, а также квалификации персонала.

Долгосрочная перспектива производственных факторов.

Заключается в перспективе АТ и возможностях их применения в производственную часть предприятий и компаний, что влияет на результат развития.

Плюсы и минусы использования.

Заклучается в зависимости сложности традиционной технологии изготовления, скорости изготовления и количества технологических операций, соответственно полностью проецируется и ставится в сравнение с АТ в которых так же учитывается скорость обучения, внедрения и самого выращивания и конечная экономическая выгода.

Актуальность внедрения.

Совместимость технологических процессов играет большую роль для внедрения, также, как и квалификация сотрудников и их умение коммуницировать с оборудованием.

Рыночные обстоятельства влияющие на структуру внедрения.

Давление внешних факторов.

Условия, предлагаемые рынком сторонних компаний по производству металлических изделий, могут предлагать более конкурентно способные предложения для производства малых объемов или единичной продукции, эти параметры пагубно влияют на закупку и внедрение АТ в производственных масштабах.

Благоприятная сторона внешних факторов.

После внедрения АТ на производство открываются новые возможности его применения, такие как внешняя поддержка, новые заказчики и потребители услуг и готовой продукции, возможность проводить обучение стороннего персонала.

Сроки поставки и изготовления конечных изделий и заготовок.

Выигрыш в ситуации за счет оптимальных предложений на рынке.

За счет возможности производить более сложную форму каждой воплощаемой детали можно сократить сроки на изготовление конечного изделия отказавшись от производства и сборки нескольких деталей для воспроизведения тех же форм и структур.

Увеличение выгоды производителя и заказчика за счет повышения спроса.

Данное условие положительно располагает обеим сторонам, как производителя, так и заказчика, соответственно со снижением сроков и ценовых аспектов.

Потребность внедрения и разбора необходимости аддитивного производства в изготовление металлических изделий связано с тем, что ставя в пример компании, где данные технологии введены в эксплуатацию, относительно компаний с традиционным производством значительно

снижают свои затраты и повышают эффективность работ, а также увеличивают прибыль за счет использования АТ.

К тому же от эффективности производства зависит удовлетворение клиентов, а соответственно и успех компании.

Применение АТ в изготовлении металлических изделий позволяет сократить время и урезать количество технологических операций исключая из производства этапы, которые требуются для традиционного процесса изготовления, например, с помощью, создаваемой 3Д модели, которая позволяет отказаться от моделирования.

Обобщенно, понятие аддитивных технологий дает технологические преимущества, которые позволяют совершенствовать производство, так как в теории для одного и того же изделия на одной и той же установке можно получить несколько абсолютно разных результатов изготовления с любой последовательностью и механическими свойствами, что позволяет производить эксперименты и опыты, которые иногда необходимы в разовом порядке. Для работы необходимы установка, материал для выращивания и создание 3Д модели конечного изделия. Так же если рассматривать установку для производства множества разных деталей поочередно, это так же не доставляет проблем и финансовых затрат, так как для производства другой детали достаточно просто сменить модель и настроить программу построения, дополнительное изготовление оснастки и формы как правило не требуется. Еще одним важным положительным отличием является то, что для производства сложной геометрии изделий не увеличиваются финансовые затраты, чего нельзя сказать о традиционных технологиях изготовления.

«Аддитивка повышает темп вывода готовой продукции на рынок, за счет легкого и удобного способа внесения корректировок (когда возможно изменять ранее существующую цифровую модель заготовки) и достаточно большой скорости изготовления(с учетом экономии времени на внесение изменений в 3D-модель). Конструкции изделий могут быть легко улучшены для использования без изменений в построении проекта поставок» [40].

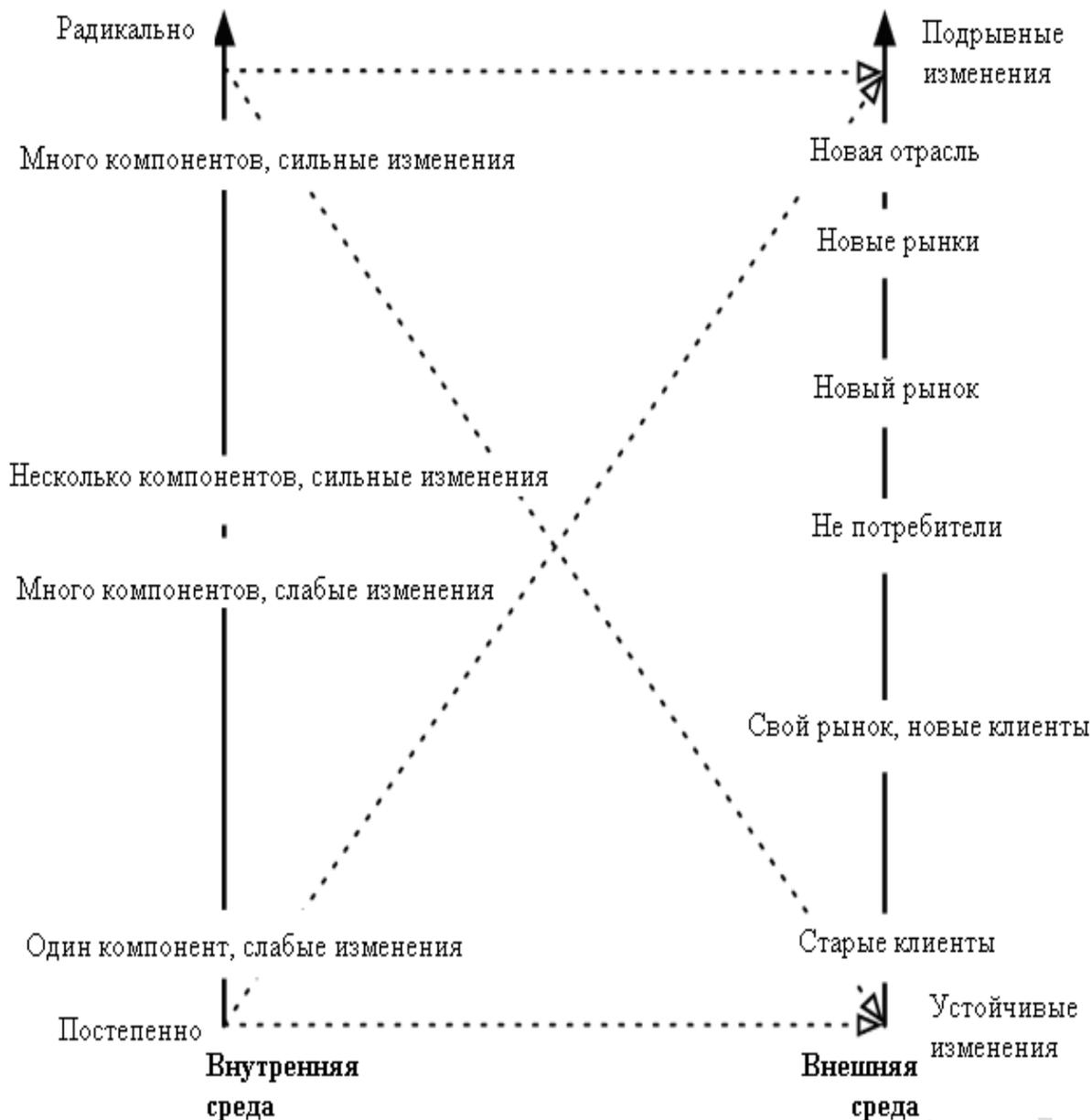


Рисунок 17 – Зависимости спроса и предложения АТ

Рисунок 17 представляет структуру зависимости спроса от предложения структура изменения бизнес-модели.

Линии, изображенные пунктиром, это связь между изменениями, которые приводят к результатам характерным не устойчивыми изменениями.

Не смотря на все факторы аддитивное производство может привести к прорыву в определенных отраслях изготовлений, так как рынок АТ все сильнее внедряется на производственные площадки предприятий.

Построение бизнес модели аддитивного производства можно разделить на модули В целом АТ позволяют бизнес-моделям стать модульными и

адаптируемыми, когда организации могут определить рынки сбыта, в зависимости от конкретных условий.

Прямое производство – одно из первых направлений для интеграции процессов посвященных аддитивному производству в сетях интернет для связи производителей и заказчиков.

Для B2B, B2C рынков выделены следующие пути развития:

- повышение рентабельности производства путем сокращения цепочки поставок;
- увеличение области охвата производителя, круглосуточный режим приема заявок;
- установление и поддержание отношений с потребителями для продвижения бизнеса [20].

«Совместное производство – является развитием предыдущего подхода, использующим возможности для передачи информации сразу нескольким производителям. Цепочка поставок в данном случае включает в себя электронную среду-посредник, служащий для координации процесса исполнения заказа. Особенностью данного подхода является сокращение затрат на поиск производственных возможностей и стоимостей изготовления.

Подобные электронные площадки могут быть доступными для каждого, либо закрытыми, для которых существуют принципиальные различия между характером и количеством участников, степенью доверия, безопасности и обмена информацией. В условиях B2C взаимодействия у клиентов зачастую могут отсутствовать специальные знания, и во избежание ошибок посредник предлагает различные рекомендации» [33].

Локализованное производство.

«Данная модель позволяет найти производственный потенциал, близкий к спросу, с целью сокращения временных и организационных затрат и характерна для рынков с низким спросом и потребностью в индивидуальном производстве. Несмотря на то, что концентрация производственных усилий в одном регионе может повысить эффективность производства за счет специализации, это увеличивает протяженность цепочки поставок» [33].

Сообщество пользователей.

«Данный подход существенно влияет на структуру цепочки поставок, ввиду отсутствия типовых производителей и потребителей. Для взаимодействия субъектов создается интернет-площадка, предназначенная для облегчения передачи 3D-моделей между пользователями и клиентами для самостоятельного изготовления на установках АП (С2С-рынок)» [33].

«Способность АТ создавать широкий ассортимент продукции вблизи точки потребления вносит серьезные изменения в технологические цепочки и различные бизнес-модели. Многие стадии потенциально могут быть исключены из цепочки, в том числе связанные с распределением, складированием и осуществлением розничной торговли» [20].

«Ключевыми факторами, от которых будет зависеть выбор способа производства продукта, станут местоположение клиента и сложность поставленной задачи. В связи с этим изменится структура цепочки поставок, она превратится в более гибкий механизм и будет меняться в зависимости от конкретных переменных на каждом отдельном объекте» [20].

«Во-первых, управление всей цепочкой поставок перестает ориентироваться на явление роста эффекта масштаба. Вся прежняя модель управления цепочками добавленной стоимости исходила из категорической необходимости снижения издержек производства на каждом этапе технологической цепочки за счет разворачивания массового производства в системе поддетальной кооперации цепочки поставщиков. На смену принципу эффекта масштаба приходит принцип кастомизации, означающий производство под индивидуальные запросы потребителей без затрат на изменение конфигурации продукции. В соответствии с данным принципом происходит изменение облика самого конечного производителя. Из крупного сборочного производства крупными сериями однотипной продукции он трансформируется в сеть небольших локализованных предприятий, ориентированных на местные запросы» [20].

«Во-вторых, производитель конечной продукции теперь не обязан выстраивать многоуровневую систему поставок многочисленных узлов и

комплектующих, оптимизированную во времени ради сокращения складских издержек. Замена поставок мелких деталей на организацию собственного аддитивного производства крупных конструкций высвобождает огромные ресурсы из сферы логистического обеспечения производства» [20].

«Основными последствиями таких изменений могут стать: переход к более локализованному производству, обслуживающего несколько сегментов рынка; снижение затрат и упрощение закупок труднодоступных частей; вытеснение части сферы услуг портативными установками и операторами, что привет к исчезновению части сектора розничной торговли; появление новых стандартов и норм регулирования деятельности субъектов данной отрасли» [20].

«Увеличение количества организаций-владельцев АТ приведет к снижению верхнего ценового барьера на готовые изделия, а конкурентная позиция будет определяться расходами, отличными от производственных, например, расходы на закупку и доставку сырья, а также стремлением к увеличению ассортимента продукции, приводя к межсегментной конкуренции. На крупных рынках, характеризующихся низким разнообразием спроса, ощутимое преимущество будут иметь специализированные технологии производства, которые связаны с крупной экономией масштаба» [20].

«В конечном итоге, благодаря функционированию данных принципов на практике стоит ожидать снижения времени производственного цикла для штучного и мелкосерийного производства, сокращения технологических цепочек, упрощения цепочек поставок по причине отказа от металлообрабатывающего или литейного оборудования, либо же высвобождения дополнительных производственных мощностей, а также концентрации производства отдельных компонентов на территории крупных предприятий» [20].

Для понимания полноты картины внедрения АТ в производство металлических изделий в первую очередь нужно производить сравнительный анализ представленных на рынке способов аддитивного производствам

применяемо к требуемым деталям и заготовкам, после продумать механизмы их реализации, а также провести экономический анализ сравнив плюсы и минусы применения.

3.2 Коммерческая модель, оценка стоимости и сравнение с традиционным производством

Для создания коммерческой модели и проведения расчетов не обязательна привязка к конкретному изделию и конкретному способу, изделия могут быть абсолютно любой формы и методы изготовления могут отличаться, так как привязка при расчетах проецируется только на производительность и отдачу процесса.

Производственная мощность – это максимум, который может производиться (за год, сутки, или смену) либо же объем переработки сырья в готовые изделия в ассортименте. Он определяется с учетом максимально допустимой нагрузки оборудования и режима изготовления на производственных площадях.

Для получения более точной коммерческой модели нужно учитывать такие факторы как производственная мощность, прямые и косвенные расходы, оплата труда сотрудников, расчеты прибыли и убытков, расчет финансовых показателей применения АТ, а также финансовая реализуемость.

Производственную мощность можно рассчитать по формуле:

$$ПМ = Пео \times КО \times ВЭ$$

где ПМ – производственная мощность в год, либо шт. в год;

Пео – производительность на изготовление единицы оборудования, либо шт. в час;

ВЭ – эффективность временного фонда 1 единицы оборудования на 1 год, либо час;

КО – количество оборудования, задействованного на предприятии для изготовления, шт.

С расчетом производственной мощности также необходимо производить расчет затрат материалов на производство продукции.

Бизнес-модель — это анализ и схематичное описание основных бизнес-процессов компании. Модель наглядно показывает: что, кому и как именно продавать, а также — насколько это выгодно. [4]

В первую очередь в расчете производственной мощности привязка идет к отдельным видам продукции, а после затраты делятся на прямые и косвенные. Прямые — непосредственно завязаны с изготовлением определенной продукции (основополагающими факторами являются материалы, используемые для изготовления, оплата труда производителей работ и другие факторы).

Косвенные расходы - затраты, необходимые для обслуживания оборудования, управления им, и поддержания, в работоспособном состоянии которые заложены в стоимость выпускаемой продукции.

Формула для расчета материальных затрат:

$$МЗ = C_c + C_{свм} + C_t + C_э$$

Где C_c — стоимость сырья, основного материала, комплектующих для изготовления;

$C_{свм}$ — стоимость вспомогательных материалов;

C_t — стоимость топлива для работоспособности агрегата;

$C_э$ — стоимость потребляемой энергии для работы установки и производства процесса.

«Экономическая эффективность (англ. Economic efficiency) — это величина, определяемая соотношением полученных результатов деятельности человека, производства продукции (товаров или услуг) и затрат труда и средств на производство, но так же, грубо говоря, ситуация, в которой ничто не может быть улучшено без ущерба для чего-то ещё. В зависимости от контекста, обычно это одно из следующих двух связанных понятий:

Эффективность распределения или Парето: любые изменения, внесенные для оказания помощи одному человеку, нанесут вред другому.

Эффективность производства: никакой дополнительный выпуск одного товара не может быть получен без снижения выпуска другого товара, и

производство продолжается при минимально возможных средних общих затратах» [30].

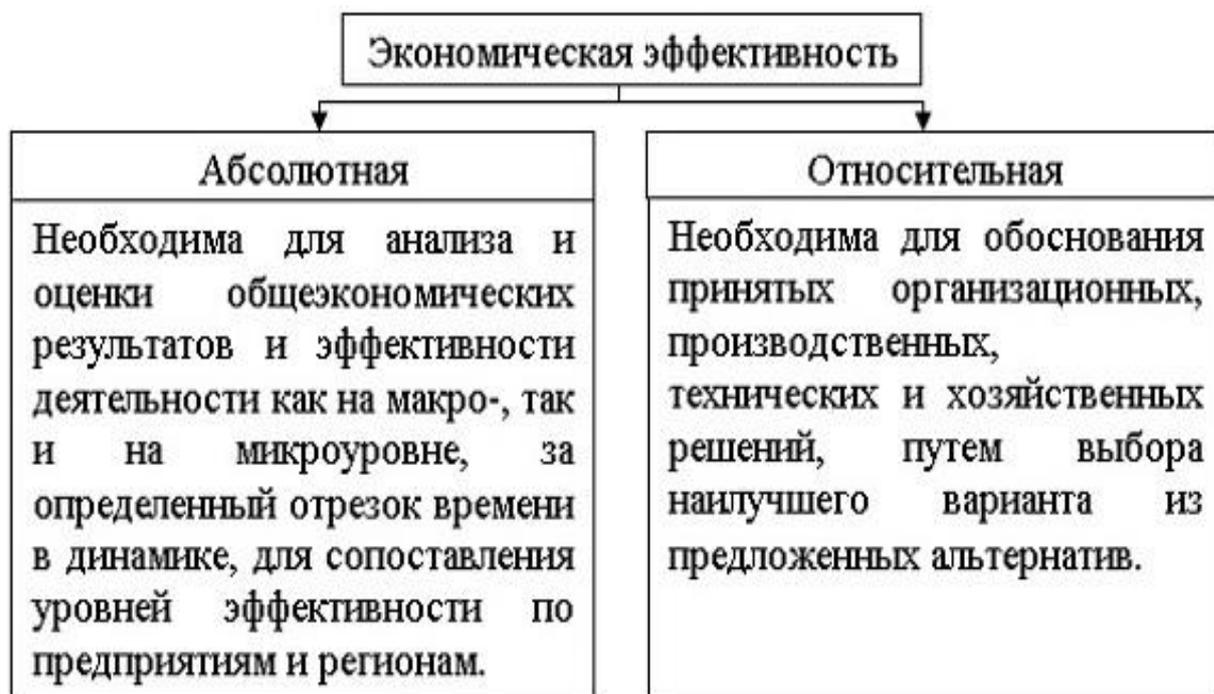


Рисунок 18 – Виды экономической эффективности

Далее необходимо производить расчеты заработной платы сотрудников, которые необходимы для производства работ на оборудовании АТ. В самом расчете необходимо учесть оклад одного рабочего, премии, в процентном соотношении к окладу, коэффициент надбавки как наладчику/оператору установки, а также ежегодную индексацию, как правило в размере 5%.

В расчет прибыли и убытков в первую очередь входит маржа, она высчитывается минусуя затраты на производство из прибыли от продаж в которые входят налоговые и государственные вычеты.

Финансовые показатели производства напрямую зависят от запаса финансовой прочности.

Запас финансовой прочности — это показатель финансовой устойчивости компании, коэффициент разницы между её фактическим состоянием и порогом рентабельности. С помощью показателя ЗФП можно понять, насколько далёк бизнес от точки, в которой он становится убыточным

[11]. Поэтому финансовая реализуемость напрямую зависит от наличия финансовых ресурсов в проекте.

На выходе, рассчитав и взвесив все эти факторы мы получаем оценку степени риска и рентабельности применения способов АТ.

Также стоит рассчитывать индекс доходности, если при расчете он получается менее единицы, то проект считается нерентабельным.

Себестоимость самих установок АТ в процессе оценки рентабельности играет огромную роль итогов расчета, но и в таких случаях есть оговорки. Если средняя стоимости продукции может быть уменьшена за счет уменьшения стоимости установки, но не с помощью увеличения ее производительности, общие накладные расходы, которые возникнут при начале работ с большим количеством систем приведут к большим внеплановым общим расходам. Чтоб этого избежать воспроизведение деталей с помощью АТ должно быть в разы быстрее и качественнее, чем изготовление традиционными способами.

Показатель	Формула расчета	Обозначения
Уровень использования трудовых ресурсов	$K_y = T_n / T_k$	K_y – коэффициент участия трудовых ресурсов в общественном производстве T_n – трудовые ресурсы, участвующие в производстве, чел. T_k – наличие трудовых ресурсов, чел.
Коэффициент использования рабочего времени в течение года	$K_r = P_\phi / P_n$	K_r – коэффициент использования рабочего времени в течение года P_ϕ – фактически отработанное рабочее время, ч P_n – возможный годовой фонд рабочего времени, ч
Коэффициент использования рабочего времени дня	$K_d = B_\phi / B_y$	K_d – коэффициент использования рабочего времени дня B_ϕ – фактически отработанное время дня, ч B_y – установленное рабочее время дня, ч
Коэффициент сезонности использования трудовых ресурсов	$K_c = Z_x / Z_{cp}$	K_c – коэффициент сезонности использования трудовых ресурсов Z_x – максимальная или минимальная занятость работников в месяц, ч Z_{cp} – среднемесячная занятость работников, ч

Рисунок 19 – Формулы расчета коэффициентов

Финансовая реализуемость - показатель (принимающий два значения - "да" или "нет"), характеризующий наличие финансовых возможностей осуществления проекта. Требование финансовой реализуемости определяет необходимый объем финансирования ИП. При выявлении финансовой не реализуемости схема финансирования и, возможно, отдельные элементы организационно - экономического механизма проекта должны быть скорректированы [13].

Финансовая реализуемость проверяется для совокупного капитала всех участников проекта, исключая общество (но включая государство и всех коммерческих участников, в том числе и кредиторов). Денежные потоки, поступающие от каждого участника в проект, являются в этом случае притоками (и берутся со знаком "плюс"), а денежные потоки, поступающие к каждому участнику из проекта, - оттоками (берутся со знаком "минус"). Помимо этого, рассматривается денежный поток самого проекта (в данном случае сумма потоков от выручки и прочих доходов - это притоки, записываемые со знаком "плюс", плюс инвестиционные и производственные затраты, не считая налогов, - это оттоки, записываемые со знаком "минус") [13].

Проект является финансово реализуемым, если на каждом шаге расчета алгебраическая (с учетом знаков) сумма притоков и оттоков всех участников и денежного потока проекта является неотрицательной [13].

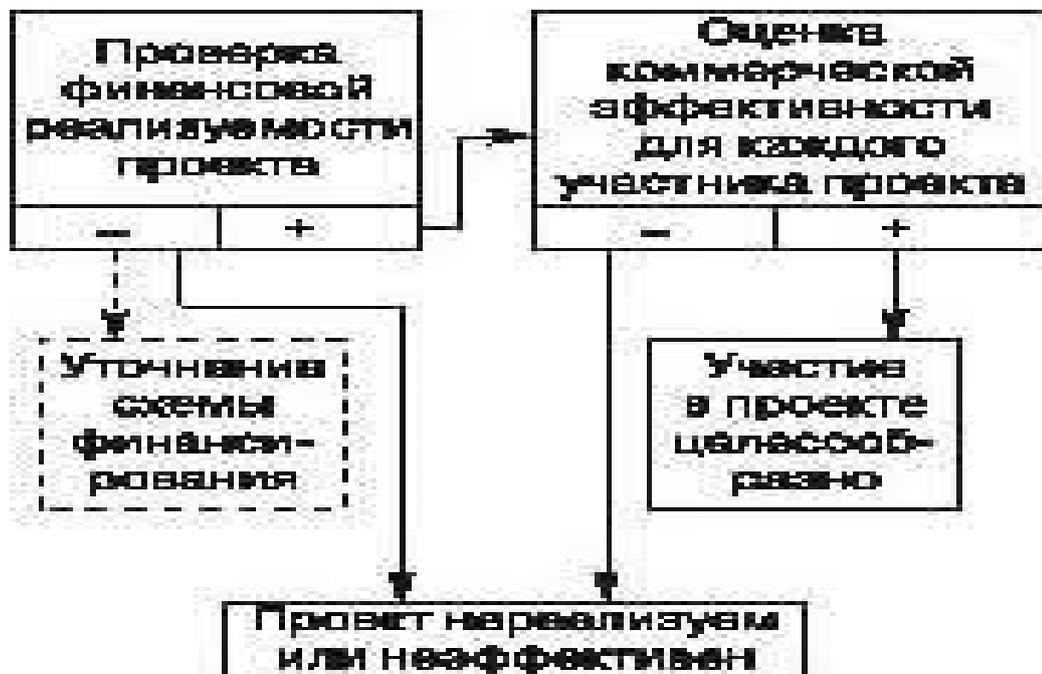


Рисунок 20 – Реализация и эффективность проекта

3.3 Факторы, помогающие разобраться в выборе АТ.

Применяемость АТ чаще всего проявляется в случаях [32]:

- при изготовлении сравнительно небольших объемах продукции;
- когда конечные изделия обладают сложной внутренней или внешней геометрией и ТЗ требует производство без удорожания;
- когда изделие невозможно воспроизвести традиционными технологиями в связи с формой или техническими особенностями;
- когда необходимо убрать из технологического процесса ряд операций, которые помогут сократить время изготовления;
- высокого риска при выходе новой продукции на рынок;
- наличия широкой клиентской базы.

Направления применения аддитивных технологий

1 Единичные партии продукции для сферы прототипирования и объемного моделирования; производство запасных частей и компонентов для автомобильной техники (в т.ч. для снятых с производства моделей).

2 Детали ответственного назначения, характерные для аэрокосмической и автомобильной отраслей.

3 Персонализированное производство изделий медицинского назначения (стоматология, травматология, хирургия, реабилитация); ювелирные изделия, спортивные товары, уникальные кастомизированные изделия.

4 Обеспечение пространственно удаленного спроса (децентрализованное производство запасных частей и компонентов, например, для нефтедобывающей, горно-обогатительной промышленности).

Необходимо разработать правильную стратегию, что в производственном контексте означает интеграцию цепочки развития с логистической цепочкой для выстраивания наиболее эффективной цепочки поставок [20].

Внедрением в промышленность новых технологий в виде аддитивного производства, в отличие от традиционных методов изготовления, мы не получаем привязки к конкретному технологическому процессу, порядку действий и операций, достижение построения и выполнение поставленной задачи происходит за счет изучения структур и анализа предприятия в условиях постоянных изменений.

Пункты, которые необходимы для оценки рентабельности и нужности внедрения аддитивных технологий.

1. Разобрать изменения, которые произойдут с производством после внедрения АТ, понять в какую сторону это сдвинет производство.
2. Разобрать на сколько это приблизит, либо отдалит нас от поставленной цели.
3. Сделать проекцию на каждый способ АТ и исходя из анализа выбрать тот, который лучше подходит.
4. Разобрать экономическую составляющую каждого из представленных вариантов с учетом технологических аспектов и результата работ в п.3.

На конечный выбор метода АТ и его применения ключевое влияние играет цель изготовления, материальная составляющая организации, материалы, применяемые для изготовления, а также планы и идеи по дальнейшей реализации оборудования.

Если планы изготовления данных деталей имеют долгосрочную перспективу, то актуальность применения метода АТ и его окупаемость в коммерческом плане возрастает в разы.

Так же существует множество стратегий внедрения, каждая по-своему необходима для построения полной картины внедрения технологий в производство некоторые из них заключаются в оценке востребованности предлагаемого товара или технологии на рынке, с помощью других стратегий осуществляется оценка конкурентной способности предлагаемого товара или технологии на общем открытом рынке среди других компаний, производителей и поставщиков, которые могут предлагать похожие или идентичные услуги и технологии, что позволяет понимать степень актуальности предлагаемых вами услуг и возможностей с учетом внедрения и выхода на рынок в данный момент времени.

Третья стратегия внедрения, которую необходимо рассматривать это функциональная, в ней кроется понимание того, какой функционал сможет нести технология, которую планируется внедрить, будь то совершенствование существующих технологий изготовления или же внедрение новых моделей, деталей и заготовок в производство металлических конструкций за счет закупки и эксплуатации нового оборудования.

«Стратегия оценки востребованности внедрения технологии характеризует выбор и помогает проводить оптимизацию портфеля заказов производимых товаров и рынков сбыта. Основным инструментом оценки является матрица «товар-рынок» Ансоффа. Реализация подобной стратегии формирует общее представление о направлениях развития, выборе приоритетов. Для стратегий проникновения на рынок и рыночного развития на первый план выходят производственные приоритеты. Для стратегии развития товара и диверсификации только инновационные. Потому было бы разумно иметь широкую номенклатуру товаров, что позволит комбинировать различные стратегии, поскольку выбор лишь одного направления не характеризует гибкость управления и не обеспечивает достижения целей организации» [14].

«Конкурентная стратегия разрабатывается с учетом формирования у организации конкурентного преимущества и должно отталкиваться выбранных

вариантов товарно-рыночной стратегии, когда необходимо определить: динамику роста объемов продаж, желаемую долю или сегмент рынка, уровень конкурентоспособности. Приобретение конкурентных преимуществ обеспечивают следующие стратегии» [20]. :

– лидерства в низких издержках, обеспечивающую низкую цену оказываемых услуг;

– широкой диверсификации или захвата нескольких сегментов рынка за счет разнообразия индивидуальных характеристик.

Разработка стратегии завершается формированием функциональных стратегий, ориентированной на следующие службы предприятия:

маркетинговой (выполняющей стратегические решения в рамках товарно-рыночной стратегии); производственной (обеспечивающей структуру и объемы

производства в рамках, сформированных портфелей стратегических зон хозяйствования и грамотном использовании ограниченных ресурсов); инвестиционной (распределяющей финансовые ресурсы).

В современных условиях, организации должны чаще применять гибкие цепочки поставок, основной характеристикой которой является способность реагировать на изменение рыночного спроса. Правильно выстроенная цепочка позволяет обеспечить тянущий механизм реализации продукции [20].

Главной целью АТ, как и других отраслей и направлений производства является решение сложных производственных задач в кратчайшие сроки и максимально быстрое воспроизведение объектов сложных форм и внутренних структур в соответствии с ТЗ и заданным объемом.

Аддитивные технологии в какой-то мере могут быть направлены в сторону автоматизации производства так как сам процесс за счет своей сущности не требует больших вмешательств оператора во время построения, изготовление происходит посредством отработки заданной ранее программы

и не прекращается до ее завершения. Зачастую после изготовления даже не требуется мех обработка так как при построении используются строгие допуски, практически не допускающие огрехов на рабочей поверхности изделия.

Материалы, предназначенные для изготовления металлических изделий перед выращиванием как правило находятся в порошкообразной форме и складываются в контейнерах и мешках, что положительно сказывается на размеры и габариты территорий и помещений для хранения сырья на производственных площадках, а так же за счет возможности использования вторичной МПК для производства малоответственных конструкций снижается необходимость в транспортировке и утилизации отходов первичного производство, а соответственно и материальные затраты на данные процессы.

«Внешние факторы как правило сильно влияют на быстроту внедрения новых технологий в производственные процессы, поэтому влияние каждой характеристики стоит просчитывать заранее, чтоб в дальнейшем при работе не возникало негативных факторов.

1. Относительное преимущество (восприятие конкурентных преимуществ от внедрения).
2. Совместимость (воспринимаемая согласованность нововведений с существующей системой производственных ценностей, основанной на опыте, потребностях и ожиданиях, внедряющих технологии).
3. Сложность (воспринимаемая трудность в понимании и раскрытии полного потенциала новых технологий).
4. Успешность внедрения технологий, результативность которой видна другим» [20].

Вышеуказанные факторы помогают направить руководство и технические отделы к принятию решения о внедрении новых технологий в производство в виде АТ.

Изготовление аддитивными методами позволяет не быть зависимым от квалификации людей в некоторых процессах исключая их из

производственного цикла, т.к. иногда быстрота и качество изготовления зависит от квалификации персонала, выполняющего процесс. Еще одним положительным фактором является отсутствие необходимости перемещения изделия на стадии конструирования между производственными цехами и площадками ввиду того, что весь процесс воспроизведения объекта происходит в одном месте.

С помощью использования внешних ресурсов становится проще проектировать новые изделия, даже не привлекая к этому свой персонал, так как данная задача может выполняться удаленно специально обученными для этого людьми для экономии ресурсов и упрощения технологического процесса, особенно если данное изделие планируют изготавливать долгое время без изменения конструктива. [39].

Так же если говорить о разовых проектах для конкретных лиц и целей, в таких случаях заказчик может перенять на себя операции по проектированию, настройке оборудования, либо постобработке изделия после выращивания. [39].



Рисунок 21 – Средства для оценки необходимости внедрения АТ [38]

3.4 Разработка рекомендаций к выбору и применению аддитивных технологий

Внедрение в производственный процесс предприятия аддитивных технологий сложный шаг, который, не смотря на отталкивающие от его внедрения факторы несет в себе огромные перспективы и окупаемость при правильном применении. Выбор в пользу аддитивного производства в целом, а также к конкретной технологии всегда должен быть проработан и просчитан. За счет большого потенциала и технических возможностей производства АТ могут с отрывом вытеснять традиционное производство с предприятий и полностью его заменять. Помимо этого, они дают возможность быстрого прототипирования, быстрого изготовления мелкосерийных изделий, улучшение мех. свойств конечного изделия, а также дает возможность производить абсолютно новые металлические изделия, производство которых ранее не представлялось возможным.

Первым шагом к пониманию целесообразности и возможности внедрения необходимо понять для каких целей планируется использование оборудования, какие металлические изделия можно будет полностью перевести на изготовление с помощью АТ, где можно усовершенствовать технологический процесс, на сколько за счет этого можно ускорить изготовление образцов, какие возможности для изготовления откроются путем внедрения, увеличится ли качество изделия, как технология повлияет на экономическую составляющую предприятия и др. Изначально оценку стоит проводить в проекции на конкретные детали, которые выпускаются или планируется выпускать с применением АТ, и положительные факторы внедрения, а уже после рассматривать дальнейшие перспективы.

Вторым шагом необходимо провести экономические и временные расчеты проецируя их на конкретные изделия, производимые предприятием с помощью традиционного производства, даже для тех, где изначально не планировался переход на АТ. Это необходимо для учета максимальной

интеграции в производство, и понимания, как и какие системы можно оптимизировать в плане времени изготовления и с точки зрения экономики. Дополнительными факторами для расчета прибыли и склоняющими к выбору могут быть возможность проектирования и создание прототипов, дешевое изготовление деталей под конкретные критерии, уменьшение цепочки производственного процесса, а также персонализация. Просчеты прибыли от возможности реализации данных пунктов сыграют большую роль в принятии решения о применении АТ.

Третьим этапом после выбора изделий можно приступить к выбору технологии изготовления. Для выбора наиболее подходящего способа рекомендуется делать привязку к изделию с учетом его форм, внутренней структуры, материала и механических характеристик, которые необходимо получить. Это необходимо для стабильной работы изделия.

Из 4-х рассмотренных способов аддитивного производства все имеют разные направления.

SLS – часто применяется для быстрого прототипирования, эффективен для воспроизведения единичных экземпляров, к минусам относится получаемая структура, так как в данном способе построение производится посредством спекания краев порошковых частиц конечное изделие не всегда может обладать необходимыми мех. свойствами, также в данном способе чаще используются композитные материалы и реже МПК.

SLM – также отлично проходит для прототипирования, возможно строить как малые так и большие объекты, считается самым сбалансированным методом АТ для повседневного применения, оптимальный по стоимости закупки оборудования и расходных материалов, за счет полного спекания частиц МПК получают высокие прочностные характеристики, чаще всего для построения используются МПК.

EBM – в основном применяется для изготовления больших деталей, способен быстро воспроизводить габаритные объекты на которые в других способах уходит значительно больше времени за счет применения

электронного луча высокой мощности. Из минусов – стоимость оборудования, необходимость вакуума и вакуумной камеры для работы.

DLD – так же как и EBM отлично подходит для воспроизведения габаритных объектов, но с меньшей скоростью построения, воспроизведение мелких изделий по сравнению с SLM более проблематично. Из плюсов по сравнению с EBM для построения нет необходимости в вакууме.

После проработки всех вышеперечисленных факторов необходимо проработать план внедрения АТ в производство и сроки его реализации.

Он должен включать себя шаги, которые необходимы для запуска и стабильной работы. Минимальные пункты к проработке представлены ниже:

1. Поиск, либо обучение сотрудников, которые будут работать с установкой (операторы, наладчики). Необходимо просчитывать затраты на обучение и оплату труда.
2. Поиск и закупка необходимого оборудования, материалов (проработка предложений от компаний, сравнение ценовой политики, гарантийных обязательств).
3. Разработка плана внедрения, как, куда и на сколько быстро необходимо внедрить АТ для оптимальной окупаемости и использования. А также минимизировать риски. Этот план включает: шаги по обучению сотрудников, закупку необходимого оборудования и материалов, а также постепенное внедрение аддитивных технологий на определенных этапах производства.

Внедрение — АТ- это процесс, включающий в себя множество этапов, каждый из которых должен быть оценен, проработан и спланирован.

При правильном подходе в конечном итоге получаем готовую схему для подбора способа АТ по всем необходимым критериям. После закупки оборудования необходимо произвести его тесты, отработку технологических режимов, оптимизировать их и только после этого начинать применение на товарных металлических изделиях.

Заключение

Целью данной магистерской диссертации являлась разработка рекомендаций по внедрению аддитивных технологий в производство металлических изделий.

Чтоб добиться результата и прийти к поставленной цели были решены задачи, которые описаны ниже:

- Разобраны теоретические основы аддитивного производства, методика их работоспособности.

- Далее аддитивное производство конкретизировали в отдельные методы, выявили их специфику, плюсы и минусы.

- Разобрана экономическая модель влияния внедрения на производство, плюсы и минусы.

- Разработаны рекомендации к выбору и применению аддитивных технологий для внедрения в производство металлических изделий.

Проанализировав представленные варианты производства металлических изделий с использованием аддитивных технологий нам открылась возможность разработки рекомендаций по выбору и применению аддитивных технологий.

Рекомендации применимы к любым металлическим изделиям не зависимо от размеров, форм и материалов изготовления.

После проработки пункта 3.2 выявлены факторы реализации аддитивных технологий на производственных площадках.

Аддитивные технологии помогают:

Уменьшить количество операций и время производства.

- Снизить трудозатраты на исполнителей производства.

- Снизить трудозатраты на производство.

- Уйти от оборудования, которое может выполнять только одну производственную задачу.

- Уйти от отлитых заготовок, которые не успевают пройти окончательную обработку.

В результате перевода производства на аддитивное производство ожидается снижение финансовых затрат на производство, снижение трудоемкости, увеличение производительности, механических характеристик, а также сокращение производственных процессов путем ухода от операций в которых пропадает необходимость.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Антонова В.С., Осовская И.И. Аддитивные технологии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. 30 с.
2. Агаповичев А.В., Сотов А.В., Смелов В.Г. Исследование влияния режимов селективного лазерного сплавления на качество заготовок: учебное издание. Изд-во Самарского университета. Самара. 2017. 30с.
3. Аддитивная технология «электронно-лучевое плавление» [Электронный ресурс]. – URL: <https://dzen.ru/a/ZRu7tGsLJTs2GaH0> (дата обращения 16.05.2024)
4. Бизнес – модель [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.unisender.com/ru/glossary/chto-takoe-business-model-primer-vidy/> дата обращения 29.05.2024
5. ГОСТ Р 57589-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартинформ, 2019.
6. ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. Термины и определения основных понятий.
7. Дронов Ф.Ю. Исследование структуры и свойств жаропрочных никелевых сплавов, полученных с применением технологии прямого лазерного выращивания. Томск. 2021.
8. Зленко М. А., Попович А.А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении: Учеб. Пособие. Издательство политехнического университета. Санкт-Петербург. 2013. 221с.
9. Заболотных А.А., Осипович Д.А. Разработка прототипа медицинского прибора «Зеленый лазер» с использованием тех с использованием технологии нисходящего проектирования под SLS-

печать. Пермский национально исследовательский политехнический университет. Пермь. 2020. 5с.

10. Зобов П. Г., Дектярев А. В., Казаченко К. В., Морозов В. Н. Исследование физико-механических свойств образцов, полученных по технологии SLM. Часть 1. Предел прочности // Известия КГТУ. 2022. № 65. С. 107–117.
11. Запас финансовой прочности: как узнать стабилен ли бизнес [Электронный ресурс]. – URL: http://www.sberbank.ru/ru/s_m_business/pro_business/zapas-finansovoj-prochnosti/ дата обращения 29.05.2024
12. Ляпков А.А. Полимерные аддитивные технологии: учеб. Пособие. Издательство Томского политехнического университета. Томск. 2016. 114с.
13. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005634/titles/8P20LT> дата обращения 29.05.2024
14. Медведев Н.А., Стратегия и внедрение инноваций. 2008.
15. Новиков С.В., Рамазанов К.Н. Аддитивные технологии: состояние и перспективы: Учеб. пособие. Издательство УГАТУ УФА. 2022. 75с.
16. Назаров А.П., Окунькова А.А. Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания: Статья. Издание Вестник СГТУ. Саратов. 2012. 8с.
17. Негодяев В.О. Разработка технологии выбора режима прямого лазерного выращивания на роботизированной установке по данным анализа микроструктуры. Самара. 2022.
18. Петров А.В. Плазменная сварка. – Итоги науки и техники /ВИНИТИ. Сер. Сварка, 1980, Т.12. С.53-109.
19. Пельмская И. С., Экономическая оценка инвестиций, методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Экономическая оценка инвестиций». Екатеринбург. 2009.

20. Соколов И.А. Разработка рекомендаций по внедрению аддитивных технологий в российское металлургическое производство. Екатеринбург. 2018.
21. Смелов В.Г., Хаймович А.И., Агаповичев А.В., Петрухин А.Г., Чупин П.В., Щедрин Е.Ю. Способ получения заготовок деталей и сборочных единиц индустриальных двигателей методом селективного лазерного сплавления металлического порошка. Описания изобретения к патенту. Самара. 2022. – 7 с.
22. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Маркова — М.: Металлургия, 1991, с. 528 с.
23. Трубашевский Д. Б. Аддитивные зарисовки, или Решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги. — Воронеж: Умное производство, 2021. — 203 с.
24. Технология ЕВМ. Принцип работы. Преимущества. Сравнение производителей. [Электронный ресурс]. – URL: <https://industry3d.ru/at-news/princip-elektronno-luchevoy-3d-pechati-v-poroshkovom-sloe/>
25. Туричин Г., О.Климова, Е.Земляков, К.Бабкин, В.Сомонов, Ф.Шамрай, А.Травянов, П.Петровский Технологические основы высокоскоростного прямого лазерного выращивания изделий методом гетерофазной порошковой металлургии Фотоника. 2015. №4(52).
26. Хакимов А.М., Жаткин С.С., Никитин К.В., Никитин В.И., Деев В.Б. Влияние технологии прямого лазерного выращивания на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава системы Ni–Cr–W–Mo. Известия вузов. Цветная металлургия. 2022. Т. 28. No. 2. С. 60–70.
27. Что такое SLM печать [Электронный ресурс]. – URL: <https://addtechno.ru/slm> (дата обращения: 10.05.2024)
28. Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Технологии и материалы 3D-печати: Учеб. Пособие. ФГБОУ «УГЛУ». 2017. 101с.

29. Швец, А.А. Сравнительный анализ устройств для объемной печати. Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (156). – С. 76-79.
30. Экономическая эффективность [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C дата обращения 29.05.2024
31. Bogers M., R. Nadar., A. Bilberg., Additive manufacturing for consumer centric business models Implications for supply chains in consumer goods manufacturing. 2016
32. Caloian F., Additive manufacturing flickering at the beginning of existence. 2012.
33. Eyyers D. R., E-commerce channels for additive manufacturing. 2015.
34. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties / B. Vrancken et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2012. V. 541. P. 177–185.
35. Influence of microstructure on high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V: Bimodal vs. lamellar structures / R. K. Nalla et al. // Metallurgical and Materials Transactions A. 2002. V. 33. N 3. P. 899–918.
36. Kasperovich G., Hausmann J. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting // Journal of Materials Processing Technology. 2015. V. 220. P. 202–214.
37. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V / F. Wang et al. // Metallurgical and materials transactions A. 2013. V. 44. N 2. P. 968–977.
38. Mellor S., Additive manufacturing: Framework for implementation. 2014.
39. Oerrmeier K., Additive manufacturing technology adoption. 2017.
40. Weeller C., Economic Implications of 3D printing Market structure models in light of additive manufacturing. 2015.

