

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: 22. 04. 01 «Материаловедение и технологии материалов»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка технологических основ 3D печати высоконаполненными металлополимерными композициями для изготовления металлических изделий сложной формы

УДК _004.356.2:004.925.84:672

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Д	Базарбай Бауыржан Бакытбекулы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник организационного отдела	Костиков Кирилл Сергеевич	К.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения СГН	Петухов Олег Николаевич	К.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент отделения ЭБЖ	Раденков Тимофей Александрович			

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
младший научный сотрудник	Ю.В. Донцов			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель отделения материаловедения	Клименов Василий Александрович.	Д.т.н., профессор		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01

Код Результата	Результат обучения
P1	Осуществлять сбор, анализ и обобщение научно-технической информации в области материаловедения и технологии материалов с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, глобальных информационных ресурсов
P2	Работать с патентным законодательством и авторским правом при подготовке документов к патентованию и оформлению ноу-хау
P3	Выполнять маркетинговые исследования и анализировать технологический процесс как объекта управления, разрабатывать технико-экономическое обоснование инновационных решений в профессиональной деятельности
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов, быть готовым к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, позволяющих получать и диагностировать материалы и изделия различного назначения.
P6	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов
P7	Внедрять системы управления качеством продукции в области материаловедения, эксплуатировать оборудование, позволяющее диагностировать материалы и изделия из них, в том числе наноматериалы
P8	Действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения, выбирать наиболее рациональные способы защиты и порядка в действиях малого коллектива в чрезвычайных ситуациях
P9	Общаться в устной и письменной формах на государственном языке РФ и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности, подготавливать и представлять презентации планов и результатов собственной и командной деятельности, формировать и отстаивать собственные суждения и научные позиции
P10	Самостоятельно осваивать новые методы исследования, изменять научный, научно-педагогический и производственный профиль своей профессиональной деятельности
P11	Применять принципы рационального использования природных ресурсов, основные положения и методы социальные, гуманитарные и экономические подходы при решении профессиональных задач с учетом последствий для общества, экономики и экологии.
P12	Использовать основные категории и понятия общего и производственного менеджмента в профессиональной деятельности

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Отделение материаловедения

Направление подготовки: 22.04.01 *Материаловедение и технологии материалов*

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Н.В. Мартюшев

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ6Д	Базарбай Бауыржан Бакытбекулы

Тема работы:

Разработка технологических основ 3D печати высоконаполненными металлополимерными композициями для изготовления металлических изделий сложной формы	
Утверждена приказом директора ИШ НПТ	Приказ № 3197 от 08.05.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Основной целью данной диссертационной работы является изучение возможности получения «зеленых» деталей методом FDM из готовых полимер-металлических композиций, применяемых в МИМ технологиях. Результатом работы должны стать научные основы технологии, сочетающие в себе достоинства МИМ и технологические возможности FDM. Основной задачей работы стало выявление влияния технологических параметров 3D печати высоконаполненными полимерами на качество (наличие дефектности) получаемых деталей.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Изучения материала 2. Изготовление филамента 3. Подбор параметров печати на 3D принтере Printbox3D ONE
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point);</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p><i>Технологическая часть</i></p>	<p>Донцов Ю.В., м.н.с., НИ ТПУ</p>
<p><i>Финансовый менеджмент...</i></p>	<p>Петухов О.Н, доцент, <i>НИ ТПУ</i></p>
<p><i>Социальная ответственность</i></p>	<p>Раденков Т.А, ассистент, <i>НИ ТПУ</i></p>
<p><i>Иностранный язык</i></p>	<p>Ажель Ю.П, старший преподаватель, <i>НИ ТПУ</i></p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Разделы на русском языке: 1 Литературный обзор</p>	
<p>Разделы на английском языке: 1 Literature Review</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник организационного отдела	Костиков Кирилл Сергеевич	К.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ6Д	Базарбай Бауыржан Бакытбекулы		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) 22.04.01 «Материаловедение и технологии ма-
 териалов»
 Уровень образования магистр
 Отделение материаловедения
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

Дата Контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.2016	1 Литературный обзор	20
09.2017	2 Методика проведения эксперимента	20
02.2018	3 Экспериментальные результаты	20
05.2018	4 Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ре- сурсосбережение	10
05.2018	5 Социальная ответственность	15
05.2018	6 Обязательное приложение на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая сте- пень, звание	Подпись	Дата
Начальник организаци- онного отдела	Костиков Кирилл Сергеевич	К.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Должность	ФИО	Ученая сте- пень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения ма- териаловедения	Мартюшев Никита Владимирович	Д.т.н., про- фессор		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 132 страниц, 35 рисунков, 11 таблиц, 68 источников, 1 приложений.

Ключевые слова: 3D печать, аддитивные технологии, МИМ- инжекционный метод литья металла, FDM моделирование методом послойного наплавления, термогравиметрический анализ, филамент, фидсток Catamold 316L,

Объект исследования: Фидсток Catamold 316L, установка для FDM печати.

Целью данной работы является изучение возможности получения «зеленых» деталей методом FDM из готовых полимер-металлических композиций, применяемых в МИМ технологиях. Результатом работы должны стать научные основы технологии, сочетающие в себе достоинства МИМ и технологические возможности FDM. Основной задачей работы стало выявление влияния технологических параметров 3D печати высоконаполненными полимерами на качество (наличие дефектности) получаемых деталей.

В процессе исследования проводились изучение свойств исходного материала, обработка режимов получения филамента и 3D печати изделий методом FDM. По результатам получения образцов исследовались влияния основных режимов 3D печати на образование дефектов в готовом образце.

В результате исследования в этой работе нами были проведены эксперименты, направленные на изучения возможности использования сырьевых материалов традиционных МИМ технологий в аддитивном производстве изделий методом FDM. В данной работе показано возможность 3D печати деталей сложной формы и внутренней структуры методом FDM из высоконаполненных полимеров порошками металлов с использованием стандартных 3D принтеров. Подобраны режимы аддитивного получения изделий из высоконаполненных полимеров, с целью управления качеством получаемой детали.

Полученные образцы могут быть далее обработаны с использованием традиционных технологий (выжигание связки, спекание) для получения готовых металлических изделий.

Abstract

Final qualification work: 132 pages, 35 drawings, 11 tables, 68 sources, 1 application.

Keywords: 3D printing, additive technologies, MIM-injection method of metal casting, FDM modeling by layer-by-layer fusion, thermogravimetric analysis, filament, feedstock Catamold 316L,

Object of study: Feedstok Catamold 316L, installation for FDM printing.

The aim of this work is to study the possibility of obtaining "green" details by the FDM method from the finished polymer-metal compositions used in MIM technologies. The result of the work should be the scientific foundations of technology, combining the merits of MIM and the technological capabilities of FDM. The main task of the work was to identify the impact of technological parameters of 3D printing by highly-filled polymers on the quality (defectiveness) of the resulting parts.

In the course of the study, the properties of the initial material were studied, the regimes for obtaining filaments and 3D printing of articles were studied by the FDM method. Based on the results of obtaining samples, the effects of the main 3D printing modes on the formation of defects in the finished sample were investigated.

As a result of the research in this work, we conducted experiments aimed at studying the possibility of using raw materials of traditional MIM technologies in the additive production of products by the FDM method. In this paper, we show the possibility of 3D printing of complex shape parts and internal structure by the FDM method from high-filled polymers with metal powders using standard 3D printers. The modes of additive production of products from highly filled polymers are selected to control the quality of the resulting part.

The resulting samples can be further processed using traditional technologies (burning bundles, sintering) to produce finished metal products.

Обозначения и сокращения

EBM – Electron Beam Melting

SLM – selective Laser Melting

SLS – selective Laser Sintering

STL – Stereo Lithography

Am – Additive manufacturing

PIM- Powder Injection Molding

MIM- Metal Injection Molding

FDM- Fused deposition modeling

AF- Additive Fabrication

LOM- Lamination Object Manufacturing

УФ- ультрафиолетовой

SLA- Stereolithography Apparatus

CAD- проектирования

STL - stereolithography

ТГА- Термогравиметрический анализ

ДСК- Дифференциально-сканирующая калориметрия

ДТА- Дифференциально-термический анализ

ПТР- Показатель текучести расплава

ИИРТ- Экструзионный пластометр

PW- парафин

PP- полипропилен

SA- Стеариновая кислота

ПММА- полиметилметакрилат

Оглавление

Оглавление	9
Введение.....	11
Обзор литературы	14
1 История развития аддитивных технологий.....	14
1.1 Селективное лазерное сплавление (SLM)	20
1.2 Электронно-лучевая плавка	25
1.3 Литье под давлением металла MIM	34
1.3.1 Связующее	43
1.3.2 Спекание	51
1.4 Технология Моделирование методом послойного наплавления (FDM)	60
2 Объект и методы исследований.....	68
2.1 Термогравиметрический анализ (ТГА).....	68
2.2 Показатель текучести расплава (ПТР) на фидсток 316L	69
2.3 Материалы и методы исследования	70
2.4 Изготовление филамента	73
2.5 Установка для 3D печатиктурного анализа.....	75
2.6 Испытание на прочность	77
3 Результаты и их обсуждение.....	79
3.1 Исследование материалов ТГА	79
3.2 Исследование материалов ПТР	80
3.3 Получение филамента	80
3.4 Проведение эксперимента по 3D печати	81

4 «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	87
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	87
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	88
4.3 Диаграмма Исикава.....	89
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	91
5.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	92
5.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	92
5.3 Вредные факторы	93
5.3.1 Микроклимат	94
5.3.2 Освещение	95
5.3.3 Электробезопасность	97
5.3.4 Пожар взрывобезопасность.....	98
5.5 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	99
5.6 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	101
5.7 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	101
5.8 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	102
5.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	102
Выводы о проделанной работе	106
Список использованных источников	107
Приложение А	115

Введение

Аддитивные технологии – это одно из прорывных направлений развития современной науки и техники. В основе данных технологий лежат научные аспекты поведения материалов при их высокоэнергетической обработке. Получить заданные свойства материала, с помощью аддитивных технологий, возможно применяя знания материаловедения и понимая, какая структура будет сформирована в готовом изделии.

Динамически развивающиеся быстрыми темпами аддитивные технологии 3D печати используются в прогрессивных производствах. Существует несколько видов аддитивных технологий, основанных на разных физических принципах, таких как: SLS, SLM, EBM, FDM, LOM и т.д. Все их объединяет один технологический принцип – получение изделий методом послойного построения. Как и традиционные технологии формирования изделий, каждый из типов аддитивных технологий имеет свои достоинства и недостатки.

Основным материалом, из которого традиционно получают функциональные изделия различного назначения, являются металлы и сплавы. Для производства изделий из металлов наиболее отработанными в мире являются две основные технологии: SLM (селективное лазерное сплавление) и EBM (электронно-лучевое сплавление). Несмотря на высокую точность и неплохое качество получаемых изделий у данной технологии есть ряд недостатков, касающихся как высокой стоимости самого технологического оборудования, так и сырьевых материалов. При этом количество порошка, который необходимо иметь при получении деталей вышеуказанными методами, должнократно превышать по весу саму деталь. Часть порошка металла в данном случае не подлежит восстановлению и уходит в отход. Кроме того, в процессе 3D печати металлических изделий методами SLM и EBM зачастую в детали формируются внутренние напряжения из-за сильно выраженной неравновес-

ности процессов, происходящих при сплавлении. В то же время данные технологии приводят к формированию анизотропной микроструктуры в материале вдоль направления построения.

Данные особенности технологий послойного сплавления при высокоэнергетическом воздействии на порошок металла диктуют необходимость постобработки получаемых изделий для снятия внутренних напряжений в материале.

В ставшей уже традиционной технологии инъекционного формирования полимерно-порошковых смесей в металлические формы также используется один из принципов и преимуществ аддитивного производства – формирования изделий методом прибавления. Технология порошкового инъекционного литья (PIM) с 70-х годов XX века используется в высокоточном производстве металлических изделий (MIM – инъекционное литье металлами) сложной конфигурации и является продолжением развития порошковых металлургических технологий. Главными недостатками использования данной технологий является необходимость использования сложного технологического оборудования, дорогостоящей оснастки для отливки «зеленой» детали; невозможность получения деталей со сложной внутренней структурой.

В настоящее время практически в каждый дом, офис, предприятие вошли доступные технологии 3D печати в виде установок, реализующих метод FDM (моделирование методом послойного наплавления). Эти установки имеют главное достоинство – это их низкая цена и простота использования, возможность легко управлять процессом получения изделия, достаточно высокая точность производства и скорость построения.

FDM технология используют полимерные сырьевой материалы для получение изделия сложной формы методом 3D печать. При этом исходные материалы PIM, представляющие собой высоконаполненный металлическим порошком полимер, являются доступным с точки зрения цены и технологии получения сырьем.

Основной целью данной диссертационной работы является изучение возможности получения «зеленых» деталей методом FDM из готовых полимер-металлических композиций, применяемых в PIM технологиях. Результатом работы должны стать научные основы технологии, сочетающие в себе достоинства PIM и технологические возможности FDM. Основной задачей работы стало выявление влияния технологических параметров 3D печати высоконаполненными полимерами на качество (наличие дефектности) получаемых деталей.

Актуальность работы заключается в разработке технологии для получения функциональных металлических изделий сложной формы и структуры методом FDM (Fused deposition modeling) с использованием в качестве исходных сырьевых материалов фидстоков, используемых в MIM (Metal Injection Molding) технологиях.

Обзор литературы

1 История развития аддитивных технологий

Аддитивные технологии (AF — Additive Fabrication), или технологии послойного синтеза, — одно из наиболее динамично развивающихся направлений "цифрового" производства. AF — Additive Fabrication (или AM Additive Manufacturing), принятая в англоязычной технической лексике аббревиатура словосочетания, означающего изготовление изделия путем "добавления" материала, в отличие от традиционных технологий механообработки, в основе которых лежит принцип "вычитания" ("лишнего") материала из заготовки. Суть AF-технологий состоит в послойном построении (синтезе) изделий — моделей, форм, мастер-моделей и так далее путем фиксации слоев модельного материала и их последовательного соединения между собой различными способами: спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией - в зависимости от нюансов конкретной технологии. Иначе говоря, аддитивные технологии предполагают формирование детали путем последовательного "наращивания" материала слой за слоем.

Предшественниками современных AF-технологий считают две оригинальные технологии, появившиеся в XIX в. В 1890 г. Josef E. Blather предложил способ изготовления топографических макетов — трёхмерных карт поверхности местности. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались одна на другую в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага.

После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумаж-

ном» виде располагали в соответствии с исходной картой. Практическое применение эта идея нашла в LOM-технологии – послойное ламинирование (Lamination Object Manufacturing) или склеивание тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051-0,25 мм. В 1979 г. профессор Nakagawa из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов.

Вторая технология – фотоскульптура была предложена французом François Willème в 1890 г. Суть её состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры (Willème использовал 24 камеры с шагом 15 градусов) и производили одномоментное фотографирование на все камеры. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину, в соответствии с профилем текущего контура.

Для уменьшения трудоемкости данного процесса немец Carlo Baese в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – экспозиции.

В 1935 г. Isao Morioka предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру. Способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набор контуров. Контуров затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким способом формировался трёхмерный образ объекта. Или же, как и у 7 François Willème, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трёхмерного образа с помощью режущего инструмента.

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея Otto Munz (1956 г.), который предложил способ селективной (последовательной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве платформы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установленный в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень перемещали на определенную величину (т.е. с определенным шагом) и сверху наносили слой эмульсии, проецируя на него изображение, после чего наносили слой фиксирующего реагента. И так каждый фрагмент построения детали: поршень перемещали вниз, наносили фотоэмульсию, засвечивали, наносили слой фиксирующего реагента и т. д. Фиксирующий состав наносился на весь слой – и на засвеченные участки, и на незасвеченные, в результате: внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, оказывался заключенным образ трехмерного объекта.

В 1977 г. Wyn Kelly Swainson предложил способ получения трехмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов (P.A. Ciraud, 1972).

В 1981 г. R.F. Housholder предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала нанесением его на плоскую платформу. Далее производилось разравнивание до определенной величины по высоте с последующим спеканием слоя. В том же году Hideo Kodama опубликовал результаты работы с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. была опубликована работа A.J. Herbert по созданию трехмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал.

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х годов прошлого века. Родоначальником отрасли стал Charles W. Hull, основатель

фирмы 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза. В 1986 г. Charles W. Hull предложил способ послойного синтеза посредством ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввел в оборот термин «стереолитография». В этом же году инженер собрал первый в мире стереолитографический 3D-принтер – SLA (Stereolithography Apparatus), благодаря чему цифровые технологии сделали огромный рывок вперед. Приблизительно в то же время Скотт Крамп, позже основавший компанию Stratasys, выпустил первый в мире FDM-аппарат. С тех пор рынок трехмерной печати стал стремительно расти и пополняться новыми моделями уникального печатного оборудования.

До середины 90-х годов они использовались главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (SLA-машины), затем порошковые (SLS-машины), были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов весьма скромный. Однако в 1995 году назрел перелом, сделавший аддитивные методы изготовления продукции общедоступными. Студенты Массачусетского технологического института, Джим Бредт и Тим Андерсон, внедрили технологию послойного синтеза материала в корпус обычного настольного принтера. Именно так была основана компания Z Corporation, долгое время считавшаяся лидером в сфере бытовой печати объемных фигур.

Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE) и механообработки (CAM) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы 3D-принтеры [1].

Основные предпосылки и преимущества применения аддитивных технологий заключаются в следующих факторах:

исключение извечного конфликта «конструктор – технолог»;
возможность изготовления деталей любой геометрической сложности;
возможность внесения изменений в проект на этапе передачи изделия в производство (например, при необходимости осуществления его функциональной оптимизации);

изготовление изделий в рамках опытного производства; отсутствие необходимости

изготовления инструментальной оснастки, свойственной традиционным методам обработки;

минимизация потерь материала и отходов производства (например, стружки);

возможности для упрощения логистики, сокращения времени поставок, уменьшения объемов складских запасов.

переход от массового производства к массовой кастомизации (возможность удовлетворения как можно большего числа индивидуальных заказчиков), увеличение номенклатуры изделий.

Процессы, используемые в АМ-технологиях, определяются состоянием применяемых материалов:

жидкое (полимеры) - стереолитография, послойная наплавка, струйная печать;

порошкообразное (полимеры, керамика) - 3D - печать, селективное лазерное спекание, селективная лазерная плавка;

порошкообразное (металлы) - прямое лазерное спекание металлов, электронно-лучевая плавка, прямое нанесение металлов, точное лазерное формование;

твёрдое (полимеры, металлы, керамика, композиционные материалы) - послойное изготовление объектов из листового металла (листы), произвольное экструзионное формование (проволока) [2].

Методы получения металлических порошков

Существуют разнообразные методы получения металлопорошков, условно их разделяют на физико-химические и механические.

К физико-химическим относят методы, связанные с физикохимическими превращениями исходного сырья, при этом химический состав и структура конечного продукта – порошок – существенно отличается от исходного материала. Механические методы обеспечивают производство порошка из сырья без существенного изменения химического состава. К механическим методам относятся, например, многочисленные варианты размола в мельницах, а также диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости, этот процесс называют также атомизацией.

Частицы порошков, получаемые механическими методами размола, имеют осколочную, неправильную форму. В изготовленном порошке содержится относительно большое количество примесей – продуктов износа размольных тел и футеровки мельницы. Поэтому эти методы не применяют для получения порошков, используемых в аддитивных технологиях.

Диспергирование расплава – наиболее производительный, экономичный и эффективный способ получения мелких и средних порошков металлов: 60-70 % объема всех промышленных порошков получают именно этим методом [3]. Распыление (атомизация) широко применяется при производстве порошков многокомпонентных сплавов, в частности с аморфной структурой, которая позволяет достичь равномерного химического состава композиции, даже при содержании легирующих компонентов, выше их предела растворимости в основном компоненте сплава. Кроме того, порошки, полученные с использованием методов диспергирования расплавов, имеют форму частиц, близкую к сферической.

Более 90% всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях, получают методами диспергирования расплава. Основными технологиями получения порошков для АМ-машин являются следующие атомизации: газовая; вакуумная; центробежная.

1.1 Селективное лазерное сплавление (SLM)

Селективное лазерное сплавление (SLM) является одним из новых аддитивных методов, которые появились в конце 1980-х и 1990-х годов [4]. Во время процесса SLM, продукт сформирован выборочно плавить последовательные слои порошка, взаимодействием лазерного луча. После облучения порошковый материал нагревается и, при достаточной мощности, плавится и образует жидкий бассейн. После этого расплавленный бассейн затвердевает и быстро остывает, а консолидированный материал начинает формировать продукт. После того, как сечение слоя от сканировано, строительная платформа опускается на величину, равную толщине слоя, и наносится новый слой порошка. Этот процесс повторяется до тех пор, пока продукт не будет завершен [23]. Не облученный материал остается в строительном цилиндре и используется для поддержки последующих слоев. После процесса, неиспользованный порошок фильтрован и может быть повторно использован. Для того чтобы противодействовать заживанию материала должный к нарастанию термальных напряжений во время процесса SLM, часть построена на твердом субстрате. Типичный SLM размещения оборудования представлен на рисунке 1 [5].

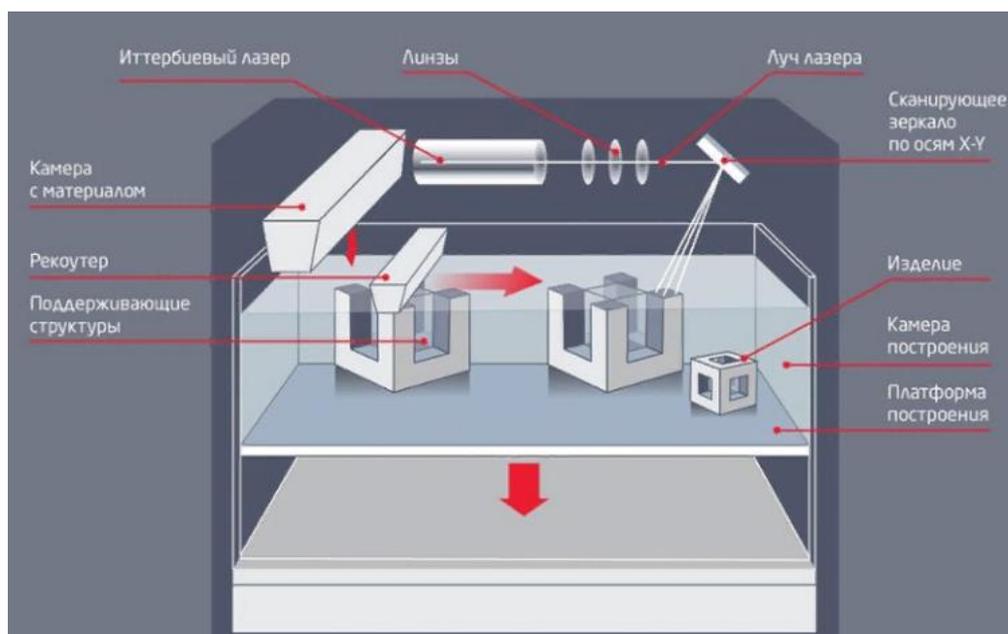


Рисунок 1 – Выборочная Лазерная Плавка, процесс [22]

По сравнению с обычными технологиями производства, SLM предлагает широкий спектр преимуществ, а именно более низкое время выхода на рынок, производство почти чистой формы без необходимости дорогостоящих форм, высокая норма использования материала, прямое производство на основе модели CAD и высокий уровень гибкости (например, продукты с различной геометрией могут быть произведены в одной и той же партии). Кроме того, из-за аддитивной и слоистой продукции процесс SLM способен создавать сложные геометрические особенности, которые невозможно получить с использованием обычных производственных маршрутов [23].

К сожалению, эта новая технология производства имеет дело с некоторыми часто наблюдаемыми проблемами. SLM характеризуется высокими температурными градиентами, что приводит к нарастанию тепловых напряжений и быстрому затвердеванию, что приводит к возникновению явлений сегрегации и наличию неравновесных фаз [23].

Основное преимущество фактора на такие процессы, как SLM является возможность создания сложных геометрических форм, которые в противном случае было бы трудно или невозможно произвести с использованием обыч-

ных производственных процессов. Это объясняется универсальность, точность и малый размер пятна лазерного луча. Возможность построения тонкой стенки детали с высоким разрешением дополняет основное преимущество технологии и расширяет свои производственные возможности. Однако изготовление изделий из металла через SLM имеет много трудностей. Высокое входное тепла часто вызывает увеличение испарения и разбрызгивания материала во время обработки. На рисунке 2 показана стратегия сканирования лазером для изготовления трехмерных моделей. Один цикл сканирования выглядит следующим образом: (1) сканирование только контур; (2) сканирование контура и штриховка внутри в x направлении; (3) сканирование только фрагмент; и (4) сканирование контура и штриховка внутри в y направлении [6].

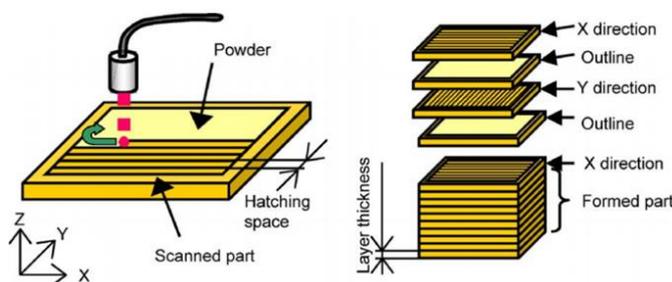


Рисунок 2 – Шаблон сканирования лазерного луча для создания трехмерной модели. (а) Штриховка. В x направлении и (б) штриховки.

Плотность после SLM

Достижимая плотность после SLM является первой и, возможно, наиболее важная проблема в этом процессе. Плотность определяет механические свойства детали, которые, в свою очередь, оказывает прямое влияние на производительность компонента [8], [9]. Цель в SLM часто заключается в получении 100% плотных частей. Однако этой цели трудно достичь, поскольку нет механическое давление, как и в процессах формования, SLM характеризуется только температурными эффектами, гравитацией и капиллярные силы вовремя SLM. Кроме того, пузырьки газа могут попасть в материал

вовремя затвердевание из-за различных причин, таких как уменьшение, растворимость растворенных элементов в плавильном бассейне во время затвердевания [7], [12]. Фактически, пористость в финале часть по-прежнему остается проблемой даже для обычных, таких как литье под давлением [10], [11].

Материалы

Чтобы найти из соответствующих металлических порошков для SLM процесс, одно сканирование испытание проводится с использованием нескольких видов материалов: алюминий, медь, утюг, нержавеющая сталь (сталь 316L стали), хрома, титана и сплава на никелевой основе [14].

Важнейшее значение для изделий, получаемых методом SLM, имеют характеристики порошков. Большое число работ [15; 16; 17; 18; 19; 20] посвящено исследованию влияния технологических характеристик порошков на свойства получаемых изделий.

Для изготовления качественных изделий используемые металлические порошки должны отвечать следующим требованиям: иметь однородный химический состав, сферическую форму частиц с коэффициентом формы от 1,0 до 2,0 и узким распределением частиц по размерам со средним значением от 40 до 75 мкм [17]. Такие порошки обладают малым коэффициентом трения между частицами и хорошей текучестью, большой насыпной плотностью и плотностью после утряски. Все вышесказанное обеспечивает бесперебойную подачу порошка и хорошее нанесение в виде тонких слоев в процессе SLM [21].

Шероховатость поверхности и части постановления

Шероховатость поверхности детали имеет решающее значение во многих приложениях с некоторыми приложениями, требующими шероховатость поверхности, составляет 0,8 мкм или более, чтобы избежать преждевременного выхода из строя от поверхности инициированного крекинга [13]. Коммерческие порошок при станках, например, Realizer MTT и EOS M270 часто требуют постобработки, в том числе обработки поверхности, шлифовки и

дробеструйной обработки для достижения финальной части отделки поверхности [21].

К достоинствам данной технологии можно отнести:

- Обеспечивает высокую точность и повторяемость;
- Механические характеристики напечатанных на 3D-принтере изделий сравнимы с литьем;
- Решает сложные технологические задачи, связанные с изготовлением геометрически сложных изделий;
- Сокращает цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обеспечивая построение сложно профильных деталей без использования оснастки;
- Позволяет уменьшить массу за счет построения объектов с внутренними полостями;
- Экономит материал при производстве.

К недостаткам технологии можно отнести:

- Высокая стоимость изготовления средних и больших тиражей деталей;
- Спектр материалов ограничен теми, которые доступны в порошковой форме;
- Внутренние термические напряжения в получаемых деталях
- Низкое качество поверхности изделий перпендикулярных слоям построения
- Необходимость дополнительной механической обработки
- Большое количество порошка уходит в отход
- Высокая стоимость установок и исходных порошковых материалов

Применение в различных отраслях техники метода SLM, относящегося к быстроразвивающимся аддитивным технологиям, имеет большие перспективы не только с точки зрения изготовления полых конструкций, основное

применение которых находится в медицинской области, но и с точки зрения изготовления изделий со 100%-ной плотностью.

Тонкостенные конструкции, заполненные металлической сеткой с определенной структурой, позволяют получать легкие и достаточно прочные конструкции, но основные машиностроительные области, как например детали авиационной техники, требуют полностью сплошной геометрии, что встречает ряд трудностей при применении технологии SLM.

У SLM технология преимущества достаточно много, но большой не достаточна, это большое количество порошка уходит в отход дорого стоит установка. Сейчас, в офисе и предприятие не выгодно купит эту установки.

1.2 Электронно-лучевая плавка

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) - аддитивный процесс полного расплавления, который опирается на металлический порошок и высокой энергии пучка [24,26]. ЕЛП –одна из немногих аддитивные технологии, которые способны реализовать получение полнофункциональных деталей высокой плотности, особенно, что касается сложных деталей с высоким качеством [27,28]. ЭЛП процесс может быть использован для работы с множеством различных классов материалов, таких как нержавеющей сталь (17-4), инструментальная сталь (h13), никелевых жаропрочных сплавов (625 и 718), Со на основе жаропрочных сплавов (Стеллит 21), с низким коэффициентом расширения сплавов (Инвар), тяжелые металлы (NiWC), интерметаллических соединений, алюминия, меди, бериллия и ниобия [28]. Тем не менее, использование этой технологии в настоящее время сосредоточена на титан и различные сплавы титана [28,29]. На самом деле, типичный титан традиционно изготавливается методомковки [30,31], прессования [31], или методом литья [32,33].

Одна из проблем касается сложной геометрии, которые являются дорогостоящими, чтобы сделать с помощью обычных технологических процессов [28]. Работая в вакуумной среде и с высокой мощностью, ЭЛП технология больше подходит для этих материалов [9,28,29,34–35], и их приложения становятся все более распространенными [25,30,36–38]. Приложения теперь включают медицинских имплантатов [39-42], а также автомобильные [43,44] и космических частей [48,45]. Применение ЭЛП процесса в медицинской сфере позволяет изготовить пациенту индивидуальные имплантаты со сложной структурой и формой [34-35], которые показывают высокую биосовместимость и остеоинтеграцию [34,39,40,41,45,46].

Одним из успешных примеров является серийное производство титановой ацетабулярной чашки изготовленной в двух европейских компаниях: Лима Лто и Аля Орто Срл, Италия. Другие примеры компонентов и промышленных решений включают лопасти турбины, турбокомпрессора, колес и клапанов для двигателей внутреннего сгорания [47-48].

В аэрокосмической отрасли, в настоящее время, используются преимущества производства с высокой производительностью, легких и сложных изделий [28,49,50]. В этой области, процесс ЭЛП позволяет уменьшить время выхода на рынок, снизить себестоимость разработки. Это связано с уменьшением количества производственными этапов и снижением отходов материала [28,30], так как порошки могут быть переработаны несколько раз без каких-либо заметных изменений их химического состава или физических свойств [28,67,69]. Особое внимание уделяется производству высокоплотных изделий, сделанных из титан-алюминиевых сплавов, так как эти материалы показали интересные свойства для применения в аэрокосмической отрасли, такие как низкая плотность, высокая удельная прочность, высокая удельная жесткость, трещиностойкость [40,49–51], пластичность, усталостную прочность, ползучесть [28,64,65], стойкость к коррозии и окислению при высоких температурах [56,43,47].

Что касается технологий, используемых для создания электронного пучка, система ЭЛП подобна сварочному аппарату, а принцип работы схож с электронным микроскопом. Компанией Аркам, которая была образованная в 1997 году, была разработана первая электроннолучевая установка для аддитивного производства изделий [24]. На рисунке 3 показаны основные компоненты машины фирмы Аркам: электроннолучевая пушка и площадка для построения детали. Электроннолучевая пушка состоит из верхней колонны, содержащей электронно-генерирующую часть, и нижней колонны, содержащей магнитные линзы, используемые для формирования и отклонения луча. Нагретая катодная нить эмитирует электроны в верхней колонне. Потенциал между катодом и анодом составляет обычно около 60 кВ. Электроны ускоряются до скорости в диапазоне от 0,1 до 0,4 скорости света [57]. Формы и отклонения электронного пучка контролируются магнитной линзой [26]. Первый набор катушек (астигматические линзы) корректирует форму пучка, и второго набора катушек (фокус линзы) регулируют размер пучка. Последний набор катушек (прогиб линзы) используется для фокусировки пучка на платформу построения [51], согласно заданной геометрии. Электронная пушка является фиксированной, таким образом, нет механической части, которая используется для того чтобы контролировать или отклонять пучок [25]. Весь процесс происходит в вакууме, чтобы избежать рассеивания электронов от молекул воздуха. Вакуум создается с помощью турбомолекулярных насосов [52]. Рабочее давление в обрабатывающей камере обычно составляет около 10^{-3} Па [28]. В процессе плавки, небольшое количество инертного газа гелия добавляется, чтобы избежать накопления электрических зарядов в порошок, а также для обеспечения термической стабильности процесса [49].

Камера состоит из трех основных частей: емкости построения, порошкового питателя и системы разравнивания [52]. Емкость построения содержит платформу построения, которая перемещается по осям X и Y, а также может и вдоль оси Z [52].

Платформу для построения изделия, которую также называют опускаемой плитой, нагревают до начала процесса построения. Порошковая система хранения состоит из двух бункеров, которые расположены в верхнем левом и правом углах сборки камеры. Порошковый материал от Arcam, как правило, производится через газовый метод распыливания [36,37,53] или с помощью вращающегося электрода с плазменным нагревом. Форма полученных частиц сферическая [54], и наиболее распространенные размеры частиц составляют от 45 до 100 мкм [36-38].

Порошок распределяется по осям XY системой разравнивания, которая собирает порошок с двух сторон и перемещает по поверхности. Ракель системы разравнивания контролирует количество распределенного порошка, потому что не равномерной толщины слоя может привести к отсутствию синтеза и провоцирует явления [52], которые будут рассмотрены в следующем разделе. Толщина слоя колеблется в пределах 0.050 мм 0.200 мм, в зависимости от материала порошка [54].

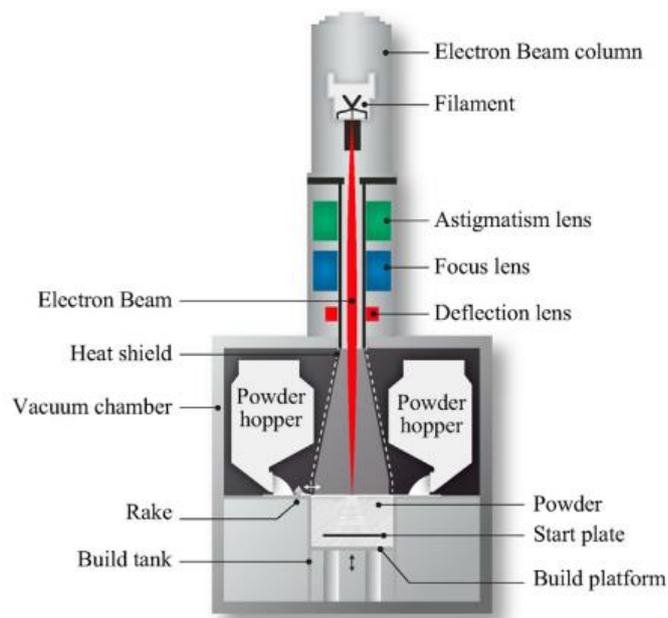


Рисунок 3 – Компоненты машины Arcam. питателя и системы разравнивания [52].

Рисунок 4. схематично изображает ЭЛП процесс. Процесс построения начинается с прогрева плиты. Температура начала пластины до первого слоя

зависит от типа порошкового материала [52] и он контролируется добавлением мощность луча. Как упоминалось выше, весь процесс происходит в вакууме.

Первый расплавленный слой порошка формирует базовую деталь. Эти слои вместе могут образовывать прочную основу, или они могут образовывать сетчатую подобную структуру, которая становится опорой конструкции, на которой строится верхняя часть. Нагрев порошка проходит через серию ходов расфокусированным лучом при большой мощности и высокой скорости (например, 15 000 мм/с и 30 мА [49]).

Мощность и скорость сканирования уменьшается для последующих этапов сплавления. После фазы селективного плавления, платформа построения опускается на один слой толщины, и новый слой порошка из бункеров наносится ракелем. Процесс повторяется до тех пор, пока изделие не будет завершено. После построения, деталь остается до полного остывания под увеличенным давлением гелия. В конце процесса, когда деталь достают из камеры, мягкий агломерат порошка остается припеченным на готовых деталях и покрывает их полностью [28,49]. Этот агломерат называется отходом порошка [49] и он удаляется с помощью пескоструйной обработки, используя исходный порошок материала [45]. Поскольку в камере отсутствует даже минимальное количество кислорода [56], неиспользованный порошок может быть использован несколько раз без какого-либо изменения его химического состава или физических свойств.

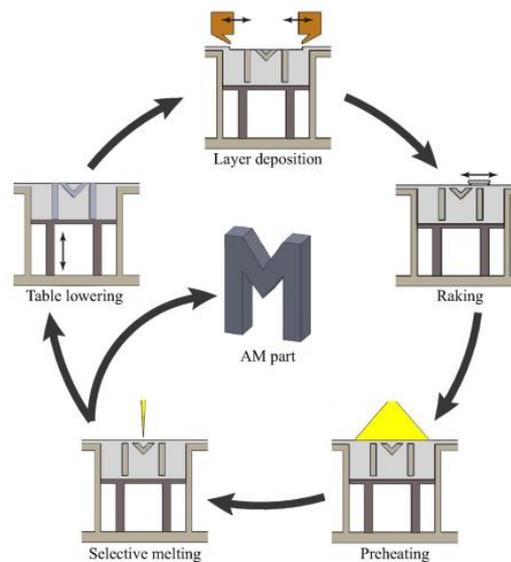


Рисунок 4. Фазы процесса ЭЛП

ЭЛП физические механизмы

ЭЛП процесс включает в себя несколько физических механизмов, как показано на рисунке 3.2. Эти механизмы сложны, поскольку скорость сканирования очень высока и фазовые изменения происходят в течение очень короткого времени [52]. Основным механизмом является взаимодействие между электронами и порошком. Когда электроны сталкиваются с частицами порошка, большая часть их кинетической энергии выделяется в виде тепловой энергии, которые плавят, спекают, нагревают и испаряют материал [52]. Оставшаяся часть кинетической энергии преобразуется в излучение и вторичные электроны, которые покидают поверхность.

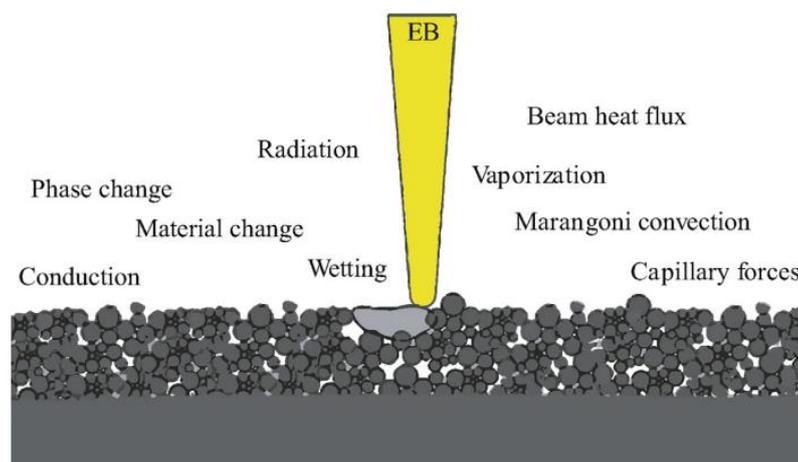


Рисунок 5. Физические явления в ЭЛП

С описанием всех сложных физических механизмов за быстрый процесс расплава небольшого расплава — бассейн-это интересный вызов. Попытка обобщить наиболее важные механизмы и результаты приведены ниже.

Взаимодействия частиц порошка и электронного пучка

Взаимодействие между электронным пучком и порошком включает в себя четыре основных последствия: разлет частиц, спекание частиц, плавление частиц и испарения некоторых легирующих элементов.

Разлет частиц порошка происходит как взрыв, как показано на рисунке 3.3.[26,55]. Этот разлет может быть порожден [26,55]: 1) остатками воды или влажности в порошке, который может испаряться взрывом; 2) импульсом, переданным электронам, которые больше когезионных взаимодействий в порошке [54]; 3) отрицательным электростатическим зарядом частиц порошка, который вызывает взаимное отталкивание между частицами [26,55].

Несмотря на наличие остатков воды, которые можно избежать при производстве порошков методом распыления и избежать последующего поглощения влажности, влияние импульса, переданного электронами и электростатического заряда должно быть уменьшено. Феномен разлета частиц, который вызывается импульсом, когда электроны переносят частицы порошка, может быть уменьшен при увеличении размера частиц. [54]. С другой стороны, разлет порошков можно избежать прежде всего на фазе подогрева, так как передача тепла на этой стадии заставляет порошок спекаться, и общий вес частиц, по сравнению с силами отталкивания, увеличивается [53,55,56].

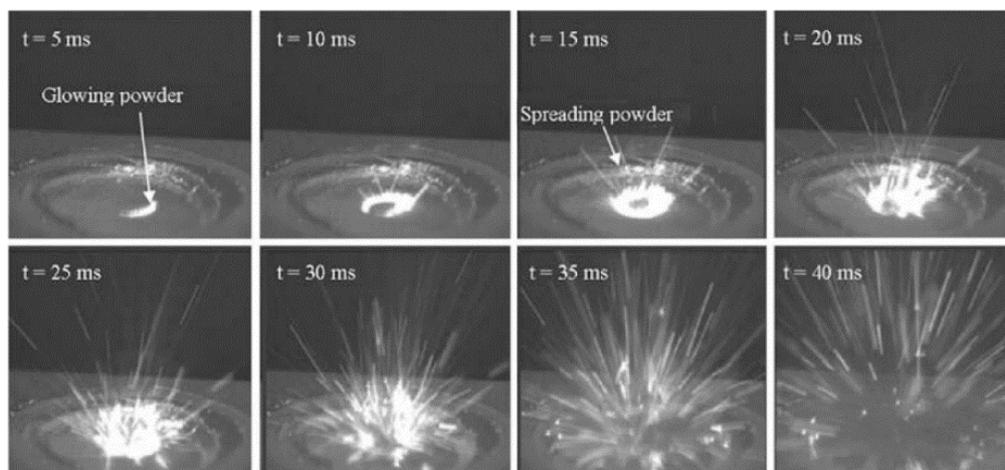


Рисунок 6. Распространение одного порошкового слоя (100 Гц, 11, 4 мА, 100 кВ, без предварительного нагрева) [26].

Спекание порошка происходит в результате передачи тепла во время нагрева и фазы плавления. Количество тепла, переданное частице порошка, зависит от технологических параметров, таких как мощность луча, размер пучка и скорости сканирования. Во время фазы подогрева, порошок обычно нагревается равномерно с помощью мощного расфокусированного луча на высокой скорости. Этот этап, который частично спекает порошок, также уменьшает расстояние между частицами.

Кроме того, спекание в окрестностях линии расплава увеличивается во время фазы плавления, за счет передачи тепла посредством теплопроводности, между линией расплава и ее окрестностями [57,58]. Во время спекания круглый перешеек формируется между частицами (Рис. 3.3.) [57]; это создает сцепление между частицами порошка и помогает избежать разлета порошка, как уже упоминалось ранее. Кроме того, поскольку агрегации порошка имеют некоторую прочность [82], снижается потребность в дополнительных поддержках. Однако, эти мягкие агрегации порошков могут легко быть разрушены путем пескоструйной обработки порошком с того же материала [28,45,49,58].

К достоинствам данной технологии можно отнести:

- высокая точность, которая достигается благодаря использованию «магнитных зеркал», которые корректируют траекторию электронного

пучка. В технологии SLS используются оптические зеркала, которые имеют меньшую точность позиционирования. Лазерные зеркала и линзы стоят дорого. В зависимости от мощности установки, зеркала могут иметь золотое или серебряное покрытие, а линзы могут быть либо алмазными или германиевыми. В ЭЛП для производства электромагнитных компонентов применяются недорогие материалы. В случае необходимости электронный луч может рассеиваться, что дает возможность нагревать исходный материал без дополнительных элементов, которые необходимы для лазерных установок. Отсутствие сложных механических компонентов позволяет добиться более высокой скорости перемещения пучка, что вместе с повышением его энергии позволяет получить более высокую производительность. Скорость плавления: до 80 см³/ч. Минимальная толщина слоя: 0,05 мм (0,0020 дюйма). Точность: +/- 0,2 мм на длине 100 мм.

- возможность производства сразу нескольких изделий;
- не требуется дополнительной термической обработки.

К недостаткам технологии можно отнести:

- В данный момент электронно-лучевая плавка ограничена точностью 0,2 мм, из-за размера электронного пучка, который составляет 0,2-1,0 мм. Это приводит к небольшой шероховатости готовых изделий;
- наличие рентгеновского излучения, которое возникает при бомбардировке электронами металлов. Так называемое «тормозное излучение». Поэтому в рабочей камере необходимо устанавливать поглощающее покрытие;
- метод электронно-лучевой плавки доступен только в промышленных масштабах. На сегодняшний день полноценного домашнего 3D-принтера, работающего по этой технологии не существует [24].
- Внутренние термические напряжения в получаемых деталях

- Низкое качество поверхности изделий перпендикулярных слоям построения
- Необходимость дополнительной механической обработки
- Большое количество порошка уходит в отход
- Высокая стоимость установок и исходных порошковых материалов

ЭВМ технология при своём достоинстве требует высокого качества исходных материала потому ее трудно написать классическая аддитивный технология.

1.3 Литье под давлением металла МІМ

В литье под давлением металла - это способ изготовления деталей из металла. Процесс литья под давлением металла обычно называют его сокращенным сокращением МІМ, как это будет сделано в этой работе. МІМ является подкатегории технологии изготовления порошкового литья (РІМ). РІМ использует технологию производства пластмасс для литья под давлением с исходным сырьем, состоящим из полимера и неорганического материала. Неорганическим компонентом сырья может быть металл или керамика. [61] Основополагающая идея метода производства МІМ состоит в том, чтобы сочетать преимущества формования литья под давлением с упругими механическими свойствами металлов. Этот подход позволяет производить сложные и детализированные металлические детали с высокой прочностью и жесткостью. Традиционные способы литья требуют, чтобы металл находился в расплавленном состоянии во время отливки, металлический порошок и полимерное сырье, используемое в МІМ, позволяют проводить процесс формования при гораздо более низких температурах. [62]

Из-за большого количества материала, состоящего из исходного материала МІМ, и температуры точки плавления в процессе формования требуется несколько дополнительных шагов для получения готовой детали. Стадия

формования - довольно простой и прямой процесс. Это делается точно так же, как и регулярное литьевое формование пластмассовых деталей: сырье загружается в машину для литьевого формования, а машина приводит в действие винт, заполняющий пресс-форму. В отличие от литьевого формования пластмасс, формованная деталь по-прежнему должна пройти еще несколько шагов для завершения. [61]

Первый этап после литья - выжигание. Стадия выжигания предназначена для избавления полимерного связующего материала от формованной детали, что делает его чисто металлическим. После того, как связующий материал был удален, следует заключительная стадия, спекание. На стадии спекания часть чистого металлического порошка нагревается до температуры плавления. Высокая температура делает частицы металлического порошка сплавить вместе, увеличивая плотность и прочность части. Хорошо выполненное спекание обеспечивает часть, изготовленную МИМ, свойствами, аналогичными свойствам литой штамповки. [61]

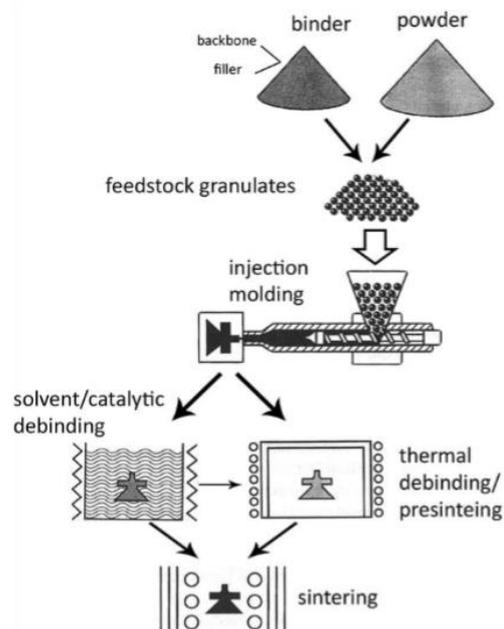


Рисунок 7. Этапы процесса инжекционного метода литья металла [61]

Инжекционный метод литья главным образом производственный процесс, используемый в продукции пластмасс. Поскольку процесс МИМ начинается с исходного сырья, состоящего из значительного количества полимера (40 об. %) этап инжекционного метода литья в очень подобном к пресс-форме пластмасс. По мере того, как только компонент связывается исходного сырья МИМ будет жидок вовремя впрыски процесс можно существенно осмотреть как нормальный инжекционный метод литья термопласта. [62]

Исходно положение работы инжекционного метода литья является довольно простой, нагревают материал до его плавления, затем впрыснуть жидкого материала в форму с желаемой формы, материал принимает форму пресс-формы, а охлаждается обратно в твердое состояние.

Инжекционный метод литья металла выполнен с такими же машинами инжекционного метода, литья как использовано, в продукции пластмасс. Машины пресс-формы, использующие поршневой винт, на сегодня являются наиболее распространенными как в производстве пластмасс, так и в производстве МИМ.

Машина Инжекционного метода литья

Машина для литья под давлением - это устройство, которое помогает формировать и производить детали. Машина состоит из двух основных блоков, блока впрыска и зажимного устройства. Эти две единицы сосредоточены на выполнении двух разных задач, которые при объединении будут производить детали. [61]

Машина инжекционного метода литья прибор, который помогает формировать и произвести части. Машина состоит из двух основных узлов, узла впрыска и узла смыкания. 2 блока сфокусированы выполнять 2 различных задачи, которая совмещено, произведет части. [61]

Блок впрыска Основная задача блока впрыска состоит в том, чтобы нагреть исходное сырье и затем вставить его в пресс-форму. Блок впрыска

управляет характеристиками от вязкости сырья до размера выстрела. Устройство состоит из нескольких центральных компонентов: Хоппер: контейнер, который сидит над машиной, и подает гранулы в процесс. Поршневой винт: это сердце блока впрыска. Он не только обеспечивает толчок, который заставляет расплавленный исходный материал в форму, он также является основным производителем тепла. Бочка: представляет собой обсадную трубу вокруг шнека, бочонок покрыт регулируемыми нагревательными лентами, которые удерживают ствол при постоянной температуре. Мотор обеспечивает вращение шнека. Цилиндр впрыска: перемещает шнек вперед и назад внутри цилиндра. Также обеспечивает тягу для инъекции. Сопло: Соединяет ствол с формой. Обеспечивает окончательный нагрев до выстрела, прежде чем он попадет в полость [61].

Зажимной узел основной задачей зажимного устройства является управление формой на протяжении всего цикла. С помощью гидравлического двигателя, зажимной узел, может открывать и закрывать пресс-форму. Наиболее требовательным аспектом зажимного устройства является поддержание плотного соединения половинок формы во время инъекции и упаковки. Зажимной блок также управляет канавкой для выпуска деталей, перемещая шток выталкивателя и штифты. [61]

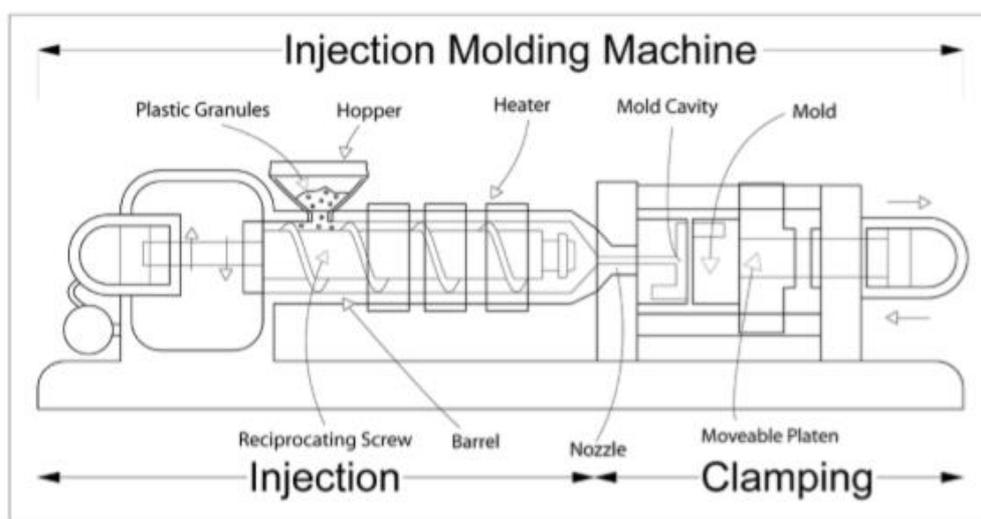


Рисунок 8. Машина инъекционного метода литья (в. Рокки,2009)

Цикл формования Цикл формования можно разделить на различные фазы:

1. Гранулы исходного сырья подаются из бункера в нагретую ствол машины для литьевого формования.

2. Вращающийся винт внутри цилиндра измельчает и плавит гранулы. Вращающийся шнек заставляет расплавленный материал к концу ствола до формы, в то время как шнек перемещается назад.

3. Гидравлический барабан заставляет собранный жидкий материал в полость формы. Более 90-99% полости заполнится. (начинается нагнетание второй ступени).

4. Остальные <10% материала вводятся под высоким давлением. Высокое давление заставляет расплавленный материал в каждом углу и трудно заполнять его. После введения второй ступени вводят давление удерживания для обеспечения того, чтобы формованный расплав не терял форму или усадку во время затвердевания.

5. Плесень открывается, выталкивающие штифты выталкивают затвердевшую часть из полости формы.

6. Пресс-форма закрывается и повторяется цикл. [62,63]

Вышеупомянутый цикл, примерно одинаковый как для традиционного литья пластмасс, так и для литья под давлением металла. Одно из отличий заключается в том, что исходное сырье МПМ не полностью расплавлено во время формования. Только связующая часть сырья будет расплавлена, в то время как порошок остается в твердой пылевидной форме. [62]

Сырье

Сырье относится к сырью, используемому при литье под давлением металла. Весь процесс МПМ в основном основан на свойствах и составе исходного сырья. Сырье состоит из двух основных компонентов: связующего и металлического порошка. Оба компонента обеспечивают свою уникальную функцию в производственном процессе. [61]

Сырьё обычно представляет собой гранулы, подобные гранулам, используемым в производстве пластмасс. Поскольку само сырьё играет такую центральную роль в процессе МІМ, характеристики сырья будут влиять на каждый шаг от начала до конца. Влияние, которое сырьё будет оказывать на процесс формования, можно проследить до пяти основных факторов:

- Характеристики металлического порошка
- Состав связующего
- Отношение порошков / связующих
- Метод смешивания
- Метод гранулирования [61]

Характеристики порошка металла

Порошок представляет собой термин, описывающий коллекцию мелких частиц. Свойства порошка представляют собой совокупный продукт характеристик частиц. Характеристики частиц влияют на каждый шаг процесса МІМ. Размер и форма частиц, например, повлияют на трение между частицами, плотность упаковки, реологию и так далее. На процесс литья под давлением будут влиять вышеупомянутые характеристики благодаря легкости формования и износу инструмента. Металлический тип и класс также будут играть свою роль в формовании, поскольку он будет влиять на вес частиц. [61]

Состав связующего

Второй компонент сырья - связующее. Хотя связующее вещество является одноразовым элементом во время процесса МІМ, его характеристики окажут фундаментальное влияние на всю продукцию. Связующее состоит из, по меньшей мере, двух разных материалов. Материал, который образует связующее вещество, будет влиять на точку плавления и реологию связующих. Поток впрыска и температура работы непосредственно зависят от связующих компонентов. Для успешного формования расплав должен иметь правильную вязкость, чтобы полностью заполнить полости формы, но

не создать вспышку. Соотношения различных компонентов связующего также будут влиять на характеристики связующего. Некоторые готовые исходные материалы содержат дополнительные добавки в связующем веществе, чтобы помочь с высвобождением плесени и впрыском. [62]

Соотношение порошок / связующее

Соотношение между количеством порошка и связующего в сырье будет влиять на его производительность. Чтобы иметь успешный процесс формования, два компонента должны иметь соответствующие пропорции. Два больших количества порошка вызовут проблемы с удержанием формы, а также абразивные свойства на литьевом оборудовании. [61]



Рисунок 9. гранулы исходного сырья MIM Catamold, нержавеющая сталь 316L

Порошок

Часть металлического порошка сырья обеспечивает механические свойства готового продукта. Полученная MIM-часть отображает аналогичные свойства, такие как металл, из которого изготовлен порошок. В принципе, любой металлический порошок может использоваться в производстве MIM, если он удовлетворяет следующим критериям; размер частиц порошка должен быть небольшим, хорошо перемешать с полимерами, спекать до достаточно высокой плотности и иметь достаточно высокую температуру плавления и спекания, чтобы не мешать процессу обезжиривания. Например, широко используемые металлы, магний и алюминий не являются общими из-за их низкой температуры плавления и сильного окисления во время спекания.

Наиболее часто используемые сплавы состоят из нержавеющей стали, инструментальной стали, меди, цементированных карбидов, титана и других тугоплавких металлов. [61]

Характеристики порошка обычно представлены путем описания отдельных частиц, а не коллективной партии порошка. Свойства порошка можно сварить до нескольких основных характеристик: размер частиц, распределение по размерам и форма частиц. Сумма этих характеристик приводит к тому, что порошок имеет плотность упаковки.

Плотность упаковки описывает, как плотно частицы могут быть упакованы вместе. Использование порошка с высокой плотностью упаковки имеет важное значение для процесса МИМ. Порошок с высокой плотностью упаковки приведет к лучшему спеканию с меньшей усадкой. Использование частиц, которые могут обеспечить высокую плотность упаковки, также имеет преимущество увеличения трения между частицами. Трение между частицами порошка поможет сохранить формованных компонентов неповрежденной во время выжигания. [61]

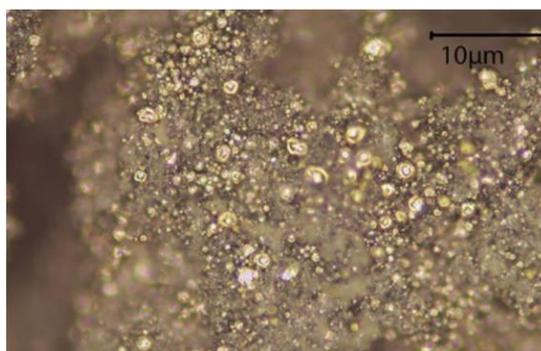


Рисунок 10. Catamold 316L под микроскопом. Сияющие шары - металлические частицы.

Размер частицы

Теоретически размер частиц порошка может составлять до 45 мкм, но идеальный размер частиц для большинства сплавов составляет менее 22 мкм в диаметре. Желательна небольшая частица, так как она увеличит плотность упаковки и улучшит однородность в исходном сырье. Некоторые металлы,

такие как цементированные карбиды, могут иметь частицы менее 5 мкм. Порошок с небольшим размером частиц также обеспечивает более гладкую отделку поверхности, а также абразивную к машине для литья под давлением. Единственной причиной выбора порошка с большим размером частиц была бы меньшая начальная стоимость. Но на практике стоимость производства может быть ненамного ниже, поскольку большие частицы имеют тенденцию создавать трудности при литье под давлением. Более мелкие частицы также имеют большую площадь поверхности и, следовательно, более высокую поверхностную энергию. Высокая поверхностная энергия благоприятна, так как она стимулирует механизм спекания. [61,62]

Форма частиц

Форма частиц оказывает огромное влияние на успех процесса МИМ. Частицы получают свои формы по методу их изготовления. По многочисленным причинам желательна сферическая форма. Круглая форма поможет лучшему потоку сырья во время инъекции. Сферические частицы также хорошо смешиваются со связующим материалом, а также распределяются равномерно, что приводит к хорошей гомогенности [61].

Сырье состоит из порошков неправильной формы частиц, тем не менее, регулярно используемое в МИМ производств. Эти частицы неправильной формы обеспечивают незначительные конструктивные преимущества отливаемой детали, помогая части сохранить свою форму во время выжигания. Форма сферы все еще предпочтена ввиду того что она имеет форму спуска сохраняет свойства. Большая площадь поверхности круглой частицы увеличивает трение между частицами во всех направлениях, сохраняя ее форму. Трение между частицами может быть увеличено, кроме того, за счет уменьшения размера частиц и, таким образом, увеличения контакта частиц с частицами. Сферические формы могут получать достаточно высокую плотность упаковки друг от друга, а также при высокой загрузке твердых частиц при смешивании со связующим материалом. [61,62]

Распределение размеров

В партии порошка МІМ каждая частица не будет такого же размера. Это отклонение в размере может быть довольно существенным и сусло, обращающая внимание. Распределение размеров в порошках МІМ описывается их значениями D10, D50 и D90. Значение D10 указывает размер, который ниже (10% частиц порошка ниже (например, D10 @ 4,6 мкм). D50 описывает средний размер частиц, в другом слове 50% частиц ниже этого размера (например, D50 @ 11 мкм). Значение D90 - это размер, который покрывает 90% частиц, только 10% частиц в этой партии порошка будут измеряться выше этого размера (например, D90 @ 18 мкм). [62]

Таблица 1- Пример характеристик порошка МІМ [61]

Производственная технология	Материал	тип/класс	Состав	D10 [Мкм]	D50 [Мкм]	D90 [Мкм]
Распыленный газ	нержавеющая сталь	316L	Fe/Cr/Ni/Mo	4,6	11	18
Распыленная вода	нержавеющая сталь	17 -4 PH	Fe/Cr/Ni/Cu	4,8	20,7	50,9

1.3.1 Связующее

Вторым компонентом для подачи сырья является связующее. В то время как металлический порошок является тем, что обеспечивает структурные свойства готового компонента, материал связующего ничего не даст и на самом деле вообще не будет присутствовать. Роль связующего заключается исключительно в том, чтобы обеспечить исходную смесь с формующей способностью и сохраняющими форму свойствами во время изготовления. Материал связующего играет очень решающую роль, и успех всей операции МІМ часто зависит от производительности связующего.

Связующее состоит из комбинации нескольких разных материалов, каждая со своей уникальной функцией. Обычно связующее МІМ состоит из

трех основных компонентов; полимера, наполнителя и поверхностно-активного вещества. Из этих трех компонентов полимер и материал наполнителя составляют подавляющее большинство связующего. Материал наполнителя обычно представляет собой некоторый тип воскового или воскоподобного материала. Полимер и воск обычно составляют аналогичные пропорции связующего. Благодаря тому, что оба компонента имеют примерно одинаковое количество, хорошее соединение в каждом материале, достигается во всей формованной части. Обычно один из этих основных компонентов будет составлять от 20 до 80% связующего. Хотя требуются даже пропорции, полная смешиваемость отсутствует. Различия в молекулярной массе и химической структуре удерживают полимер и воск от полного смешивания, что помогает компонентам связующего экстракта разделить отдельно во время обезжиривания. Разница в температуре точки плавления между компонентами является основным атрибутом для облегчения выборочного удаления отдельных компонентов в процессе МІМ. Воски имеют происходить во время изъятия. Условия размола недостаточно жестки, чтобы полимер разрушался. Полимера происходит после удаления наполнителя и совпадает с предварительным прессованием. [61,62]

Хотя существует практически бесконечный выбор полимеров и материалов для наполнителей, на выбор существует только ограниченное количество возможных комбинаций. Компоненты связующего должны обладать свойствами, совместимыми друг с другом, а также функционировать в целом. Конфигурация связующего также должна работать с порошком и показывать хорошее смачивание. Приближаясь к составу вяжущего с практической точки зрения, самыми главными критериями отбора основной на доступные способы выжигания и нужные порошкового материала. [61,62]

Вторичное связующее.

Функция вторичных связующих состоит в том, чтобы обеспечить структурную прочность формованной части МІМ во время выжигания и

начала спекания. Из-за своей решающей роли структурной помощи в процессе МІМ вторичный связующий компонент часто называют «основой». Вторичное связующее вещество почти всегда изготавливается из полимера. Обычно это основной полимер, который имеет самую высокую температуру плавления всех компонентов связующего. Полимерная часть связующего является самой сложной и наиболее трудоемкой составляющей для удаления [62]. Полиэтилен и полипропилен являются наиболее часто используемыми связующими полимерами. Они обладают идеальными свойствами, так как они могут обеспечить необходимую структурную прочность, при этом все еще относительно легко снимать. Они имеют низкие температуры плавления и низкую вязкость, что обеспечивает эффективное формование. Они также имеют хорошее смачивание, поэтому хорошо смешиваются с другими связующими веществами, а также с порошком. Их короткие длины молекулярных цепей позволяют разлагаться с относительно небольшими изменениями объема, минимизировать вероятность осложнений во время выжигания и спекания. PE и PP также являются двумя из наиболее часто производимых пластмасс, что делает их очень недорогими в качестве компонентов связующего материала. Они также создают очень мало загрязнений углерода от окончательного выгорания на вторичные выжигания шаг. [62]

Первичное связующее

Первичный связующий или "фаза наполнителя", как правило, воск или воск, как материал. Его цель обеспечить пластичность и прочность конструкции и в то же время легко снимается. В отличие от полимера, который также служит той же цели структурных воск полностью удаляется во время выжигания. Фазу наполнителя вместе с поверхностно-активным веществом часто называют первичным связующим. Воски имеют температуры плавления гораздо ниже и деградируют легче, чем полимеры, это обеспечивает их удаление отдельно. Низкий молекулярный вес воска делает их, легко испаряются, это необходимый аспект, так как помогает во время выжигания.

Наиболее часто используемыми восками в качестве наполнителей являются парафином, карнаубский воск и пчелиный воск. [61,62]

Смесь порошкового связующего

Соотношение между металлическим порошком и связующим материалом очень важно для успеха всего процесса МІМ. Несбалансированное соотношение между двумя компонентами приведет к дефектам и неправильной усадке. Слишком маленький порошок и чрезмерное количество от связующего приведет к осложнениям при формовании. При избыточном связующем в сырье порошок и связующее будут отделяться друг от друга вовремя впрыски, что приводит к неравномерному разбросу металлических частиц. Избыток связующего также приведет к низкой вязкости, что может привести к появлению поблескивая. Слишком большой избыток связующего может привести к тому, что части будут разрушаться или полностью разрушаться вовремя выжигания после того, как связующее будет извлечено. И наоборот, если отношение отключено из-за избытка порошка и недостаточного количества связующего, пустоты пустот внутри деталей будут происходить. В части, содержащей пустоты, легко трескается во время выжигания. Другие проблемы, вызываемые избыточным порошком, связаны с трудностями формования. Большое количество порошка не будет течь должным образом, вызывая множество дефектов. Оптимальное соотношение смеси - это то, что называется критической загрузкой твердых веществ. Критическая загрузка твердых веществ - это точка, в которой частицы порошка упаковываются как можно плотнее, а связующий материал заполняет все пространство между частицами. Другими словами, все частицы соединены цепью вместе, и связующее выделяет все незаполненное пространство, не оставляя места для пустот. [61,62]

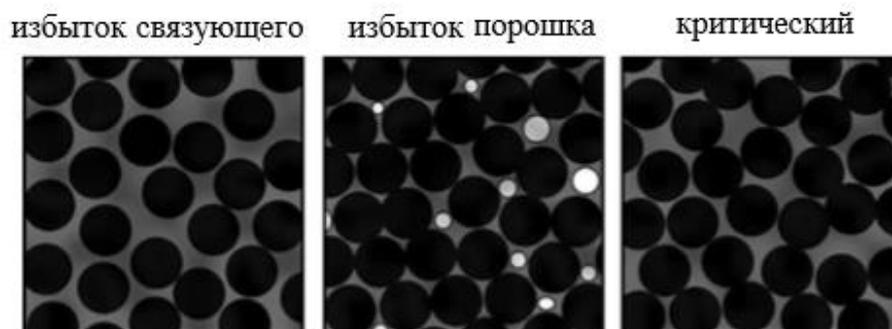


Рисунок 11- Иллюстрация различных коэффициентов порошка / связующих. Черный = металлические частицы, серый = связующее, белый = пустоты

Выжигание

Выжигание — это процесс удаления связующего материала из формованной детали. В конце процесса размотки произведенные детали будут состоять исключительно из металла. Процесс выжигания является, пожалуй, самым важным шагом в производстве МИМ. Успех в значительной степени зависит от того, насколько тщательно удаляется связующее. Во время выжигания отливаемой детали должны выдержать нагрузки, возникающие в результате связывания, выделены из части, сохраняя свою форму. Процесс размотки требует двух этапов: первичного и вторичного. Функция первичного выжигания избавиться от фазы наполнителя и поверхностно-активных веществ. Вторичного выжигания шаг, где основой связующего удаляется, и процесс спекания начинается. Во время выжигания, что часть вяжущего сырья из единственной структурной составляющей, чтобы стать полностью однородными. [61,62]

Первичное выжигание

Первичное выжигание - это процесс избавления от более легко удаляемых компонентов связующего. Эта часть связующего вещества называется первичным связующим или растворимым связующим. Идея заключается в удалении основного связующего эффективно и без повреждения детали, одновременно создавая систему тоннелей для полимерной основы для выхода через время вторичного выжигания.

На выжигания производится либо путем термического выжигания или растворителя на основе выжигания. В случае термического выжигания отливаемой детали вводится в среду температуры достаточно высоки, чтобы сделать основной биндер испариться. На практике это очень медленный и трудоемкий процесс, так как температура должна быть достаточно низкой, чтобы не влиять на полимерные основы. Испарение также должно происходить постепенно, двигая от краев внутрь, для того чтобы не треснуть или не передернуть отлитую в форму часть. Из-за трудоемкого характера термическая обвалка редко используется в промышленном производстве. [61,62]

Разбавление на основе растворителей - это более современный подход для удаления первичного связующего. Вместо термического испарения сжигание первичного связующего растворителя зависит от химических характеристик связующих компонентов. Разбавление растворителем работает над принципом использования первичного и вторичного связующего, которые не растворимы одним и тем же растворителем. Путем введения формованной детали в атмосферу, состоящую из растворителя, первичное связующее будет реагировать, теряя свою твердость и вытекающее из компакта, создавая структуру пор, необходимую для окончательного вторичного обматывания. Тип используемого растворителя и связующие материалы работают только в определенных сочетаниях, так как они должны быть полностью совместимы для того, чтобы работа по перегонке была работоспособной. Существует несколько различных способов введения формованной части в растворитель. Поскольку связующие материалы, растворители и метод работы настолько взаимозависимы и эксклюзивны друг к другу, их часто называют коллективной системой. В отличие от термообработки, когда связующее вещество удаляется в виде пара, экстракция на основе растворителя обычно происходит через поток жидкости. [61,62]

К концу первичного удаления все первичное связующее будут удалены, а часть теперь называется «коричневой». При удалении всей фазы

наполнителя часть теперь заполнена порами через часть, и единственное, что удерживает часть от развала, - это основной полимер. Часть в коричневом состоянии является хрупкой и ее нужно обрабатывать с осторожностью. В отличие от того, когда часть как раз была отлита в форму (зеленый цвет), коричневая часть имеет более грубую поверхность и теперь чувствует металлической к касанию. [61,62]

Каталитическая система выжигания

Системы каталитического выжигания используют комбинацию механизмов тепловых и растворителем выжигания. Система работает путем разрушения полимерных цепей первичного связующего с помощью катализатора. Катализатор представляет собой химическое вещество, предназначенное для снижения температуры, при которой полимер распадается обратно в мономерную форму [61,62].

Температура во время процесса размораживания ниже температуры размягчения связующего, для большинства полимеров она составляет около 120 °С. Количество используемого катализатора относительно невелико и находится в виде пара внутри камеры размораживания. После выжигания происходит из-за контакта между связующим и катализатором пара прогрессирующее выжигание движется равномерно из наружных частей к сердцевине. Это одетое в форму прогрессирующее избегает разниц в прочности конструкции внутри части, уменьшая шанс искажения. Поскольку температура на его собственные, не радикально будет изменять вязущие структурную целостность, он может обеспечить больше поддержки во время процесса выжигания. Еще одно привлекательное свойство, не позволяя выжигания, происходят чисто от теплового воздействия является отсутствие, пара-карман накопление, пара с внутренней частью может привести к части трещин. Каталитический процесс размотки больше напоминает системы размотки растворителем, чем термические. Механизм удаления связующего ос-

нован на паре катализатора, входящем в прозу, который он создал, и позволяет проникновению разложений выйти из них. В отличие от других растворов систем выжигания время и прогресс не ограничивается прониканием растворителя, а скорость деполимеризации. [61,62]

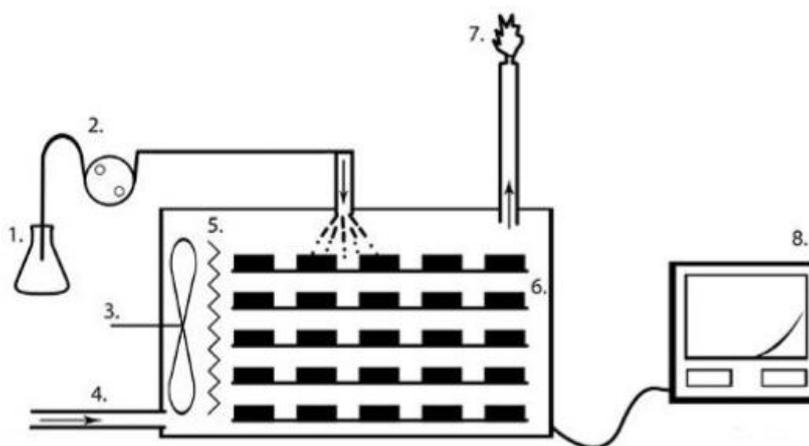


Рисунок 12. Каталитическая выжигания печь. (Автор, 2016)

1. Кислота: содержит кислотный катализатор. В качестве катализатора обычно используют азотную кислоту.

2. Насос: транспортирует кислотный катализатор из его контейнера в развал печи. Насос также контролирует концентрацию катализатора.

3. Вентилятор: помогает равномерно распределять температуру по всей камере, помогает равномерно распределять пар катализатора, создает воздушный поток, который помогает парам выходить из поры компонентов.

4. Вход азота: позволяет в инертном газообразном азоте заменить весь кислород, исключая вероятность взрывов.

5. Нагреватель: нагревает камеру печи.

6. Подносы для поддонов: периодические духовые шкафы, как правило, оснащены системой лотков для упрощения загрузки. Детали обычно располагаются на керамической основе, которая является индивидуальной конструкцией для обеспечения лучшей поддержки.

7. Горелка: опасные пары, образующиеся в результате обматывания, выводятся через канал. В верхней части канала находится горелка с пилотным пламенем. Пламя зажигает газ, сжигая его.

8. Блок управления: компьютер, содержащий параметры процесса, управляет газовыми клапанами, кислотным насосом, вентилятором и нагревателем.

1.3.2 Спекание

Спекание - это процесс, который дает части МІМ их прочность. До сих пор части были скреплены только трением частиц и связующим материалом. Процесс спекания превратит твердые порошковые компакты в правильные твердые металлические предметы. После спекания полученные детали будут демонстрировать прочность, твердость, пластичность, износостойкость, проводимость и даже визуальное сходство, аналогичные частям, полученным обычными методами металлообработки.

Спекать процесс, который дает частям МІМ их прочность. До сих пор части только держались за счет трения частиц и связующего материала. Процесс спекать преобразует твердые компакты порошка в свойственные твердые объекты металла. После спекания произведенные детали будут демонстрировать прочность, твердость, пластичность, износостойкость, проводимость и даже визуальное сходство с деталями, изготовленными традиционными методами металлообработки.

Спекать термальная обработка, которая делает частицы скрепить совместно. Путем подвергать компоненты к высоким температурам, скрепления между частицами порошка металла начнут сформировать. Как процесс идет на частицы предохранитель ту же и ту же устраняет поры, созданные в основном для выжигания. В какой-то момент все поры исчезнут, и все частицы бу-

дут перемешаны в одну плотную и твердую массу. Как следствие, компоненты будут подвергаться довольно резкой усадке. Хотя процесс спекать произведет твердый предмет металла, температура во время процесса никогда фактически не будет превышать точку плавления материала. Температура спекания немного ниже температуры плавления. При спекании компактов будет подвергнуто огромное количество стрессов, но поскольку частица облитации в то же время стать сильнее воздействие не будет настолько до того существенным, как во время выжигания. [61,62]

Хотя спекать играет большую роль в процессе МИМ, нет быть, рассмотренным формируя методом. Спекать главным образом термальный метод обработки для уплотнения. Механизм, который делает частицы сплавить совместно не исключителен к металлам, керамике и полимер можно также спечь. И процесс спекать часть всех продукция инъекционного метода литья порошка.

Механизмы спекания

Природа стремится к состоянию минимальной энергии. Это стремление к достижению более низкого энергетического состояния также является движущей силой спекания. Все поверхности имеют поверхностную энергию. Уменьшая площадь поверхности, энергия также будет уменьшаться. Поскольку две частицы сливаются вместе, их сумма площадь поверхности будет уменьшаться, понижая энергию. Форма частиц также помогает управлять процессом спекания. Высокое напряжение, удерживаемое в криволинейной поверхности, обеспечивает дополнительную поверхностную энергию сферическим частицам, поэтому сферические частицы являются благоприятными. [61]

Механизмы массового транспорта. Естественная вибрация атомов в сочетании с природой, преследующая за минимальную энергию, приводит к механизмам, которые заставляют частицы сливаться. Эти механизмы были раз-

биты и изолированы на шесть уникальных механизмов массового транспорта. Механизмы массового транспорта описывают картины движения и поток атомов, которые происходят между двумя частицами. [61,62]

По мере того как имя предлагает сплавление частицы начинают от поверхности частиц. По мере того как спекать развивает, механизмы внутри частиц начинают активировать также. Механизмы, которые происходят изнутри частиц как механизмы Навального перехода. [62]

Прогрессирование диффузии частиц: #1. Предполагая, что исходное сырье обеспечило достаточную плотность упаковки металлического порошка, частицы будут по-прежнему контактировать друг с другом после размотки. Эта начальная площадь контакта действует как учреждение для сплавления. [62]

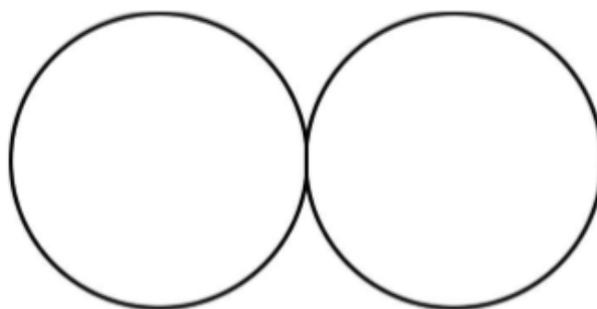


Рисунок 13. Начальный контакт частиц (автор, 2017)

2. Образование шейки и рост ранней шеи: на первых этапах спекания атомы с поверхности частиц начинают двигаться к области контакта между частицами. В конечном итоге достаточное количество атомов будет накапливаться для создания «моста» между частицами. Атом в области контакта начнет образовывать связи с атомами из соседних частиц. Во время этого процесса сужения массовый транспортный поток атомов происходит только от поверхности частиц, поэтому центр частиц по-прежнему будет иметь свое первоначальное расстояние друг к другу. [62]

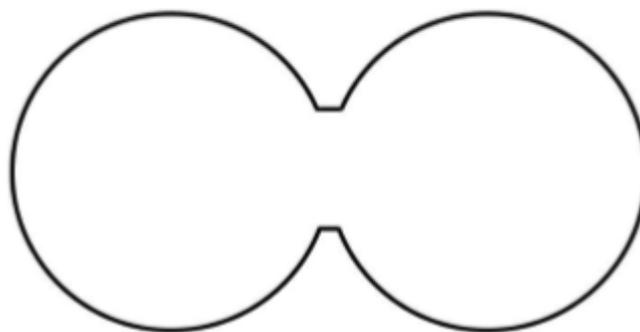


Рисунок 14. Процесс обжима (Автор, 2017)

Механизмы, которые находятся за спеканием на этом этапе, все вместе известны как механизмы поверхностного переноса. Механизмы поверхностного транспорта разработаны тремя основными процессами: испарение / конденсация, диффузия поверхности и объемная диффузия. [62]

3. Рост шеи: поскольку спекание продолжалось некоторое время, и «шеи» между частицами были сформированы, процесс войдет в свою более позднюю стадию роста шеи. В этот момент механизмы наземного транспорта больше не будут преобладающей движущей силой. Процесс в настоящее время в основном осуществляется механизмами массового транспорта. Механизм объемного транспорта перемещает атомы изнутри частиц, а не поверхности. Поток атомов все еще находится в направлении шеи, заставляя шею, расти еще больше. [62]

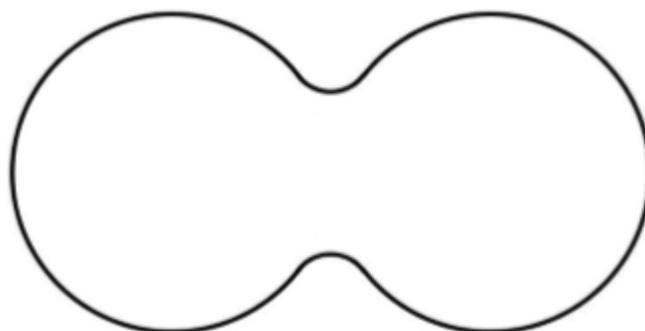


Рисунок 15. Рост шеи (автор, 2017)

Механизм массового переноса, который имеет место во время роста шейки поздней стадии, это пластический поток, вязкий поток, диффузия границ зерен и объемная диффузия. В отличие от последнего этапа механизмы массового переноса заставят центры частиц двигаться ближе друг к другу. Энергия активации для объемных механизмов выше, чем для поверхностных механизмов, поэтому позже начинается спекание. В дополнение к росту шеи, поры также будут устранены. Вследствие роста шеи и устранения пор будет наблюдаться усадка. [62]

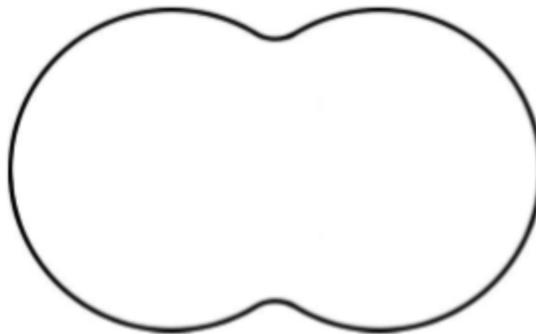


Рисунок 16. Поздняя стадия роста шеи (Автор, 2017)

Указанные механизмы массового переноса присутствуют в различной степени, в зависимости от материала и условий спекания. Различные механизмы работают с их собственной конкретной методологией, хотя они обусловлены более или менее той же силой. Понимая, какие механизмы массового транспорта, связаны с каким материалом, можно спроектировать оптимальную атмосферу спекания для рассматриваемого материала. [62]

Проблемы литья

Формование - это первый шаг процесса МІМ, и здесь проблемы могут возникнуть. Некоторые из этих проблем имеют форму типичного дефекта литья, в то время как другие могут появиться на более позднем этапе процесса или только при конечном контроле качества. Формованные компоненты будут служить основой для остальных шагов, и, как и дом с плохо сделанным

фундаментом, все это может рухнуть. Чем раньше обнаруживаются дефекты, тем меньше параметров, что облегчает устранение проблемы. Разумеется, есть и более непосредственные дефекты, которые можно наблюдать до обжига и спекания. [62]

Деформируемые дефекты

Дефекты пресс-формы МІМ в большинстве эти, же как одни столкнутые в традиционном пластичном инъекционном методе литья. Использование неправильных параметров, таких как температура, давление и размер выстрела, являются распространенными причинами проблем в традиционном литье под давлением, и они также применяются к МІМ. Сам инструмент пресс-формы может вызвать дефекты, состоящие из сложной геометрии или отсутствия адекватных воздушных каналов. Большинство мелких дефектов можно решить, изменив соотношение температуры и времени. [62]

Неполное заполнение

Как видно из названия, этот дефект связан с тем, что полость формы не заполняется полностью и, следовательно, образуется дефектная деталь. Этот дефект вызван тем, что расплавленное сырье не достигает всюду внутри полости. Причиной этого может быть то, что ворота затвердевают до того, как полость полностью заполнена или размер выстрела слишком мал. Увеличение размера выстрела, давления уплотнения, скорости впрыска или температуры пресс-формы может привести к неполному заполнению. Улучшение воздушных каналов пресс-форм или увеличение температуры пресс-формы также могут быть решениями. Если проблемы связаны с подачей материала, проблема может заключаться в обратном прохождении сырья или восстановительном проходе. [61,62]

Вспышка

Вспышка накопление избыточного материала вокруг изделия. Это вызвано утечкой материала между двумя половинами формы. Путем повышения усилия или уменьшения скорости и давление впрыска, пресс-форма

должна остаться более герметичной. Качество инструмента также будет влиять на мигание. Неровная или грязная поверхность пресс-формы предотвращает правильное уплотнение, поэтому необходимо использовать инструменты высокого качества. Используя более высоковязкое исходное сырье можно также помочь вспышке сформировать. Вспышка также может быть отрезана или снята, это должно быть сделано до выжигания. [62]

Пустоты

Образование свободных пространств в отлитых в форму частях обычно причинено газом, будучи поглощённым в полости. Источником этого газа может быть сам связующий материал или просто воздух, захваченный при закрытии формы. Возможные выходы смогли быть: увеличивая давление владением или уменьшая скорость, впрыски. Оба работают путем помощи вентиляции поглощенного газа. Увеличение температуры формы также может помочь. Если конструкция инструмента вариант, двигая стробы или увеличивая их размер, может также извлечь этот дефект [62].

Линии сварки

Этот дефект возникает, когда расплавленный исходный материал внутри пресс-формы расщепляется в разные стороны и вместе с ним соединяется. В точке, где сталкиваются фронты расплавленного исходного сырья, может образоваться дефект сварочной линии. Если фронты, не горячие и достаточно жидкие, материал не будет соединяться должным образом. Это создаст слабую точку в формованной детали. Слишком холодное сырье является причиной этого дефекта. Убедившись, что сырье, достаточно горячее в точке, когда сталкиваются фронты, этот недостаток можно избежать. Повышение температуры пресс-формы и / или сырья может быть решением. Другой подход заключается в уменьшении времени заполнения и тем самым предотвращении охлаждения исходного сырья и его вязкости.

Этот сможете быть сделано путем увеличивать скорость впрыски или увеличивать стробы. [62]

Раковины

Раковины - это дефекты, которые принимали форму отступов на формованной детали. Они не вызваны неполным заполнением, а неравномерной усадкой при охлаждении. Увеличивая давление упаковки, сохранит свою правильную форму при затвердевании. Снижение температуры формы также может обеспечить более равномерную усадку. [62]

Растрескивание

Если части приходят из пресс-формы как треснутые части, то большинства правдоподобный вопрос отстрела. Части МІМ более хрупки, чем чисто полимер одни, поэтому отстрел более критический. Увеличивать топление пресс-формы или использование меньше давления упаковки помогут выпускать части от пресс-формы, понижая усилие от выталкивающих штифтов. Хрупкая природа и тяжеловес металлических компонентов положат их в опасности трескаться после впрысков слишком. По мере того как пресс-форма раскрывает, и части выкинуты, они должны приземлиться как можно нежно. Это могло требовать конструкции дополнительных пандусов и снабжать подкладкой для системы сборника части. [62]

Деформация

Деформирование в формованной детали либо вызвано проблемой выброса, либо неравномерным давлением в компоненте. Поскольку сырье является частично металлическим порошком, детали накапливают тепловую скважину, что является проблематичным во время выброса. Не только выброс может привести, к взлому горячей формованной детали, но также деформации. Увеличивая время, охлаждения или уменьшая нагрев пресс-формы, деформация должна прекратиться. Градиент давления внутри детали также может привести к деформации детали, это можно исправить, уменьшив давление удержания. [62]

Проблемы удаления

Это во время выжигания, что части опыта наибольшее количество стрессов МІМ процесс.

Удаление связующего будет подвергать любой дефект формования, усиливая их, потенциально удаляя всю структурную герметичность, приводя к в сбросе. Тяжелый вес металлического порошка делает компоненты подверженными деформации, но, имея хорошо формованную деталь и используя правильные параметры, часть выжигания должна выходить по назначению. К концу цикла отжига начинается предварительное спекание, усиливающее хрупкие уплотнения. Выжигания - это долгий и трудоемкий процесс, и его нужно делать медленно, чтобы избежать дефектов. Хотя процесс должен прогрессировать медленно, длительная продолжительность также будет означать комнату для улучшений, ускорив процесс всего на несколько процентов, можно будет сохранить много времени. [61,62]

Проблемы спекания

Процесс спекания в последней остановке в цикле МІМ. Это теперь, когда компоненты получают свою окончательную силу, и результаты порицаются. Так как это окончательный процесс, это также где незначительные дефекты, введенные, во время предыдущих процессов будет отображаться. Принцип деятельности спекать основан на уплотнении и усушке. Соответственно, наиболее распространенные дефекты спекания также будут связаны с контролем размеров. Другой типичной причиной проблем спекания является атмосфера. Для успешного управления спекая атмосферы необходим. Это требует, чтобы химия и концентрация газа были правильными. В дополнение к размерным и атмосфера дефекты знакомые формования и выжигания дефектов: трещин, деформаций и вздутий и т. д. [61]

1.4 Технология Моделирование методом послойного наплавления (FDM)

Процесс моделирования наплавленного осаждения (рис. 5) представляет собой технологию RP, первоначально разработанную Stratasys, которая горизонтально откладывает расплавленный термопластичный материал, такой как ABS и PLA (два наиболее распространенных материала, используемых в FDM), выдавливается из головки сопла, части по слоям [64,66,67]

Нить накапливается и расплавляется внутри сжижается при температуре выше его температуры плавления и проталкивается через матрицу сопла с помощью неподвижной сплошной нити накала. По мере того, как сжижайтесь перемещается, экструдированный полимер укладывается, начиная с периметра объекта, а затем наполнителя для каждого слоя объекта [64,66]

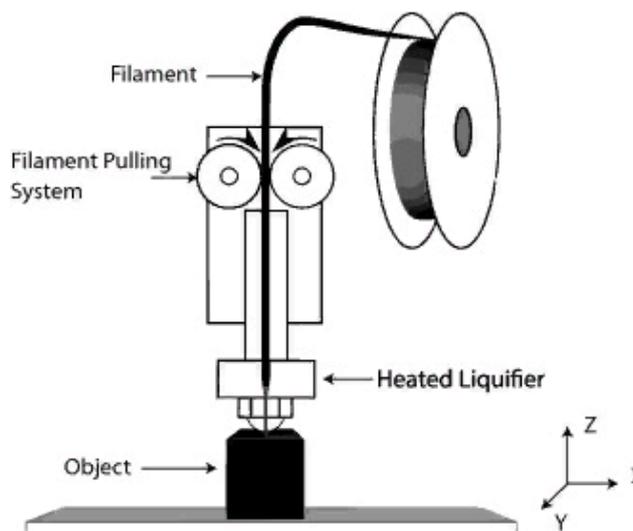


Рисунок 17. Иллюстрация метода FDM

В FDM возможно зависание элементов может быть поддержано структурой, стиль которой может быть либо отрывными, либо водорастворимыми несущими конструкциями [67]. После частичной печати формователи удаляют вручную, удаляя их с поверхности детали, а последние растворяют в растворе вода / растворитель, который не взаимодействует с конструкционным материалом детали.

Хотя основной принцип FDM довольно прост, существует модель управления, поддерживающая весь принцип работы системы, который объединяет все параметры вместе, а именно скорость подачи нити, ширину экструзии, скорость линейной печати и толщину слоя. Эти параметры связаны друг с другом, так как скорость закачки системы зависит от линейного построения скорость и подавая скорость, время последнее также зависит от скорости, при которой конденсатор может расплавить материал и подавать его через сопло [68].

Подобно многим другим аддитивным производственным системам, FDM начинается с файла CAD (*обычно. в STL* Формат). Этот файл используется для создания перекрестного профиля (срезов), который будет печататься послойно. САПР файл только дает слоя наброски, то есть программное обеспечение используется для определения заполнения каждого слоя и постановка сюжета и путь из сопла [68]. Окончательная установка файла печати определяет к которому концу спектра печатания одно смотрит: если к геометрическому разрешению (точным печатям) или если к механическому представлению.

Для лучшего понимания диапазона FDM с точки зрения качества печати на рисунке 5.1. показано влияние скорости подачи и скорости линейного перемещения при заданной толщине слоя на ширину экструзии. Увеличение скорости подачи приводит к увеличению ширины экструзии, и аналогичный сценарий происходит, когда линейная скорость построения экструзионной головки, или сопла, уменьшается, для заданной скорости подачи.

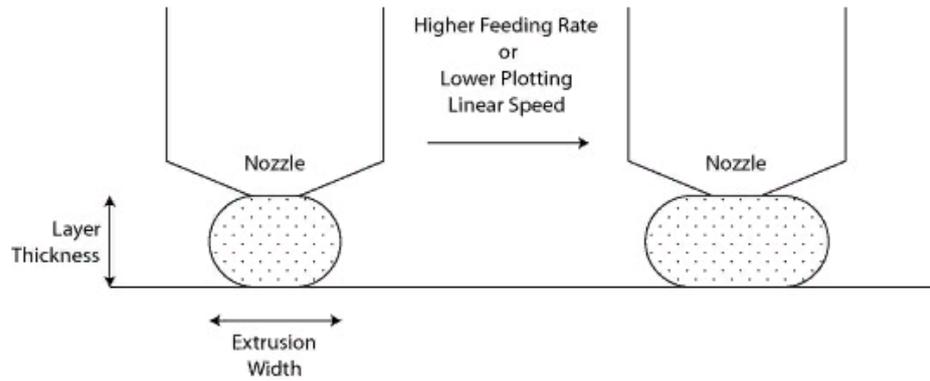


Рисунок 18. ФДМ Ширина экструзии иллюстрации параметра.

Если смотреть на рисунке 5.2, (I) на соседние дорожки очень близко друг к другу, что приводит к перекрытию путей и сверх депозита нити; и (II) соседние дорожки далеких друг от друга, что привело к возникновению пробелов и минимальный или несуществующие связи между ними, что ослабляет структурную целостность части. Таким образом, будет необходимым оптимизировать ширину пути, путем прессовать больше или меньше материал через изменение коэффициента скорости подачи/скорости построения графика головы линейного. Хотя более толстые пути водят к более лучшему выпуску облигаций и таким образом более лучшему механически представлению, оно наиболее вероятно не сумеет соответствовать геометрическому разрешению. Для последней цели тонкий путь обеспечит точность формы в ущерб механическим свойствам.

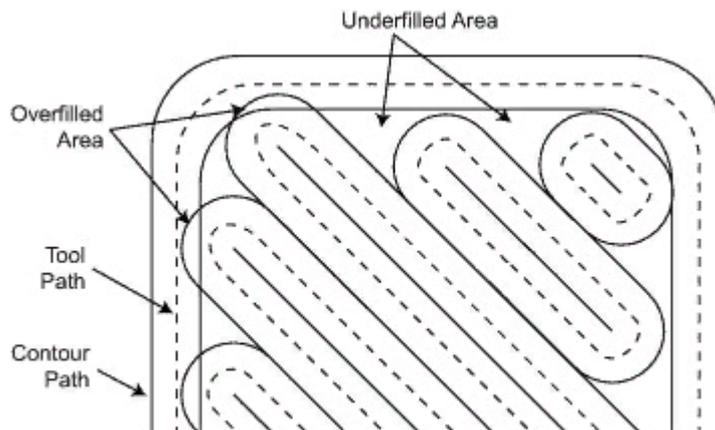


Рисунок 19. Иллюстрация из путей воздействия, когда в целях получения геометрической

точности или механические характеристики.

FDM метод который представляет преимущества быть высок-надежным процессом, в настоящее время требуя низкого начального облечения также, как используя относительно недорогие материалы. Его можно эксплуатировать в окружающих средах офиса, с коротким построенным временем для частей с тонкими стенами, низким материальным отходом (ограниченным к структурам поддержки) и включающее пользу различных материалов или цветов в таких же объекте или слое. С другой стороны, материалы, которые он использует, должны иметь низкую температуру плавления, и, если части требуют опор на свесах, они будут иметь плохую отделку поверхности и зернистый внешний вид, требующий трудоемких ручных рабочих процедур для улучшения эстетики поверхности.

Преимущества FDM

FDM обеспечивает чистый, простой в использовании, удобный 3D-процесс печати. Термопластичные детали могут быть стойкими к воздействию температуры, химических веществ, влажных или сухих сред, и механических напряжений. Растворимые материалы делают возможным изготовление деталей сложной геометрии и полостей, которые было бы сложно изготовить с помощью традиционных методов производства.

Недостатки FDM

Первым, и важнейшим из них является низкое разрешение печати. Сегодня максимальное разрешение домашних 3D-принтеров составляет 0,1 мм, тогда как некоторые способы аддитивного производства имеют разрешение на порядок выше.

Еще один минус – при печати детали с отрицательными поверхностями возникает необходимость в создании поддерживающих элементов. Это приводит к перерасходу материалов и соответственно, к удорожанию производства. К тому же, после создания такой детали приходится обрабатывать ее вручную.

В то же время, благодаря своей доступности и простоте, моделирование методом наплавления стало самой популярной технологией на рынке 3D-печати и пока сдавать свои позиции не собирается.

Дефекты

Так называют дефекты, связанные с самым верхним слоем изготавливаемой модели. Чаще всего, поддутость выражается в появлении отверстий и вздутий на изделии. Проблема связана с провисанием верхнего слоя материала, который не успевает застыть, оставшись без опоры. Несколько таких провисающих слоев и создают брак, известный как вскипание. Борьба с этой неприятностью можно и довольно успешно.

1. Увеличьте степень охлаждения модели. Чем быстрее будет застывать пластик, тем меньше вероятности появления брака.
2. Проверьте толщину стенки и отдельного слоя. Помните, что любая стенка должна насчитывать не менее 6 слоев, только в этом случае будет достигнуто необходимое качество. Толщина слоя менее 0,1 мм – это также угроза для изделия.
3. Поиграйте настройками заполняемости – иногда слайсеры меняют заполняемость после достижения определенной величины заполнения. Большая заполняемость поможет избежать поддутости.

Неслойность

При неслойности нарушается геометрия модели. Особенно хорошо это видно на изделиях, имеющих правильную геометрическую форму, например, круглые модели получаются продолговатыми или кривыми. Также при этом дефекте отсутствует параллельность линий, везде или на некоторых участках. Обычно такой дефект является следствием проблем с ремнями, которые идут к шаговым двигателям. Устраняется эта неисправность своими силами.

- Произведите подтяжку ремней. Последовательность действий при этой процедуре зависит от типа принтера, и узнать ее можно у производителя.
- Проверьте состояние всех крепежей. Если некоторые узлы вызывают сомнение – подтяните их, применяя инструменты, которые входили в поставку оборудования.
- Произведите смазку направляющих – обычно для этого достаточно нанести на каждую из них одну каплю масла

Слоновья нога

Основной признак этого дефекта – неравномерные слои, утолщающиеся в нижней части модели. Нижние слои имеют большую площадь из-за того, что при старте печати сопло устройства слишком плотно прижато к столу и слегка размазывает материал. По мере удаления от стола — это явление постепенно исчезает. Исправить можно таким образом:

- Произведите регулировку стола, чтобы между ним и головкой было небольшое расстояние.
- Попробуйте понизить температуру стола, но не переусердствуйте, так как холодное основание может негативно влиять на печать.
- Поработайте над конструкционным решением изделия, добавив кое-где фаски или небольшие сопряжения. Для того, чтобы данный совет принес результат, нужно потратить немного времени и найти «золотую середину» экспериментальным путем.

FDM освобождает от традиционных конструкторских и производственных ограничений, поскольку строит модель послойно снизу-вверх. Сегодня технология FDM используется конструкторами и инженерами практически в любой отрасли промышленности. Студенты и школьники используют FDM прямо в своих аудиториях и классах.

Вывод

Изучение российской и зарубежной литературы показало возможность использования технологии FDM в процессе формирования деталей из исходных сырьевых материалов (фидстоков) МІМ технологий. Преимуществом технологии FDM является низкая стоимость оборудования и простота ее использования. Преимущество технологии МІМ заключается в том, что она позволяет создавать точные и качественные детали, лишенные проблем, присущих SLM и EBM. При этом стоимость формы для литья (оснастки) достаточно высока, а ее изготовление представляет собой непростую задачу. Особенно это критично, когда необходимо произвести единичные опытные образцы либо мелкую серию продукта. Кроме того, традиционные МІМ технологии не позволяют формировать пористое изделие либо деталь, имеющую внутри пустоты, сложную структуру и т.д.

Объединение этих двух технологий для производства сложных металлических деталей позволит решить вышеуказанные проблемы. Для этого необходимо решить ряд взаимосвязанных задач:

1. Исследовать свойства исходного сырья на основе высоконаполненных полимер-металлических фидстоков и их применимость в технологии FDM.
2. Изучить технологические режимы формирования филамента с постоянными свойствами и качеством для использования в традиционных плунжерных 3D принтерах для FDM.
3. Изучить влияние технологических режимов процесса 3D печати на дефектообразование в процессе печати изделия.
4. Исследовать влияние параметров 3D печати на прочностные свойства отпечатанной детали.

Использование данной технологии в перспективе позволит получать сложные изделия из комбинаций различных материалов и сплавов для получения детали с градиентными свойствами. Например, разные части детали

смогут иметь различную твердость, истираемость, теплофизические свойства для обеспечения более высокой ресурс эффективности и функциональности при создании современных машин и механизмов

4 «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Основные потребители результатов исследований представлены в таблице 6.

Таблица 6 – основные потребители результатов исследований

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Низкая стоимость оборудования С2. Заявленная экономичность и энергоэффективность метода. С3. По сравнению с другими технологиями стоимость производства низкая. С4. Простота использования	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Частичный сбой программного обеспечения Сл2. Процесс печати занимает очень много времени Сл3.Отсутствие корпуса в оборудовании, влияет на появление дефектов
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Применение данной технологии позволит производству к снижению затрат. В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.		
Угрозы: У1. Отсутствие материала на внутреннем рынке У2. Запах материала может привести к различным заболеваниям У3. Дефицит материалов, на внутреннем рынке		

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта, который может быть представлен в виде линейного графика или диаграммы Ганта.

Таблица 7 – календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление технического задания	4	06.09.17	09.09.17	Костиков К.С
2	Изучение литературы	44	10.09.17	23.10.17	Базарбай Б.Б
3	Анализ порошка	10	24.10.17	02.11.17	Базарбай Б.Б
4	Моделирование детали в SolidWorks	23	03.11.17	25.11.17	Базарбай Б.Б
5	ТГА анализ	21	26.11.17	15.12.17	Базарбай Б.Б, Донцов Ю.В
6	Техническая настройка 3d-печати	14	16.12.17	30.12.17	Базарбай Б.Б
7	Проведение серии экспериментов	34	27.03.18	18.05.18	Базарбай Б.Б

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. График строится в виде таблицы (таблица 8) с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта.

чин проблемы и последующего графического представления. Данная диаграмма используется для выявления причин возникновения проблем, анализа и структурирования проекта, а также для оценки причинно-следственных связей. Проблемной областью анализа является шероховатость поверхности полученной детали методом Электронно-лучевой плавкой. технической. К факторам, влияющим на объект анализа, можно отнести:

- персонал;
- оборудование;
- технологию проведения работ.

Причинно-следственная диаграмма представлена на рисунке 1.



Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» произведён анализ конкурентных технических решений установки для 3Д печати. Проведен сравнительный Исикава анализ применения методов FDM печати в промышленном производстве. По данному анализу предоставлена матрица Исикава.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Социальная ответственность – это ответственность организации за воздействие её решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения;
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется в ее взаимоотношениях [39].

Целью данного раздела является проведение анализа вредных и опасных факторов при проведении исследовательских работ и решение вопросов, касающихся защиты работников от выявленных факторов при проведении производственных работ.

Данная работа включает в себя изучение содержания сырьевых материалов фидстоков, получить изделия сложной формы с помощью fdm технологий.

Комплекс исследовательских работ включает в себя два этапа: лабораторный и камеральный, которые выполняются в помещении.

Рабочее место расположено в аудитории №208 на втором этаже здания Научного парка Томского политехнического университета (ТПУ).

5.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

В процессе изготовления филамента и при работе с технологий FDM все действия должны проводиться для уменьшения или сведения к минимуму воздействия вредных факторов на сотрудников. Опасные факторы можно отнести к физическим, химическим и биологическим факторам.

Во время работы с оборудованием — это может привести к повреждению работающего с ним работника, если вы прикоснетесь к столу или соплам при получении деталей. Если вы не заметите, вы можете сжечь руку, получая детали.

С точки зрения условий работы, то весьма опасны такие факторы, как загазованность воздуха, слишком высокая или слишком низкая температура воздуха, повышенная влажность в помещении, отсутствие движения воздуха в рабочей зоне, опасность электрического замыкания, повышенный уровень шума и вибраций, слабая освещенность помещения, радиационный фон. К главной химической опасности можно отнести проникновение в организм человека токсических веществ. К биологически вредным факторам относится влияние различных микробов.

5.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

В таблице 9 представлена информация о вредных и опасных факторах, возникающих при проведении работ.

Таблица 9 - Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при полевых работах

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Опасные	Вредные	
Лабораторный и камеральный этапы проведения работ			
Обработка информации на персональном компьютере (построение графиков и схем, обработка базы данных, набор текста и т.д.)	1. Электрический ток; 2. Пожароопасность;	1. Отклонение показателей микроклимата в помещении; 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны; 3. Монотонный режим работы	СанПиН 2.2.4.548-96 [49] ГОСТ Р 50571.3-94 [40] ГОСТ 12.1.38-82[42] ГОСТ 12.1.004-91 [41] СП 52.13330.2011 [43]
Химический анализ	Наличие паров органических веществ	Химический ожог кислотой	ГОСТ 12.0.003-2015 [47]

Примечание: Пожарная и взрывная безопасность рассматривается в п.3.

5.3 Вредные факторы

При работе 3D-принтера выделяются вредные вещества, которые не значительно влияют на здоровье человека. По ГН 2.2.5.1313–03 для акрилонитрила (С3Н3N), которые входит в состав Catamold 316L пластика: – Величина предельно допустимая концентрация: 5 мг/м³; – Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства: а - аэрозоль; – Класс опасности: не опасное. Так как величина предельно допустимой концентрации 5

мг/м³ для уменьшения концентрации можно провести вентиляцию над рабочей зоной или периодически проветривать помещение.

5.3.1 Микроклимат

Параметры микроклимата могут меняться в широких пределах, в то время как необходимым условием жизнедеятельности человека является поддержание постоянства температуры тела благодаря терморегуляции, т.е. способности организма регулировать отдачу тепла в окружающую среду. Принцип нормирования микроклимата – создание оптимальных условий для теплообмена тела человека с окружающей средой. 3D-принтер является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлен 3D-принтер, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата. В санитарных нормах СанПиН 2.2.4-548-96 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения (см. табл. 10).

Объем помещений, в которых размещены работники вычислительных центров, не должен быть меньше 19,5м³ /человека с учетом максимального числа одновременно работающих в смену. Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположен 3D-принтер, приведены в табл. 11.

Таблица 10. Параметры микроклимата для помещений, где установлен 3D-принтер

Период	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Температура воздуха в помещении	22...24 °С 40...60 % до 0,1м/с

	Относительная влажность Скорость движения воздуха	
Теплый	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	23...25 °С 40...60 % 0,1...0,2м/с

года Таблица 11

Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где 3D-принтер

Характеристика помещения	Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м ³ /на
Объем до 20м ³ одного человека в час 3 на человека 20...40м ³ на человека Более 40м ³ на человека	Не менее 30 Не менее 20 Естественная вентиляция

Для обеспечения комфортных условий используются как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система).

5.3.2 Освещение

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способ-

ствуется повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать б5 резкие тени, блики, дезориентировать работающего. Все эти причины могут привести к несчастному случаю или профзаболеваниям, поэтому столь важен правильный расчет освещенности.

Существует три вида освещения - естественное, искусственное и совмещенное (естественное и искусственное вместе).

Согласно СНиП 23-05-95 в помещения вычислительных центров необходимо применить систему комбинированного освещения.

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного освещения обычно используются люминесцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ.

Требования к освещенности в помещении для нашего случая, следующие: при выполнении зрительных работ средней точности общая освещенность должна составлять 200лк, а комбинированная - 500лк.

Кроме того, все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Иными словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой

утомляемости.

5.3.3 Электробезопасность

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50Гц. [4] По опасности электропоражения кабинет относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного соприкосновения с имеющими соединение с землей металлическими предметами и металлическими корпусами оборудования.

При нормальном режиме работы оборудования опасность электропоражения невелика, однако, возможны режимы, называемые аварийными, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта FDM или 3D-принтера;
- при возможном коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания, блоке развертки монитора. Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются:
 - изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
 - установки защитного заземления;
 - своевременный осмотр технического оборудования, изоляции.

5.3.4 Пожар взрывобезопасность

Пожар в кабинете может привести к очень неблагоприятным последствиям (потеря ценной информации, порча имущества, гибель людей и т.д.), поэтому необходимо: выявить и устранить все причины возникновения пожара; разработать план мер по ликвидации пожара в здании; план эвакуации людей из здания. Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробое изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

Эксплуатационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования и правильное содержание помещения, удовлетворяющее требованиям СНиП 245-71.

В качестве средств пожаротушения используются пожарные краны, находящиеся в коридоре, а также передвижной углекислотный огнетушитель типа ОП-1. Огнетушитель порошковый ОП-1 предназначен для тушения возгорания твердых, жидких и газообразных веществ (класса А,В,С или В,С в зависимости от типа применяемого порошка).

1. Недостаточная освещенность рабочей зоны. При правильно организованном освещении рабочего места обеспечивается сохранность зрения человека и нормальное состояние его нервной системы, а также безопасность в процессе производства. Различают следующие виды про-

изводственного освещения: естественное, искусственное и совмещенное.

В помещении, где находится рабочее место, есть естественное и искусственное освещение. Естественное освещение осуществляется через световые проемы. Естественное освещение нормируется по «коэффициенту естественной освещенности» (КЕО) или (е) естественного освещения. Коэффициент естественной освещенности, согласно СНиП 23-05-95 [5] вычисляется по формуле (1)

$$KEO=(E/E_0)\times 100\%, (...)$$

где, E – освещенность (измеренная) на рабочем месте, лк;

E_0 – освещенность на улице (при среднем состоянии облачности), лк. Обеспечивается коэффициент естественного освещения не ниже 1,5%.

5.5 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Рабочее место сотрудника должно удовлетворять всем требованиям, согласно регламентирующих тот или иной вид деятельности стандартов. Рабочее место не должно быть подвержено иным вредным воздействиям, не оговоренным в стандартах.

Основными мероприятиями, направленными на ликвидацию причин травматизма, относятся [40]:

- Систематический контроль состояния изоляции электропроводов и кабелей;
- Разработка инструкций по техническому обслуживанию и эксплуатации вычислительной техники и контроль их соблюдения;
- Соблюдения правил противопожарной безопасности; 74

– Своевременное и качественное выполнение работ по проведению планово-профилактических работ и предупредительных ремонтов.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности помещениях использования ПЭВМ следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить яркость окон могут быть применены занавеси, шторы, жалюзи [43]

Экологическая безопасность

Возможно множество способов превращения полимерного мусора в полезные продукты. Их первичная обработка включает в себя повторное использование низкосортных отходов и обрезков непосредственно в местах их производства, первичная обработка приемлема для полимеров, имеющих низкий уровень загрязнения.

Вторичная обработка заключается в разделении, очистке и повторном использовании полимеров. Первичная и вторичная обработка нацелены на восстановление пластмасс, однако эти виды обработки зачастую ограничены загрязнением, деградацией свойств и т.д.

Некоторые предприятия прибегают к сжиганию отходов, но в таком случае доля полезных продуктов чрезвычайно мала.

Наиболее прогрессивный подход – химическая переработка, технологии которой многообразны. Это превращение полимера в мономер, разрушение к низким молекулярным массам через расщепление точно определенных химических связей, наращивание полимерных цепей для восстановления молекулярной массы и т.д. Как Вы заметили, технологий химической переработки в настоящий момент множество, чтобы отдать предпочтение именно

этому подходу. Данный подход к переработке отходов позволяет восстановить их большее число и не имеет ряда ограничений.

В соответствии с ФККО полимерные отходы классифицируются как отходы 5 класса опасности, к 4 классу относятся пыль полимерных материалов.

Компания «ЭкоАрхитектура» оказывает профессиональные услуги в Томске по утилизации отходов 1-5 класса опасности. Мы утилизируем в Томске, просп. Ленина, 110, оф. 465

5.6 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

В научно-исследовательской лабораторий в ходе процесса выполнения ВКР не оказывается влияние на природную окружающую среду.

При получении объект исследование могут возникнуть воздействие. При нагреве материала вредный запах. Вредный запах оказывать следующий влияние:

Запах может ослабит иммунитет. Порошок состоит из 75 % процент металла, и 25 % процент с пластмассы. Пластмассы состоит из 5% процент Стеариновая кислота, 25% процент с полипропилен, с 70% процент с парафин.

5.7 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Экологическая задача производства заключается в рациональном использовании сырья и электроэнергии, замене вредных для окружающей среды технологических процессов на более экологичные. Загрязнений воздушного бассейна, гидросферы и литосферы при работе непосредственно с

установкой 3D принтер, марки «PrintBox» не обнаружено.

5.8 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

При изготовлении образцов энергия в первую очередь расходуется на работу аддитивной машины, процесс оказывается весьма энергоемким. Ниже приведены основные методы снижения энергопотребления, которые можно применять как вместе, так и по отдельности: модернизация аддитивной машины; использование остаточного тепла 3D принтера.

5.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.

В ходе проведенной научной-исследовательской работы необходимо соблюдать предельную осторожность. В целом объектом исследований является готовые гранулы марки Catamold 316L, который не может являться причиной возникновения ЧС.

Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.

При проведении исследований существует вероятность появления пожара. Причинами возникновения пожара неэлектрического характера могут быть неосторожное обращение с огнем, нагревающимися предметами, электронагревательными приборами, легковоспламеняющимися веществами. Самовозгорание веществ электрического характера возможно вследствие ко-

роткого замыкания, перегрузки электросети, больших переходных сопротивлений.

Во избежание травм и повреждения системы PrintBox существует несколько различных систем безопасности, в том числе: экстренная остановка; главный выключатель безопасности; функция остановки высокого напряжения; несколько механических предохранителей; двери с ключом с предохранительными выключателями.

Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

Для предупреждения пожара проводятся организационные, эксплуатационные, технические и режимные мероприятия. К организационным мероприятиям относятся: обучение работающих пожарной безопасности; проведение инструктажа, бесед, лекций и др.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных правил и норм при устройстве отопления, вентиляции, оборудования. К мероприятиям режимного характера относится запрет курения в неустановленных местах. В случае возникновения пожара из помещения выносятся, в первую очередь, дорогостоящее оборудование и ценная документация, но без риска для людей.

При возникновении пожара надо организовать эвакуацию людей, используя для этого имеющиеся средства: при необходимости вызвать газоспасательную, медицинскую и другие службы; прекратить все работы, не связанные с мероприятиями по ликвидации пожара: обеспечить защиту людей, принимающих участие в тушении пожара, от возможных обрушений конструкций, поражений электрическим током, отравлений, ожогов.

По прибытии подразделений пожарной охраны представитель администрации предприятия, руководивший тушением пожара, обязан сообщить начальнику подразделения пожарной охраны необходимые сведения об очаге по-

жара; мерах, принятых по его ликвидации, а также о наличии в помещениях людей, занятых ликвидацией пожара.

Одним из основных способов защиты работников от чрезвычайных ситуаций является эвакуация. Сущность эвакуации заключается в организованном перемещении людей в безопасное место.

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.

Во-первых, начальник должен обеспечить работников спец. одеждой и необходимыми инструментами, помещение с хорошо оборудованной и отвечающей всем стандартам, микроклимата, освещения, шума, так же отвечающей всем правилам техники безопасности.

5-дневный режим работы с 9 до 18:00, с обедом с 13:00 до 14:00.

Плата за вредность, льготы в виде бесплатного молока в количестве 5 штук, раз в месяц. За вредность в работе, предоставляется надбавка к заработной плате в виде 5%. Бесплатный медицинский осмотр 2 раза в год.

Нормы на допустимые токи и напряжения прикосновения в электроустановках установлены в соответствии с предельно допустимыми уровнями воздействия на человека токов и напряжений прикосновения.

Электробезопасность обеспечивается: конструкцией электроустановок; техническими способами и средствами защиты; организационными и техническими мероприятиями.

Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствуют требованиям электробезопасности.

ГОСТ 12.2.033-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования».

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

Под организацией рабочего места понимается его оснащение и планировка. Полное и комплектное оснащение рабочего места, а также его рациональная планировка позволяют наилучшим образом организовать трудовой процесс и, как следствие, повысить его эффективность.

Общие эргономические требования устанавливаются к рабочим местам при выполнении работ в положении сидя и стоя при проектировании нового и модернизации действующего оборудования и производственных процессов. К ним относятся следующие требования:

- * Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.
- * Выполнение трудовых операций «часто» и «очень часто» должно быть обеспечено в пределах зоны лёгкой досягаемости и оптимальной зоны моторного поля.
- * Конструкцией производственного оборудования и рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием.

Вывод

В результате можно сделать следующие выводы. Социальная ответственность – это реализация не только своих экономических интересов и целей, но и учет социальных последствий воздействия деловой активности на собственный персонал, потребителей и организации, совместно с которыми осуществляется та или иная деятельность. В разделе «Социальная ответственность» был проведён анализ вредных и опасных факторов. Разработаны мероприятия при возникновении ЧС и мер по ликвидации её последствий.

Выводы о проделанной работе

В данной работе доказано, что можно получать сложные детали с помощью FDM технологий, с использованием в качестве сырьевых материалов высоконаполненных полимеров, применяемых в МИМ технологиях. Преимуществом технологии FDM является низкая стоимость оборудования и простота ее использования, а также не высокие требования к исходным материалам.

Исследованы особенности поведения материала методами ТГА и ПТР. Определены пределы оптимальных температур, при которых материал обладает наилучшими технологическими параметрами при температурах в пределах от начала плавления материала до начала деструкции, входящего в состав композиции полимера: 190-210°C.

Показано, что для высоконаполненных полимерных материалов при их экструдировании наиболее важную роль играет величина создаваемого в экструдере давления по сравнению с температурой.

Определен оптимальный режим 3D печати, позволяющий получать изделия с наименьшей дефектностью с помощью стандартного FDM принтера: толщина слоя: 0.6 мм, процент заполнения: 100%, скорость печать: 25 мм/с, экструдированная ширина: 0.7 мм, количество подаваемого материала: 1.

Получаемые по данной технологии изделия далее возможно подвергать обработке традиционными для МИМ технологий методами с целью получения спеченных металлических изделий. Использование данного подхода в перспективе позволит получать металлические изделия сложной формы и структуры из комбинаций различных материалов и сплавов для получения детали с градиентными свойствами. Например, разные части детали смогут иметь различную твердость, истираемость, теплофизические свойства для обеспечения более высокой ресурс эффективности и функциональности при создании современных машин и механизмов.

Список использованных источников

1. В.С. Антонова, И.И. Осовская. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ/ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ// Санкт-Петербург 2017
2. А.Н. Чемодуров. ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ//Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч. 2
3. Осокин Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Электрон. дан. (5 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008
4. Kruth JP, Levy GN, Klocke F, Childs THC. Ann CIRP 2007;56(2):730–59.
5. Santos, E.C., Osakada, K., Shiomi, M., Kitamura, Y., Abe, F., 2004. Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting. Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science 218 (7), 711–719.
6. Kozo Osakada, Masanori Shiomi. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1188–1193
7. Kruth, J.-P., Levy, G., Klocke, F., Childs, T.H.C., 2007, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, CIRP Annals, 56/2: 730-759
8. Morgan, R., Sutcliffe, C.J., O'Neill, W., 2004, Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives, J. of Materials Science, 39/4: 1195-1205
9. Hauser, C., Childs, T.H.C., Taylor, C.M., Badrossamay, M., Akhtar, S., Wright, C.S., Youseffi, M., Xie, J., Fox, P., O'Neill, W., 2003, Direct selective laser sintering of tool steel powders to high density: Part A- effective of laser beam width and scan strategy, Proc. SFF Symp., Austin, Texas, USA, 644-655

10. Zhao, H.D., Wang, F., Li, Y.Y., Xia, W., 2009, Experimental and numerical analysis of gas entrapment defects in plate ADC12 die castings, *J. of Materials Processing Technology*, 219/9: 4537- 4542
11. Avalor, M., Belingardi, G., Cavatorta, M.P. Doglione, R., 2002, Casting defects and fatigue strength of a die cast aluminium alloy: a comparison between standard specimens and production components, *International J. of Fatigue*, 24/1: 1-9
12. Rombouts, M., 2006, selective laser sintering / melting of iron-based powders, Ph.D. Thesis, K.U.Leuven
13. Dalgarno, K., 2007. Materials research to support high performance RM parts. In: *Rapid Manufacturing 2nd International Conference*, Loughborough University, pp. 147–156.
14. Abe, K. Osakada, M. Shiomi, K. Uematsu, M. Matsumoto, the manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting, *Journal of Materials Processing Technology* 111 (1–3) (2001) 210–213.
15. Довбыш В. М., Забеднев П. В., Зеленко М. А. Аддитивные технологии и изделия из металла. Библиотечка литейщика. № 8–9. 2014.
16. Olakanmi E. O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties // *Journal of Materials Processing Technology* № 213. 2013. P. 1387–1405.
17. ГОСТ 25849-83. Порошки металлические. Метод определения формы частиц. М.: Издательство стандартов, 1983.
18. Eleftherios Louvis, Peter Fox, Christopher J. Sutcliffe. Selective laser melting of aluminium components // *Journal of Materials Processing Technology* № 211. 2011. P. 275–284.
19. Olakanmi E. O., Dalgarno K.W., Cochrane R.F. Laser sintering of blended AlSi powders // *Rapid Prototyping Journal* №18(2). 2012. P. 109–119.

20. Nesma T. Aboulkhair, Nicola M. Everitt, Ian Ashcroft, Chris Tuck. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting // Additive Manufacturing Journal №1–4. 2014. P.77–86
21. А. Н. Солонин СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ КАК ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НИТУ «МИСиС», г. Москва
22. <http://blog.iqb-tech.ru/slm-technology>
23. Lore Thijs, Frederik Verhaeghe, Tom Craeghs Jan Van Humbeeck, Jean-Pierre Kruth. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V Available online 16 March 2010
24. I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, Springer, 2010.
25. L.U. Larsson Morgan, Harrysson Ola, Rapid manufacturing with electron beam melting (EBM)—A manufacturing revolution? in: B. D (Ed.), Solid Freeform Fabrication Symposium, 2003, pp. 438–443, Austin, TX.
26. X. Gong, T. Anderson, K. Chou, Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology, ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation, American Society of Mechanical Engineers (2012) 507–515.
27. M.S.J. Milberg, Electron beam sintering of metal powder, Prod. Eng. 2 (2008).
28. L.E. Murr, E. Martinez, S. Gaytan, D. Ramirez, B. Machado, P. Shindo, J. Martinez, F. Medina, J. Wooten, D. Ciscel, Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting, Metall. Mater. Trans. A 42 (11) (2011) 3491–3508.
29. S. Biamino, A. Penna, U. Ackelid, S. Sabbadini, O. Tassa, P. Fino, M. Pavese, P. Gennaro, C. Badini, Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation, Intermetallics

- 19 (6) (2011) 776–781.
30. S. Fager Franzén, J. Karlsson, Titanium Aluminide Manufactured by Electron Beam Melting, 2010.
31. [28] A. Antonysamy, J. Meyer, P. Prangnell, Effect of build geometry on the grain structure and texture in additive manufacture of Ti 6Al 4V by selective electron beam melting, *Mater. Charact.* 84 (2013) 153–168.
32. Y.-Y. Kim, Microstructural evolution and mechanical properties of a forged gamma titanium aluminide alloy, *Acta metallurgica et materialia* 40 (6) (1992) 1121–1134.
33. S. Draper, G. Das, I. Locci, J. Whittenberger, B. Lerch, H. Kestler, Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Gamma Met PX, 2003. [31] A. Mitchell, Melting, casting and forging problems in titanium alloys, *Mater. Sci. Eng. A* 243 (1) (1998) 257–262. [
34. A. Duarte, F. Viana, H.M. Santos, As-cast titanium aluminides microstructure modification, *Mater. Res.* 2 (3) (1999) 191–195.
35. J. Parthasarathy, B. Starly, S. Raman, A. Christensen, Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM), *J. Mech. Behav. Biomed.* 3 (3) (2010) 249–259.
36. P. Heintl, C. Körner, R.F. Singer, Selective electron beam melting of cellular titanium: mechanical properties, *Adv. Eng. Mater.* 10 (9) (2008) 882–888.
37. Arcam, ASTM F75CoCr Alloy, 2016 .
38. Arcam, Ti6Al4V ELI Titanium Alloy, 2016 .
39. Arcam, Ti6Al4V Titanium Alloy, 2016 .
40. P. Heintl, L. Müller, C. Körner, R.F. Singer, F.A. Müller, Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting, *Acta Biomater.* 4 (5) (2008) 1536–1544.
41. P. Thomsen, J. Malmström, L. Emanuelsson, M. Rene, A. Snis, Electron beam-melted, free-form-fabricated titanium alloy implants: material surface

- characterization and early bone response in rabbits, *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 90 (1) (2009) 35–44.
42. A. Palmquist, A. Snis, L. Emanuelsson, M. Browne, P. Thomsen, Long-term biocompatibility and osseointegration of electron beam melted, free-form-fabricated solid and porous titanium alloy: experimental studies in sheep, *J. Biomater. Appl.* (2011), 0885328211431857.
43. G. Chahine, H. Atharifar, P. Smith, R. Kovacevic, Design optimization of a customized dental implant manufactured via electron beam melting®, in: *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, USA, 2009, pp. 631–640.
44. L.E. Murr, S.M. Gaytan, A. Ceylan, E. Martinez, J.L. Martinez, D.H. Hernandez, B.I. Machado, D.A. Ramirez, F. Medina, S. Collins, R.B. Wicker, Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting, *Acta Mater.* 58 (5) (2010) 1887–1894.
45. D. Cormier, O. Harrysson, T. Mahale, H. West, Freeform fabrication of titanium aluminide via electron beam melting using prealloyed and blended powders, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2007 (2008).
46. P. Heintl, A. Rottmair, C. Korner, R.F. Singer, Cellular titanium by selective electron beam melting, *Adv. Eng. Mater.* 9 (5) (2007) 360–364.
47. O. Harrysson, B. Deaton, J. Bardin, H. West, O. Cansizoglu, D. Cormier, D. Marcellin-Little, Evaluation of titanium implant components directly fabricated through electron beam melting technology, in: *Materials and Processes for Medical Devices Conference*, Boston, 2006, pp. 15–20.
48. H. Clemens, H. Kestler, Processing and applications of intermetallic -TiAl-Based alloys, *Adv. Eng. Mater.* 2 (9) (2000) 551–570
49. S. Knippscheer, G. Frommeyer, Intermetallic TiAl (Cr, Mo, Si) alloys for lightweight engine parts, *Adv. Eng. Mater.* 1 (3–4) (1999) 187–191.
50. S.M. Gaytan, L.E. Murr, F. Medina, E. Martinez, M.I. Lopez, R.B. Wicker,

- Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting, *Mater. Technol.* 24 (3) (2009) 180–190.
51. L.E. Murr, S.M. Gaytan, F. Medina, E. Martinez, J.L. Martinez, D.H. Hernandez, B.I. Machado, D.A. Ramirez, R.B. Wicker, Characterization of Ti-6Al-4V open cellular foams fabricated by additive manufacturing using electron beam melting, *Mater. Sci. Eng. A Struct.* 527 (7–8) (2010) 1861–1868. [
 52. C. Korner, E. Attar, P. Heinl, Mesoscopic simulation of selective beam melting processes, *J. Mater. Process. Technol.* 211 (6) (2011) 978–987. [60] E. Attar, *Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes*, Dr. – Ing., University of Erlangen, Nuremberg, Germany, 2011.
 53. T. Mahale, *Electron Beam Melting of Advanced Materials and Structures, Mass Customization, Mass Personalization*, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2009.
 54. A. Neira Arce, *Thermal Modeling and Simulation of Electron Beam Melting for Rapid Prototyping on Ti6Al4V Alloys*, 2012.
 55. H.B. Qi, Y.N. Yan, F. Lin, W. He, R.J. Zhang, Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting, *Proc. Int. Mech. Eng. B. J. Eng.* 220 (11) (2006) 1845–1853. [64] A. AB, <http://www.arcam.com/>. (Accessed November 2016).
 56. M. Sigl, S. Lutzmann, M. Zäh, Transient physical effects in electron beam sintering, in: *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, Austin, TX, 2006, pp. 397–405.
 57. M. Larsson, A. Snis, Method and device for producing three-dimensional objects, Google Patents, 2008.
 58. B. Cheng, S. Price, J. Lydon, K. Cooper, K. Chou, On process temperature in powder-bed electron beam additive manufacturing: model development and validation, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. Asme* 136 (6) (2014).

59. BASF, 2009. 1. [Online] Available at: http://www.catamold.de/cm/inter-net/en_GB/function/conversions:/publish/content/Microsite/Catamold/Technische_Informationen_/Verfahrensanweisungen/GeneralProcessing_Instructions_Catamold_CIM.pdf [Accessed 2 12 2016].
60. Ehrhart, P., 1991. Properties and interactions of atomic defects in metals and alloys. 3 ed. Berlin: Springer.
61. German, R. M. & Bose, A., 1997. Injection Molding of Metals and Ceramics. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
62. Heaney, D. F., 2012. Handbook of metal injection molding. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
63. Polyplastics, 2016. Polyplastics. [Online] Available at: <https://www.polyplastics.com/en/support/mold/outline/> [Accessed 5 11 2016].
64. M. Too, K. Leong, C. Chua, Z. Du, S.F. Yang, C.M. Cheah, S.L. Ho, Investigation of 3D non-random porous structures by fused deposition modelling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 19 (2002) 217–223.
65. J. Kruth, M. Leu, T. Nakagawa, Progress in additive manufacturing and rapid prototyping, *CIRP Ann. Technol.* 47 (1998) 525–540.
66. S.H. Masood, W. Rattanawong, P. Iovenitti, Part build orientations based on volumetric error in fused deposition modelling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 16 (2000) 162–168.
67. T. Grimm, Fused Deposition Modeling: A Technology Evaluation, T.A. Grimm & Associates, Inc., Atlanta, 2002.
68. B. Mueller, Additive Manufacturing Technologies, Springer Science+Business Media, New York, 2012.

Список публикаций студента

Получение металлических изделий методом FDM из Фидстоков, применяемых в МIM технологиях / Б.Б. Базарбай , Ю.В. Донцов , К.С. Костиков // Современные технологии и материалы новых поколений, г. Томск, 9–13 октябрь 2017 г.

Приложение А

Thermogravimetric analysis (TGA)

To study the behavior of the material - Catamold 316L, thermogravimetric analysis was used during heating, a method in which the change in sample mass as a function of temperature is recorded. Thermogravimetric analysis is necessary to more accurately adjust the injection temperature of the metal-polymer composite during the printing of the samples. It will allow to determine at what temperature the melting of the material begins, as well as its thermal destruction.

TGA was performed on the SDT Q600 device (Figure 5), which is a combined TGA / DSC / DTA analyzer, which allows simultaneous recording of changes in sample mass and processes accompanied by the release or absorption of heat. The device is equipped with a horizontal two-beam design with automatic beam growth compensation and the possibility of simultaneous analysis of two TGA samples. The DSC heat flux data is dynamically normalized using the instantaneous weight of the sample at any given temperature.

The DSC heat flux data is dynamically normalized using the instantaneous weight of the sample at any given temperature.



Figure 5. Installing the SDT Q600

The device has the following characteristics:

- Temperature range - up to 1500 ° C
- Heating rate up to 1000 ° C - from 0.1 to 100 ° C / min.
- The cooling rate of the furnace is from 1500 to 50 ° C in less than 30 minutes.

- Sample weight - up to 200 mg
- Weighing sensitivity - 0.1 µg
- Calorimetric accuracy / production - ± 2% (by metal standards)
- DTA sensitivity - 0.001 ° C
- Sample atmosphere control

Material analysis was carried out in an inert argon medium in the temperature range from 10 ° C to 990 ° C to prevent oxidation of the metal forming the basis of the polymer-metal composite Catamold 316L. For the measurement, we took a sample of 77.20 mg, a heating rate of 10 ° C / min.

Melt flow index (MFR) for the 316L

The flow rate of the melt of thermoplastics is the flow velocity (melt index). It is defined as the mass of a substance in grams, passing through a standard nozzle for 10 minutes. at a certain temperature and load. The speed is expressed in g / 10 min. Determination of the melt flow index (MFR) of thermoplastics is carried out according to GOST 11645-73 in an extrusion plastometer that is part of the IORT (Figure 6)



Figure 6. Istr-5 extrusion plastometer

The device includes a voltage regulator, a contactless temperature regulator, a stand with a base plate and a stand on which an extrusion plastometer is attached. The extrusion plastometer (Figure 6) consists of a heated cylinder (inner diameter 9.54 ± 0.016 mm), in the cavity of which a piston is installed.

The temperature regulator of the device ensures that the cylinder is heated in the range of 100-200 ° C with an accuracy of ± 0.5 ° C. A calibrated capillary is installed in the lower part of the cylinder (diameter 2.095 ± 0.005 mm, length 8.000 ± 0.025 mm) fixed by a stopper. The melt is pressed under the action of disc-shaped loads, which are suspended from the collet fixed to the screw with the helm. The measuring unit of the plastometer consists of an extrusion chamber, a hollow rod with a piston, a capillary head guide and an additional load.

Materials and methods of research

As a research material, the Catamold 316L feedstock in the form of a pellet, obtained by injection molding from the feedstock 316L, was selected.

Catamold 316L

Catamold 316L- ready for production of sintered components in austenitic stainless steel type 316L using the BASF system. The guaranteed composition of Catamold 316L after sintering is shown in Table 2.1.

Table 2.1 - Composition after sintering [5]

C %	Cr %	Ni %	Mn %	Mo %	Si %	Fe %
≤ 0.03	16 – 18	10 – 14	≤ 2	2 – 3	≤ 1	Balan.

The Feedstock "Catamold 316L" is designed for molding on standard injection molding machines for thermoplastic polymers. Catalytic repulsion in accordance with the BASF system. Sintering in pure hydrogen or in a vacuum.

Table 2.2 shows the characteristic properties of sintered parts: [5].

Table 2.2 - Characteristic properties of sintered parts

Density	$\geq 7.9 \text{ г / cm}^3$ ($A \geq 7,75 \text{ г / cm}^3$)
Ultimate tensile strength	$\geq 510 \text{ Мпа}$

Elongation	A10 \geq 50%
Hardness	120 HV10

The product of the 316L feedstock is used as components with high corrosion resistance. Watches, decorative details, medical equipment, spare parts for food and chemical industries.

A typical microstructure after sintering is shown in Figure 2.1

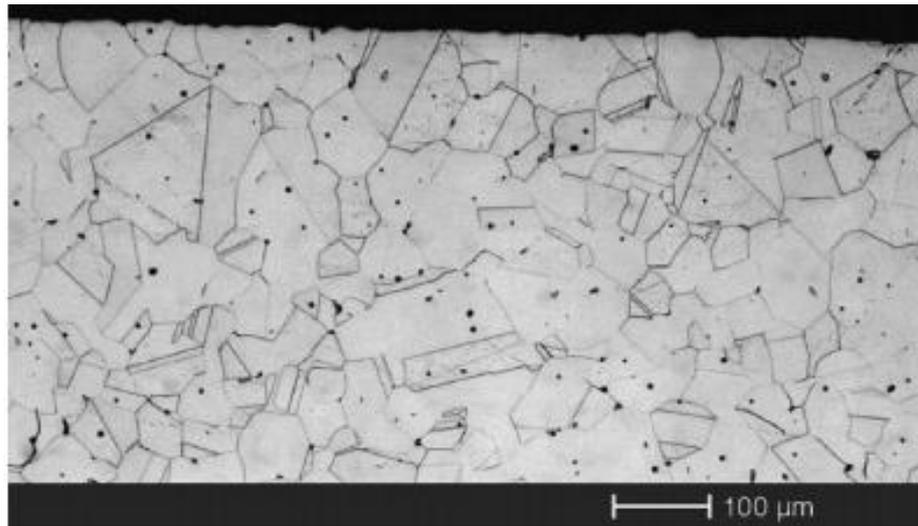


Figure 7. Catamold 316L G sintered in H2 at 1360 ° C

Fabrication of filaments

The production of filaments consists of three stages. At the first stage a filament was made. In the second stage, the filament was cooled, and in the third stage, the winding of the filament was made. In this process, a filament with a diameter of 1.75 mm for 3D printers was manufactured from the Catamold 316L granule.

The filament was produced on a Filabot ORIGINAL instrument (Figure 9), this device is a system of extruders that produce a plastic thread for 3D printers.



Figure 8. Installing Filabot

Filabot extruders (Figure 8) produce a plastic thread with three most common diameters: 1.75 mm, 2.85 mm and 3 mm. A nozzle with a diameter of 2.85 mm was installed in the experiment. The input material should be less than 3 mm in diameter.

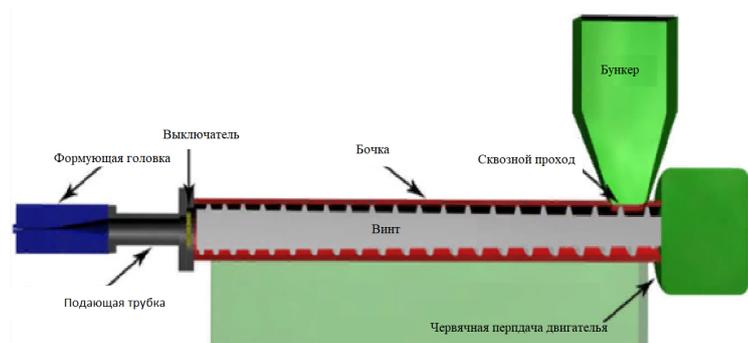


Figure 9. Structure of Filabot ORIGINAL

This picture shows schematically the process of obtaining the Catamold 316L thread. Granules Catamold 316L is loaded into a special container. Then it enters the compartment where the screw is located (Fig. 10). After that the crushed Catamold 316L enters the heated part of FILABOT.



Figure 10. Screw structure

A nozzle with a diameter of 2.85 mm is installed in the unit. Before the extrusion, the heating of the plant took place within 15 minutes

Catamold 316L material of melting point 190 °C is inserted through the thermostat, before the extrusion starts, the device heats for 15 minutes to enter the mode.

When temperature reaches, the Catamold pellets 316L are loaded into the hopper, then the device itself is launched. This activates the feeding auger and starts transporting the material forward, and cools the filament that exits the nozzle.

When the Catamold 316L material is processed and reaches the nit state, the cooling fan fan reaches a speed of up to 70 m / s. If the fan speed is more than 70 m / s, the filament immediately freezes and retains its diameter, this process does not allow changing the diameter.

The next process, the winding of the thread. This process was carried out on the Filabot Spooler, which is a desktop winding system. The device takes an extruded yarn from extruders, such as Filabot EX2 (Fig. 8), and winds the yarn.

Now that the thread is between the extruder, the buffer, you will need to fine-tune the equipment to achieve the desired diameter. Despite the fact that these adjustments are on both the extruder and the buffer, the primary adjustment is performed using the DRIVER knob. An additional tolerance setting can be made by adjusting the extrusion temperature. Measurement of the diameter was done with a micrometer 30-60 seconds after adjustment. Periodically checking the diameter.



Figure 11. Filament from Catamold 316L

Installation for 3D printing

After fabrication of the filament (Figure 11), the next process is printing in 3D format. 3D printing was performed on the PrintBox3D One installation (Figure 12), which works on FDM (Fused deposition modeling): the model is made by applying thin layers of molten material to each other.



Figure 12. Installing PrintBox3D One

The printer is connected to the 220 V network and to the USB port of the computer, and opens the Repetier-Host program and connects to the printer. Repetier-Host is a control program, and G-code is required for printing. Most models come in the form of STL files, which can be converted into G-code by a slice program.

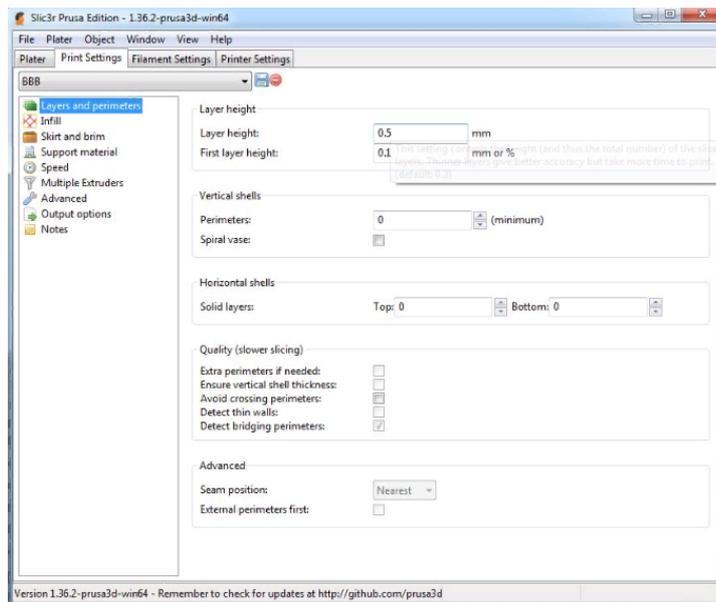


Figure 13. The program Slic3r

Slic3r is offered as a slicer in this case (Fig. 13). It is called a slider because it slices a 3D model into a set of flat two-dimensional layers, from which a 3D

printer will add a physical object. A number of settings and parameters are available in the Slicer: printing speed, layer thickness, printing of supports, fillings, etc. The next process, installed the filament and loaded the part and changed the settings and printing. The temperature of the extruder is 200 °C and the temperature of the table is 90 °C degrees. When we changed the setting and changed another setting in the next printout, it was determined in which mode to print the Catamold 316L. For printing, the main parameters are adjusted: the thickness of the layer, the percentage of filling, the speed of printing, the extruded width, the amount of material being fed.

Strength test

Tests can be carried out on a tensile machine such as GOTECH AI7000-M (Figure 14) or any other that allows measuring the load value with an accuracy of 1% of the measured value.



Figure 14 - Tearing machine GOTECH AI-7000-M

To test specimens of molded materials, the machine must be provided with grippers appropriate to the shape and size of the sample. Tests are carried out at the speed of expansion of the grippers of the machine, provided by GOST or TU for the material.

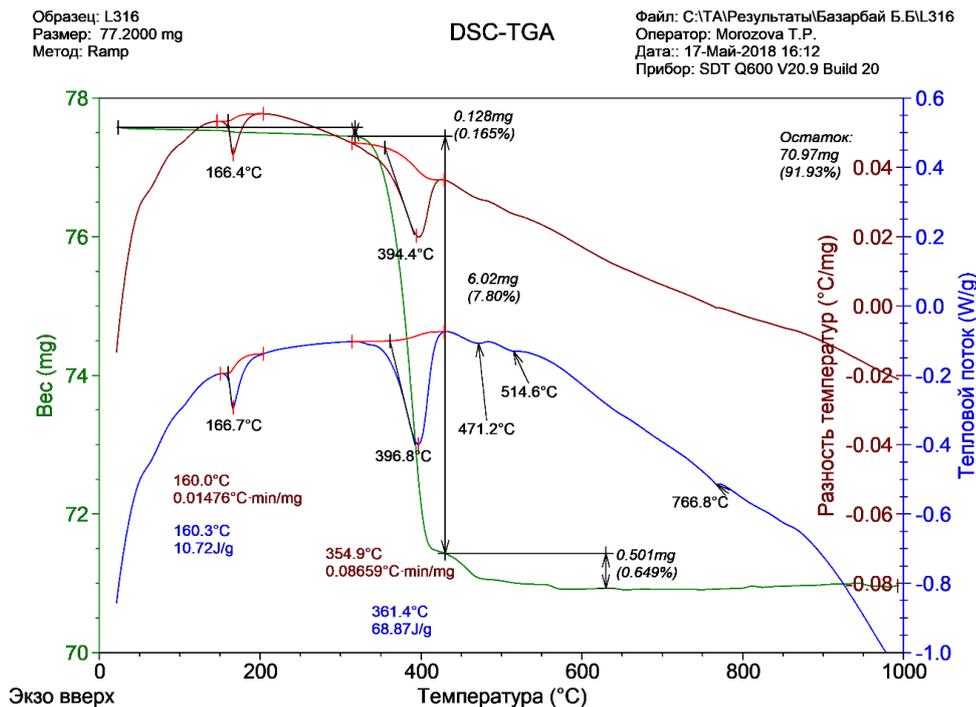


Figure 15 - Hooks for fastening and retaining the samples in a tensile test at room temperature

Tests were carried out on four samples. Before the test, measure the thickness and width of the sample in its working part and calculate the cross-sectional area. Measurements are conducted in at least three places with an accuracy of 0.01 mm. According to the arithmetic mean of the three measurements, the cross-sectional area in sm^2 is calculated.

Results and its discussion

Investigation of TGA materials



In this analysis, the melting of the material and the loss of mass were determined. The figure shows three lines, the green line shows the weight changes, the blue line shows the change in heat flux, the brown line shows the change in the difference in temperature. In this picture, there is no exothermic process. The decomposition process starts with a temperature of 190 ° C. The heat extinguishing, i.e., the endothermic process at a temperature difference of 166.4 ° C, 394.4 ° C is running. And also the endothermic process in thermal molasses 166.7 ° C, 396.8 ° C, 471.2 ° C, 514.6 ° C, 766.8 ° C showed. Changes in temperature, the distance from 190-600 ° C decomposition decomposes, and some of the mass is lost, paraffin, polypropylene and stearic acid is removed. The thermal effect of 160-200 ° C is the distance, and from 354-410 ° C the distance goes. As a result, according to this analysis, 9.7% lost weight.

Investigation of MFR materials

According to a preliminary opinion, Catamold 316L contains an organic composition based on polymethyl methacrylate (PMMA). Presumably the content of this component is 25% of the organic part, while polyethylene glycol contains

less than 75%. At the same time, the melting point of the material determined by the polymethyl methacrylate is 166 °C as a result of the viscosity, carried out at a temperature of 170 °C according to the DSC data, the first peak falls to 166 °C which indirectly confirms the melting point of the mixture. As a result, according to GOST on PMR PMMA are measured in 3 ways.

- 1) 200 °C load of 10,000 kg / s, cf. mass of the sample is 67.4 g / 10 min.
- 2) 230 °C load 3.800 kg / s, cf the sample weight is 18.4 g / 10 min.
- 3) 170 °C load of 10,000 kg / s, cf the sample weight is 30.9 g / 10 min

The minimum processing temperature is 170 °C with the most important factor being the pressure build-up in the cylinder, not the temperature.

Obtaining Filament

In the process of obtaining filaments, a melting point of 190 °C is established. According to the TGA analysis, the melting process starts at a temperature of 190 °C. The composition of the material does not change; its composition remains unchanged at 100%. During cooling, a speed of 60 m / s of the fan is set. If it exceeds the speed, the filament changes its shape. Filament from Catamold 316L, very fragile and quickly break. As a result of this work, a filament with a diameter of 1.75 mm was obtained.

Carrying out an experiment on 3D printing

In this paper, we select the main parameters that strongly affect the printing. During the printing process, these parameters: the thickness of the layer, the percentage of filling, the speed, the extruded width, the amount of material being fed varies the quality of the part. The eighth table shows.

With these parameters, 40 parts were obtained. During printing, one parameter was changed, and the rest remained unchanged. In order to determine on which parameter the process of printing influences the process. In this work, the thickness

of the layer was changed from 0.3 mm to 0.9 mm, the percentage of filling from 80% to 100%, and the speed from 10 mm / s to 20 mm / s, the extruded width from 0.6 mm to 1 mm, the amount of feed material from 0.6 to 1 has been changed.

Table 6. Basic parameters

No	Layer height mm	Fill density %	Speed mm/s	Extrusion width mm	Extrusion multiplier	Types of defects	Description
2	0,5	100	20	1	1	Missing layer	The layer is different from the rest of the model layers. The model is broken into pieces
3	0,5	100	20	1	0,9	Bleed, Bloom	Holes on the top layer, a problem with the outer layer.
4	0,5	100	20	1	0,8	Bleed, Bloom	Holes on the top layer, a problem with the outer layer.
5	0,5	100	20	1	0,7	Non-filling	The detail strangely prints. Incorrect filling of the part.
6	0,5	100	20	1	0,6	Skews	Layers swam, Vertical is not respected, the layers do not lie exactly on each other
7	0,3	100	20	1	1	Underextrusion	Holes in the press, problems with layers, defects on the surface
8	0,4	100	20	1	1	Scratches	Scratches on the surface
9	0,6	100	20	1	1	Missing layer	The layer is different from the rest of the model layers.

							The model is broken into pieces
10	0,7	100	20	1	1	Friable, Sway	Snot on the part, sagging material on the part
11	0,8	100	20	1	1	Elephant's leg	Thicker lower layers, unequal layers at the base.
12	0,9	100	20	1	1	Waviness	defects at the edges
13	0,5	100	20	0,9	1	Underextrusion	Holes in the press, problems with layers, defects on the surface
14	0,5	100	20	0,8	1	Skews	Layers swam, Vertical is not respected, the layers do not lie exactly on each other
15	0,5	100	20	0,7	1	Layering of the lower layer	Clearly expressed lower layer, thick lines of the lower layer
16	0,5	100	20	0,6	1	Skews	Layers swam, Vertical is not respected, the layers do not lie exactly on each other
17	0,5	90	20	1	1	Missing layer	The layer is different from the rest of the model layers. The model is broken into pieces
18	0,5	95	20	1	1	Underextrusion	Holes in the press, problems with layers, defects on the surface
19	0,5	100	20	1	1	Missing layer	The layer is different from the rest of the model layers. The model is broken into pieces
2	0,5	100	25	1	1	Underextrusion	Holes in the press,

1						n	problems with layers, defects on the surface
2 2	0,5	100	20	1	1	Crushing	Unsticked from the platform, bends
2 3	0,5	100	15	1	1	Non-observance of axes	The right angle is not observed.

After printing, many types of defect were discovered. This is due to overheating of the Catamold 316L, and does not have time to cool down and deform, and take a wrong shape, especially in places where the printing time of each next layer is very small, in this case set the minimum time for printing the layer. On 17 Fig. shown.



Figure 17. Detail number 15

During the 3D printing process, the feed from the extruder is constantly interrupted and occurs again. At the beginning of filing, undesirable effects can appear in the form of bulges between layers or other minor defects. On the 18 fig. shown.



Figure 17. Detail number 23

Stratification of the printed part. This problem can occur when the layers are not sufficiently interconnected and begin to flake apart during printing. The problem here is in the high layer height. In 19 Fig. shown.



Figure 19. Detail number 1

Strips and scratches on the surface of the finished prints. This can occur from an extruder squeezed out a large amount of material and during the movement it sticks to the surface of the print. The extruder touches the surface of the part and creates scratches. To solve these problems, in the first case, it is necessary to select the rollback of the thread, and in the second case, it is necessary to set the extruder's lift when moving it between control points. The defect can be eliminated by finishing. On 20 Fig. shown.



Figure 20. Detail number 9

After printing the detection of defects, we selected the parameters, and with this parameter a spade was printed and its strength was measured. The main parameters at which parts with good quality were obtained.

Layer height: 0.6 mm

Fill density: 100%

Speed: 25 mm / s

Extruded width: 0.7 mm

Extrusion multiplier: 1

In this mode, a blade was printed.

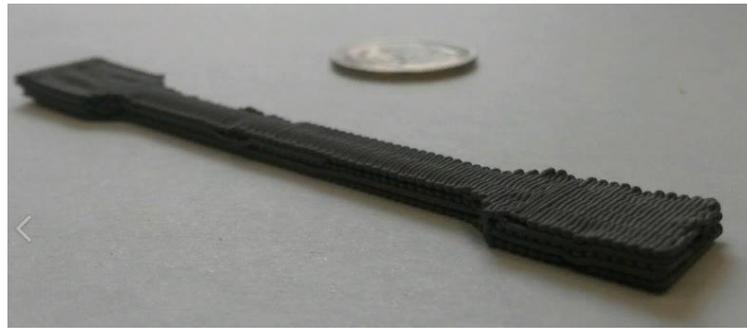


Figure 21. Bobbin number 5.

Table 11. Tensile test

№ re- cta	Width	Thickness	Load N	Elongation%	Elastic modulus MPa	Flow Limit MPa
1	5.414	3.125	29.993	314.598	-	1.229
2	5.333	2.965	42.399	165.261	12.274	1.273
3	5.580	3.200	36.585	152.727	40.180	1.014
4	5.528	3.139	44.854	99.873	55.380	1.139

Conclusion

In this paper, we combined two FDM and MIM technologies. It has been proved by this work that it is possible to print complicated details using FDM technologies, using as feedstock's used in MIM technologies. The mechanical properties of manufactured products with this technology are not inferior. In this work, the print mode was selected layer height: 0.6 mm, fill density: 100%, speed: 25 mm / s, extruded width: 0.7 mm, extrusion multiplier: 1. Tasks are fulfilled

The products obtained after 3D printing, MIM technologies of heat treatment stage:
1. Removal of polymer binder in specialized furnaces.

2. Sintering of finished products under vacuum.