

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет (институт)

Кафедра

Факультет машиностроения и транспорта

Сварочное, литейное производство и
Материаловедение

Направление подготовки

22.03.01 Материаловедение и Технологии
материалов

Профиль

Материаловедение

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

Разработка РИМ-технологии для изготовления деталей машино- и приборостроения

Студент

 19.06.19
(подпись, дата)

Некрасов Кирилл Олегович
(ФИО полностью)

Руководитель/Научный
руководитель

 19.06.19
(подпись, дата)

Прыщак А.В.
(Фамилия, инициалы)

Консультанты (Если имеются)


(подпись, дата)

Розен А.Е.
(Фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр

 19.06.19
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(Фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 06.06.2019 № 13)

Заведующий кафедрой

 20.06.19
(подпись)

Розен А.Е.
(Фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой хорошо (протокол заседания ГЭК от 21.06.19 № 5)

Секретарь ГЭК

 21.06.2019
(подпись)

Гуськов М.С.
(Фамилия, инициалы)

Пенза 2019

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛП и М
д.т.н., профессор  А.Е. Розен

« 08 » апреля 2019 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 15MT1 Факультета машиностроения и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов»

Некрасову Кириллу Олеговичу.

Научный руководитель работы: к.т.н., доцент Прыщак А.В.

Время выполнения ВКР: с 08.04.2019 г. по 19.06.2019 г.

Место преддипломной практики: кафедра «Контроль и испытания материалов» ПГУ.

Тема работы: Разработка РИМ-технологии для изготовления деталей приборо- и машиностроения.

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 434/О от 08 апреля 2019 г.

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): разработать алгоритм подбора связующего для обеспечения заданных технологических свойств, а также геометрической точности изделий.

Объем и содержание основной части работы

Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчетов, обоснований, описаний):

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- аналитический обзор технологии, в том числе преимуществ и недостатков и областей применения, установление перспективности технологии;
- исследование связующих веществ, рецептур фидстоков на основе полиформальдегида и фенолформальдегидной смолы, исследование влияния связующего вещества на усадку изделия;
- экспериментальный раздел – систематизация данных о связующих и разработка алгоритма;
- заключение – выводы по теме работы и полученным результатам.

Презентация бакалаврской работы (перечень и содержание плакатов)

- тема ВКР 1л А4;
- цели и задачи выпускной работы 1л А4;
- преимущества РИМ технологии 1л А4;
- схема основных этапов РИМ технологии 1л А4;
- сравнение характеристик изделий, изготавливаемых по РИМ технологии с аналогами 1л А4;
- области применения изделий, изготовленных по РИМ технологии 1л А4;
- общий вид изделий, изготовленных по МИМ и СИМ технологии 1л А4;
- требования к связующему 1л А4;
- известные рецептуры связующих в РИМ технологии 1л А4;
- алгоритм подбора связующих 4л А4;
- основные выводы 1л А4.

Рекомендуемая литература:

1. Дежина, И.Г. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» [Текст]: доклад / И.Г. Дежина [и др.]. – М.: Сколковский Институт Науки и Технологий, 2015. – 210 с.

2. «МИМ технология» Инжекционное формование сложных деталей [Электронный ресурс] // Группа компаний «Калашников» [сайт]. – URL: <https://api.kalashnikovgroup.ru/upload/iblock/8c4/8c40cf8daf045c14bd7d7cf52deb650a.pdf> (дата обращения: 26.03.2019).

3. Пархоменко, А.В. Развитие связующих веществ в гранулятах для МИМ-технологии [Текст] / А.В. Пархоменко [и др.] // Вестник Самарского Государственного технического университета: технические науки. – Самара: на базе СГТУ, 2013. – № 2. – С. 91–98.

Дата выдачи задания: 08.04.2019 г.

Руководитель ВКР:

к.т.н., доцент

Задание к исполнению принял студент

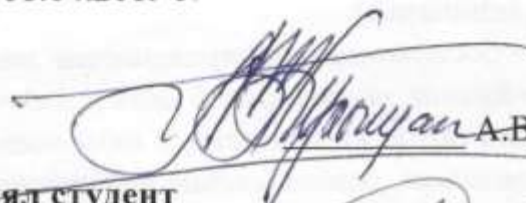
гр. 15МТ1

08 апреля 2019 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

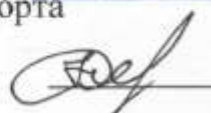
Декан факультета машиностроения и транспорта

Политехнического института ПГУ

 А.В. Прыщак

 К.О. Некрасов

ОПОП освоена в полном объеме.
допустить
аттестации допустить

 С.Ю. Киреев

ОТЗЫВ

на выпускную квалификационную работу студента

Некрасова Кирилла Олеговича

Тема работы: «Разработка РИМ-технологии для изготовления деталей
приборо-и машиностроения»

ВКР Некрасова К.О. выполнена в соответствии с заданием и содержит, расчетно-пояснительную записку на 72 страницах и презентацию на 14 листах.

Оформление расчетно-пояснительной записки соответствует требованиям стандартов ЕСКД.

За время выполнения выпускную квалификационной работы Некрасов К.О. проявил себя инициативным, технически грамотным специалистом, обладающими знаниями, способным самостоятельно решать поставленные перед ним задачи. Имеет свою точку зрения, но при этом тактичен в общении. На старших курсах Некрасов К.О. проявил интерес к одному из научных направлений, существующих на кафедре СЛПиМ. И планирует продолжить обучение в магистратуре по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Считаю, что ВКР может быть допущен к защите в ГЭК, а его автор Некрасов К.О. заслуживает присвоение квалификации бакалавра по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Руководитель работы: к.т.н., доцент  Прыщак А.В.

Ректору Пензенского государственного
университета
А. Д. Гулякову
студентка 4 курса ФМТ очной формы
обучения

Некрасова Кирилла Олеговича
(фамилия, имя, отчество)

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Некрасов Кирилл Олегович, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», бакалаврская программа «Материаловедение и технологии материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» выпускной квалификационной работы на тему – «Разработка PIM-технологии для изготовления деталей приборо- и машиностроения», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.



(подпись студента)

20.06.2019г.

(дата)

ВКР представлена на проверку 20.06.2019г.

(дата)

Руководитель ВКР



(подпись)

А.В. Прыщак

(И.О.Фамилия)

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Разработка PIM-технологии для изготовления деталей приборо- и машиностроения».

студента 4 курса **К.О. Некрасова**

(И.О. Фамилия)

направления подготовки **22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»**,
профиль «Материаловедение и технологии новых материалов».

Руководитель ВКР **Прыщак Алексей Валерьевич, к.т.н., доцент каф. «Сварочное, литейное производство и материаловедение»**

Результат проверки на плагиат бакалаврской работы Некрасова Кирилла Олеговича составляет 51 % оригинальности, что соответствует существующим требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12-2018. Выпускная квалификационная работа может быть рекомендована к защите.

СКРИНШОТ

отчета о проверке



Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: Акимова Ольга Борисовна metat@pogu.ru / ID: 254
Проверяющий: Акимова Ольга Борисовна metat@pogu.ru / ID: 254
Организация: Пензенский государственный университет
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <http://pogu.ru/antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 477
Начало загрузки: 20.06.2019 14:02:14
Длительность загрузки: 00:00:14
Имя исходного файла: ВКР_Некрасов КО
Размер текста: 2872 кБ
Тип документа: Выпускная квалификационная работа
Символов в тексте: 116442
Слов в тексте: 14174
Число предложений: 1053

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 20.06.2019 14:02:28
Длительность проверки: 00:00:27
Комментарий: не указано
Модули поиска: Модуль поиска ИПС «Адиат», Модуль выделения библиографических записей, Сводная коллекция ЗБС, Коллекция РГБ, Цитирование, Модуль поиска переводных заимствований, Коллекция eLIBRARY.RU, Коллекция ГАРАНТ, Модуль поиска Интернет, Коллекция Медицина, Модуль поиска перефразирований eLIBRARY.RU, Модуль поиска перефразирований Интернет, Коллекция Патенты, Модуль поиска «ПГУ», Модуль поиска общепотребительных выражений, Кольцо вузов



ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
34,63%	13,7%	51,65%

20.06.2019

(дата)

А.В. Прыщак
(И.О. Фамилия руководителя ВКР)

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА
кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»
Руководитель ВКР
к.т.н., доцент  А.В. Прыщак
подпись
« ____ » _____ 2019 г.

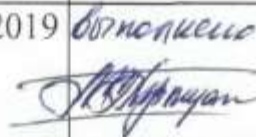
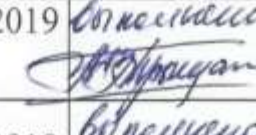
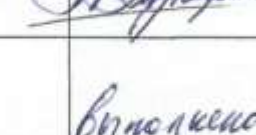
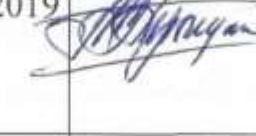
КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 15MT1 Факультета машиностроения и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов»

Некрасову Кириллу Олеговичу.

Тема работы: Разработка РИМ-технологии для изготовления деталей машино- и приборостроения.

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	начало	окончание	
1 Получение задания, его уяснение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению ВКР.	08.04.2019	09.04.2019	выполнено 
2 Подбор и изучение рекомендованной литературы.	10.04.2019	17.04.2019	выполнено 
3 Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	18.04.2019	20.04.2019	выполнено 
4 Литературный и патентный поиск по теме исследования. Теоретический анализ технологических особенностей РИМ-производства.	21.04.2019	27.04.2019	выполнено 
5 Исследование применяемого оборудования, анализ преимуществ и недостатков технологии. Анализ патентной информации с целью изучения предложенных способов улучшения составов связующих.	28.04.2019	01.05.2019	выполнено 
6 Экспериментальный раздел – разработка алгоритма подбора связующего в условиях обеспечения высоких технологических свойств и геометрической точности изделий.	02.05.2019	07.05.2019	выполнено 

7 Завершение оформления пояснительной записки, схем и рисунков.	08.05.2019	12.05.2019	Выполнено <i>К.О. Некрасов</i>
8 Представление завершенной ВКР нормоконтролеру	13.05.2019	03.06.2019	Выполнено <i>К.О. Некрасов</i>
9 Представление ВКР руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	04.06.2019	06.06.2019	Выполнено <i>К.О. Некрасов</i>
10 Предварительная защита ВКР	07.06.2019	07.06.2019	Выполнено <i>К.О. Некрасов</i>
11 Полное завершение всех работ и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с графической частью, протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя)	08.06.2019	20.06.2019	Выполнено <i>К.О. Некрасов</i>
12 Защита выпускной квалификационной работы	21.06.2019	21.06.2019	Выполнено <i>К.О. Некрасов</i>

Прохождение каждого этапа подготовки ВКР подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 15MT1
«8» апреля 2019 г.



К.О. Некрасов

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 72 с., 10 рис., 11 табл., 60 использованных источников.

РИМ ТЕХНОЛОГИЯ, *МИМ* ТЕХНОЛОГИЯ, ИНЖЕКЦИОННОЕ ФОРМОВАНИЕ, ФИДСТОК, СВЯЗУЮЩЕЕ, ПОЛИМЕРНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ, АЛГОРИТМ

Объектом исследования является *РИМ* технология для изготовления деталей приборо- и машиностроения.

Предметом исследования является составление алгоритма выбора полимерного связующего в композициях «связующее-наполнитель».

Целью выпускной квалификационной работы является разработка алгоритма подбора связующего для обеспечения заданных технологических свойств, а также геометрической точности изделий.

Методы исследования – сравнительный анализ научно-технической и патентной информации, классификация рецептуры гранулятов, анализ исследований микроструктуры, насыпной плотности гранулята, моделирование процессов с разработкой алгоритма.

Полученные результаты – были систематизированы ключевые особенности *РИМ* технологии, были рассмотрены на технологические свойства, исходя из полученной информации, был построен алгоритм подбора связующих в условиях обеспечения технологический свойств и геометрической преимущества и недостатки *РИМ* технологии, определены влияния связующих в составе фидстока точности изделий.

Область применения – производство деталей и аппаратуры в машиностроении и приборостроительной отрасли.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка РИМ-технологии для изготовления деталей приборо- и машиностроения	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Некрасов К.О.					2	72
Провер.		Прыщак А.В.						
						Каф. СЛПМ, гр.15МТ1		
Н. Контр.		Хорин А.В.						
Утверд.		Розен А.Е.						

Содержание

Введение.....	5
1 Аналитический обзор.....	7
1.1 Порошковое инжекционное литье	7
1.2 Основные этапы <i>PIM</i> технологии.....	7
1.3 Подготовка фидстока.....	9
1.4 Процессы формования заготовки	11
1.4.1 Экструзия	16
1.4.2 Виды брака при формовании изделий	18
1.5 Удаление связующего компонента	20
1.5.1 Метод термического удаления связующего.....	20
1.5.2 Метод удаления связующего с помощью растворителей.....	22
1.5.3. Каталитический метод удаления связующего	22
1.5.4 Преимущества и недостатки методов удаления связующего	23
1.6 Спекание	24
1.7 Преимущества и недостатки <i>PIM</i> технологии	26
1.8 Области применения <i>PIM</i> технологии	27
1.9 Выводы по разделу 1	28
2 Условия и принципы подбора связующих в гранулятах	30
2.1 Общие сведения о полимерных связующих.....	30
2.2 Полимерные связующие, используемые в <i>PIM</i> технологии.....	31
2.2.1 Использование полиформальдегида в качестве связующего.....	34
2.2.2 Выбор связующего на основе фенолформальдегидной смолы... 35	
2.3 Разработка отечественного аналога фидстока	38
2.3.1 Влияние связующих веществ на свойства стальных заготовок.. 39	
2.3.2 Исследование характеристик фидстока <i>Catamold 42CrMo4</i>	44
2.3.3 Исследование влияния связующего на усадку гранулята	46
2.4 Выводы по разделу 2	48

3 Систематизация данных о связующих веществах	50
3.1 Связующие в композициях «металл-полимер»	52
3.2 Связующие в композициях «керамика-полимер»	54
3.3 Разработка алгоритма подбора связующего.....	56
3.4 Формирование высокоплотной структуры карбида кремния	58
3.5 Выводы по разделу 3	61
Заключение	62
Список использованных источников	65
Приложение А	73
Приложение Б	75

Введение

Новые способы получения точных изделий из металлических и керамических порошков в течение последних 30 лет приобрели значительный вес как в современном машиностроении, так и в других технических отраслях, в том числе в производстве оружия, приборостроении, изделий электроники, авиационной, космической и других типах промышленности. С целью изготовления изделий небольшого размера и массы сложной геометрической формы, зарубежными компаниями внедрены технологии инжекционного формования порошковых композиций – *Powder injection molding* или *PIM* технологии. Перспективность и конкурентоспособность *PIM* технологий определяется такими преимуществами как: возможность снятия практического всех ограничений по сложности формы изготавливаемого изделия; высокий коэффициент использованного материала – от 96 до 99 %; возможность изготавливать изделия с толщиной сечения стенки до 0,5 мм; высокая производительность процесса и возможность полной автоматизации производства [1, 2].

Для получения изделий с помощью *PIM* технологии, применяют технологическое оборудование, использующееся при литье пластмасс под давлением. Основными предпосылками для развития *PIM* технологии послужили расширение номенклатуры порошков и связующих, аппаратуры контроля их качества, методы получения порошков сферической формы и контролируемого размера, а также оборудование для получения смесей порошков и связующих. Использование таких технологий позволило получать фидстоки – композиции на основе порошков и связующих веществ заданного состава, из которых далее методом инжекционного формования получают заготовки изделий [2].

Наиболее распространёнными материалами, использующимися в качестве фидстоков для *PIM* технологии являются порошки металлов, оксидной и безоксидной керамики. Помимо этого, в составе фидстоков имеется пластификатор – связующее на основе термопластов, реактопластов или гелеобразных водораство-

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

римых полисахаридов и т.д. Однако, в современных публикациях на тему связующих в композициях практически отсутствует информация о классификациях и методиках подбора порошка и пластификатора подходящим образом. В связи с этим, данная работа посвящена изучению и анализу влияния связующих на свойства получаемых изделий для определения последовательных действий при подборе связующего для фидстока.

Таким образом, цель работы – на основании полученных данных осуществить построение алгоритма выбора связующих для *PIM* технологии в условиях обеспечения высоких технологических свойств и геометрической точности. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- а) выявить и систематизировать ключевые особенности технологических операций *PIM* производства;
- б) рассмотреть преимущества и недостатки *PIM* технологии; сделать вывод о перспективности технологии;
- в) проанализировать влияние составов связующих на свойства исходного сырья для *PIM* технологии;
- г) разработать алгоритм подбора связующего в условиях обеспечения высоких технологических свойств, а также геометрической точности изделий.

1 Аналитический обзор

1.1 Порошковое инжекционное литье

Порошковой инжекционной технологией называется высокотехнологичный процесс формования изделий, изготавливаемых из мелкодисперсных смесей полимерного связующего с металлическим или керамическим наполнителем. Технология получила развитие на мировом уровне сравнительно недавно, так как промышленно стала внедряться с середины 80-х годов XX века. *PIM* технология, в зависимости от наполнителя, может применяться как для литья металлических (*Metal Injection Moulding – MIM* технология), так и для керамических (*Ceramic Injection Moulding – CIM* технология) изделий [1].

По сравнению с существующими технологиями литья и порошковой металлургии, *PIM* технологии обеспечивают снижение в несколько раз себестоимости изготовления изделий сложных геометрических форм [2]. Это связано с тем, что *PIM* технологией не предполагается дополнительных операций (например, механической обработки) для завершения процесса изготовления детали.

1.2 Основные этапы *PIM* технологии

PIM технология включает в себя четыре этапа: подготовка сырья, формование, удаление связующего и спекание. Процесс изготовления *PIM* деталей представлен на рисунке 1.1.

Подготовка сырья включает в себя получение наполнителя и связующего компонента в виде порошка, последующего их смешения и гранулирования. Конечным продуктом данного этапа является гранулят, но чаще всего в литературе, посвященной данной тематике, встречается англоязычное название фидсток («*Feedstock*» — смесь мелкодисперсных металлических или керамических порошков с полимерной матрицей), которое чаще всего и употребляется.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

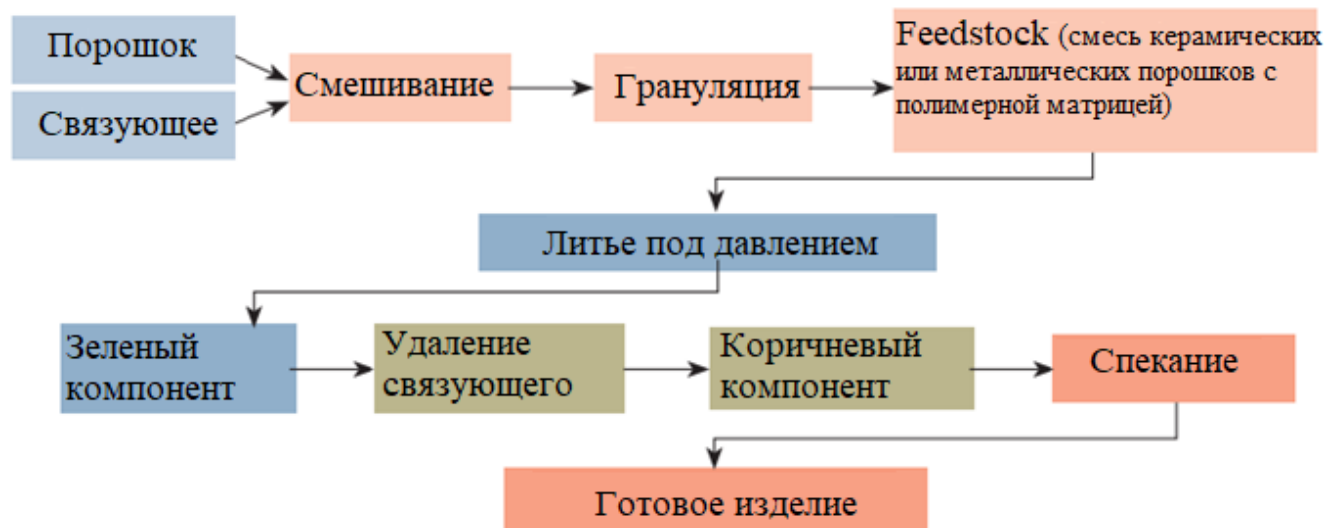


Рисунок 1.1 – Этапы PIM технологии

После фидсток загружается в бункер литьевой машины, где он превращается в расплав, дополнительно перемешиваясь, и подается под давлением в литьевую форму. Происходит формование заготовки №1, в некоторых источниках встречается название «зеленый компонент».

«Зеленый компонент» подвергается дебайдингу. Дебайдинг может происходить в одну или несколько стадий в зависимости от состава связующего компонента. Таким образом получается заготовка №2, или «коричневый компонент», который имеет пористую структуру, в связи с этим не обладающий высокой прочностью.

Завершающим этапом является спекание, во время которого заготовку №2 загружают в специальную печь. При спекании происходит усадка материала вследствие уменьшения пор. После чего изделие приобретает твердость, и его поверхность может быть подвергнута механической обработке, если эта технологическая операция является необходимой.

1.3 Подготовка фидстока

Первым этапом технологии является подготовка исходного сырья. Содержание порошка в нём, как правило, составляет от 50 до 65 % по объему. В зависимости от требований технического задания эти соотношения могут варьироваться для получения изделий с повышенными механическими или функциональными свойствами, в которых используется более 80 % наполнителя. С другой стороны, при увеличении количества наполнителя важно учитывать, чтобы вязкость материала была как можно ниже для облегчения процесса литья под давлением.

В качестве исходных наполнителей могут использоваться: медь, титан, никель, молибден, нержавеющей стали (аустенитные, мартенситные и др.), быстрорежущие стали, сплавы никеля и кобальта, интерметаллиды, керамики (оксид алюминия, нитрид алюминия, карбид кремния, нитрид кремния, диоксид циркония), магнитомягкие и магнитотвёрдые (бариевые, стронциевые) ферриты, пьезоэлектрическая керамика и множество других.

Одним из основных требований к наполнителю – это наличие низкой свободной поверхностной энергии, для хорошего смешения со связующим. В свою очередь, данное требование является противоречивым, так как более высокая свободная энергия обеспечивает наилучшую спекаемость. Этому требованию удовлетворяет сферическая (иногда равноосная) форма частиц порошка с размером до 50 мкм (желательно от 1 до 5 мкм). Также, важными параметрами наполнителя являются гранулометрический состав и состояние поверхности частиц.

Улучшение структуры конечного изделия может быть достигнуто при использовании материала, наполненного двумя типами частиц с различными размерами – крупными и мелкодисперсными. Вследствие этого произойдет уменьшение пористости структуры изделия, так как частицы меньшего размера заполняют пространство между частицами большего размера. Поиск оптимальных соотношений размеров частиц для достижения максимальной упаковки материала является одним из значимых этапов в подготовке композиционных смесей [3].

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Одним из наиболее важных свойств сырья является его однородность. Важность однородности порошка и связующего в исходном сырье обусловлена необходимостью сведения к минимуму разделения смеси на стадии литья под давлением, а также получением изотропной усадки после процессов выжигания и спекания [4]. Неоднородная смесь может привести как к видимым дефектам конечного спеченного изделия, так и к чрезмерной пористости, появлению трещин и короблению [5]. Как правило, для смешения используют различные типы смесителей, дробилки (валковые, щековые, конусные), мельницы, шнековые экструдеры и др.

На этапе подготовки композиционной смеси необходимым является проведение реологических испытаний для определения характеристик текучести расплава. Расплавленный материал пропускают при определенной температуре через сопло определенного диаметра в течение 10 минут и определяют показатель текучести расплава. Показатель текучести расплава (ПТР) определяет способность подачи материала в пресс-форму литьевой машины. Реологические свойства важны для определения оптимальной композиций связующего материала и наполнителя, а также выбора необходимых модификаторов и добавок.

Связующее вещество в *PIM* процессе обычно является многокомпонентным. Одним из основных компонентов связующего является термопластичный полимер (термопласт), который удерживает и сохраняет форму сформованного изделия. Такие полимеры являются наиболее распространенными и состоят из макромолекул, соединенных между собой только физическими связями. Энергия разрыва физических связей меньше химических и составляет от 12 до 30 кДж/моль. При нагревании физические связи исчезают, а при охлаждении восстанавливаются. Энергия разрыва химических связей, соединяющих мономерные звенья в макромолекулу, превышает указанные значения и составляет от 200 до 460 кДж/моль. Поэтому при нагревании термопластов до их температуры плавления физические связи нарушаются. Иногда вместо термопластичных полимеров в качестве связующих используются термореактивные полимеры (реактопласты), состоящие из

макромолекул, соединенных химическими связями. Неограниченное нагревание таких полимеров приводит к расплавлению, сопровождающемуся термодеструкцией. В качестве реактопластов чаще используют термореактивные смолы, в частности, акриловые. При их использовании температуры выжигания связующего относительно низкие и составляют от плюс 80 до плюс 90 °С.

1.4 Процессы формования заготовки

Вторым этапом технологий является формования исходного материала. Наиболее распространенным методом формования является литье под давлением с использованием литьевых машин (термопластавтоматов).

Процесс технологии литья под давлением представлен на рисунке 1.2. Расплавы полимера подготовлен и накоплен (на рисунке расстояние, соответствующее значению накопленного расплава обозначено как $l = \text{nom}$) в цилиндре литьевой машины (в данном случае – червячного типа) к дальнейшей подаче в сомкнутую форму (позиция а). Далее, цилиндр смыкается с узлом формы, а пластикатор (в данном случае – невращающийся червяк) осевым движением со скоростью $V_{\text{ос}}$ перемещает расплав в пресс-форму (позиция б). В результате осевого движения червяка форма заполняется расплавом материала, а пластикатор смещается в крайнее левое положение (позиция в, $l = 0$) отображенное на рисунке 1.2. Далее расплав в форме застывает с образованием твердого изделия (позиция г). Цилиндр продолжает оставаться в сомкнутом с системой формы положении. В этой ситуации червяк начинает вращаться с угловой скоростью $\omega_{\text{ч}} = \text{nom}$, подготавливает и транспортирует расплав в переднюю зону цилиндра и при этом отодвигается назад. После накопления требуемого объема расплава, вращение червяка прекращается, что обозначено на рисунке 1.2 как $\omega_{\text{ч}} = 0$.

Узел смыкания
(размыкания) формы

Узел подготовки
расплава

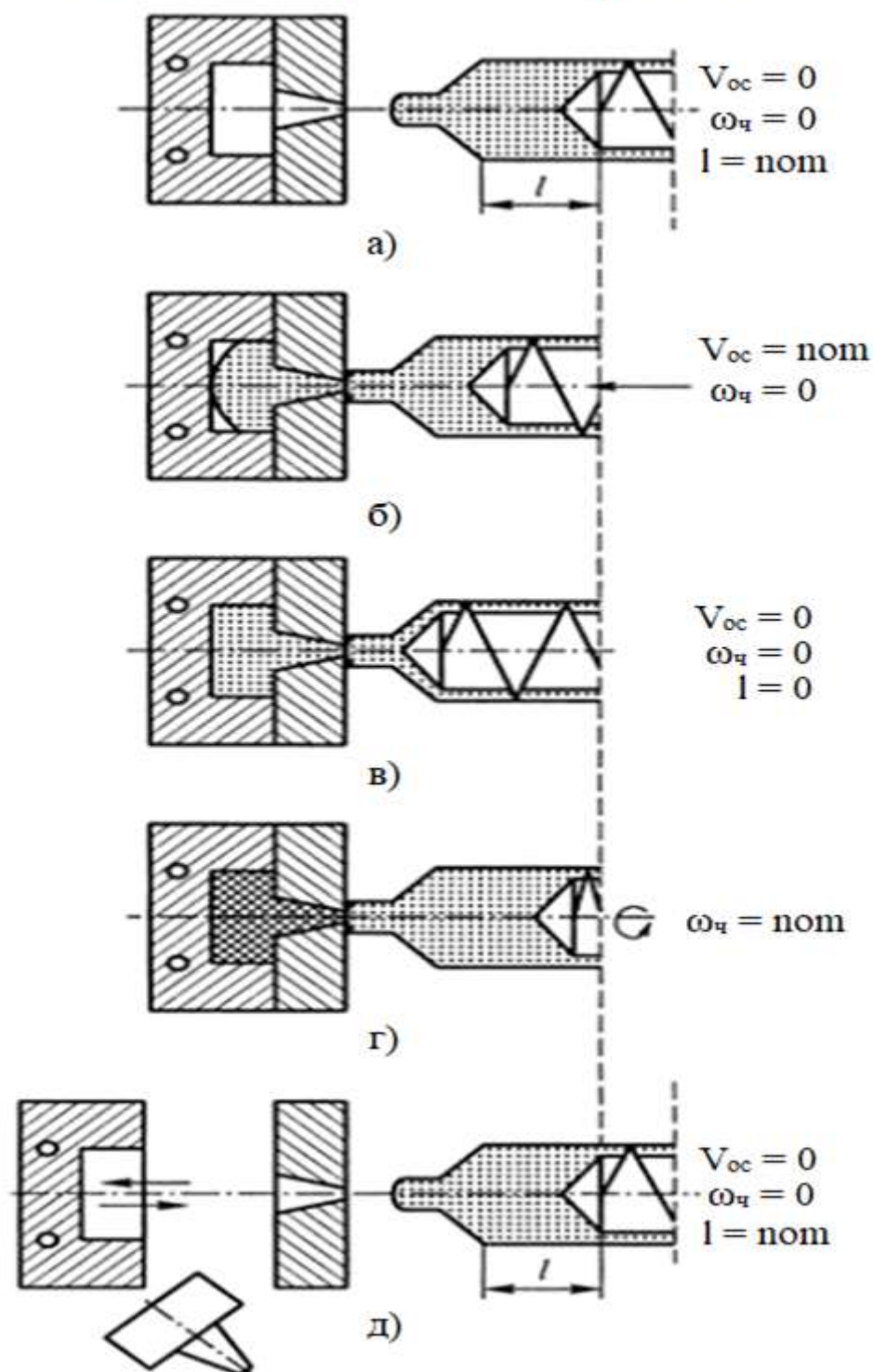


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема процесса литья под давлением;

а) – накопление подготовленного полимера; б) – перемещение расплава в форму;
в) – заполнение формы расплавом; г) – застывание с образованием твердого изделия; д) – размыкание формы и удаление изделия

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ

Лист

12

Он занимает исходное к дальнейшим действиям положение. После завершения процесса затвердевания (отверждения) материала форма размыкается, и изделие удаляется из нее (позиция д). Для облегчения съема изделия цилиндр к этому моменту отодвигается от узла формы.

Конструкция литьевой машины (термопластавтомата) состоит из: блока подготовки расплава и его подачи в форму (инжекционный узел); блока запира-ния (и размыкания) формы в виде прессового устройства с ползуном (узел смыка-ния); блок привода, обеспечивающего все виды движения подвижных устройств оборудования и оснастки; устройство управления литьевой машиной, реализую-щее требуемую последовательность взаимодействия блоков, силовых и кинемати-ческих узлов, а также температурные, скоростные, нагрузочные параметры, обес-печивающие оптимальный режим работы оборудования [9].

Основными параметрами литьевых машин (ЛМ) являются усилие запираения формы (кН), то есть смыкание формы, создаваемое прессовым блоком, и объем впрыска или мощность, выражаемая числом кубических сантиметров расплава, которые могут быть подготовлены машиной для однократной подачи в литьевую форму.

Наиболее распространенными литьевыми машинами являются горизон-тальные одночервячные термопластавтоматы с совмещенной пластикацией. Они обеспечивают объемы впрыска от 4 см³ до 70000 см³ при усилии запираения фор-мы от 25 до 60000 кН [9]. Принципиальная схема такого термопластавтомата представлена на рисунке 1.3.

Все функциональные блоки и устройства термопластавтомата располагают-ся на жесткой раме 27. Гранулированный полимерный материал из бункера 17 по-ступает в цилиндр 16, захватывается вращающимся шнеком 15 и транспортирует-ся в направлении мундштука 10.

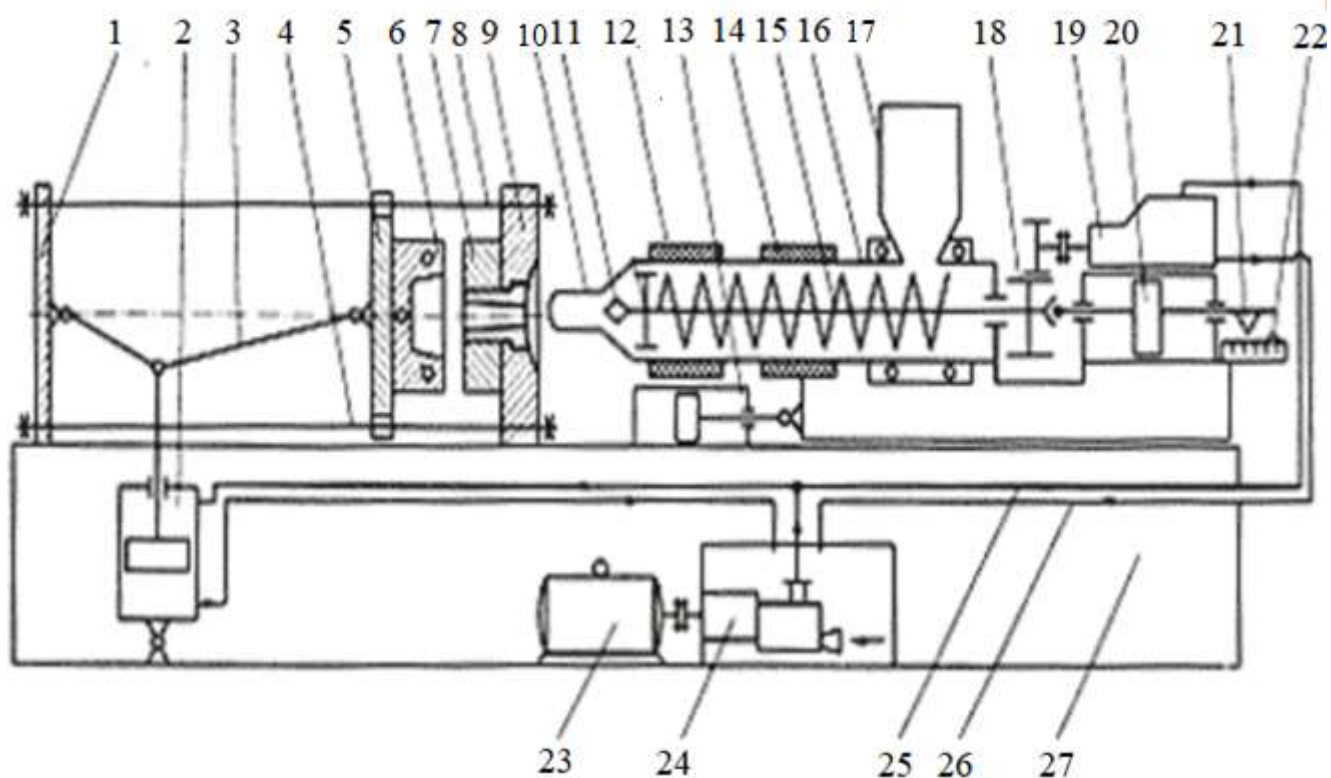


Рисунок 1.3 – Схема термопластавтомата с червячной пластикацией:

1 – плит-стойка гидравлического пресса; 2,3 – рычажно-гидравлический механизм; 4 – внешняя колонна гидравлического пресса; 5 – ползун; 6, 7 – части пресс-формы; 8 – внутренняя колонна гидравлического пресса; 9 – стойка для литниковой втулки; 10 – мундштук; 11 – наконечник; 12 – обратный клапан; 13 – гидропривод; 14 – электронагреватель; 15 – шнек; 16 – цилиндр; 17 – бункер; 18 – зубчатая передача; 19 – гидродвигатель; 20 – плунжер; 21 – хвостовик с концевым выключателем; 22 – регулирующая линейка; 23 – электродвигатель; 24 – насосный блок; 25 – трубопровод высокого давления; 26 – трубопровод низкого давления; 27 – жесткая рама термопластавтомата

При этом гранулированный материал нагревается, уплотняется в пробку и под действием тепла от трения о поверхность винтового канала червяка и поверхность цилиндра, а также за счет тепла от наружных зонных электронагревателей 14 пластицируется, то есть расплавляется под давлением, и, пройдя через обратный клапан 6, накапливается в зоне дозирования цилиндра. При воздействии возникающего давления, червяк отодвигается вправо, смещая тем самым плунжер 20

и хвостовик с имеющимся на нем (условно) концевым выключателем 21. Установкой ответного выключателя на линейке 22 регулируют отход червяка и, следовательно, подготовленный к дальнейшим действиям объем расплава в зоне дозирования и мундштука 10. После срабатывания концевых выключателей и вращение червяка прекращается, т.е. требуемая доза расплава подготовлена. Далее, с помощью гидропривода 13, пластикационный (инжекционный), узел сдвигается влево до смыкания мундштука с литниковой втулкой, установленной в стойке 9. К этому моменту завершает смыкание частей пресс формы 6 и 7 прессовый узел литьевой машины. Он представляет собой, по сути, горизонтальный рычажно-гидравлический пресс, состоящий из задней 1 и передней 9 плит-стоек, соединенных, как правило, четырьмя колоннами 4 и 8, по которым смещается вправо (смыкание) и влево (размыкание) ползун 5. Ползун приводится в движение от рычажно-гидравлического механизма 2, 3.

После приведения всех блоков в исходное состояние создается давление в гидроприводе 20 осевого движения червяка, который, действуя аналогично поршню, инжeksiрует расплав полимера из цилиндра в пресс форму, в которой и происходит образование изделия. Наконечник 11, установленный на червяке, способствует уменьшению образования застойных зон после впрыска. В период формообразования изделия червяк приводится во вращение для подготовки следующего объема впрыска. После охлаждения расплава до заданной температуры форма раскрывается, и изделие с помощью выталкивателей или применением робототехнических устройств удаляется из рабочей зоны литьевой машины.

Все подвижные узлы литьевой машины обеспечиваются энергией от главного привода, состоящего из электродвигателя 23, насосного блока 14, установленного в маслосборнике, и системы трубопроводов высокого 25 и низкого 26 давления. Для вращения червяка в данной схеме служит гидродвигатель 19 с зубчатой передачей 18.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

К преимуществам описанных литьевых машин относят: широкую номенклатуру перерабатываемых материалов, высокую производительность, надежность в эксплуатации, а также удобство управления и обслуживания [10].

1.4.1 Экструзия

Способ формования, при котором с помощью непрерывного продавливания расплава материала через формирующую головку, геометрическая форма выходного канала которой определяет профиль получаемого изделия, называется экструзией.

Основным оборудованием экструзионного процесса является червячный пресс или экструдер. Такие устройства осуществляют непрерывную пластикацию полимера, позволяют получить однородный расплав, а также оснащены специальной формующей головкой, с помощью которой расплав выдавливается в виде профиля требуемого изделия.

В абсолютном большинстве случаев используются различные модификации одночервячных или двухчервячных экструдеров, называемых также червячными прессами. Также, в некоторых случаях применяют дисковые и поршневые пластикаторы [11].

На рисунке 1.4 проиллюстрировано устройство работы одночервячного экструдера. Материал из бункера 1 поступает в цилиндр 5, захватывается вращающимся червяком 6 и транспортируется к формующей головке, фрагмент которой показан позицией 2. При этом материал в первой, питающей, зоне червяка 8 размягчается и уплотняется в пробку, в зоне сжатия 12 он расплавляется, а в зоне дозирования гомогенизируется и подготавливается к подаче в формующую головку.

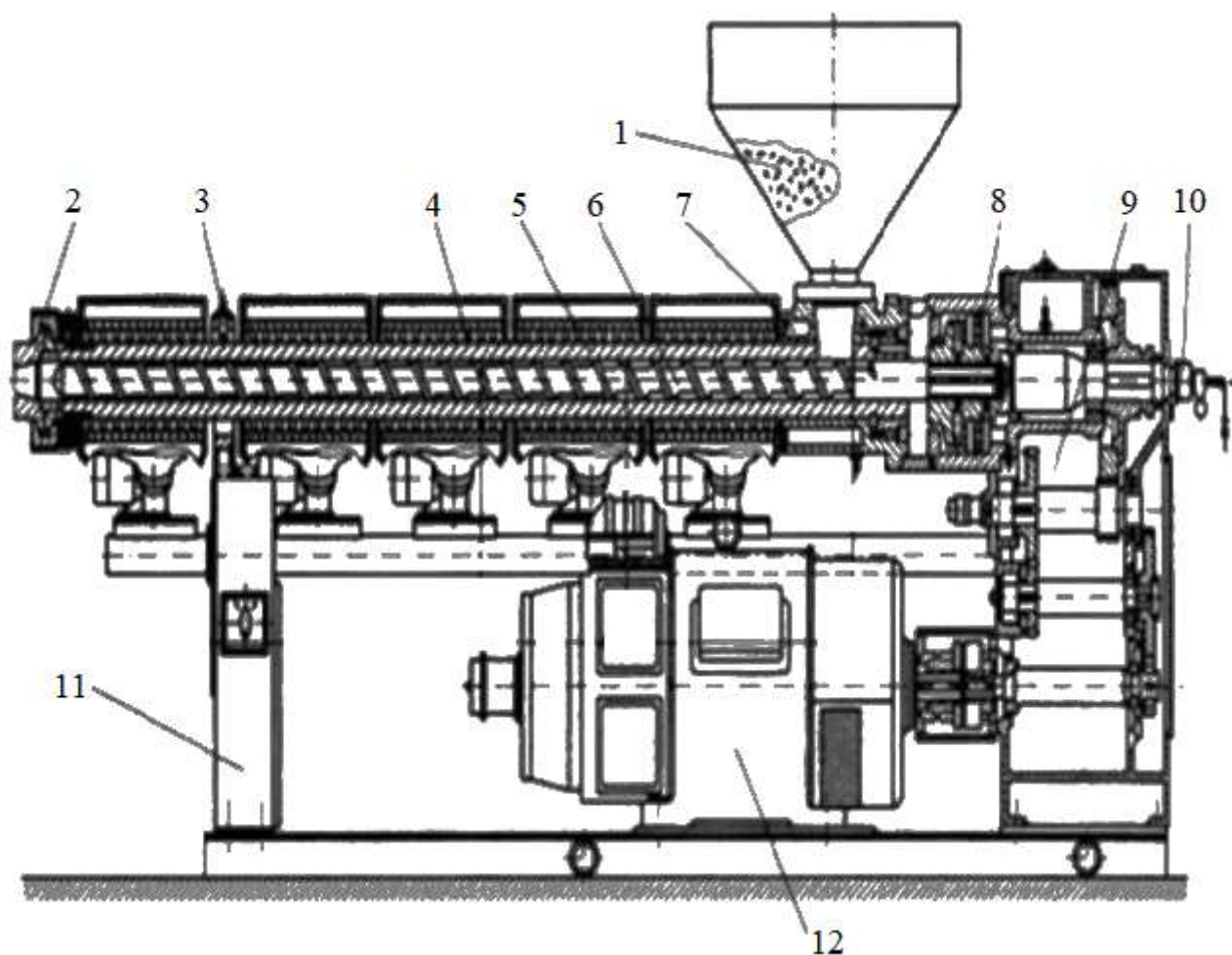


Рисунок 1.4 – Устройство работы одночервячного экструдера: 1 – бункер; 2 – формующая головка; 3 – термопары; 4 – кольцевые нагреватели; 5 – цилиндр; 6 – вращающийся червяк; 7 – каналы водяного охлаждения; 8 – подшипниковый узел; 9 – механическая передача; 10 – устройство внутреннего водяного охлаждения; 11 – корпус экструдера; 12 – электродвигатель

Для обеспечения требуемого теплового режима и условий транспортирования на цилиндре установлены зонные кольцевые нагреватели 4 с индивидуальными вентиляционными устройствами; участок цилиндра вблизи загрузочного отверстия охлаждается водой по каналам 7, а для контроля температуры служат термопары 3. Конструкция червяка, как правило, предусматривает его внутреннее охлаждение водой, подаваемой и отводимой через устройство 10. Червяк получает вращение от электромеханического привода, состоящего из электродвигателя 12 постоянного или переменного тока и редуцирующей механической передачи 9.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ

Лист

17

Осевое усилие, действующее на червяк в направлении, противоположном транспортированию расплава, воспринимается подшипниковым узлом 8. Все рабочие узлы экструдера смонтированы в корпусе 11 [9].

1.4.2 Виды брака при формовании изделий

Применение литья под давлением и экструзии предполагают определенные виды брака, возникновение которых обусловлено технологическими особенностями литья. Основными видами брака при литье считаются:

а) Недолив – дефект сырья, возникающий из-за поступления расплава в недостаточно разогретую пресс-форму. Также, может возникать из-за недостаточной вязкости расплава, или из-за засорения литникового и разводящих каналов.

б) Перелив – дефект, связанный с проявлением потеков расплава в области соединения пресс-формы. Как правило, такой дефект возникает при неправильной работе дозирующего устройства, или недостаточном усилии смыкания формы.

в) Вздутия на поверхности и пузыри (пустоты) в массе изделия наблюдаются при увеличенном содержании летучих газов, вспучивающих поверхностную пленку при перегреве расплава. Как правило, данный дефект сопровождается частичной деструкцией и значительным газовыделением. Также, вздутия на поверхности образуются при недостаточном охлаждении изделия.

г) Усадочные раковины – это значительные углубления на поверхности изделий. Они появляются по причине повышенной усадки при перегреве массы и недостаточном поступлении расплава. Например, в случае недостаточно высокого удельного давления поступающего расплава или при малом сечении впускных каналов пресс-формы.

д) Коробление готовых изделий возникает из-за наличия высоких напряжений внутри изделия, обусловленных большой разностью температур в различных частях формы, а также при недостаточной выдержке изделия в литьевой форме, из-за чего изделие извлекается недостаточно жестким.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

е) Трещины образуются по причине высоких остаточных напряжений в изделии, а также при его прилипанию к стенкам пресс-формы.

Основные дефекты изделий, полученных с помощью *PIM* технологии и способы их устранения, приведены в таблице 1.1 [9].

Таблица 1.1 – Дефекты изделий, полученных с помощью *PIM* технологии

Дефект	Причина дефекта	Способ устранения
Пустоты изделия	Сильный нагрев (в результате сжатия) воздуха, попавшего в форму	Улучшение условий выхода воздуха из полости формы; уменьшение скорости впрыска материала
Темные пятна на поверхности изделия	Перегрев расплава	Снижение температуры расплава; полирование литниковых каналов
Темные полосы на поверхности изделия	Местный перегрев материала;	Снижение температуры расплава;
Полосы и продолговатые пузыри на поверхности изделия	Влажность материала	Подсушка сырья
Загрязнение изделия	Попадание в материал посторонних частиц или наличие задиров на поверхности цилиндра, поршня или червяка	Контроль чистоты материала, попадающего в бункер; проверка поверхностей, соприкасающийся с материалом

Таким образом, главными мерами предупреждения брака являются: исправное состояние оборудования, соблюдение технологического режима и однородности сырья.

1.5 Удаление связующего компонента

После этапа формования необходимо удалить связующее вещество, так как углеродные остатки могут отрицательно влиять на процесс спекания и, как следствие, на качество конечного продукта [12]. Удаление связующего компонента является одним из наиболее важных этапов в процессе технологии, т.к. из-за недостаточного удаления связующего могут быть получены различные дефекты изделий - возникновение пузырей, внутренних пустот, поверхностных трещин и т.д. Самыми распространенными методами удаления связующих компонентов являются: термическое удаление, удаление с помощью растворителей, каталитический метод.

1.5.1 Метод термического удаления связующего

Термическое удаление связующего основано на использовании механизмов термодеструкции органических связующих, т.е. разложении крупных молекулярных структур на более легкие, которые, в свою очередь, могут быть испарены с поверхности сформованной заготовки. Время и особенности такого процесса прямым образом зависят от типа используемой связки. Например, используемая достаточно часто [3] система на основе полиэтилена или пропилена, синтетического или натурального воска и стеариновой кислоты может быть удалена термическим способом. Также, в иностранной литературе описывается использование полиоксиметилена (ПОМ) и полибутилметакрилата (ПБМА), при использовании которых термическое удаление происходит гораздо быстрее, чем при использовании других полимеров, таких как полипропилен (ПП) и этиленвинилацетат (ЭВА) [13]. Следует также отметить, что на скорость удаления связующего большое влияние оказывает и используемая атмосфера выжигания.

Быстрые скорости нагрева могут привести к чрезмерному росту давления испарения внутри детали и как следствие – возникновению различных дефектов.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Поэтому для термического удаления используются низкие скорости нагрева, чтобы снизить риск появления трещин или искажений формы. Однако в результате этого процесс удаления связки растягивается на длительное время (от 10 до 60 часов) [14].

В целях повышения эффективности процесса термического выжигания используется вакуумный насос, который непрерывно высасывает пары связующего из горячих изделий. Первоначально, скорость нагрева составляет 0,5 °С/мин до достижения температуры 100 °С. Такая температура поддерживается ориентировочно 4 часа, а затем увеличивается до 400 °С при скорости нагрева 1 °С/мин и поддерживается в течение 2 часов.

Удаление паров, образовавшихся в процессе дебайдинга, обычно протекает в два этапа в камере печи для дебайдинга. На первом этапе происходит сжигание газа в пропановом пламени при минимальном количестве кислорода. Избыточная азотная кислота и закись азота, образовавшаяся из азотной кислоты, преимущественно восстанавливаются до азота, так как формальдегид обладает сильными восстановительными свойствами. Во время второй стадии происходит полное сгорание газов в условиях дополнительной подачи воздуха, после чего остатки паров конденсируют и собирают в специальные сборники.

Если весь связующий компонент удален, то температура может быть увеличена для начала этапа спекания. Не смотря на данное преимущество удаления связующего в вакууме, подобный процесс удаления связующего может протекать до 10 часов [6].

Термическое удаление связующего используется в *PIM* технологии из-за своей простоты и экологичности по сравнению с методами каталитического удаления и удаления с помощью растворителей [15].

1.5.2 Метод удаления связующего с помощью растворителей

Удаление связующего компонента с помощью растворителей осуществляется путем погружения полуфабриката в газообразные [16] или жидкостные растворители (этанол, гексан, ацетон, гептан и др.) при низкой температуре, как правило, от плюс 50 до плюс 60 °С [17]. Таким образом, растворитель удаляет как минимум один из связующих компонентов и формирует открытую пористость. Следующим этапом является выгорание связки для полного удаления второго связующего компонента [6]. Полное удаление связки происходит термическим путем в диапазоне температур от плюс 200 до плюс 600 °С как предварительный перед спеканием этап. Эффективность такого метода сильно зависит от температуры процесса, геометрии изделия, состояния его поверхности и развития пористости в процессе проникновения растворителя.

Известны также методы использования связующих, растворимых в воде, поскольку обработка водных растворителей намного проще, чем органических. В качестве водорастворимых связующих используют полиэтиленгликоли, полиэтиленоксиды, поливиниловые спирты, крахмалы и полиакриламид. Все эти полимеры являются гидрофильными [18].

1.5.3. Каталитический метод удаления связующего

Каталитическое удаление связующего актуален для типов связующих веществ, которые проще разлагаются на более мелкие молекулы с использованием катализатора, а также при воздействии определенной температуры. Примером подобного связующего вещества может служить связующее на основе полиоксиметилена (ПОМ). При использовании катализатора, полимер на поверхности изделия разлагается в мономер и испаряется. Образуются поры, и процесс деполимеризации продолжается дальше вглубь детали. Таким образом, удаление связующего происходит снаружи внутрь.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

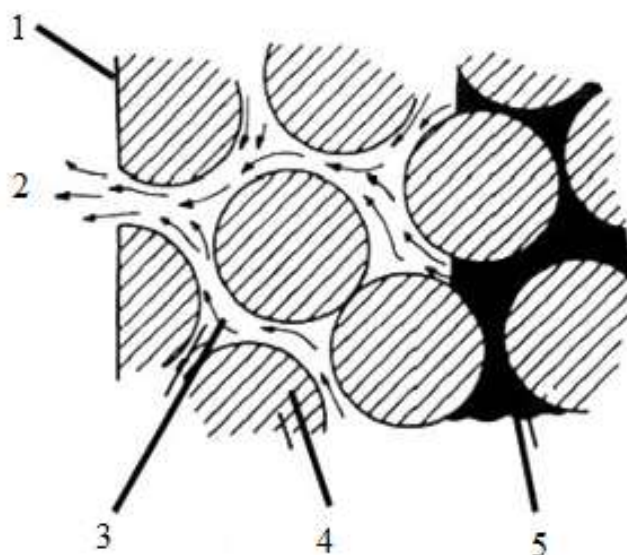


Рисунок 1.5 – Механизм удаления связующего каталитическим методом: 1 – поверхность изделия; 2 – газ; 3 – открытые поры; 4 – порошок; 5 – связующее

С использованием каталитического процесса сокращается время удаления связки, так как скорость диффузии мономеров довольно высока вследствие малого размера их молекул [19]. Скорость выжигания зависит от температуры и концентрации катализатора. Механизм каталитического дебайдинга, представленный на рисунке 1.5, протекает благодаря диффузии и проникновения испаряющейся связки через образовавшиеся поры.

1.5.4 Преимущества и недостатки методов удаления связующего

Выбор метода удаления связующего основывается не только на совокупности факторов процесса в целом (таких как: геометрическая форма и размеры изделия, типа наполнителя и полимера, необходимое время выполнения изделия и т.д.), но и на основе преимуществ и недостатков самих методов удаления связующего. Сравнительная характеристика вышеперечисленных методов представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнение методов удаления связующего

Метод удаления связующего	Преимущества	Недостатки
Термический метод	Стадии выжигания связки и спекания происходят в один этап; меньшая стоимость процесса	Скорость протекания процесса (до 60 часов), выбросы вредных паров в атмосферу
Удаление с помощью растворителя	Скорость протекания процесса (около 6 часов)	Токсичность используемых растворителей, низкая экологичность, дорогостоящее оборудование
Каталитический метод	Скорость протекания процесса (от 4 до 6 часов)	Возможная опасность при использовании кислотных катализаторов и разлагающихся побочных продуктов; необходимость переработки побочных продуктов в целях экологичности

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение различных методов удаления связующего обуславливается техническим заданием или используемым фидстоком, с целью обеспечения требуемых технологических свойств. Также, важным является то что ни один из методов удаления связующего не обеспечивает достаточной экологичности. Наиболее экологичным и экономически выгодным является каталитический метод.

1.6 Спекание

Заключительным этапом процесса *PIM* технологии является спекание. Операция спекания состоит в нагреве и выдержке заготовок при температуре, составляющей от 0,7 до 0,8 от температуры плавления основного компонента спекаемой композиции. Данная температура внутри печи является достаточно высокой для осуществления процесса рекристаллизации металлических или керамических ча-

стиц, и достаточно низкой, чтобы не происходило их расплавление. Частицы рекристаллизуются, происходит рост зерен и последующее сцепление частиц друг с другом. В процессе спекания участвуют различные механизмы массопереноса: поверхностная диффузия, диффузия по границам зерен, испарение - конденсация, вязкое течение, пластическое течение и другие [20].

Сплавление металлических частиц в процессе спекания наблюдается с помощью синхротронной микротомографии, что отображено на рисунке 1.6 на примере медных частиц. В процессе спекания частицы меди сближаются друг к другу, увеличивается их площадь контакта и уменьшается пористость.

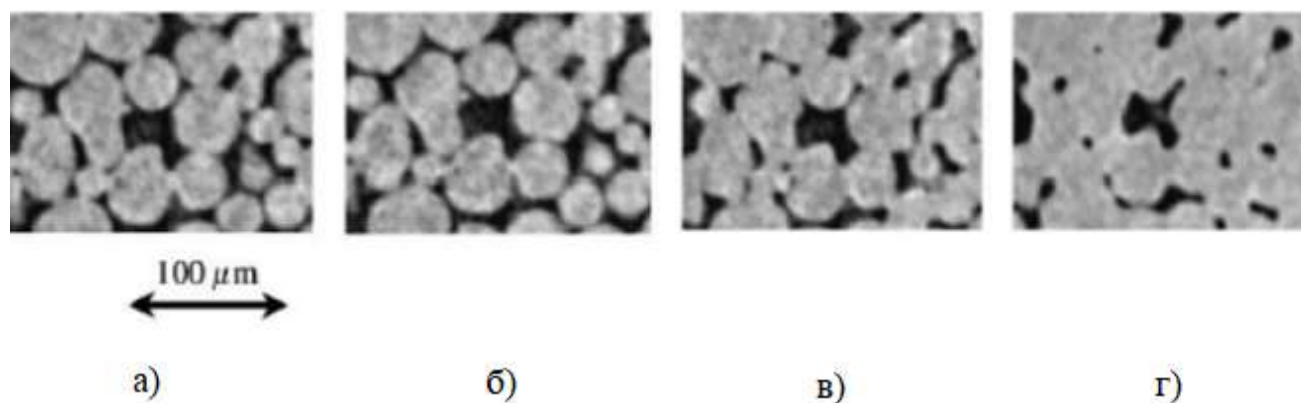


Рисунок 1.6 – Микроструктура частиц меди на различных этапах процесса спекания: а) непосредственно перед спеканием; б) сразу после нагрева до 1050 °С в течение 45 минут; в) при 1050 °С после 120 минут спекания; г) спустя 220 минут после начала спекания при 1050 °С и охлаждения до комнатной температуры в течение 15 минут

В интервале от комнатной температуры до 1050 °С не происходит значительной усадки, но формирование контактов частиц вызывает небольшие смещения и вращения частиц, что отображено на рисунке 1.6 а и 1.6 б, соответственно. В результате перегруппировки частиц одни поры уменьшаются в размере, а другие растут. После спекания в течение 120 минут при температуре 1050 °С увеличивается площадь контакта частиц и образуется их более плотная упаковка, показанная на рисунке 1.6 в. После спекания в течение еще 100 минут и охлаждения

до комнатной температуры большинство пор исчезло, но некоторые крупные поры все же остались, что показано на рисунке 1.6 г [21].

Время спекания изделий может варьироваться в зависимости от используемых материалов и размеров самого изделия. Так, для деталей небольшого размера, например, втулок, среднее время спекания составляет от 1 до 1,5 часа. Для заготовок больших размеров процесс спекания может продолжаться вплоть до 8 часов. Например, для изделий из вольфрама и вольфрамовых сплавов.

Процесс спекания должен проводиться в защитной атмосфере во избежание окисления спеченных изделий. В качестве таких атмосфер, как правило используются атмосферы диссоциированного аммиака и азота, однако также часто применяют и вакуумные атмосферы, например, для деталей из нержавеющей стали, вольфрама и ряда других сплавов [14].

По завершению операции спекания происходит уплотнение и упрочнение заготовок, сопровождающиеся объемными изменениями (например, усадкой), обусловленными уменьшением пористости. Плотность изделий после спекания находится в диапазоне от 95 до 99,5 % от компактной плотности, таким образом, обеспечивая необходимые механические и функциональные свойства.

1.7 Преимущества и недостатки *PIM* технологии

PIM технология имеет ряд преимуществ и недостатков, определяющих возможность ее применения в различных отраслях.

Одним из основных преимуществ является высокий коэффициент использования материала – от 0,96 до 0,99 в отличие от, например, механической обработки – в которой коэффициент использования материала может находиться в диапазоне от 0,4 до 0,7. В традиционных методах металлообработки до 80 % материала может уйти в стружку, а в *MIM* процессе литники после дробилки могут повторно использоваться. Эта экономия становится еще более значимой при работе с дорогими металлами (например, титаном) или сплавами, большинство из которых мо-

жет использоваться в качестве сырья для *PIM* технологии. Возможность получения изделия с формой, соответствующей форме готовой детали позволяет снизить затраты на дорогостоящие фрезы, расходные материалы, сервис станков, сократить технологический цикл производства. При этом, *PIM* технологией предполагается работа с композициями на основе порошков и полимеров, нагретыми до температуры от 0,6 до 0,8 от $t_{пл}$, а не с расплавленным металлом. Немаловажным преимуществом является возможность развертывания производства металлических заготовок на участках литья изделий из пластмассы. Также, можно утверждать, что *PIM* технология может быть полностью автоматизирована.

Возможность объединения нескольких операций в один технологический процесс обеспечивает успех этой технологии и позволяет сократить период освоения производства новых изделий, а также их себестоимость.

Однако, не смотря на вышеперечисленные преимущества, технология имеет ряд недостатков. К основным можно отнести:

- а) сложность удаления связующих из состава фидстоков без нарушения формы и структуры заготовок;
- б) низкая экологичность технологии;
- в) необходимость выполнения противоречивых требований к связующим веществам [22].

1.8 Области применения *PIM* технологии

В настоящее время можно говорить, что номенклатура изделий, полученных с использованием метода инжекционного формования, уже достаточно широка. Это роторы малогабаритных турбин, шестерни для ручного электроинструмента, хирургические инструменты, сердечники магнитов для приводов дисков в компьютерах, детали ручного оружия (в основном детали ударно-спускового механизма и предохранителей) а также разнообразные изделия массового производства, в том числе бытового [23].

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Стоит отметить, что особую важность представляет возможность изготавливать с помощью *PIM* технологии изделия не массового выпуска с уникальными эксплуатационными свойствами. Это изделия, используемые в космической промышленности, машиностроении, вооружении и военной технике и т.д.

Учитывая достаточную гибкость метода, *PIM* технология может быть внедрена в любые отрасли, требующие высокой геометрической точности изготавливаемых изделий. Данное утверждение может быть обосновано тем фактом, что усложнение геометрических форм (например, связанное с использованием наружной или внешней резьбы, а также различных типов производственных маркировок) не влияет на повышение стоимости изделий.

Увеличение степени автоматизации и роботизации процессов *PIM* технологии позволяет сделать вывод о конкурентоспособности метода, что может послужить дополнительным фактором для использования технологии в качестве замены традиционным методам изготовления деталей [2].

1.9 Выводы по разделу 1

Сравнительный анализ научно-технической, в том числе патентной, информации позволил выявить ключевые особенности технологических операций *PIM*-производства, а также оборудования, необходимого для их реализации. К ним относятся: подготовка фидстока с использованием наполнителя и связующего, формование с помощью термопластавтоматов, удаление полимерного связующего и спекание заготовок в специальных печах для дебайдинга.

Также, были кратко рассмотрены принципиальные схемы оборудования, использующегося для *PIM* производства, такие как: схема экструдера, схема термопластавтомата. Были рассмотрены методы выполнения отдельных операций инжекционного литья: удаление связующего термическим, каталитическим методами и с помощью растворителя.

Характеристики *PIM*-изделий, согласно исследованным источникам, находятся в следующих диапазонах: масса – от 0,5 до 200 г, длина до 300 мм, толщина стенки – от 0,5 до 7,0 мм. При этом, все изделия могут подвергнуты как механической, так и химической (фосфатирование, борирование, нанесение различных покрытий) пост-обработке, если в ней есть необходимость. В настоящее время одной из актуальных тем для разработок является возможность изготовления с помощью *PIM* технологии более крупных и толстостенных форм деталей.

В ходе выполнения работы были выявлены наиболее значимые преимущества и недостатки *PIM* технологии.

На основании проанализированных данных и выявленных преимуществ и недостатках можно сделать вывод о перспективности изучаемой технологии для следующих отраслей: машиностроение, космическая промышленность, приборостроение, авиастроение, вооружение и военная техники.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 Условия и принципы подбора связующих в гранулятах

В предыдущем разделе были описаны основные технологические операции *РІМ* технологии, методики контроля состава изделия на последних этапах и принципиальные схемы оборудования, используемого для выполнения этих операций, исследована область применения. Также были сделаны выводы относительно преимуществ и недостатков технологии. В данном разделе более подробно рассматриваются и анализируются данные о характеристиках, составах связующих веществ в рецептурах фидстоков и влиянии их как на готовое изделие, так и на этапы формования заготовки.

2.1 Общие сведения о полимерных связующих

Полимерными связующими являются синтетические или природные органические вещества, способные благодаря воздействию различных факторов (например, веществ-отвердителей или температуры) осуществлять переход из жидкого состояния в твердое. При этом, как в жидком состоянии, так и после отвердевания полимеры сохраняют хорошую адгезию с другими материалами [24].

Основной вид полимерных связующих – синтетические полимеры, получаемые из низкомолекулярных продуктов (мономеров) полимеризацией или поликонденсацией.

В зависимости от отношения к нагреванию и потенциальной способности к укрупнению (сшивке) молекул различают термопластичные и реактопластичные вещества.

Термопласты, при нагреве могут переходить из твердого состояния в жидкое (плавятся), а при охлаждении вновь затвердевают, и при этом данные переходы могут повторяться многократно. Такие свойства термопластов объясняются линейным строением молекул, их химической инертностью, а также довольно слабым межмолекулярным взаимодействием. По тем же причинам большинство

термопластов способны растворяться в соответствующих растворителях. К термопластам относятся многие широко распространенные полимеры: полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол, модифицированная целлюлоза (метилцеллюлоза, нитроцеллюлоза) и природные смолы: канифоль, копал, битумы, дегти.

Реактопластами называют вещества, которые осуществляют необратимый переход из жидкого состояния в твердое. Это обусловлено изменением молекулярной структуры: линейные молекулы соединяются в пространственные сетки – гигантские макромолекулы с прочными химическими связями. Такое необратимое твердение происходит не только под действием нагревания, но и под действием отвердителей, ионизирующего излучения и некоторых других факторов.

Отверждённые реактопласты, как правило, более термостойки чем термопласты, и практически не растворяются, а только набухают в растворителях. К термореактивным связующим могут быть отнесены, например, эпоксидные и полиэфирные смолы, олифы, каучуки в смеси с вулканизаторами и т.д. [24].

Помимо вышеперечисленного, компонентами в составе связки могут являться разнообразные присадки и добавки. Их вводят в состав с целью управления скоростью процедуры дебайдинга, а также с целью уплотнения фидстока [25].

2.2 Полимерные связующие, используемые в *PIM* технологии

Не смотря на то, что связующее вещество не влияет на окончательный состав изделия и его эксплуатационные свойства, оно является важным фактором, определяющим успех производства деталей с помощью *PIM* технологии.

Для изготовления изделий с помощью *PIM* технологии, как правило, применяются системы связующих из нескольких компонентов. Такие системы должны обладать рядом определенных требований, в том числе противоречивых. Например, наличие адгезии с порошковой фракцией без сцепления со стенками пресс-формы или обеспечение химической инертности и ускорения процесса дебайдинга. Для обеспечения подобных свойств, в *PIM* технологии нашли применение

ние системы связующих, состоящие из нескольких полимерных или органических веществ. В таблице 2.1 представлены известные рецептуры подобных систем.

Таблица 2.1 – Типы и составы связующих

Тип связующего	Термопласты	Термореактопласты	Гелеобразные
Состав связующего	а) 72% полиэтиленгликоль + 24; полиэтилен + 4% трикрезил фосфат б) 58% полистирол + 29% минеральное масло + 13% растительное масло в) 65% полиэтиленгликоль + 35% ацетобутират целлюлозы г) 79% парафин + 10% этил(винил)ацетат + 10% полиэтилен высокого давления + 1% стеариновая кислота	а) 65% эпоксидная смола + 25% парафин + 10% бутилстеарат б) 62% поликарбосилан + 20% парафин + 16% бензохинон + 12% олеиновая кислота	а) 98,4 % вода + 1,2 % агар + 0,4 % диспергатор <i>Darvan</i> б) 98,4 % вода + 1,2 % агар + 0,4 % диспергатор <i>Darvan</i>

Условно, рецептуры связующих можно разделить на 4 основных типа, в зависимости от способа удаления:

- а) термопласты;
- б) реактопласты;
- в) гелеобразные водорастворимые связующие;
- г) неорганические связующие.

Наибольшее применение находят системы на основе термопластов, реактопластов и гелеобразных связующих. Корректируя составы подобного рода систем, можно управлять процессом с целью получения бездефектной структуры заготовок на всех этапах изготовления.

Наилучшие технологические свойства связующих обеспечиваются, как правило, если система состоит из 3 типов веществ:

а) основное вещество, обеспечивающее прочность расплава во время заполнения пресс-формы;

б) вещество, позволяющее ускорить процесс дебайдинга без нарушения структуры заготовки;

в) различные ПАВ, обеспечивающие достаточные смазывающие свойства, например, снижение риска разрушения заготовки при извлечении из пресс-формы.

В работах [26-28] описывается применение подобных систем на основе термопластов. Особенностью данных рецептур является удаление связок путем погружения заготовок в воду, что существенно ускоряет процесс дебайдинга.

В работе [29] описана система на основе поливинилового спирта, поливинилового эфира, полистирола, винилацетата и некоторых ПАВ, способствующих улучшенному смазыванию сырья. Дебайдинг также производится в водном растворе с содержанием хлора.

На основании рассмотренной информации из научных источников, можно сформулировать ряд требований к связующему веществу для *PIM* технологии:

а) стабильность при воздействии высоких температур во время формования заготовки;

б) химическая инертность при воздействии высоких температур и давления;

в) вязкость расплава, позволяющая равномерно заполнять стенки пресс-формы;

г) прочность «зеленого компонента»;

д) достаточная смачиваемость и уплотнение фидстока.

2.2.1 Использование полиформальдегида в качестве связующего

В связи с тем, что *PIM* технологией предполагается изготовление изделий сложной геометрической формы, одним из важных требований к веществам в составе связующего является достаточная вязкость. Совместно с требованиями, описанными в предыдущем подразделе, высокие показатели вязкости обеспечивает полиформальдегид (полиацеталь, полиоксиметилен) в составе связующего [30].

Композиции на основе полиформальдегида обеспечивают хорошие технологические свойства как при изготовлении металлических изделий, что описано в работах [30-31], так и керамических (изолирующих прокладок и огнеупорных плит), что описано в работах [32-34].

В качестве связующего для *PIM* процесса, впервые, полиформальдегид был применен немецкой компанией *BASF* в 1992 году. Для достижения наибольшей целостности и сохранения формы детали, была применена композиция на основе полиформальдегида и стеариновой кислоты, использующейся в качестве ПАВ [35]. Также, в данном патенте было отмечено наименьшее нарушение структуры заготовки после проведения дебайдинга.

В процессе анализа научных статей на тему использования полиформальдегида, можно отметить ряд составов, обеспечивающих высокие технологические свойства (гомогенность смеси, ускорение процесса дебайдинга, прочность расплава во время формования «зеленого компонента»):

- а) гомо- и сополимеры полиформальдегида – триоксан, 1,3-диоксан [36];
- б) циклические эфиры или формали (бутандиол) [37];
- в) феноксосмолы, полиэфиры угольной кислоты [38];
- г) смеси органических соединений (сложные эфиры жирных кислот, парафин, полиэтиленовый воск, полипропиленовый воск, карнаубский воск, соединения полигликоля) с термопластичными смолами (полиэтилен, аморфный полиолефин, этилен и винилацетат, акриловые смолы и пр.) [39];

д) смесь политетрагидрофаруна и винилового эфира, алифатических карбоновых кислот, виниловых акрилатов [40].

На основе подобных систем, компанией *BASF* было организовано производство и выпуск фидстоков серии *Catamold*, связующим веществом в которых является полиформальдегид. Большинство деталей, изготавливаемых с помощью *PIM* технологии, используют фидстоки именно этой серии в качестве сырья [41].

2.2.2 Выбор связующего на основе фенолформальдегидной смолы

Противоречивость требований к связующему веществу может быть использована непосредственно для улучшения технологических показателей заготовок, изготавливаемых по *PIM* технологии. Примером подобного использования связующих является применение фенолформальдегидной смолы (ФФС) в качестве основного вещества в связующем. После термодеструкции, реактопласты образуют сажу – высокий углеродный остаток, активный из-за своего небольшого размера. Использование реактопластов в качестве связок для металлических порошков влечёт за собой изменение состава металла, и как следствие, изменение свойств получаемого изделия. Однако, при использовании некоторых типов реактопластов, в частности ФФС, в композициях «железо – реактопласт», можно добиться получения чугуновой структуры. Способ, описанный в работах [41-42] позволяет получать чугуновые и толстостенные заготовки с помощью *PIM* технологии.

Использование ФФС в качестве связующего вещества имеет следующие преимущества:

а) возможность применения композиций на основе ФФС не только в области инжекционного формования, но и прямым прессованием;

б) заготовки из композиций на основе ФФС имеют усадку в несколько раз меньшую, чем на основе термопластов из-за выделения меньшего количества газов при термодеструкции;

в) сформованные заготовки на основе ФФС не размягчаются и, следовательно, не теряют форму при нагреве, что особенно важно для крупногабаритных изделий [41].

Использование фенолформальдегидной смолы в качестве связующего описывается в патенте [42].

Целью изобретения является расширение ассортимента металлополимерных композиций при одновременном сокращении технологического цикла изготовления деталей.

Технический результат был достигнут с использованием в качестве фидстока несколько образцов, состав которых представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Составы образцов фидстоков

Компоненты	Содержание компонентов, % по массе			
	№1	№2	№3	№4
Фенолформальдегидная смола	8,0	15,0	8,0	15,0
Пластификатор (стеарат цинка) $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$	0,4	0,75	0,4	0,75
Оксид железа (III)	8,0	40,0	7,0	41,0
Смесь высокодисперсных порошков железа	84,0	45,0	85,0	44,0

Материал изготавливают путем механического смешивания водного или спиртового раствора фенолформальдегидной смолы, пластификатора, порошков оксида железа и высокодисперсных порошков железа. Затем материал подвергается сушке и грануляции. Для получения стальных заготовок материал формуется в изделия при температуре от плюс 130 до плюс 150 °С и сформованные заготовки подвергаются спеканию. На первом, низкотемпературном этапе спекания осуществляется удаление связующего путем его термического разложения, на втором, высокотемпературном этапе осуществляется окончательное спекание при температуре от плюс 1250 до плюс 1300 °С до плотности, близкой к теоретической. При нагреве изделий в интервале температур до 750 °С смола термически

разлагается, выделяя активный углерод, вступающий в реакцию с оксидами. Образующийся в результате подобного взаимодействия материал на основе восстановленного железа, углеродного остатка и железного порошка имеет прочность достаточную для сопротивления разрушению вследствие собственного веса или образующихся при удалении связующего пор. Это и позволяет получать габаритные и толстостенные заготовки данным методом.

Сравнение свойств полученных рецептур и аналогичного фидстока серии *Catamold* фирмы *BASF* отображено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение показателей свойств опытных образцов и аналога

Показатели свойств	Смесь №1	Смесь №2	Аналог
Время удаления связующего на 1 мм толщины, мин	20	30	60
Наличие и тип катализатора в печи	нет	нет	Пары азотной кислоты
Температурный интервал деструкции связующего, °С	450...750	450...750	110

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование реактопластов (в частности, фенолформальдегидной смолы) в качестве связующего обуславливает сокращение технологического цикла, вследствие значительного уменьшения времени, требуемого для проведения процедуры дебайдинга. Также, в некоторых случаях, использование реактопластов позволяет изготавливать крупногабаритные и толстостенные изделия. Однако, в сравнении с термопластичными связующими (в частности, полиацеталя в порошках марки *Catamold*) это требует применения дополнительных технологических операций для обеспечения заданного содержания углерода.

2.3 Разработка отечественного аналога фидстока

В последнее время промышленные предприятия РФ прорабатывают вопрос освоения современной инновационной технологии инжекционного прессования и спекания деталей из металлических и керамических порошков. Возможности отечественных предприятий в выполнении данной задачи ограничены отсутствием в России сырьевой базы, т. е. отечественного гранулята, для реализации высокоэффективного процесса инжекционного формования деталей из мелкодисперсных порошков металла или керамики. Немногочисленные частные компании, изготавливающие в России детали по данной технологии, работают на дорогостоящем импортном грануляте, в основном производства фирмы *BASF* (Германия).

Крупнейший поставщик сырья для *MIM* немецкая фирма *BASF* предлагает все виды услуг по освоению процесса переработки своего фидстока, имеющего торговую марку *Catamold*, вплоть до поставки программного обеспечения для моделирования процесса литья, но исходное сырье (фидсток) необходимо покупать у *BASF*. В результате большая часть прибыли от внедрения *MIM* технологии остается у изготовителя сырья.

Таким образом, именно отсутствие отечественного гранулята как сырья для *MIM* технологии является наиболее острой проблемой, тормозящей ее развитие в России [43]. Также, в ходе анализа свойств материалов, предполагаемых для использования в качестве сырья для фидстоков, одной из важнейших задач является изучение влияния полимерных связующих на качество фидстока, что прямым образом соответствует одной из поставленных целей в работе.

2.3.1 Влияние связующих веществ на свойства стальных заготовок

В работе [44] проводится исследование зависимостей конечных свойств стальных заготовок, спеченных по *MIM* технологии от содержания связующего вещества в *MIM* грануляте и от состава компонентов в связующем на основе порошка карбонильного железа марки НМ.

Рецептуры партий гранулята на основе порошка карбонильного железа приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Рецептуры опытных партий гранулята

№ партии гранулята	Состав гранулята, % вес.			
	Металлическая часть	Связующая часть		
	Карбонильное железо марки НМ	Полиформальдегид	Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)	Стеариновая кислота (СК)
1	86,5	11,0	1,0	1,5
2	86	11,4	1,0	1,6
3	85,5	11,8	1,1	1,6
4	85	12,2	1,1	1,7
5	87	11,6	0	1,4
6	86	12,4	0	1,6
7	87	11,3	0,3	1,4

Для определения коэффициента усадки из семи партий гранулята на основе карбонильного железа на термопластавтомате *MicroPower 5/7,5* были изготовлены «зеленые» детали. Скорость впрыска материала в пресс-форму была равна примерно 5 см³/с. Далее контрольные образцы спекали в среде водорода при температуре нагрева до 1450 °С.

Также на контрольных спеченных образцах, изготовленных по *MIM* технологии, проводился замер плотности. Измерение плотности образцов проводилось методом гидростатического взвешивания.

Коэффициенты усадки образцов, изготовленных из семи партий гранулята на основе порошка карбонильного железа, а также результаты замеров плотности приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Коэффициенты усадки и плотность спеченных образцов

№ партии	Средний коэффициент усадки	Плотность спеченных образцов, г/см ³
1	1,203	7,6
2	1,202	7,6
3	1,212	7,53
4	1,225	7,5
5	1,275	7,49
6	1,292	7,41
7	1,251	7,43

Чем ниже коэффициент усадки, тем меньше возможность возникновения в структуре материала пористости, более высокая стойкость деталей к деформации во время спекания, а также большая вероятность соблюдения необходимой точности деталей после процесса спекания. Импортный аналог *Catamold* имеет средний коэффициент усадки 1,216 [45].

Анализируя таблицу 2.5, можно сделать вывод, что коэффициент усадки и плотность спеченных образцов имеют обратную зависимость. С увеличением коэффициента усадки плотность материала снижается. Точки экстремума значений коэффициента усадки (*max*) и плотности (*min*) достигаются в спеченном материале, изготовленном с использованием связующего без применения ПЭВД (рецептуры № 5-6).

Следовательно, при получении гранулята для изготовления деталей по MIM технологии необходимо использование ПЭВД в связующем в качестве добавки, поддерживающей структуру материала при удалении связки и спекании.

Также были изготовлены микрошлифы спеченных контрольных образцов, полученных по *MIM* технологии. Фотография микроструктуры контрольного спеченного образца представлена на рисунке 2.1.

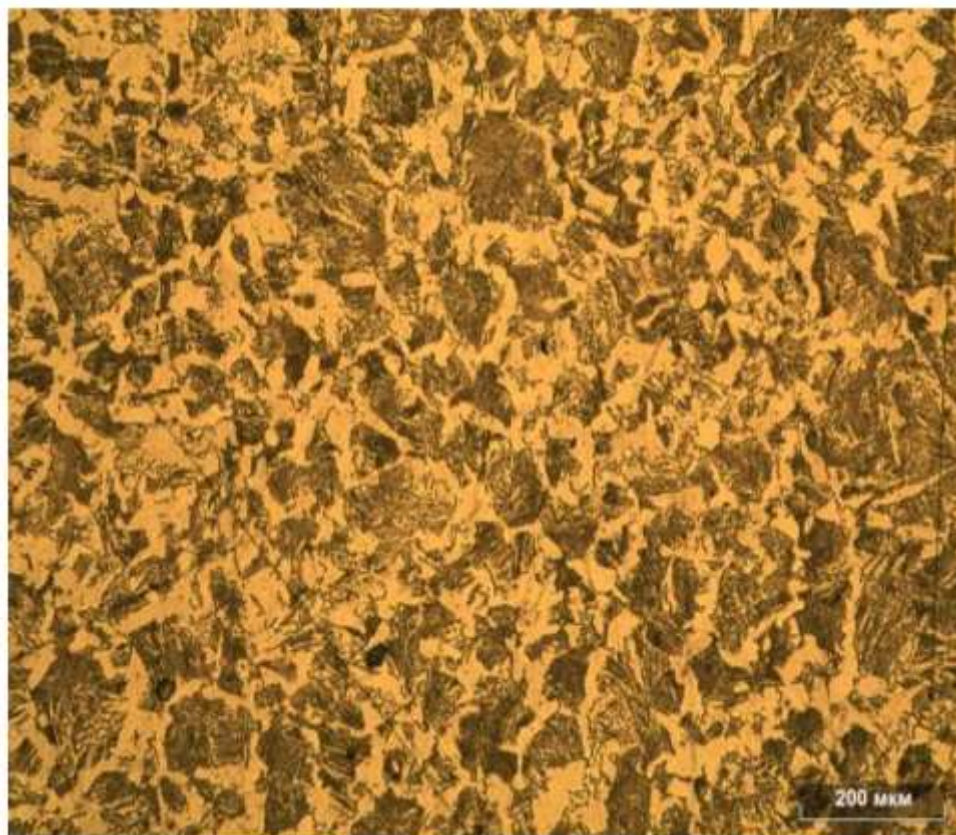


Рисунок 2.1 – Микроструктура спеченного образца, полученного по *MIM* технологии

Идентичность микроструктуры полученных образцов свидетельствует об однородности составов используемых фидстоков.

В ходе исследований установлено, что коэффициент усадки, плотность и твердость спеченных образцов зависит от содержания связующего компонента и от состава компонентов в связующем. С увеличением количества связующего в смеси коэффициент усадки увеличивается, а плотность и твердость снижаются [44].

Качество гранулята для *MIM* технологии на основе порошка карбонильного железа контролировалось по следующим характеристикам [46, 47]:

а) показатель текучести расплава (ПТР);

б) гомогенность (однородность).

Показатель текучести расплава гранулята измерялся на приборе по определению текучести расплава *CEAST 7026*.

Показатель текучести расплава гранулята, включающий в себя массовый коэффициент расплавленного потока, объемный коэффициент расплавленного потока, вязкость расплавленного гранулята и скорость сдвига показывает возможность применения материала на термопластавтомате, а также правильность соотношения порошковой и полимерной частей [48].

Определение показателя текучести проводилось на ПОПТР на следующих режимах:

- а) диаметр сопла – 2,095 мм;
- б) температура – 190 °С;
- в) нагрузка – 21,6 кгс;
- г) время преднагрева без нагрузки – 240 с.

Гомогенность гранулята на основе порошка карбонильного железа контролировалась на приборе по определению плотности фирмы *MICROMERITICS*. Гомогенность показывает степень распределения порошкового материала в полимерном связующем. Отклонение от гомогенности для гранулята не должно превышать 1,5 % [5].

Определение плотности и гомогенности проводилось на гелиевом пикнометре.

Показатель текучести расплава и гомогенность гранулята на основе порошка карбонильного железа приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Характеристика опытных партий гранулята

№ партии гранулята	Плотность средняя, г/см ³	Массовый показатель текучести, г/10 мин	Объемный показатель текучести, см ³ /10 мин
1	4,57	109,1	27,22
2	4,49	190,6	47,56
3	4,39	243,59	60,87
4	4,32	423,64	105,91
5	4,42	615,25	136,7
6	4,33	584	129,82
7	4,42	445,44	98,95

Грануляты приготовленные по рецептурам без добавления ПЭВД (№5 и №6) имеют низкую плотность, недопустимые для *MIM* процесса показатели текучести и достаточно низкую гомогенность смеси.

Гранулят, приготовленный по рецептуре с добавлением в состав связующей системы ПЭВД в количестве 2 % по массе (№7), также не подходит для *MIM* процесса из-за низкой плотности и высокой неоднородности смеси.

Наиболее оптимальными являются грануляты, приготовленные по рецептурам №1 и №2, так как одновременно обеспечивают наибольшую плотность смеси и приемлемую для процесса литья под давлением на термопласт автомате текучесть и гомогенность [47].

При увеличении содержания связующего в смеси и уменьшении количество ПЭВД происходит увеличение коэффициента усадки до 5 %, снижение плотности до 10 % и твердости до 5 %.

Таким образом, для получения гранулята для изготовления деталей по *MIM* технологии необходимо использовать минимальное количество связующего компонента с содержанием ПЭВД около 5 % по массе.

2.3.2 Исследование характеристик фидстока *Catamold 42CrMo4*

В связи с тем, что большинство отечественных *PIM* предприятий использует дорогостоящий импортный фидсток в качестве сырья, первоочередной задачей для развития *PIM* технологии в России является разработка отечественного гранулята.

В качестве начального этапа решения поставленной задачи, в работе [49] были проведены исследования импортного гранулята *Catamold 42CrMo4*.

Было проведено исследование микроструктуры, рентгенофазового и химического состава импортного гранулята для *MIM* технологии *Catamold 42CrMo4*, что позволило дать рекомендации по подбору отечественных аналогов для полимерной и металлической части гранулята. Определены механические характеристики гранулята *Catamold 42CrMo4* – плотность, показатель текучести расплава, насыпная плотность и насыпной вес.

Плотность гранулята *Catamold 42CrMo4* определяли при температуре до 190 °С. Образцы цилиндрические диаметром 2 мм, длиной от 13,2 до 13,4 мм взвешивали на электронных весах с точностью $\pm 0,0001$ г и измеряли размеры микрометром с точностью $\pm 0,01$ мм, что отображено в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Геометрические размеры гранулята *Catamold 42CrMo4*

№ опыта	Масса образца M , г	Диаметр образца D , см	Длина образца H , см	Плотность образца, г/см ³
1	0,1894	0,2	1,32	4,57
2	0,1902	0,2	1,33	4,57
3	0,1927	0,2	1,34	4,57

Таким образом, средняя плотность гранулята *Catamold 42CrMo4* составляет около 4,57 г/см³.

Измерение насыпного веса гранулята осуществлялось заполнением заданного объема в 50 мл навеской гранулята с дальнейшим взвешиванием навески. Результаты измерений отображены в таблице 2.8.

Таким образом, средний насыпной вес гранулята *Catamold 42CrMo4* составляет около 1,33 г/см³.

Таблица 2.8 – Насыпной вес гранулята *Catamold 42CrMo4*

№ опыта	Заданный объем V, мл	Насыпной вес гранулята, г/см ³
1	50	1,32
2	50	1,32
3	50	1,34

Содержание порошковой фазы в грануляте *Catamold 42CrMo4* варьируется в пределах от 88 до 89 % и, соответственно, полимерной фазы от 11 до 12 %.

В результате химического исследования состава металлической фазы, было установлено, что она состоит из:

- а) порошка железа в пределах от 97 до 98 %;
- б) хрома в пределах от 0,2 до 0,4 %;
- в) молибдена в пределах от 0,2 до 0,3 %.

После термического разложения образца остается сухой остаток серого цвета, с сохранением формы образца.

С использованием спектроскопии, в результате анализа полимерной части гранулята *Catamold 42CrMo4* было выявлено наличие полиформальдегида и полиэтилена высокого давления в составе фидстока [35].

В результате полученных данных, можно сделать вывод о том, что связующее марки Технасет А-110 может быть использовано в составе сырья на основе сталей марок 40ХФА и 38ХМ в качестве аналога импортного фидстока.

2.3.3 Исследование влияния связующего на усадку гранулята

Для изучения величины свободной усадки связующего в фидстоке, в работе [50] были выбраны два промышленных фидстока с наиболее распространёнными типами полимерного связующего. Оба фидстока применимы для изготовления МІМ методом деталей из стали 38ХМА. Оба фидстока имеют в своей основе приблизительно 62 % объёма порошка хромомолибденовой стали зарубежных марок *Catamold 42CrMo4* и *MIM-4140* (являющиеся аналогом стали 38ХМА) с практически идентичным гранулометрическим составом, что отображено на рисунке 2.2.

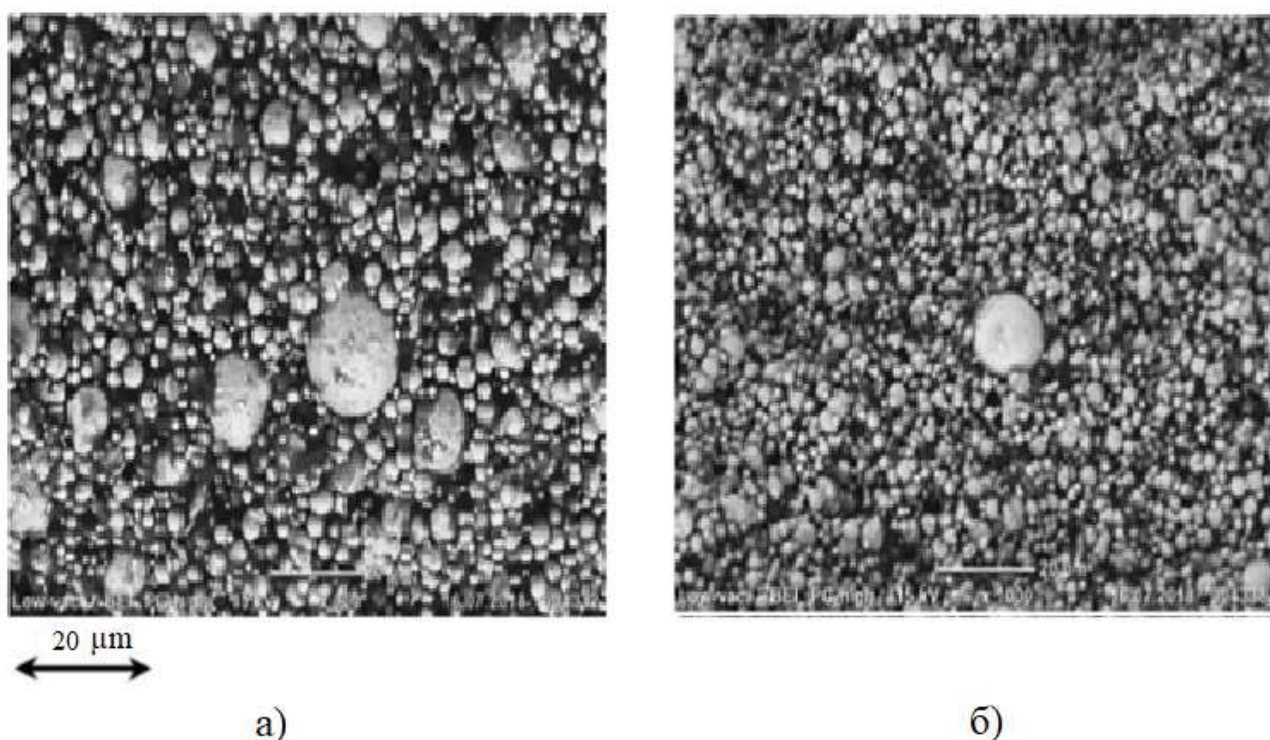


Рисунок 2.2 – Изображения микроструктуры полимерно-порошковых смесей: а) фидстока *MIM-4140*; б) фидстока *Catamold 42CrMo4*

Влияние веществ в составах фидстоков обуславливает различие микроструктур. Система на основе воска и полиолефина в составе фидстока *MIM-4140* предполагает растворно-термический способ удаления связки, а система на основе полиоксиметилена в фидстоке *Catamold 42CrMo4* предназначена для каталитического типа дебайдинга.

Экспериментальные зависимости коэффициентов линейного термического расширения фидстоков, показанные на рисунке 2.3, а также результаты измерения их плотности пикнометрическим методом позволили выполнить для фидстоков, находящихся в отформованной «зеленой» детали в твердом состоянии, оценочный расчет зависимости их плотности и удельного объема от температуры [50].

Изменение удельного объема фидстоков, даже при относительно малом изменении температуры объясняется высоким значением коэффициента теплового расширения этих материалов, представляющих собой дисперсионнонаполненные композиты с полимерной матрицей.

Установлено, что свободная объёмная усадка фидстока в рассматриваемом диапазоне температур составляет приблизительно 1,5 % и при этом практически не зависит от типа полимерного связующего в сравниваемых фидстоках. Непосредственно в процессе литья под давлением это приблизительно значение объёмной усадки является некомпенсируемым для материала отливки, что связано с тем, что уплотнение и подпитка завершается в момент перемерзания литниково-питающей системы. Для фидстока на основе воска и полиолефина, температура нулевой жидкотекучести, связанная с существенным повышением динамической вязкости, составляет 125 °С [51]. Для материала отливки, температура которого ниже температуры нулевой жидкотекучести в момент перемерзания литниково-питающей системы, усадка будет соответственно ниже 1,5 %, что показано на рисунке 2.3. Величину свободной некомпенсируемой усадки следует учитывать при оценке бюджета погрешностей при МІМ-производстве прецизионных деталей, обладающих повышенными требованиями к размерной точности.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

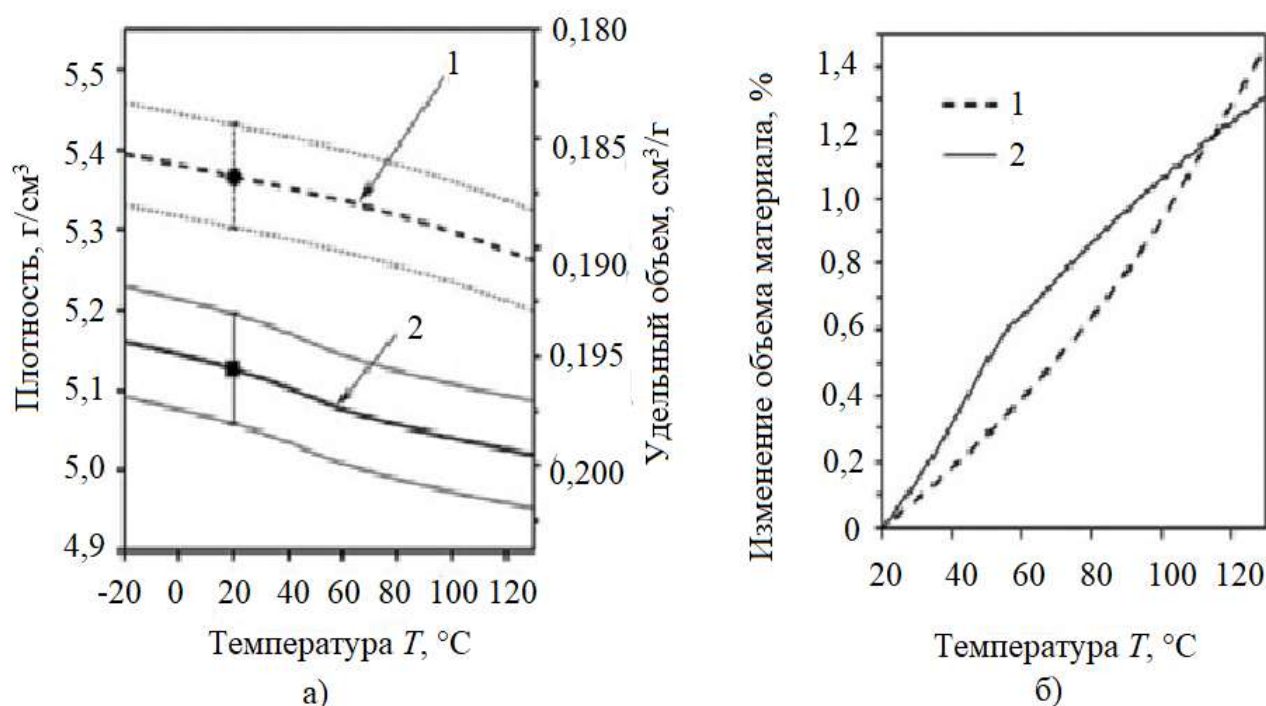


Рисунок 2.3 – Температурные зависимости плотности (а) и (б) – относительного изменения удельного объема различных типов полимерно-порошковых смесей: 1 – фидстока *Catamold 42CrMo4*; 2 – фидстока *MIM-4140*

Таким образом, для комплексного сравнения и выбора оптимальных условий переработки различных типов фидстоков, преобразуемых для осуществления процесса литья в шликер с тиксотропными свойствами, необходимо более подробное изучение значимых свойств, которые определяют технологических формуемых материалов.

2.4 Выводы по разделу 2

На основании проанализированных данных, можно сформулировать ряд выводов, касающихся связующих веществ в составах фидстоков для *PIM* производства.

Выбор связующего и способ его удаления критически важны для успешного *PIM* производства, но точные составы связующих и методы их изготовления в значительной степени являются секретами патентов.

При изучении опубликованных рецептур фидстоков можно сформулировать несколько принципов подбора связующих. Многокомпонентные связующие вещества имеют преимущества: они позволяют использовать прогрессивный цикл извлечения. Связующее вещество должно смачивать порошок и обеспечивать низкую вязкость при высокой загрузке порошка. Следовательно, основой для связующего вещества обычно являются полимеры или воски с низкой молекулярной массой. Молекулы с малой длиной цепи проще смешивать и извлекать при удалении связующего вещества. Связующее необходимо подбирать с учетом того, что оно не должно вступать в реакцию с порошком. Для регулирования смачивания и вязкости широко применяются присадки к связующему веществу. Помимо первичных требований к выбору связующего вещества существуют и вторичные, такие как токсичность, срок хранения, прочность, смачивающая способность, биостойкость и возможность неоднократной переработки без потери свойств. Хотя это и широкая область исследований, экспериментальные результаты показывают, что принципы едины для многих систем связующих веществ.

Разработка и использование отечественного сырья позволит существенно снизить себестоимость производимой продукции при условии сохранения ее потребительских свойств и обеспечить возможность применения *PIM* технологии на отечественных предприятиях.

На данный момент, наиболее перспективным для изготовления деталей из малолегированной стали представляется фидсток фирмы *BASF*, который состоит из смеси порошка карбонильного железа со средним размером частиц 5 мкм и порошка никеля со средним размером частиц 8 мкм с содержанием смеси порошков 58 объемных % от объема смеси, а также связующего вещества состава: 90 % полиформальдегид, 10 % полиэтилен. Данный фидсток имеет плотность 4,52 г/см³, температуру формования 180 °С, вязкость 190 Па·с при этой температуре, прочность после изготовления 20 МПа. Связующее на основе полиацетала обеспечивает прочность зеленой и коричневой заготовки и удаляется при дальнейшей обработке.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 Систематизация данных о связующих веществах

Анализ вышеописанных научных работ и патентных исследований на тему связующих в композициях, используемых в качестве фидстоков для порошкового инъекционного формования показывает наличие большого количества противоречивой информации. Это обусловлено многими факторами – например, коммерческой тайной о составах связующих фидстоков зарубежных марок, а также широкой номенклатурой полимеров, которые могут быть использованы в качестве связующих. В связи с этим, можно сделать вывод о необходимости систематизации имеющейся информации и построении алгоритма при разработке технологического процесса подбора и удаления связующего. Для выполнения этой задачи необходимо проанализировать современные исследования о влиянии составов связующих на технологические свойства и геометрическую точность изделий и классифицировать полученную информацию.

Технологическими требованиями, предъявляемыми к фидстоку являются: плотность фидстока, усадка изготавливаемой детали, прочность «зелёной» и «коричневой» заготовок. Данные свойства являются также зависимыми друг от друга при подборе связующего – например, увеличение количества связующего в составе фидстока приводит к уменьшению плотности и твердости, а также к увеличению коэффициента усадки; уменьшение вязкости – к увеличению плотности детали и т.д.

Не менее важными параметрами являются скорость удаления связующего и смачиваемость поверхности порошка. В данном случае имеется зависимость между связующим, обеспечивающим быстрые процессы дебайдинга и технологическими свойствами. Например, использование гелевых связующих существенно ускоряет процесс дебайдинга, однако снижает прочность формирующихся заготовок. По этой причине, гелевое связующее хорошо подходит для изготовления геометрически точных изделий, но не подходит для толстостенных или крупногабаритных изделий. Использование терморектопластов сокращает время, требуе-

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

мое для операции дебайдинга, но в большей степени подходит для керамики на основе карбида кремния чем для металлических порошков. Это связано с высоким углеродным остатком после разложения реактопластов – мельчайших частиц графита, активных за счёт своего небольшого размера.

Важным также является требование смачиваемости порошка. Вместе с тем, связующее с одной стороны должно обеспечивать адгезию с порошковым наполнителем, а с другой – минимизировать сцепление со стенками пресс-формы. Для выполнения этого условия, в состав связующего добавляются различные ПАВ. Однако, сложность использования ПАВ состоит в том, что зависимость уровня адгезии от процентного содержания ПАВ в составе фидстока носит нелинейный характер. Из-за этого, повышение количества ПАВ приводит к разжижению фидстока и, как следствие, невозможности обеспечения требуемой геометрической точности. Для керамических порошков широкое применяются парафин и латекс в качестве смачивающих веществ.

Геометрическая точность заготовок зависит от коэффициента усадки при спекании. В результате дебайдинга и дальнейшего спекания заготовок, конструкция изделия претерпевает изменения форм и размеров ввиду увеличения и уменьшения количества пор. По этой причине происходит усадка размеров изделия. Существуют типы связующих, использующихся с целью уменьшить усадку изделий, к таким относят, например, гелевые системы связующих. Также известно, что коэффициент усадки снижается при увеличении плотности фидстока, поэтому связующие, обеспечивающие высокую плотность улучшают влияние на геометрическую точность изделия.

Вышеописанный комплекс требований к связующему способны выполнить так называемые системы связующих на основе нескольких веществ. Количество веществ может варьироваться от 2 до 5, но каждое из них обеспечивает заданные свойства, особенности которых описываются техническим заданием.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.1 Связующие в композициях «металл-полимер»

В частности, при использовании металлических порошков могут быть предложены нижеуказанные связующие.

Композиция, описываемая в патенте [26], содержит в качестве связующего полиэтиленовый воск и парафин и может быть применена для порошков на основе железа, карбонильного железа, кобальта, вольфрама и т.д. В данном случае, использование этих типов связующих обеспечивает высокую сохранность изделия в процессе изготовления и после удаления связующего, но значительно увеличивает время, требующееся для его удаления.

В 1991 году группой учёных – *Achikita Masakazu* и *Ohtsuka Akihito* на базе разработок *Sumitomo Metal Mining Company* была разработана связующая система для *MIM* процесса на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД), парафина и эфира борной кислоты [27]. Данная разработка была направлена на снижение температур и времени во время процесса удаления связующего, а также сокращения количества дефектов, возникающих на этапе формирования «зеленой детали».

В патенте [28] использована композиция из металлического порошка сферической формы, диаметром от 2 до 5 мкм, с содержанием органического связующего 40 % по объему всей смеси. В качестве связки использованы системы на основе термопластов (в частности, полипропиленовых или полистирольных смол) и различных типов воска (пчелиный или японский воск).

Наряду с тем, что указанные связки обеспечивают хорошие реологические свойства смеси «порошок – связующее», основной целью исследования является достижение значения коэффициента плотности свыше 93 %. Однако при этом, такие композиции обладают существенными недостатками:

- а) высокий риск термической деформации деталей;
- б) длительный процесс удаления связующих компонентов (от 24 до 70 часов).

Одной из широко применяемых связующих является композиция на основе полиформальдегида, ПЭВД и стеариновой кислоты. Разработка описана в патенте, зарегистрированном компанией *BASF* и используется в фидстоках собственного производства до сих пор [35]. Подробности состава такой композиции являются коммерческой тайной, но исходя из исследований [49], можно сделать вывод, что вышеуказанные компоненты в составе связующего обеспечивают хорошую сохранность формы детали, и её целостность благодаря повышенной пористости после удаления полиформальдегида. Стеариновая кислота используется для обеспечения высокой смачиваемости поверхности.

При рассмотрении вопроса о разработке отечественного связующего, было установлено что использование термореактопластов (например, фенолформальдегидной смолы) в составе композиции повышает скорость технологического цикла по сравнению с зарубежным аналогом, а также допускает возможность изготовления крупногабаритных и толстостенных изделий благодаря наличию оксида железа, который, в результате восстановления, упрочняет исходную металл-полимерную композицию. Недостатком данного связующего является увеличение продолжительности технологического акта из-за принятия мер для сохранения заданного содержания углерода.

В патенте [39] рассматривается четырёхкомпонентная формула связующего на основе органического связующего, вязкость которого при температуре размягчения по Вика указанного полиоксиметилена (т.е. 600 °C) не более 200 мПа·с. Также, в состав входит полиоксиметилен, полипропилен и термопластическая смола.

При этом, если объём всех компонентов составляет 30 % или менее по отношению к металлу, то заготовка имеет свойство быть слишком хрупкой. Если объём всех компонентов свыше 60 %, то изделие деформируется во время спекания при температуре меньше чем 600 °C. В диапазоне между 30 и 60 % по объёму, помимо сокращения рисков деформации и охрупчивания изделия, существенно снижается время, необходимое для термической обработки и спекания заготовок.

В качестве металлического порошка использовалась сталь *SUS316L*, отечественным аналогом которой является коррозионностойкая сталь 03X16H15M3 Примеры составов таких связующих, отображены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Примеры составов связующих

№ состава	1	2	3	4
Составы связующих	Полиоксиметил- лен – 10 % Полипропилен – 20 % Парафиновый воск – 40 % Полипропилено- вый воск – 10 % Поливинилбути- раль – 20 %	Полиоксиметил- лен – 20% Полипропилен – 20 % Парафиновый воск – 40 % Карнаубский воск – 10 % Полибутил метак- рилат – 10 %	Полиоксиме- тилен – 10 % Полипропи- лен – 20 % Полипропи- леновый воск – 50 % Поливи- нилбутираль – 20%	Этиленвинилацетат – 25 % Парафиновый воск – 50 % Полиэтилен высоко- го давления – 25 %

3.2 Связующие в композициях «керамика-полимер»

Среди большинства керамических порошков, использующихся в *CIM* технологии, можно выделить два основных типа: керамика на основе оксидов алюминия (Al_2O_3) и керамика на основе карбидов кремния (SiC).

В частности, для оксидной керамики, в работе [52] было проведено исследование системы связующего состава: полиэтилен – 10 %, парафин – 60 %, этилен винилацетат – 10 %, дибутилфталат – 5 %, стеариновая кислота – 15 %. Дополнительно, в состав вводят порошок оксида магния с целью предотвращения роста кристаллов в процессе спекания. За счёт адсорбции стеариновой кислоты на поверхности порошка происходит снижение вязкости композиции, что способствует уменьшению усадки изделия в результате дебайдинга. Использование данного связующего позволяет практически прозрачные изделия из оксида алюминия.

Известна композиция состава: латекс, поливиниловый спирт и эфир целлюлозы, используемая для формования порошков Al_2O_3 [53]. Применение латекса позволяет использовать фидстоки с низкой вязкостью, и как следствие, получать изделия с плотностью от 93 до 98,6 %.

Исследование влияния присадок оксида магния на керамические фидстоки рассматривается в работе [54]. Использование MgO способствует уплотнению порошка Al_2O_3 , в результате чего происходит повышение плотности изделий. Однако, из-за сильного влияния малых концентраций MgO на свойства сырья, процесс распределения MgO в порошке трудно контролировать. Для улучшения распределения MgO в порошке Al_2O_3 предложено использование стеарата магния как эффективной присадки для MgO , а в качестве связующей смеси – парафина и полипропилена. Преимуществом данного решения является минимизация пор и увеличение плотности заготовок. Также, для удаления присадок данного типа не требуются температуры выше 169 °С, в отличие от присадок на основе оксида магния.

Использование водорастворимых связующих на гелевой основе рассматривается в работе [55]. В работе рассматривается влияние полисахаридов – агара и агарозы на процесс формования порошка оксида алюминия. Главным преимуществом таких связующих является высокая плотность полученных заготовок и меньшая усадка после дебайдинга чем при использовании, например, терморектопластов. Однако, данная композиция имеет низкую вязкость, что отрицательно сказывается на формировании крупногабаритных или толстостенных изделий во время заполнения пресс-формы.

Для формования «зеленой детали» из порошков безоксидной керамики (например, на основе карбида кремния) с размером частиц от 10 до 70 мкм, известны следующие составы связующих:

а) полиэтилен низкого давления – 29% по массе, парафин – 65% по массе, стеариновая кислота – 1% [56];

б) система на основе парафина, полиэтилена низкого давления с добавлением стеариновой кислоты [57];

в) смесь парафина и воска при соотношении 94% парафина + 6% воска [58].

3.3 Разработка алгоритма подбора связующего

На основании вышеизложенной информации, можно провести классификацию веществ в составах фидстоков в зависимости от их функционального назначения. Использование типа порошкового наполнителя обуславливается, в первую очередь, техническим заданием, поэтому подбор связующего рассмотрен на основе наиболее часто используемых в *PIM* технологии наполнителей: металлических порошков, а также оксидных и безоксидных керамических порошков. Указанные материалы использованы в качестве входных данных в алгоритме, представленном в Приложении А на рисунке А1. Блок входных данных на рисунке обозначен цифрой 2.

Химическая пассивность при высоких температурах, термическая стабильность и достаточная вязкость являются основными критериями выбора материала связующего, поэтому данные требования заданы в начальном блоке условий 3. Условие выполняется в зависимости от наполнителя фидстока: в случае металлических порошков этими материалами являются термопласты и гелевые связующие, а для керамических порошков также подойдут термореактопласты, что отражено в блоках 4 и 5, соответственно. Реактопласты в большей степени влияют на состав металлического порошка после разложения из-за образования углеродного остатка – мельчайших частиц графита, активных за счёт своего небольшого размера. В связи с этим, реактопласты не соответствуют заданному условию для металлических порошков.

Следующим требованием, указанном в блоке условий 6, является прочность заготовки на этапе формования «зелёной» детали. В случае использования металлических порошков или порошков оксидной керамики, высокую прочность обес-

печивают термопластичные связующие. В частности, для металлических наполнителей, более высокую прочность «зелёной» детали обеспечивает связующее на основе полиацетала, что указано в блоке 7. Для порошков безкислородной керамики находят применение системы на основе парафина или полиэтилена высокого давления, что изображено в блоке 8.

Также, важным требованием является скорость удаления связующего, что обозначено в блоке условия 9. Процедура дебайдинга с последующим спеканием являются причиной усадки изделий и поэтому является противоречивым требованием – полимеры, позволяющие существенно ускорить процесс дебайдинга, также могут негативно влиять на другие технологические параметры фидстока. Подобным примером является система на основе гелевого связующего, которая существенно ускоряет процесс дебайдинга, но в то же время затрудняет процесс формования крупных и толстостенных изделий. Однако, гелевые связующие находят применение для формования деталей из порошков оксидной керамики. Известно, что использование полиоксиметилена и полибутилметакрилата повышает скорость дебайдинга для металлических порошков. Для порошков безкислородной керамики часто используют добавки в виде полиэтилена или воска.

Для обеспечения достаточной смачиваемости и уплотнения фидстока, используют различные органические присадки. При смачивании металл-полимерных композиций широко применяют различные ПАВ, например, стеариновую кислоту, а для уплотнения – фосфаты, оксиды магния. Для керамических порошков самым часто используемым уплотнителем состава является оксид магния, также находит применение стеарат магния. В качестве смачивающего вещества для керамических фидстоков используют латекс или некоторые типы восков.

3.4 Формирование высокоплотной структуры карбида кремния

В работе [59] освещена технология получения высокоплотных изделий из карбида керамики, использующиеся в условиях интенсивных динамических нагрузок. Такими изделиями являются бронезащитные элементы и бронепластины, изготовленные из композиции на основе порошка карбида кремния и системы связующего – парафин, пчелиный воск, олеиновая кислота и углеродосодержащие добавки.

Разработка и применение керамических материалов на основе карбида кремния в составе бронезащитных элементов определены такими свойствами керамики как: плотность, твердость, модуль упругости и трещиностойкость [60]. Плотности керамического материала уделяется особое внимание, так как она предопределяет все вышеперечисленные свойства.

Для обеспечения заданных свойств были использованы рецептуры порошков карбида кремния с размером от 1 до 100 мкм и насыпной плотностью от 0,92 до 1,56 г/см³. Вязкость связующего на основе парафина не превышает 11 Па·с. Заготовки формовали в специально изготовленных разборных литейных формах, которые собирали непосредственно перед процессом литья и, с целью обеспечения однородности отливки по объему, их предварительно нагревали до температуры 40 °С. После сборки формы процесс литья производили под давлением до 0,6 Мпа. После охлаждения технологического узла до комнатной температуры литейную форму разбирали и заготовку извлекали.

Удаление связки из заготовки изделия осуществляли посредством нагрева в муфельной печи в присутствии адсорбентов при температуре 120 °С. В результате дебайдинга, расплавленная связка выходит из заготовки через множество капиллярных каналов, образованных межзеренными пространствами. Излишне быстрый нагрев приводит к формированию перепада температуры по толщине заготовки и, следовательно, к неравномерной интенсивности испарения связки, что может привести к избыточному давлению и формированию градиента напряжений, превышающих предел прочности материала на растяжение и привести к раз-

рушению заготовки. При нагреве заготовок со скоростью свыше 200 град/ч, вследствие неравномерного разогрева внутренних и внешних слоев происходило разрушение крупногабаритных заготовок, если их толщина превышала 14 мм. В то же время, при достаточно медленном нагреве заготовки также могли разрушаться, но только при температурах от 50 до 60 °С и от 130 до 170 °С, которые соответствуют переходам связки из твердого в жидкое состояние и из жидкого в газообразное. После выравнивания температуры по объему изделия процесс отгонки связки стабилизировался (с выдержкой заготовки при 200 °С), а количество удаляемой связки в единицу времени после 3 или 8 ч было практически одинаковым. Это говорит о наличии возможности управления температурным градиентом на протяжении всего процесса отгонки связки. После процедуры дебайдинга производили дополнительный нагрев заготовки до температуры от 1800 до 1900 °С. По окончании выдержки при указанной температуре заготовку извлекали из графитового тигля и после очистки определяли ее физико-механические свойства.

Еще одним фактором, увеличивающим плотность заготовок, является пропитка заготовок после отгонки связующего углеродосодержащими материалами, такими как органические смолы, в частности, гудрон или спиртовые растворы бакелитовых лаков и т. п. Так, в результате сжигания (отгонки) нефтяного кокса было получено практически 100 % остаточного углерода, бакелита – до 60 %, нефтяного крекинга – до 40 % и парафина – до 1 %.

Одним из последних принципиальных моментов процесса, оказывающих существенное влияние на плотность изделия из карбида кремния, является силицирование сырья, в ходе которого заготовка подвергается пропитке жидкой фазой кремния в среде CO_2 при температуре от 2150 до 2200 °С. Создаваемое в результате этого переноса пересыщение углерода на поверхности частиц SiC приводит к формированию вторичного карбида кремния, образующего жесткий карбидный скелет и содержащего остаточную кремниевую фазу, представляющую собой твердый раствор углерода в кремнии. На основании ряда проведенных экспериментов по получению керамических изделий и исследованию их свойств был

установлен оптимальный режим спекания, заключающийся в равномерном нагреве изделий до температуры 1400 °С и последующей выдержкой при достигнутой температуре. Дальнейший нагрев изделий до температуры спекания осуществляли с интенсивностью около 200 град/ч. Еще одна выдержка при достижении температуры спекания предназначена для выравнивания напряжений в объеме спекаемых изделий.

Таким образом, на примере формования изделий из карбида кремния, можно сделать вывод что предложенный алгоритм подбора связующих может быть использован при разработке технологического процесса изготовления бронезLEMENTОВ.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.5 Выводы по разделу 3

Не смотря на широкую номенклатуру связующих, принципы работы с ними едины для большинства из них. Известно, что для металлических порошков широко применяемым составом связующего является система на основе полиформальдегида (или полиацетала), ПЭВД и стеариновой кислоты. Для керамических порошков на основе оксидной керамики более распространены системы на основе парафина, латекса и гелевых связующих. Для безкислородной керамики – реактопласты и т.д. Основным различием составов связующих для металлов и керамики являются дополнительные присадки для уплотнения фидстока. В частности, у металлов среди присадок преобладают оксиды железа, требуемые для изготовления чугунных заготовок. Для керамических порошков такими присадками являются оксиды или стеараты магния.

Анализ имеющейся информации, а также зависимости свойств полимерных связующих и их влиянии друг на друга позволили построить алгоритм, предполагающий подбор связующего для *MIM* и *SIM* процессов. В основе алгоритма лежат выборы условий, соответствующих требованиям к связующим. На основании заданных условий (требований), путём подбора исходного материала порошкового наполнителя осуществляется рациональный выбор связующего.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Заключение

Не смотря на высокую актуальность *PIM* технологии в современном машиностроении, в РФ отсутствуют систематические исследования в этой области на данный момент, так как на Российском рынке данная технология начала свое развитие совсем недавно.

Выбор связующего и способ его удаления критически важны для успешного *PIM* производства, но точные составы связующих и методы их изготовления в значительной степени являются секретами патентов.

Исследование связующих, способов их удаления и влияния их на расплав в процессе формования деталей потребовало предварительного рассмотрения некоторых общих вопросов, связанных с особенностями структуры и свойств термопластов и реактопластов. При изучении существующих рецептур фидстоков можно сформулировать несколько принципов. Многокомпонентные связующие вещества имеют преимущества: они позволяют использовать прогрессивный цикл извлечения. Связующее вещество должно смачивать порошок и обеспечивать низкую вязкость при высокой загрузке порошка. Следовательно, основной для связующего вещества обычно являются полимеры или воски с низкой молекулярной массой. Молекулы с малой длиной цепи проще смешивать и извлекать при удалении связующего вещества. Связующее необходимо подбирать с учетом того, что оно не должно вступать в реакцию с порошком. С целью регулирования смачивания и вязкости широко применяются присадки к связующему веществу. Помимо первичных требований к выбору связующего вещества существуют и вторичные, такие как токсичность, срок хранения, прочность, смачивающая способность, биостойкость и возможность неоднократной переработки без потери свойств. Хотя это и широкая область исследований, экспериментальные результаты показывают, что принципы едины для многих систем связующих веществ.

Наиболее перспективным для изготовления деталей из малолегированной стали представляется фидсток фирмы *BASF*, который состоит из смеси порошка

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

карбонильного железа со средним размером частиц около 5 мкм и порошка никеля со средним размером частиц 8 мкм с содержанием смеси порошков 58 % от объема всей смеси, а также связующего вещества состава: 90 % полиформальдегид, 10 % полиэтилен. Данный фидсток имеет плотность 4,52 г/см³, температуру формования 180 °С, вязкость 190 Па·с при этой температуре, прочность после изготовления 20 МПа. Связующее на основе полиацетала обеспечивает прочность зеленой и коричневой заготовки и удаляется при дальнейшей обработке.

В этих условиях наиболее простым и актуальным является направление по созданию отечественных гранулятов – аналогов фидстоков фирмы *BASF* с последующим применением их в отлаженной *MIM* технологии, работающей на фидстоках фирмы *BASF*.

Использование отечественного сырья позволит существенно снизить себестоимость производимой продукции при условии сохранения ее потребительских свойств и дать возможность расширения *PIM* технологии на отечественных предприятиях.

Анализ информации, полученной в результате патентного поиска по вопросу подбора связующих, показал, что наилучших технологических свойств для заготовок из металлических порошков с помощью *PIM* технологии можно достичь с использованием термопластов, а для безоксидной керамики с использованием термореактопластов. В том числе, кроме сведений об используемых рецептурах было выяснено что системы связующих веществ могут иметь противоречивые свойства, использование которых может как ухудшать, так и улучшать технический процесс формования изделий. Примером использования подобных противоречивых свойств описывается в патенте [42]. Активный углеродный остаток при использовании термореактопластов для фидстоков на основе металлических порошков оказывает влияние на состав и, как следствие, на структуру металлического наполнителя, ухудшая технологические свойства. Однако, благодаря взаимодействию углеродного остатка с металлами оказывается возможным изготавливать чугунные и толстостенные изделия с помощью *MIM* технологии.

В связи с этим, с целью систематизации имеющейся информации был построен алгоритм при разработке технологического процесса подбора и удаления связующего. Практическое использование разработанного алгоритма может быть связано с разработкой программного обеспечения, направленного на упрощение и оптимизацию технического процесса проектирования деталей.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

Список использованных источников

1. **3D/PIM технология** [Электронный ресурс] // Общество с ограниченной ответственностью «Куранты»: [сайт]. – URL: http://www.kuranty.pro/3D_PIM-tehnologiya/obzor/ (дата обращения: 24.03.2019).
2. **Дежина, И.Г. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии»** [Текст]: доклад / И.Г. Дежина [и др.]. – М.: Сколковский Институт Науки и Технологий, 2015. – 210 с.
3. **Получение элементов микроэлектроники методом порошковых литьевых технологий** [Электронный ресурс] // Библиотека Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета: [сайт]. – URL: <http://library.eltech.ru/files/vkr/2017/bakalavri/3206/2017%D0%92%D0%9A%D0%A0320618%D0%9B%D0%95%D0%A3%D0%A5%D0%98%D0%9D.pdf> (дата обращения: 24.03.2019).
4. **История и причины создания композиционных материалов** [Электронный ресурс] // Полимерные композиционные материалы (полимерные композиты, ПКМ): [сайт]. – URL: <http://p-km.ru/vvedenie-v-pkm/istoriya-i-prichiny-sozdaniya-kompozicionnykh-materialov.html> (дата обращения: 24.03.2019).
5. **Шевченко, В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов** [Текст]: учеб. пособие / В. Г. Шевченко. – М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2010. – 99 с.
6. **Dos Santos, M.A. Plasma debinding and pre-sintering of injected parts** [Текст] / M. A. Dos Santos, [et al.] // *Material Research*. – New York: SciELO, 2004. – Vol.7. – №3. – P. 505–511.
7. **Ahn, S. Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process** [Текст] / S. Ahn, [et al.] // *Powder Technology*. – California: Elsevier, 2009. – Vol.193. – №3. – P.162-169.

8. **Chan, T.Y. Effects of stearic acid on the injection molding of alumina** [Текст] / T.Y. Chan, S.L. Lin // *Journal of the American Ceramic Society*. – California: Wiley-Blackwell, 1995. – Vol.78. – №10. – P.2746-2752.

9. **Крыжановский, В.К. Производство изделий из полимерных материалов** [Текст]: учеб. пособие / В.К. Крыжановский [и др.]. – СПб.: Профессия, 2004. – 654 с.

10. **Литьё под давлением** [Электронный ресурс] // Общество с ограниченной ответственностью «СПбПласт»: [сайт]. – URL: <https://spbplast.ru/info.html?start=27> (дата обращения: 26.03.2019).

11. **Методы экструзии пленок** [Электронный ресурс] // Аналитический портал химической промышленности «Новые химические технологии»: [сайт]. – URL: http://www.newchemistry.ru/process_info.php?pr_id=2&pr_parent=1 (дата обращения: 26.03.2019).

12. **«MIM технология» Инжекционное формование сложных деталей** [Электронный ресурс] // Группа компаний «Калашников» [сайт]. – URL: <https://api.kalashnikovgroup.ru/upload/iblock/8c4/8c40cf8daf045c14bd7d7cf52deb650a.pdf> (дата обращения: 26.03.2019).

13. **Kankawa, Y. Effects of polymer decomposition behavior on thermal debinding process in metal injection molding** [Текст] / Y. Kankawa // *Materials and Manufacturing Processes*. – New York: Taylor & Francis, 1997. – Vol.12. – №4. – P.681-690.

14. **Boljanovic, V. Powder metallurgy. In Metal Shaping Processes: Casting and Molding, Particulate Processing, Deformation Processes, Metal Removal** [Текст] / V. Boljanovic. – New York: Industrial Press Inc., 2009. – 428 с.

15. **Quinard, C. Development and property identification of 316L stainless steel feedstock for PIM and MIM** [Текст] / C. Quinard, T. Barriere, J.C. Gelin // *Powder Technology*. – California: Elsevier, 2009. – Vol.190. – №1-2. – P.123-128.

16. **Krug, S. Differential sintering in ceramic injection moulding: particle orientation effects** [Текст] / S. Krug, J.R.G. Evans, J.H.H ter Maat // *Journal of the European Ceramic Society*. – California: Elsevier, 2002. – Vol.22. – №2. – P.173-181.

17. **Slabe, J.M. Conference proceedings: ICIT & MPT 2011, 8th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies, Ljubljana, Slovenia, October 2nd - 5th 2011** [Текст]: в сборнике докладов конференции / J.M. Slabe. – Ljubljana: TECOS, Slovenian Tool and Die Development Centre, 2011. – 58 с.

18. **Auzene, D. Investigation into water soluble binder systems for powder injection moulding** [Текст] / D. Auzene, S. Roberjot // *Powder Injection Moulding International*. – Paris: Inovar Communications Ltd, 2011. – Vol.5. – №1. – P.54-57.

19. **Clemens, F. Thermoplastic extrusion for ceramic bodies. In Extrusion in Ceramics-Engineering Materials and Processes** [Текст]: учебник для вузов / F. Clemens. – Berlin: SpringerVerlag, 2007. – 311 с.

20. **Kang, L. Ceramic Membranes for Separation and Reaction** [Текст]: научное пособие / L. Kang. – London: John Wiley and Sons, 2007. – 306 с.

21. **Lame, O. In situ microtomography investigation of metal powder compacts during sintering** [Текст] / O. Lame [et al.] // *Nuclear 68 Instruments and Methods in Physics Research*. – California: Elsevier, 2003. – Vol.200. – P.287-294.

22. **Инжекционное формование** [Электронный ресурс] // Электронная библиотека «Моя библиотека» [сайт]. – URL: <https://mybiblioteka.su/11-116113.html> (дата обращения: 26.03.2019).

23. **Нарва, В.К. Функциональные порошковые наноматериалы** [Текст]: учеб. пособие / В.К. Нарва, В.С. Панов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010. – 148 с.

24. **Попов, К.Н. Полимерные и полимерцементные бетоны, растворы и мастики** [Текст]: учеб. пособие / К.Н. Попов. – М.: Высшая Школа, 1987. – 72 с.

25. Пархоменко, А.В. Развитие связующих веществ в гранулятах для МИМ-технологии [Текст] / А.В. Пархоменко [и др.] // Вестник Самарского Государственного технического университета: технические науки. – Самара: на базе СГТУ, 2013. – № 2. – С. 91–98.

26. *Two-stage fast debinding of injection molding powder compacts* [Текст]: Pat. 5,028,367 USA: МПК C 04 B 33/32 / Tai-Shing Wei, Randall M.; заявители и патентообладатели Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y. – заявл. 08.12.89; опубл. 02.07.91. – 9 с.

27. *Composition for injection moulding* [Текст]: Pat. 5,030,667 USA: МПК C08K5/55 / Masakazu Achikita [et al.]; заявители и патентообладатели Sumitomo Metal Mining Company Limited, Tokyo, Japan – заявл. 18.10.89; опубл. 09.07.91. – 7 с.

28. *Starting material for injection molding of metal powder* [Текст]: Pat. 5,006,164 USA: МПК B22F1/00 / Yoshisato Kiyota; заявители и патентообладатели Kawasaki Steel Corporation, Japan – заявл. 26.02.90; опубл. 09.04.91. – 10 с.

29. *Powder injection molding binder, powder injection molding composition and method for production of sintered member* [Текст]: Pat. 5,744,532 USA: МПК C08K3/08, C08K3/10, C08L31/00 / Yoshimitsu Kankawa, Toshiki Nikaya; заявители и патентообладатели Nippon Shokubai Co. Ltd, Osaka-fu, Japan – заявл. 20.04.95; опубл. 28.04.98. – 9 с.

30. *Metal powder injection molding material and metal powder injection molding method* [Текст]: Pat. 2006/0099103A1 USA: МПК C 22 C 1/05 / Hans Wohlfromm [et al.]; заявители и патентообладатели BASF Aktiengesellschaft – заявл. 21.10.03; опубл. 11.05.06. – 5 с.

31. Берлин, А.А. Полиоксиметилены [Текст]: учеб. пособие / А.А. Берлин. – М.: Наука, 2008. – 286 с.

32. *Process for the production of an inorganic sintered body* / [Текст]: Pat. 0413231A3 DE: МПК C04B35/00 / Johan Herman Hendrik Ter Maat, Wilhelm Dr.

Schuetz, Hans-Josef Dr. Sterzel; заявители и патентообладатели *BASF Aktiengesellschaft* – заявл. 07.08.90; опубл. 20.02.91. – 2 с.

33. ***Inorganic sintered mouldings*** [Текст]: Pat. 3926869A1 DE: МПК B22 F3/1025 / *Johan Herman Hendrik Ter Maat, Wilhelm Dr. Schuetz, Hans-Josef Dr. Sterzel*; заявители и патентообладатели *BASF Aktiengesellschaft* – заявл. 16.08.89; опубл. 21.02.91. – 5 с.

34. ***Process for producing preforms from ceramic or metallic fibers*** [Текст]: Pat. 0424739B1 DE: МПК B22F1/00, B22F3/22, C04B35/00, C22C1/09 / *T. Maat [et al.]*; заявители и патентообладатели *BASF Aktiengesellschaft, Carl-Bosch-Strasse 38, D-67063 Ludwigshafen (DE)* – заявл. 24.10.89; опубл. 02.05.91. – 5 с.

35. ***Thermoplastic masses for preparing metallic mouldings*** [Текст]: Pat. 0465940B1 DE: МПК C08L59/00, C08K3/08, B22F3/22, B22F1/00 / *Johan Dr. Ebenhoech [et al.]*; заявители и патентообладатели *BASF Aktiengesellschaft, Carl-Bosch-Strasse 38, D-67063 Ludwigshafen (DE)* – заявл. 15.01.92; опубл. 17.05.95. – 9 с.

36. ***Thermoplastic materials for the production of ceramic moldings*** Pat. 5,145,900 USA: МПК C08K3/38, C08K3/10, C08K3/28, C08K3/18 / *Hans-Josef Sterzel [et al.]*; заявители и патентообладатели *BASF Aktiengesellschaft* – заявл. 01.17.92; опубл. 08.09.92. – 9 с.

37. ***Process for production of sintered body*** [Текст]: Pat. 0503966A3 JP: МПК B22F3/22 / *Yoshihiko Seyama, Tsutomu Iikawa*; заявители и патентообладатели *Fujitsu Limited 1015, Kamikodanaka Nakahara-ku Kawasaki-shi Kanagawa 211* – заявл. 13.03.92; опубл. 16.09.92. – 9 с.

38. ***Producing sintered articles from thermoplastic compositions containing polyoxymethylene binder*** [Текст]: Pat. 5,695,697 USA: МПК C01B31/00 / *Peter Trubenbach, Graham Edmund McKee, Hans Wohlfromm*; заявители и патентообладатели *BASF Aktiengesellschaft* – заявл. 07.11.94; опубл. 09.12.97. – 6 с.

39. ***Metal powder injection moldable composition, and injection molding and sintering method using such composition*** [Текст]: Pat. 6,051,184 USA: МПК

B22F3/12 / *Yoshimitsu Kankawa*; заявители и патентообладатели *Mold Research Co., Ltd., Otsu, Japan* – заявл. 15.10.98; опубл. 18.04.00. – 7 с.

40. **Binding agent for inorganic material powders for producing metallic and ceramic moulded bodies** [Текст]: *Pat. 6,939,488B2 USA*: МПК B29B9/10, B29B9/06 / *Martin Blomacher [et al.]*; заявители и патентообладатели *BASF Aktiengesellschaft* – заявл. 19.04.01; опубл. 06.09.05. – 5 с.

41. **Литье порошковых смесей** [Электронный ресурс] // Портал индустрии пластмасс «Пластикс»: [сайт]. URL: <https://www/plastics.ru/pdf/journal/2013/06/Pogodina.pdf> (дата обращения: 24.03.2019).

42. **Металлополимерная композиция для изготовления чугунных заготовок** [Текст]: пат. 2310542С1 Рос. Федерация: МПК C08L61/10, C08K3/08 / В.А. Довыденков; заявители и патентообладатели Общество с ограниченной ответственностью «Наномет», В.А. Довыденков. – № 2007100646/04; заявл. 09.01.07; опубл. 27.08.08, Бюл. № 24. – 6 с.

43. **Пархоменко, А.В. Развитие связующих веществ в гранулятах для МИМ-технологии** [Текст] / А.В. Пархоменко [и др.] // Вестник Самарского Государственного технического университета: технические науки. – Самара: на базе СГТУ, – 2013. – № 4. – С. 8-13.

44. **Пархоменко, А.В. Зависимость свойств стальных заготовок от содержания связующих веществ в МИМ-грануляте** [Текст] / А.В. Пархоменко [и др.] // Новое слово в науке и практике: Гипотезы и апробация результатов исследований. – Самара: Центр развития научного сотрудничества, 2016. – № 23. – С. 66-72.

45. **Грабой, И.Э. Материалы Catamold компании BASF для литья под давлением** [Текст] / И.Э. Грабой, А. Thom // Сборник трудов научно-практического семинара «Новые материалы и изделия из металлических порошков. Технология. Производство. Применение». – 2005. – С. 71-74.

46. **Huang, B. The rheology of metal injection molding** [Текст] / B. Huang, S. Liang, X. Qu // *Journal of Materials Processing Technology*. – California: Elsevier, 2003. – Vol. 137 – P. 132–137.

47. **Пархоменко, А.В. Характеристики МИМ-гранулята на основе порошка карбонильного железа марки НМ и полиформальдегида** [Текст] / А.В. Пархоменко [и др.] // *Интеллектуальный потенциал XXI века: Ступени познания*. – Самара: Аэтерна, 2016. – № 32. – С. 89-93.

48. **Randal, M. Injection molding of metals and ceramics** [Текст]: учебное пособие / M. Randal, A. Bose. – Princeton: Metal Powder Industry, 1997. – 414 с.

49. **Самборук, А.Р. Исследование импортного гранулята Catamold 42CrMo4 для МИМ-технологий** [Текст] / А.Р. Самборук [и др.] // *Вестник Самарского Государственного технического университета: технические науки*. – Самара: на базе СГТУ, 2014. – № 4. – С. 93-98.

50. **Муранов, А.Н. Исследование свободной усадки основных типов полимерно-порошковых смесей, применяемых для изготовления деталей из порошковых аналогов стали 38ХМА (42CrMo4) МИМ-методом** [Текст] / А.Н. Муранов [и др.] // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – Москва, Институт прикладной механики Российской Академии наук, 2019. – Том 25. – № 1. – С. 76-86.

51. **Семенов, А.Б. Разработка методики математического моделирования процесса литья под давлением полимеров, наполненных металлическими порошками** [Текст] / А.Б. Семенов [и др.] // *Технология металлов*. – Москва, ООО «Наука и технологии», 2019. – № 1. – С. 9-16.

52. **Liu, W. Fabrication of injection moulded translucent alumina ceramics via pressureless sintering** [Текст] / W. Liu [et al.] // *Advances in Applied Ceramics*. – New York: Taylor & Francis, 2011. – Vol 4. – P. 251–254.

53. **Schaffer, G.B. Liquid Phase Sintering of Aluminum Alloys** [Текст] / G.B. Schaffer, T.B. Sercombe, R.N. Lumley // *Materials Chemistry and Physics*. – California: Elsevier, 2001. – Vol 67. – P. 85–91.

					ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

54. **Hwangw, K.S. Injection-Molded Alumina Prepared with Mg-Containing Binders** [Текст] / K.S. Hwangw, C.C. Hsieh // *Journal of the American Ceramic Society*. – California: Elsevier, 2005. – Vol 88. – №9. – P. 2349–2353.

55. **Fanelli, An.J. New Aqueous Injection Molding Process for Ceramic Powders** [Текст] / An. J. Fanelli [et al.] // *Journal of the American Ceramic Society*. – California: Elsevier, 1989. – Vol 72. – №10. – P. 1833–1836.

56. **Chu, K. The thermal conductivity of pressure infiltrated SiC/Al composites with various size distributions: Experimental study and modeling** [Текст] / K. Chu [et al.] // *Materials and Design*. – California: Elsevier, 2009. – Vol 30. – P. 3497–3503.

57. **XinBo, He Net-shape forming of composite packages with high thermal conductivity** [Текст] / He XinBo [et al.] // *Science in China Series E: Technological Sciences*. – Taiwan: Chinese Academy of Sciences, 2009. – Vol 52. – №1. – P. 238-242.

58. **Ивженко, В.В. Исследование упругого последействия при инжекционном литье термопластичных масс на основе порошков SiC, AlN, WC и его влияния на механические свойства материала заготовок изделий** [Текст] / В.В. Ивженко [и др.] // *Сверхтвердые материалы*. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля, 2009. – № 1. – С. 49-57.

59. **Майстренко, А.Л. Формирование высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния** [Текст] / А.Л. Майстренко, В.Г. Кулич, В.Н. Ткач // *Сверхтвердые материалы*. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля, 2009. – № 1. – С. 18-35.

60. **Rozenberg, O. Peculiarities of manufacturing and properties of high-density silicon carbide – based armored ceramics** [Текст] / O. Rozenberg [et al.] // *Proc. 5th Int. Armament Conf.* – Waplevo: Academy of Sciences, 2004. – P. 11-20.

Приложение А

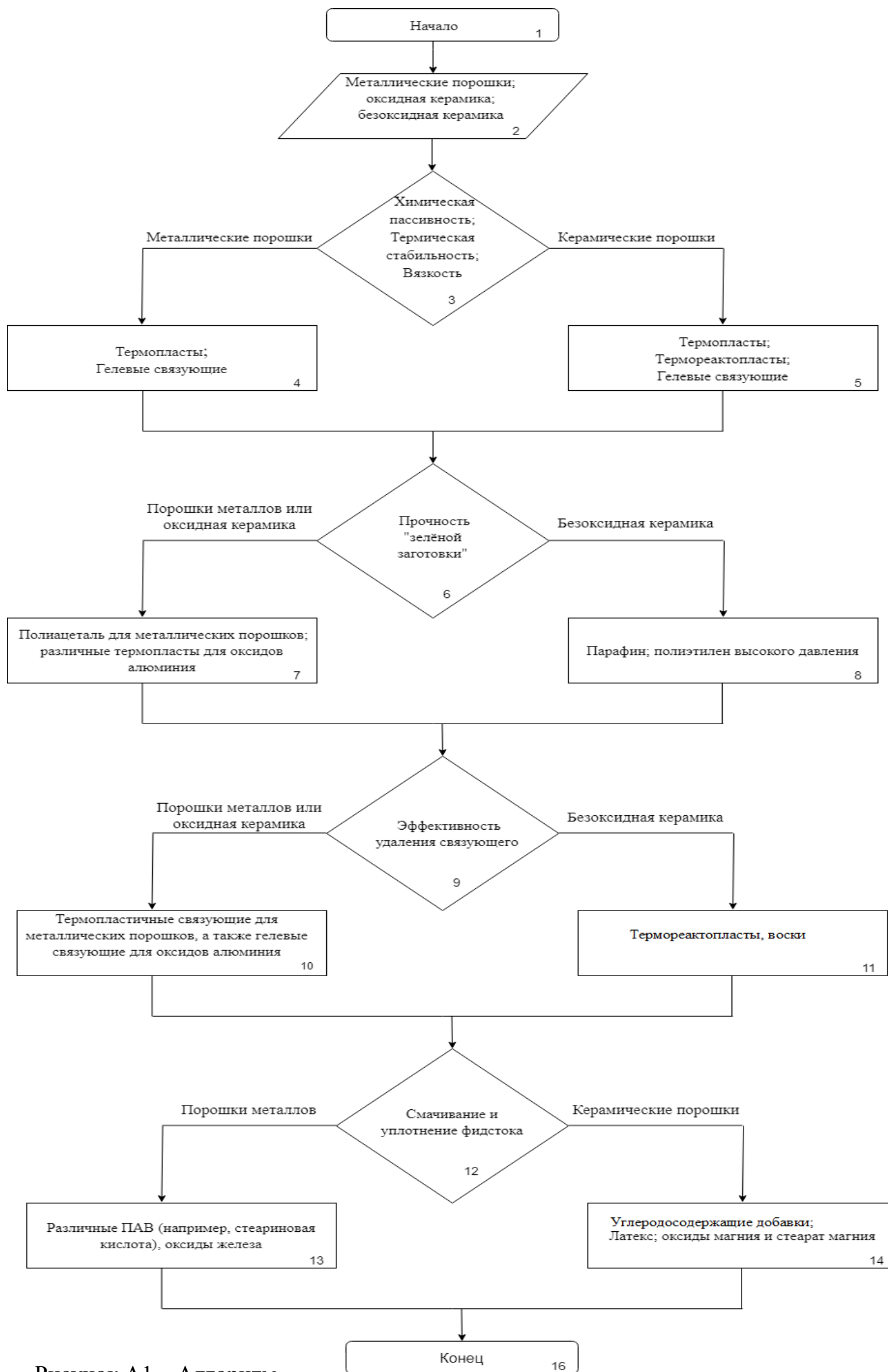


Рисунок А1 – Алгоритм

Приложение Б

					<i>ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						75
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		



ФГБОУ ВО ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет машиностроения и транспорта
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Разработка РИМ-технологии для изготовления деталей
приборо- и машиностроения

Выполнил: студент гр. 15МТ1

Некрасов К.О.

Руководитель: к.т.н., доцент

Прыщак А.В.

Пенза, 2019

Рисунок Б1 – Слайд 1

Объект исследования – РИМ технология для изготовления деталей приборо- и машиностроения.

Предмет исследования – взаимосвязь свойств полимерного связующего в композициях «связующее-наполнитель».

Цель работы – разработка алгоритма подбора связующего для обеспечения высоких технологических свойств, а также геометрической точности изделий.

Задачи работы:

- ✓ выявить и систематизировать ключевые особенности технологических операций РИМ производства;
- ✓ рассмотреть преимущества и недостатки РИМ технологии; сделать вывод о перспективности технологии;
- ✓ проанализировать влияние составов связующих на свойства исходного сырья для РИМ технологии;
- ✓ на основании полученных данных, разработать алгоритм подбора связующего в условиях обеспечения высоких технологических свойств, а также геометрической точности изделий.

2

Рисунок Б2 – Слайд 2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ

Лист

76

Преимущества РІМ технологии

- а) возможность снятия практически всех ограничений по сложности формы изготавливаемого изделия;
- б) высокий коэффициент использования материала – от 97 до 99,5 %;
- в) возможность получать изделия с минимальной толщиной сечения стенки до 0,5 мм;
- г) возможность получения изделий с высокой геометрической точностью;
- д) высокая производительность процесса и возможность полной автоматизации и роботизации производства.

3

Рисунок Б3 – Слайд 3

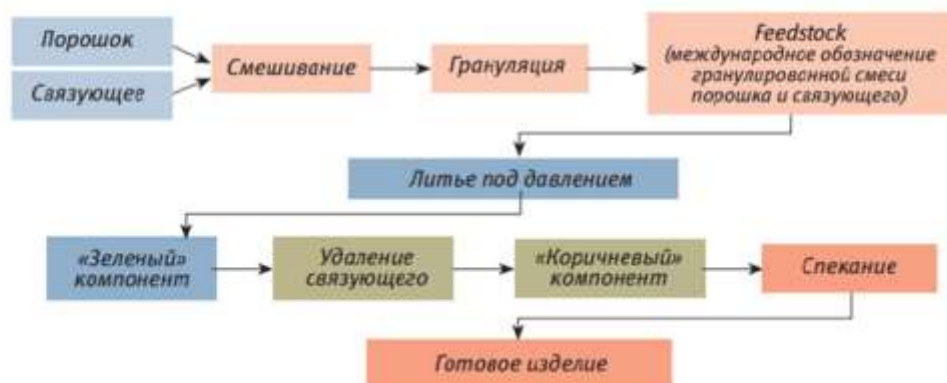


Рисунок 1 – Схема основных этапов РІМ технологии

4

Рисунок Б4 – Слайд 4

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ

Лист

77

Таблица 1 - Сравнение характеристик металлических изделий, изготавливаемых по PIM технологии с аналогами

Характеристика	Инжекционное литье порошковых композиций (MIM)	Порошковая металлургия (Powder metallurgy)	Литье под давлением (Die casting)	Литье по выплавляемым моделям (Investment casting)	Механическая обработка (Machining)
Сложность формы	Высокая	Низкая	Высокая	Удовл.	Высокая
Толщина стенки (мм)	0,5 – 10	1 – 20	0,8	2 – 20	0,5 – 100
Качество поверхности, Ra (мкм)	1 – 2	2 – 5	5	5	0,2 – 4
Прочность (%)	Высокая (> 96)	Удовл. (70)	Низкая	Удовл. (> 95)	Высокая (100)
Плотность (%)	95 - 100	<95	99-100	99-100	99-100
Вес (г)	0.01 – 200	5 – 2500		1 – 1000	1 – 10000
Минимальный допуск (%)	0.3 – 0.5	0.1		0.5 – 1.0	< 0.1
Разнообразие материалов	Большое	Среднее	Небольшое	Среднее	Большое
Производительность	Высокая	Высокая	Высокая	Удовл.	Низкая
Себестоимость	Средняя	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая

5

Рисунок Б5 – Слайд 5

Таблица 2 – Области применения изделий, изготовленных с применением PIM технологии

Отрасль	Изделие
Точное машиностроение, приборостроение, авиакосмостроение:	- элементы режущего инструмента, зубчатые колеса, рабочие колеса насосов, прижимные лапки швейных машин, корпуса и детали часов (MIM); - керамические сопла для струйной очистки и гидроабразивной резки; фильтры, керамические подшипники скольжения (CIM).
Вооружение и военная техника:	- элементы безопасности, спусковые механизмы, ударники и мощные внутренние детали стрелкового оружия
Медицина:	- ортодонтические брекеты, хирургический инструмент, имплантаты, эндодонтические наконечники, инструмент для биопсии (MIM);

6

Рисунок Б6 – Слайд 6

Таблица 2 – Области применения изделий, изготовленных с применением РІМ технологии

Отрасль	Изделие
Точное машиностроение, приборостроение, авиаракетостроение:	- элементы режущего инструмента, зубчатые колёса, рабочие колеса насосов, прижимные лапки швейных машин, корпуса и детали часов (МІМ); - керамические сопла для струйной очистки и гидроабразивной резки; фильтры, керамические подшипники скольжения (СІМ).
Вооружение и военная техника:	- элементы безопасности, спусковые механизмы, ударники и мощные внутренние детали стрелкового оружия
Медицина:	- ортодонтические брекеты, хирургический инструмент, имплантаты, эндодонтические наконечники, инструмент для биопсии (МІМ);

6

Рисунок Б7 – Слайд 7

Требования к связующему

- а) Химическая пассивность при высоких температурах, термическая стабильность и достаточная вязкость;
- б) прочность «зелёной заготовки»;
- в) обеспечение высокой технологичности процедуры дебайдинга;
- г) высокая смачиваемость;
- д) уплотнение порошка.

8

Рисунок Б8 – Слайд 8

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ

Лист

79

Таблица 3 – Известные рецептуры связующих в РИМ технологии

Составы связующих	
Термопластичные связующие:	
-	72% полиэтиленгликоль + 24% полиэтилен + 4% трикрезил фосфат;
-	58% полистирол + 29% минеральное масло + 12% стеариновая кислота;
-	65% полиэтиленгликоль + 35% ацетобутират целлюлозы;
-	79% парафин + 10% этил(винил)ацетат + 10% полиэтилен высокого давления + 1% стеариновая кислота.
Термореактопласты:	
-	65% эпоксидная смола + 25% парафин + 10% бутилстеарат;
-	62% поликарбосилан + 20% парафин + 16% бензохинон + 12% олеиновая кислота.
Гелеобразные связующие:	
-	98,4 % вода + 1,2 % агар + 0,4 % диспергатор Darvan;
-	56,5 % вода + 25% метилцеллюлоза + 12,5% глицерин + 6% борная кислота.

9

Рисунок Б9 – Слайд 9



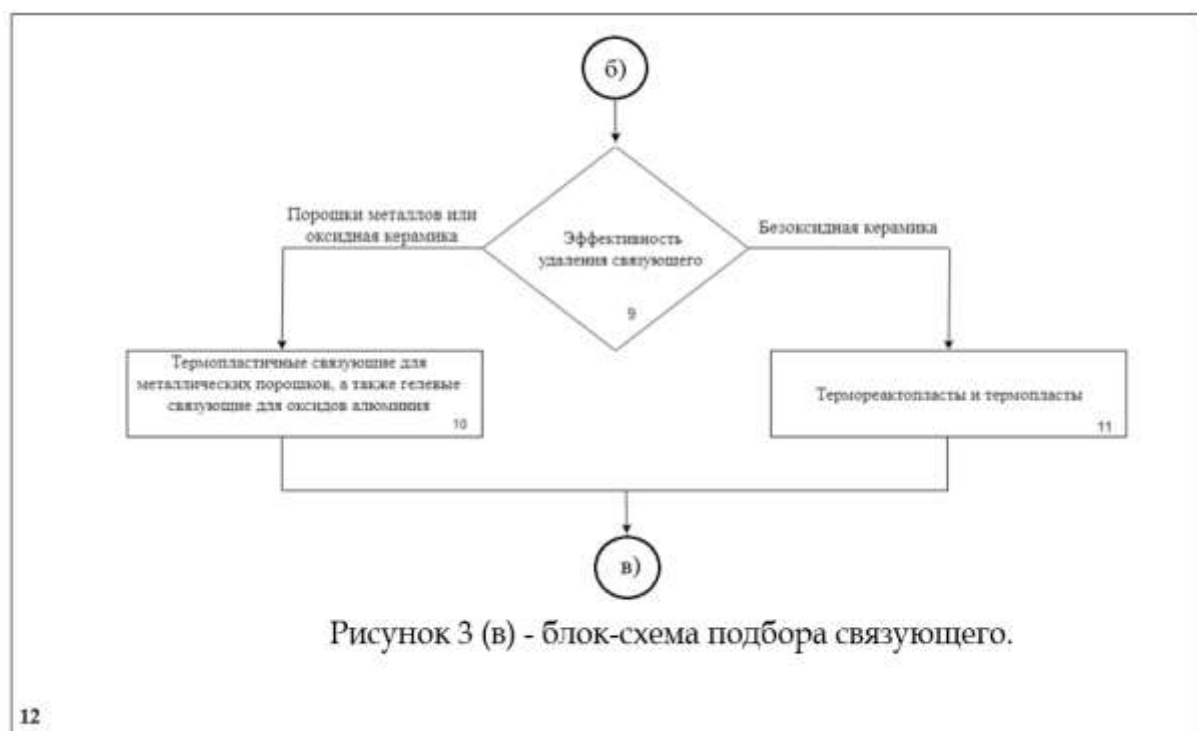
10

Рисунок Б10 – Слайд 10



11

Рисунок Б11 – Слайд 11



12

Рисунок Б12 – Слайд 12

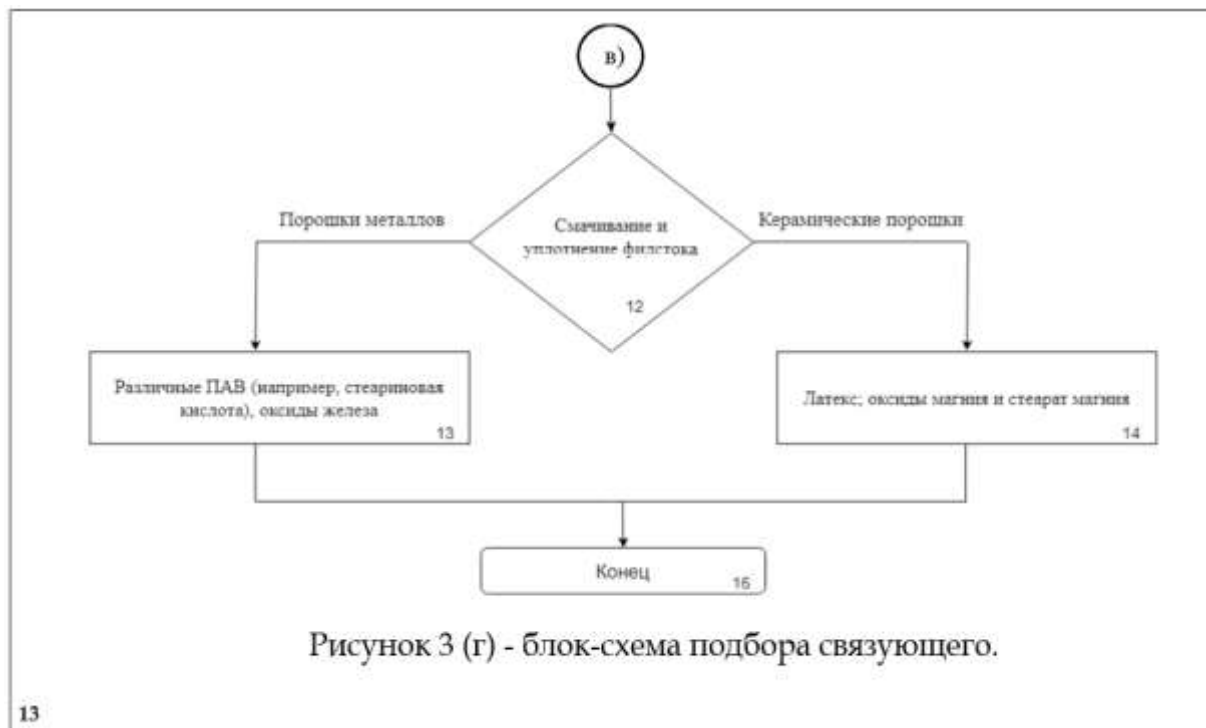


Рисунок Б13 – Слайд 13

Основные выводы по работе

- ✓ Выявлены ключевые особенности технологических операций РІМ производства.
- ✓ Были рассмотрены преимущества и недостатки технологии, в том числе в сравнении с аналогами технологий изготовления деталей. На основании этой информации, был сделан вывод о перспективности развития технологии.
- ✓ Исходя из главных технологических недостатков, было определено что основным фактором, влияющим на успешность проведения технологии, является связующее вещество в составе сырья для РІМ технологии. В связи с этим, был проведён анализ научной литературы, в том числе патентных исследований, с целью исследования влияния связующих веществ на технологические свойства и геометрическую точность изделий.
- ✓ На основании полученных данных, была проведена классификация свойств различных рецептур связующих веществ, а также был построен алгоритм подбора связующего.

Рисунок Б14 – Слайд 14

Преимущества PIM технологии

- а) возможность снятия практически всех ограничений по сложности формы изготавливаемого изделия;
- б) высокий коэффициент использования материала – от 97 до 99,4 %;
- в) возможность получать изделия с минимальной толщиной сечения стенки до 0,5 мм;
- г) возможность получения изделий с высокой геометрической точностью;
- д) высокая производительность процесса и возможность полной автоматизации и роботизации производства.

3

Рисунок Б3 – Слайд 3

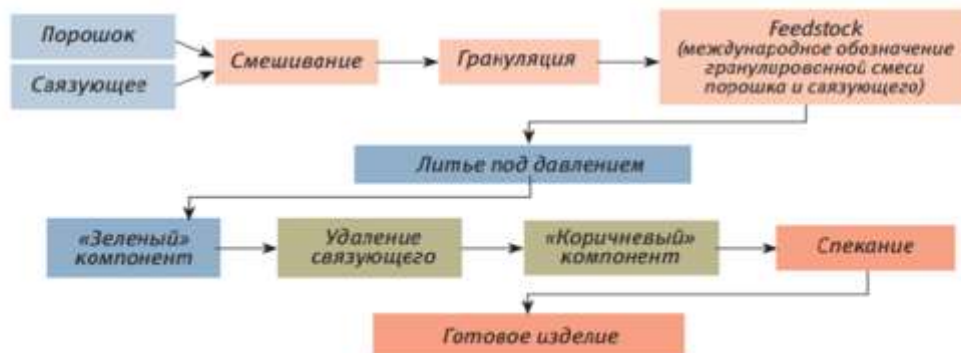


Рисунок 1 – Схема основных этапов PIM технологии

4

Рисунок Б4 – Слайд 4

Таблица 1 - Сравнение характеристик металлических изделий, изготавливаемых по PIM технологии с аналогами

Характеристика	Инжекционное литье порошковых композиций (MIM)	Порошковая металлургия (Powder metallurgy)	Литье под давлением (Die casting)	Литье по выплавляемым моделям (Investment casting)	Механическая обработка (Machining)
Сложность формы	Высокая	Низкая	Высокая	Удовл.	Высокая
Толщина стенки (мм)	0,5 – 10	1 – 20	0,8	2 – 20	0,5 – 100
Качество поверхности, Ra (мкм)	1 – 2	2 – 5	5	5	0,2 – 4
Прочность (%)	Высокая (> 96)	Удовл. (70)	Низкая	Удовл. (> 95)	Высокая (100)
Плотность (%)	95 - 100	<95	99-100	99-100	99-100
Вес (г)	0,01 – 200	5 – 2500		1 – 1000	1 – 10000
Минимальный допуск (%)	0,3 – 0,5	0,1		0,5 – 1,0	< 0,1
Разнообразие материалов	Большое	Среднее	Небольшое	Среднее	Большое
Производительность	Высокая	Высокая	Высокая	Удовл.	Низкая
Себестоимость	Средняя	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая

5

Рисунок Б5 – Слайд 5

Таблица 2 – Области применения изделий, изготовленных с применением PIM технологии

Отрасль	Изделие
Точное машиностроение, приборостроение, авиакосмостроение:	- элементы режущего инструмента, зубчатые колеса, рабочие колеса насосов, прижимные лапки швейных машин, корпуса и детали часов (MIM); - керамические сопла для струйной очистки и гидроабразивной резки; фильеры, керамические подшипники скольжения (CIM).
Вооружение и военная техника:	- элементы безопасности, спусковые механизмы, ударники и мощные внутренние детали стрелкового оружия
Медицина:	- ортодонтические брекетты, хирургический инструмент, имплантаты, эндодонтические наконечники, инструмент для биопсии (MIM);

6

Рисунок Б6 – Слайд 6

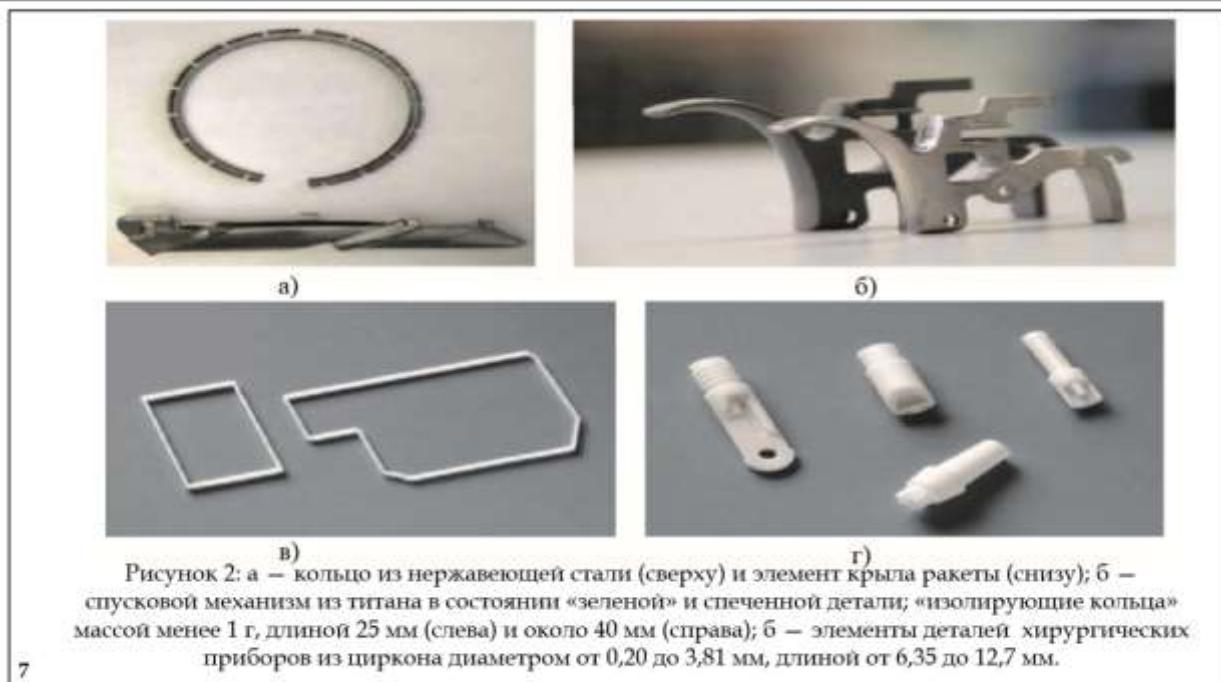


Рисунок Б7 – Слайд 7

Требования к связующему

- а) Химическая пассивность при высоких температурах, термическая стабильность и достаточная вязкость;
- б) прочность «зелёной заготовки»;
- в) обеспечение высокой технологичности процедуры дебайдинга;
- г) высокая смачиваемость;
- д) уплотнение порошка.

Рисунок Б8 – Слайд 8

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ ВКР.22.03.01.14МТ115.ПЗ

Лист

86

Таблица 3 – Известные рецепты связующих в РИМ технологии

Составы связующих
<p>Термопластичные связующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 72% полиэтиленгликоль + 24% полиэтилен + 4% трикрезил фосфат; - 58% полистирол + 29% минеральное масло + 12% стеариновая кислота; - 65% полиэтиленгликоль + 35% ацетобутират целлюлозы; - 79% парафин + 10% этил(винил)ацетат + 10% полиэтилен высокого давления + 1% стеариновая кислота.
<p>Термореактопласты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 65% эпоксидная смола + 25% парафин + 10% бутилстеарат; - 62% поликарбосилан + 20% парафин + 16% бензохинон + 12% олеиновая кислота.
<p>Гелеобразные связующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 98,4 % вода + 1,2 % агар + 0,4 % диспергатор Darvan; - 56,5 % вода + 25% метилцеллюлоза + 12,5% глицерин + 6% борная кислота.

9

Рисунок Б9 – Слайд 9



10

Рисунок Б10 – Слайд 10



Рисунок Б11 – Слайд 11



Рисунок Б12 – Слайд 12



Рисунок Б13 – Слайд 13

Основные выводы по работе

- ✓ Выявлены ключевые особенности технологических операций РИМ производства.
- ✓ Были рассмотрены преимущества и недостатки технологии, в том числе в сравнении с аналогами технологий изготовления деталей. На основании этой информации, был сделан вывод о перспективности развития технологии.
- ✓ Исходя из главных технологических недостатков, было определено что основным фактором, влияющим на успешность проведения технологии, является связующее вещество в составе сырья для РИМ технологии. В связи с этим, был проведён анализ научной литературы, в том числе патентных исследований, с целью исследования влияния связующих веществ на технологические свойства и геометрическую точность изделий.
- ✓ На основании полученных данных, была проведена классификация свойств различных рецептур связующих веществ, а также был построен алгоритм подбора связующего.

Разработчик	Михайлов К.О.	Инф. с. 01/15/16
Руководитель	Кузнецов А.В.	стр. 13/127

Рисунок Б14 – Слайд 14