

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»  
(Самарский университет)

Институт двигателей и энергетических установок

Кафедра технологий производства двигателей

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«Технико-экономическое обоснование и разработка прогнозных моделей  
управления качеством поверхностного слоя деталей с использованием  
технологии ММР»

по направлению подготовки 24.04.05 D Двигатели летальных аппаратов  
профиль «Управление и бизнес в машиностроении»

Обучающийся \_\_\_\_\_ Е.С. Гончаров

Руководитель ВКР,

д.т.н, доцент \_\_\_\_\_ А.И.Хаймович

Консультант \_\_\_\_\_ А.В. Балякин

Самара 2020



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»

Кафедра «Технологии производства двигателей»

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ (Хаймович А.И.)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020г.

### ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ РАБОТУ МАГИСТРАНТА

Студенту Гончарову Евгению Станиславовичу. группы 2126-240405D

1. Тема ВКРМ «Технико-экономическое обоснование и разработка прогнозных моделей управления качеством поверхностного слоя деталей с использованием технологии ММР» утверждена приказом по университету от «20» января 2020 г. №24-Т.
2. Исходные данные к выполнению ВКРМ:
  - 2.1. Технические характеристики качества технологического процесса селективного лазерного сплавления.
  - 2.2. Программное обеспечение ANSYS FLUENT, Statistica.
3. Перечень вопросов, подлежащих разработке
  - 3.1. Аналитический обзор методов обработки поверхности изделий с высокой шероховатостью поверхности.
  - 3.2. Разработка конструкции экспериментального стенда для гидроабразивной обработки внутренних полостей деталей.
  - 3.3. Установление зависимости качества поверхностного слоя от управляющих воздействий (перепада давления, концентрации абразива, времени экспозиции) при гидроабразивной обработке.
  - 3.4. Разработка конечно-элементной модели гидроабразивной обработки, проведение численного эксперимента для выявления особенностей процесса.
  - 3.5. Сравнительное технико-экономическое обоснование методов ОПС.
4. . Дата выдачи задания 20.01.2020
5. . Срок в представления работы на кафедру в электронном виде в формате pdf 19.06.2020

Руководитель ВКР

д.т.н., профессор \_\_\_\_\_  
должность, степень

\_\_\_\_\_ / А.И. Хаймович/  
подпись И.О.Фамилия

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ / Е.С. Гончаров /  
подпись студента И.О.Фамилия студента

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 85 страниц, 35 рисунков, 16 таблиц, 77 источников.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СПЛАВЛЕНИЕ, ПОСТОБРАБОТКА, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ, ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, КАВИТАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА, ХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ, КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, ДЕФЕКТЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ

Предметом исследования магистерской диссертации является оценка процессов изменения состояния поверхностного слоя металлических изделий, полученных аддитивными технологиями.

Объектом исследования являются технологические процессы обработки поверхностного слоя металлических изделий, полученных методами аддитивным технологий.

Цель исследования: разработка технологии микрополирования изделий, полученных селективным лазерным сплавлением, прогнозных моделей получаемого после обработки поверхностного слоя и экономическое обоснование использования данного метода.

Результатом работы является технико-экономическое обоснование методов гидроабразивной и кавитационной обработки, прогнозная модель управления качеством поверхностного слоя деталей с использованием метода гидроабразивной обработки.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 Аналитический обзор по теме исследования. Обоснование актуальности решаемой проблемы.....	8
1.1 Актуальность темы .....	8
1.2 Актуальные научные проблемы .....	11
1.3 Характеристика объекта и предмета исследования .....	18
1.4 Анализ состояния научно-технического уровня по теме обработки поверхностного слоя изделий, полученных методами аддитивных технологий .....	18
1.5 Формулирование цели и задач исследования .....	32
2 Разработка модели операции технологического процесса .....	33
2.1 Формализованное описание модели .....	34
3 Экспериментальные исследования.....	42
3.1 Постановка задачи эмпирического исследования с детализацией основных моментов исследования. ....	42
3.2 Характеристика проводимых эмпирических исследований.....	42
3.3 Разработка и обоснование плана эксперимента .....	43
3.4 Интерпретация результатов экспериментов .....	46
3.5 Гидроабразивная обработка образцов с большой величиной огранки поверхности .....	50
3.6 Обработка результатов измерений.....	52
3.7 Регрессионная модель обработки поверхности гидроабразивным методом .....	59
4 Прикладные исследования для конкретного объекта с использованием разработанных моделей и методов.....	62

4.1	Разработка практических рекомендаций по результатам исследований	62
5	Выводы по этапам исследования	64
5.1	Экономическое сравнение методов обработки	64
5.2	Выводы по проделанному исследованию	75
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	77

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования: Селективное лазерное сплавление (СЛС) - одно из направлений аддитивного производства, при котором происходит формирование трехмерного изделия путем последовательного сплавления слоев порошкового материала лучом лазера по заданной программе. Технология СЛС позволяет получить минимальный припуск на постобработку у заготовки, что делает СЛС привлекательной альтернативой для производства деталей сложной формы. В настоящее время детали, полученные по технологии СЛС, как правило, имеют достаточно большую шероховатость поверхности до  $Ra = 15$  мкм и  $Rz = 70$  мкм, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к деталям в аэрокосмической, машиностроительной и медицинской отраслей. Поэтому данная технология является заготовительной, т.е. не может быть использована в полной мере без постобработки поверхности.

Цель работы: Повышение эффективности аддитивных технологий за счет снижения шероховатости труднодоступных для инструмента поверхностей методом пост обработки изделий с применением технологии Micro Machine Processes (ММР) – технология обработки микронеровностей.

### Задачи исследования:

- 1) провести аналитический обзор и систематизировать данные по типовым дефектам поверхности, получаемых при выращивании деталей методом СЛС;
- 2) провести аналитический обзор методов обработки поверхности изделий с высокой шероховатостью поверхности;
- 3) разработать и изготовить конструкцию экспериментального стенда для гидроабразивной обработки внутренних полостей деталей с высокой шероховатостью поверхности;
- 4) разработать конечно-элементную модель гидроабразивной обработки в ANSYS и на ее основе провести численный эксперимент для выявления особенностей процесса;

- 5) провести натурный эксперимент и методом регрессионного анализа получить зависимость качества поверхностного слоя по параметрам шероховатости от управляющих воздействий (перепада давления, концентрации абразива, времени экспозиции). Провести экспериментальное обоснование эффективности методов обработки поверхностного слоя (ОПС);
- 6) провести сравнительное технико-экономическое обоснование методов ОПС.

Научная новизна работы:

- 1) на основе теоретического анализа и по результатам экспериментов определены ограничения рабочего процесса выращивания деталей на установках СЛС применительно к качеству поверхностного слоя;
- 2) теоретически методом численного анализа выявлено и экспериментально подтверждено наличие кавитации, а также оценено её влияние на качество поверхности для гидроабразивной обработки изделий полученных методом СЛС;
- 3) разработана регрессионная модель гидроабразивной обработки, устанавливающая зависимость качества поверхностного слоя по параметрам шероховатости от управляющих воздействий (перепада давления, концентрации абразива, времени экспозиции).

Предметом исследования является оценка процессов изменения состояния поверхностного слоя сложнопрофильных изделий, полученных методом СЛС.

Объектом исследования является технологический процесс постобработки поверхности сложнопрофильных деталей, полученных методом СЛС.

Публикации: суммарно по объекту исследования написано 7 статей, в том числе 2 статьи Scopus, 3 статьи РИНЦ, 2 статьи-тезисов. Одна статья Scopus готовится к печати.

1 Аналитический обзор по теме исследования. Обоснование актуальности решаемой проблемы

### 1.1 Актуальность темы

Для поддержания высокого уровня конкурентоспособности, предприятию, да и всей стране в целом, необходимо внедрять новые технологии в производство. Без новых технологий в производстве происходит моральный износ оборудования, в результате чего конкурентоспособность снижается. Одной из таких относительно новых технологий являются аддитивные технологии, которые разделяются на несколько видов, зависящих от используемого для печати материала. Виды используемых аддитивных технологий представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Виды используемых аддитивных технологий [1]

История аддитивного производства начинается с 1983 года – именно тогда Чак Халл сделал первый 3D принтер, работающий на принципе последовательного отвержения слоев фотополимерной смолы лучом ультрафиолета. В 1986 году он получил патент на 3D принтер и основал компанию 3D System, существующую до сих пор [2]. Данная компания создала формат STL использующийся и сейчас во всех 3D принтерах [3]. Влияние данного формата на качество изделий будет рассмотрено ниже.



Для производства большое значение имеют аддитивные технологии, позволяющие выращивать металлические изделия. Видов металлического аддитивного производства так же несколько, основными из которых являются селективное лазерное сплавление (СЛС), электронно-лучевое наплавление (ЭЛН), прямое лазерное спекание металлов (ПЛСМ) и прямое осаждение металла (ПОС), или же как они называются в зарубежной литературе Selective Laser Melting (SLM), Electron-beam melting (EBM), Direct metal laser sintering (DMLS) и Direct Metal Deposition (DMD) [4, 5]. В настоящий момент, самый перспективный и быстро развивающийся метод аддитивных технологий – метод СЛС, поэтому в основном будет рассматриваться именно он. Первые три метода используют формирование изделия из нанесенного на платформу слоя металлического порошка (Bed Deposition), последний использует технологию прямого наплавления частиц порошка (Direct Deposition).

Получение изделий методом СЛС заключается в следующем. Создается 3D модель необходимого изделия, после чего модель сохраняется в формате STL и переносится на установку для печати. Данная модель разбивается на слои определенной толщины, устанавливаемой технологом, в результате чего получаются отдельные 2D сечения каждого слоя. В пределах контура каждого слоя генерируется так называемая «штриховка» - траектория последовательных проходов луча лазера, сплавляющего металлопорошковые композиции в слое. После заполнения камеры защитной атмосферой, в установке происходит перемещение платформы вниз на толщину одного слоя, после чего дозатор высыпает порошковый материал, и затем следует процесс выравнивания слоя с помощью силиконового ножа. Далее лазерный луч проходит по контуру слоя и по траектории внутри контура - штрихует слой внутри контура. В той зоне, где проходит лазерный луч происходит локальное расплавление порошка. Затем платформа опускается в колодец на величину, равную толщине одного слоя, после чего действия по сканированию контура продолжают для следующего слоя.

Данный цикл повторяется до полного построения детали. Далее идет удаление защитной атмосферы и очистка платформы построения от лишнего порошка [6, 7].

Процесс электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) аналогичен процессу СЛС, только вместо лазерного луча используется электронный луч и температура в камере построения ЭЛН выше, чем в камере построения СЛС [7]. Процесс ПЛСМ отличен от двух выше названных методов, потому что в нем порошок не расплавляется полностью, а нагревается до температуры, при которой происходит спекание частиц порошка. В качестве спекающего элемента также используется лазерный луч. За счет отсутствия расплавления частиц остаточные напряжения меньше, но меньше и прочность изделий [7, 8].

В процессе выращивания изделий методом ПОС происходит прямое нанесение расплавленного порошка специальной головкой, которая подводит порошок или же подвод осуществляется второй головкой, находящейся рядом с первой. Как правило, лазерный луч фокусируется через центр головки подачи соосно направлению подачи порошка. Платформа построения перемещается по горизонтали для создания желаемого рисунка слоя и, когда завершено, голова осаждения перемещается вертикально, чтобы создать следующий слой. Процесс происходит в контролируемой атмосфере инертный газ (аргон) и отсутствие кислорода, чтобы улучшить адгезию слоя и контролировать продукт свойства. В отличие от технологии селективного лазерного плавления, металлический порошок применяется только там, где требуется.

В настоящий момент метод СЛС все чаще начинают использовать на производстве, например, в двигателях LEAP-1B для самолетов Boeing 737 MAX использовали форсунку, которая раньше состояла из 18 частей, соединяемых сваркой, а теперь используют форсунку, полученную методом СЛС [9, 10]. Эта форсунка выпускается массово (больше 3 тысяч самолетов

уже летают с данными двигателями), что означает что установки СЛС могут использоваться не только для создания опытных прототипов для единичного производства, но и в условиях серийного и массового производства. Кроме того, данная технология позволяет упростить производственную структуру предприятия, из-за уменьшения количества операций и как следствие, уменьшения количества необходимых для данных операций подразделений и цехов. Но для того, чтобы внедрить аддитивные технологии на российское производство необходимо устранить проблемы, связанные с качеством, получаемых методами 3D печати, изделий. Проблемы у каждого метода аддитивного производства различны, но есть схожие недостатки. Недостатки метода определяют направление, в котором нужно двигаться, для их устранения. Недостатки будут рассмотрены на примере деталей, полученных на СЛС, из титанового сплава Ti6Al4Al, так как это часто используемый в авиастроении сплав [11, 12], для других сплавов фазовые превращения будут аналогичны, но они будут происходить при другой температуре.

## 1.2 Актуальные научные проблемы

Процесс СЛС протекает при больших скоростях нагрева, плавления и последующего охлаждения, с локальным характером данных изменений, в результате чего могут возникнуть такие эффекты, как пористость, микро и макротрещины, и появление пустот. Прилипшие не расплавившиеся частицы также негативно влияют на качество поверхностного слоя [13].

Как говорилось выше, детали, выращиваемые в процессе СЛС, поступают на установку в формате STL. Формат STL представляет информацию об объекте в виде набора координат фасеточных треугольных граней и их нормалей, поэтому может быть различие между CAD моделью детали и моделью в формате STL (рисунок 2) – «огранка» поверхности [14].

Если в CAD модели используются поверхности с большой кривизной или плоскости, то модель в STL-формате аппроксимирует CAD модель без существенных погрешностей. Погрешность аппроксимации поверхностей малой кривизны зависит от числа граней в STL модели [15]. С увеличением

числа граней ошибка становится меньше, но при этом требуются большие вычислительные мощности.

Из-за конструкторских ограничений процесса СЛС, пятно сплавления отклоняется от заданной величины на 0,01-0,05 мм, из-за чего возникают ошибки геометрии, что вызывает увеличение волнистости поверхности.

Во время процесса СЛС появляется эффект «лесенки», связанный с процессом формообразования и обуславливаемый толщиной слоя. С толщиной слоя данный эффект увеличивается, так как растет высота каждой «ступеньки». Данный эффект приводит к возникновению больших значений шероховатости и волнистости поверхностного слоя. С ростом угла наклона увеличивается волнистость поверхности. Максимальный угол построения равен  $45^\circ$ , если не используются поддержки. Схема наложения слоев изображена на рисунке 3.

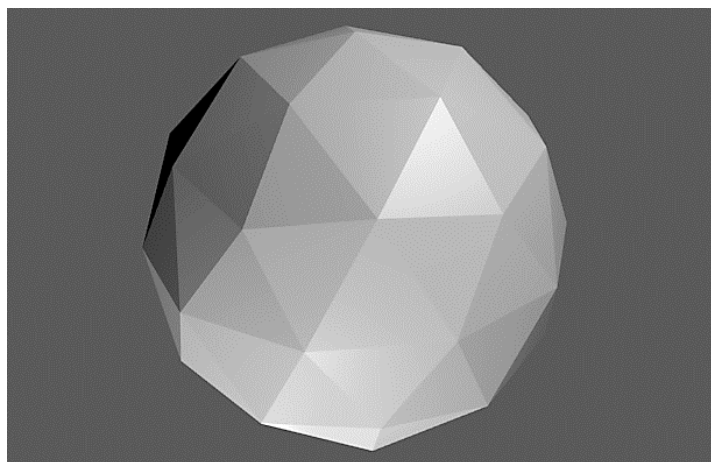
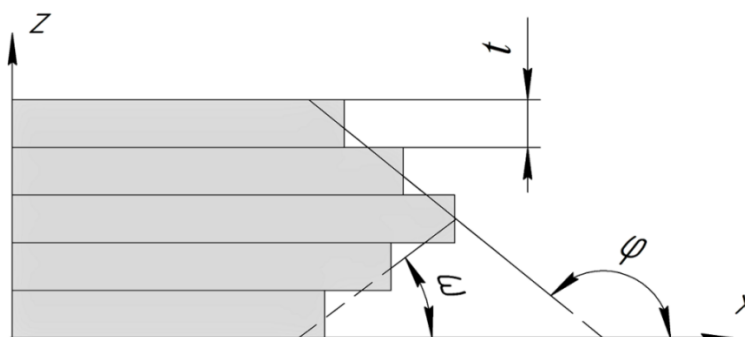


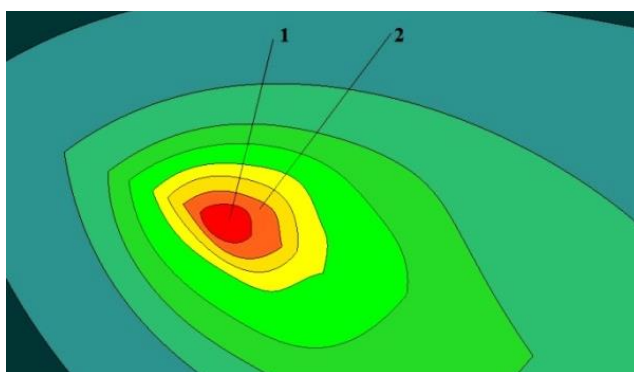
Рисунок 2 - Пример огранки шара в формате STL



$\omega$  – острый угол наклона;  $\varphi$  – тупой угол наклона;  $t$  – толщина слоя.

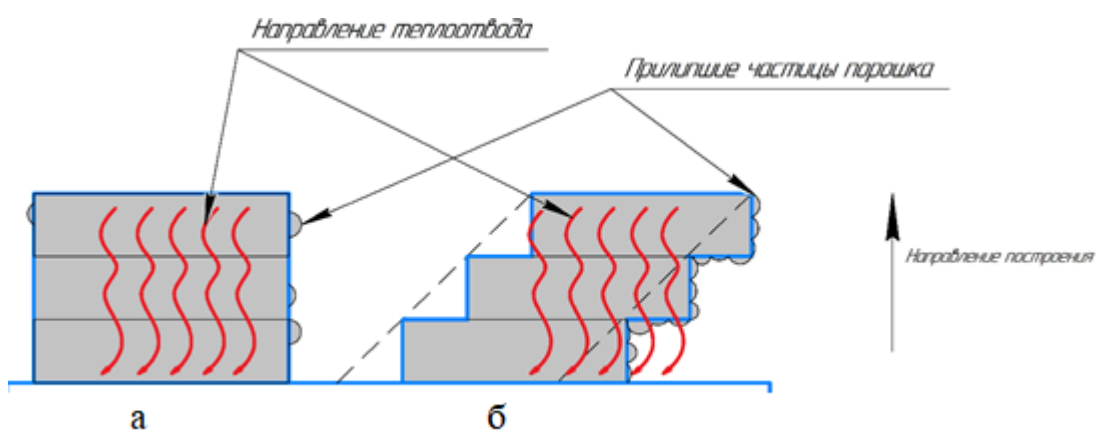
Рисунок 3 - Схема образования эффекта «лесенки» на наклонных поверхностях

Распределение градиента температур при сплавлении единичным импульсом изображено на рисунке 4, оно показывает зону образования ванны расплава 1, в которой порошок переходит в полностью жидкую фазу, при этом порошок, находящийся на участке 2 не переводится целиком в жидкую фазу, так как температура недостаточно велика, в результате чего происходит их частичное сплавление. На наклонных поверхностях этот эффект проявляется максимально – это приводит к росту шероховатости и волнистости (рисунок 5). Так же на рисунке 5 показано влияние эффекта лесенки на качество поверхности.



1 – зона ванны расплава; 2 – зона сплавления

Рисунок 4 – Схема распределения градиента температур при селективном лазерном сплавлении



а – вертикальная стенка; б – наклонная стенка

Рисунок 5 - Схема образования поверхностного слоя в зависимости от распределения теплоотвода

Данные технологические особенности процесса СЛС повлияют на распределение остаточных напряжений и механических свойства. Геометрические характеристики модели и распределение отводимого тепла влияют на распределение не сплавленных частиц порошка по поверхности синтезируемого изделия и на увеличение волнистости и шероховатости поверхности, особенно на наклонных поверхностях. Описанные процессы ведут к появлению неблагоприятных характеристик технологической наследственности.

### Плотность энергии в процессе СЛС

В исследовании [16] было обнаружено, что при одинаковой толщине слоя при снижении плотности энергии с 50,62 до 33,74 Дж/мм<sup>3</sup> уменьшается количество равновесной структуры: от ультратонкой пластинчатой ( $\alpha + \beta$ ) происходит переход до преимущественно игольчатого  $\alpha$ -мартенсита.

Кроме того, оценивали зависимость изменения плотности энергии на плотность образцов. Исследователи Nan и др. [17] и Kasperovich и др. [18] определяли технологические параметры процесса при 120-202 Дж/мм<sup>3</sup> и 83-120 Дж/мм<sup>3</sup> для получения компонентов Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>Al с плотностью более 99,9%. Кроме того, Kasperovich и др. [18] заявили, что плотность энергии 117 Дж/мм<sup>3</sup> должна использоваться для получения полностью плотных компонентов, и это значение тесно коррелирует с плотностью 120 Дж/мм<sup>3</sup>, в работе ученых Attar и др. [19, 20]. Напротив, Cunningham и др. [21] сообщили о более широком диапазоне процесса, получая детали с плотностью более 99,9% для плотностей энергии от 48,61 до 194,44 Дж/мм<sup>3</sup>, тогда как Gong и др. [22] изготовлены полностью плотные детали с плотностью энергии всего 33,33 Дж/мм<sup>3</sup>. Отмечено, что важные параметры процесса, такие как стиль штриховки, диаметр перетяжки и другие, не учитываются, поэтому вопрос о возможности использования переменной плотности энергии как средства характеристики процесса в последнее время подвергается сомнению [23].

## Скорость сканирования и мощность лазера

В работах [24 - 29] авторами исследовались скорости сканирования от 100 до 4250 мм/с и мощности лазера от 40 до 400 Вт и влияние данных параметров на пористость образцов получаемых из Ti6Al4Al. Nan и др. в своем исследовании [17] получили образцы с плотностью более 99% для скоростей сканирования от 400 до 1100 мм/с. Gong и др. [26] сообщили о пористости менее 1% для скоростей от 600 до 1600 мм/с, тогда как Qui и др. [30] сообщили о плотности 99,9% для скоростей сканирования до 2600 мм/с. Тем не менее, эти параметры необходимо учитывать независимо друг от друга. Диапазон, в котором могут быть изготовлены полностью плотные детали, является функцией соотношения скорости сканирования и мощности лазера, а затем как результат каждого отдельно.

Gong и др. [26, 29] сформировали параметры процесса, основанные на этом соотношении, из которого могут быть сделаны классификации пористости (рисунок 6). Авторы пришли к выводу, что параметры зоны 1 будут создавать полностью плотные компоненты. Параметры зоны 4 следует избегать, так как полученное тепло не может быть рассеяно моментально. Параметры зоны 2 и 3, которые называются «предельными параметрами», могут быть использованы для изготовления образцов титанового сплава с минимальным количеством примесей с различными уровнями пористости. Аналогично, Song и др. [31] использовали скорость сканирования и мощность лазера для определения параметров процесса СЛС для титанового сплава Ti6Al4Al. Они определили, что высокий уровень энергии в зоне 1 приведет к образованию трещин, зона 2 будет производить полностью плотные компоненты, в то время как зона 3 приведет к образованию шариков из-за нестабильности расплава. В то время как аналогичные выводы сообщаются обоими коллективами авторов исследований, параметры, определяющие зоны, существенно различаются.

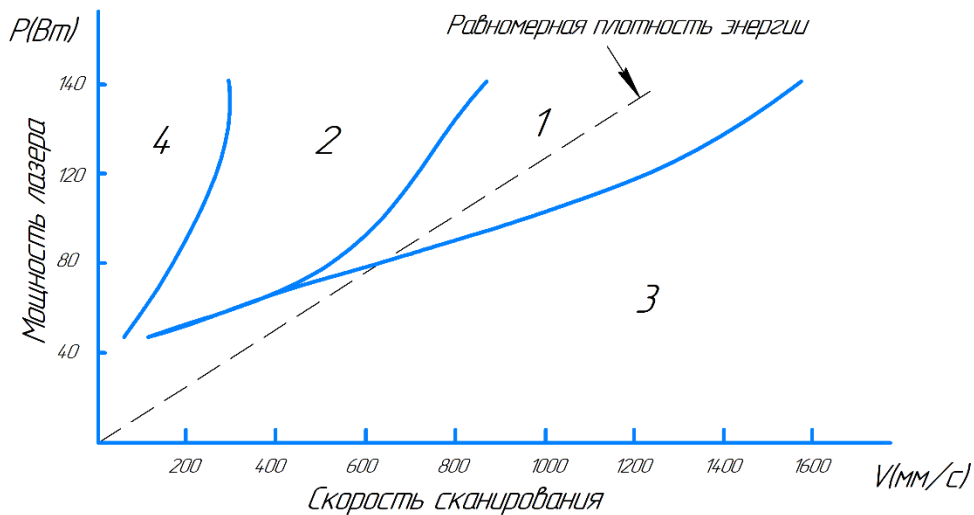


Рисунок 6 – Распределение зон в зависимости от параметров процесса СЛС [31]

#### Толщина слоя

Для деталей, изготовляемых методом СЛС из титанового сплава Ti6Al4V, решающей переменной в определении получаемой микроструктуры является толщина слоя, тогда как другие переменные процесса сохраняются неизменными [23]. В зависимости от толщины слоя темпo от расплавленных участков происходит по-разному и как следствие, охлаждение будет происходить с разной скоростью. Помимо это будет влиять количество слоев в изготовляемой детали – последние слои будут иметь мартенситную структуру. В исследовании [23] при следующих параметрах процесса мощность 375 Вт, толщина слоя 60 мкм, скорость сканирования лазером 1029 мм/с, FOD 2 мм, E 50,62 Дж/мм<sup>3</sup>, получили следующий результат: нижняя область детали состоит из четко определенной слоистой структуры ( $\alpha + \beta$ ), за которой следует гораздо более тонкая пластинчатая ( $\alpha + \beta$ ) в средней области, в то время как последние несколько слоев обозначены  $\alpha'$  мартенситом.

Qiu и др. [28] в своей работе исследовали влияние толщины слоя на качество детали получаемых методом СЛС. Они пришли к выводу, что общая пористость и размер пор непрерывно возрастают с увеличением толщины слоя.



## Величина фокального смещения (FOD)

В статье [16] при параметрах процесса мощность 375 Вт, толщина слоя 60 мкм, скорость сканирования лазером 1029 мм/с,  $E$  50,62 Дж/мм<sup>3</sup> исследователи изменяли величину фокального смещения от 0 до 4 мм. В итоге были сделаны выводы получились следующими: при FOD находящемся в диапазоне от 0 до 2,00 мм в образцах проявляется преимущественно тонкая пластинчатая  $\alpha + \beta$  структура, при это толщина пластинок уменьшается вместе с уменьшением FOD, при FOD = 0 мм наблюдалось незначительное количество мартенситных включений. Для толщины слоя, равной 90 мкм зависимость была аналогичной.

Качество поверхностного слоя обуславливается неровностями поверхности и физико-химическим состоянием поверхностного слоя, как это показано на рисунке 7:

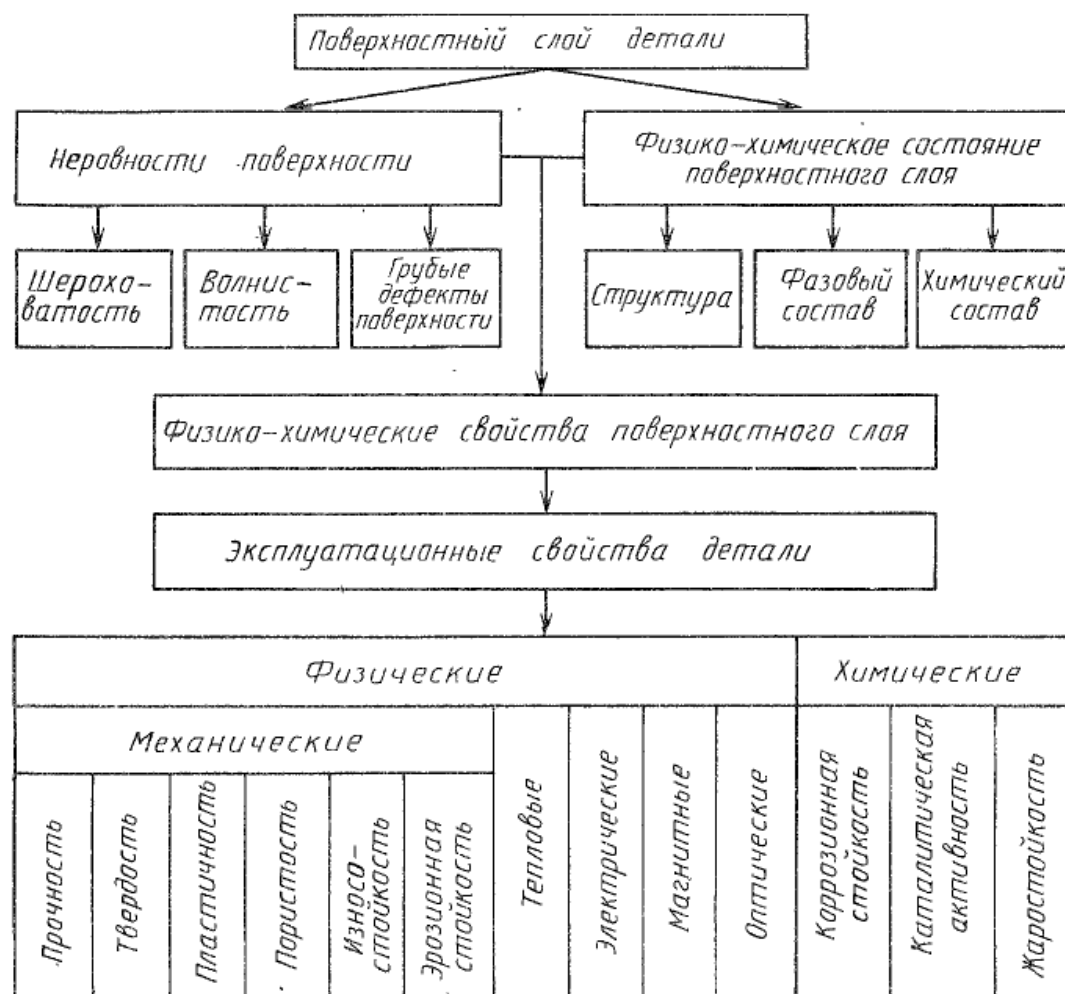


Рисунок 7 – Составляющие свойства поверхностного слоя изделия [32]

Таким образом видно, что многие авторы изучали различные параметры, влияющие на процесс СЛС, и согласно их рекомендациям, можно избежать проблем со структурой поверхности, фазовым составом, химическим составом изделия, пористостью, и повлиять на зависимость прочность/пластичность для конкретного применения изделия. Но некоторых недостатков, связанных с физико-химическим состоянием поверхностного слоя, а также с некоторыми механическими свойствами, но некоторые проблемы решить не удастся – большая величина волнистости и шероховатости поверхности, грубые дефекты поверхности, такие как прилипшие частицы и другие проблемы поверхностного слоя изделий. Аналогичные проблемы с поверхностями существуют и в ЭЛН и ПЛН. Поэтому в настоящее время применение аддитивных технологий ограничено качеством поверхностного слоя.

### 1.3 Характеристика объекта и предмета исследования

Предметом исследования магистерской диссертации является оценка процессов изменения состояния поверхностного слоя металлических изделий, полученных аддитивными технологиями.

Объектом исследования являются технологические процессы обработки поверхностного слоя металлических изделий, полученных методами аддитивных технологий.

### 1.4 Анализ состояния научно-технического уровня по теме обработки поверхностного слоя изделий, полученных методами аддитивных технологий

Качество поверхности – важный фактор, потому что часто разрушение начинается именно с поверхности, поверхность с низкой шероховатостью имеет меньшее количество концентраторов напряжения. В некоторых случаях поверхностный слой можно улучшить с помощью традиционных методов обработки, но чаще всего детали, полученные методами аддитивных технологий имеют сложную форму, с тонкими стенками, и в данном случае традиционные методы применять нельзя. Поэтому для изделий, полученных

аддитивными технологиями, необходимо использовать другие методы обработки.

Обработка лезвийным инструментом, а также закрепленным абразивом деталей из некоторых материалов технологически сложный процесс, а в ряде случаев и вовсе неосуществимый, например, в некоторых случаях тонкостенных деталей. В настоящее время к операциям, которые трудновыполнимы или вообще невозможны с применением механической обработки, относятся: прошивание отверстий и щелей очень малых размеров, получение соединительных каналов и каналов аэродинамического профиля или выполнение других операций в труднодоступных местах деталей и т.п. В вышеперечисленных и ряде других случаев эффективными могут являться методы обработки, указанные на рисунке 8.

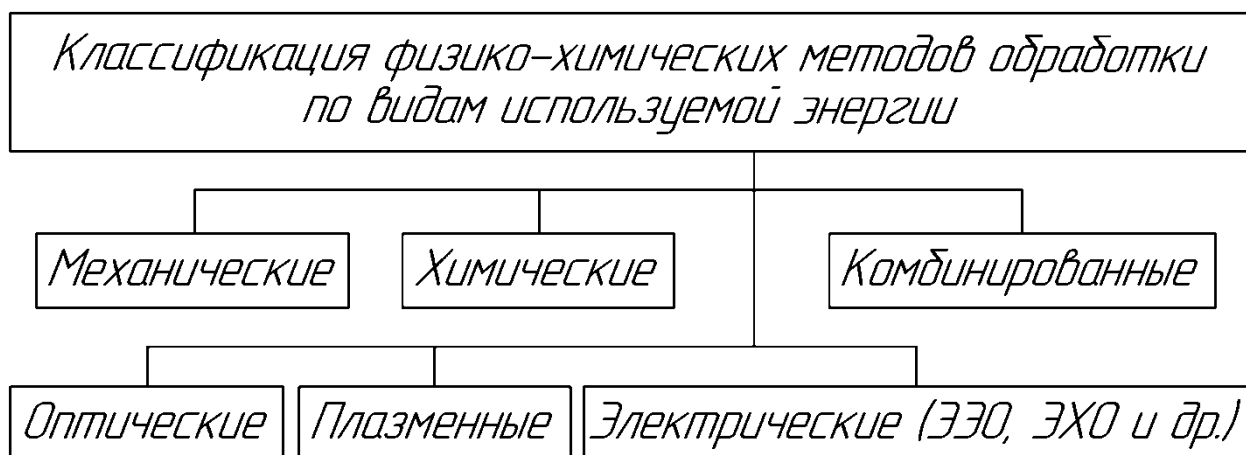


Рисунок 8 – Классификация физико – химических методов обработки по видам подводимой энергии

Оптические методы модификации поверхности заключаются в следующем: лазерный луч локально расплавляет поверхность изделия, в процессе чего за счет сил поверхностного натяжения расплава происходит выглаживание поверхности, что позволяет уменьшить волнистость и шероховатость поверхности. Для локального расплавления лазерным лучом поверхность должна быть открытой, что невозможно в случаях с деталями, имеющими сложную геометрию.

Плазменная модификация поверхности похожа на процесс лазерной модификации, только вместо лазерного луча используют плазму, под действием которой так же происходит расплавление поверхности и ее выглаживание. Структурирование поверхностного слоя изделий осуществляется быстрым (больше  $10^6$  К/с) его нагревом до плавления и быстрым охлаждением [33]. Во время плазменной модификации изделий можно проводить легирование поверхности изделия, что может позволить дополнительно увеличить износостойкость и твердость поверхностного слоя. В зависимости от применяемого генератора плазмы обрабатываться могут различные изделия, обработка внутренних поверхностей возможна при внутренних диаметрах цилиндрических поверхностей больших 3 мм [34]. Так же в зависимости от установки генерация плазмы может происходить в вакууме, либо в обычной атмосфере.

Механические методы обработки имеют множество вариаций: это и обработка лезвийным инструментом, все виды абразивной обработки, ультразвуковая обработка и прочие методы. При обработке ажурных изделий лезвийным инструментом возникают трудности – большие силы резания могут изгибать тонкие стенки деталей, но при этом лезвийная обработка используется долгие годы и поэтому намного лучше изучена.

Абразивная обработка может производиться закрепленным и свободным абразивом. Процессы шлифования и хонингования, в которых абразив скреплен в круг или пластинки используются для финишной размерной обработки. Они зарекомендовали себя как методы, обеспечивающие низкую шероховатость поверхности, высокую производительность и геометрическую точность деталей, возможность обработки высокотвердых материалов, коэффициент обрабатываемости которых лезвийными методами крайне низок. Но при этом данные методы обработки имеют ряд негативных свойств, к которым относится ограниченность форм обрабатываемых поверхностей. В основном данными методами обрабатывают поверхности тел вращения, либо плоские

поверхности, изредка линейные поверхности. Характер обработки таковой, что в процессе снятия припуска происходят всплески температур, приводящие к снижению физико-механических свойств и нежелательным превращениям структуры материала, так называемым прижогам. Только 20% от всей механической работы, затрачиваемой на процесс шлифования идет на модификацию поверхностного слоя, остальное переходит в тепло. Из-за засаливания абразивных кругов и других инструментов приводит к понижению эффективности процесса шлифования и дополнительно увеличивает температуру в зоне обработки. Засаливание происходит из-за недостатка свободного места для удаления стружки и абразивного материала из зоны обработки. К повышенному расходу абразивных материалов приводит необходимость периодической правки шлифовального круга. Обработка закрепленными абразивами применяется довольно давно, в следствие чего эти процессы изучены достаточно глубоко различными исследователями и представлены во многих работах.

Обработка свободным абразивом (ОСА) представлена следующими методами обработки: вибрационной обработкой (ВиО), струйно-абразивной обработкой (САО), обработкой свободным абразивом уплотненным инерционными силами (ОСАУИС), центробежно-ротационную обработкой (ЦРО), турбо-абразивной обработкой (ТАО), магнитно-абразивной полировкой (МАП), галтовкой, классификация данных методов показана на рисунке 8.

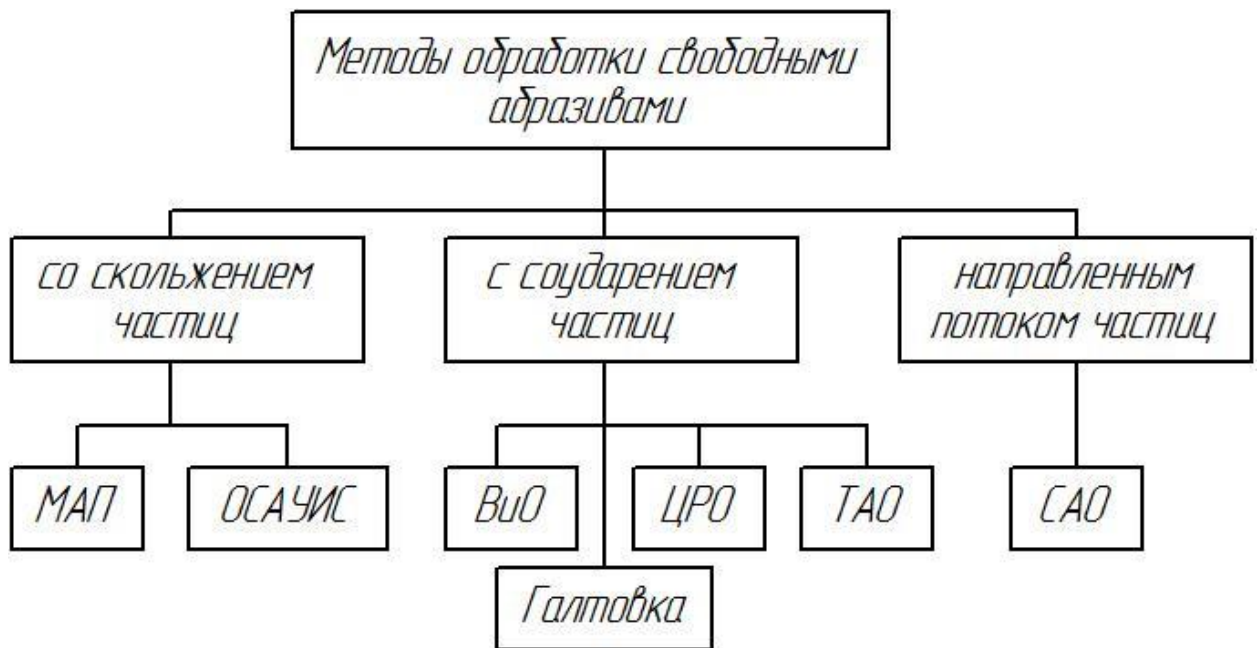
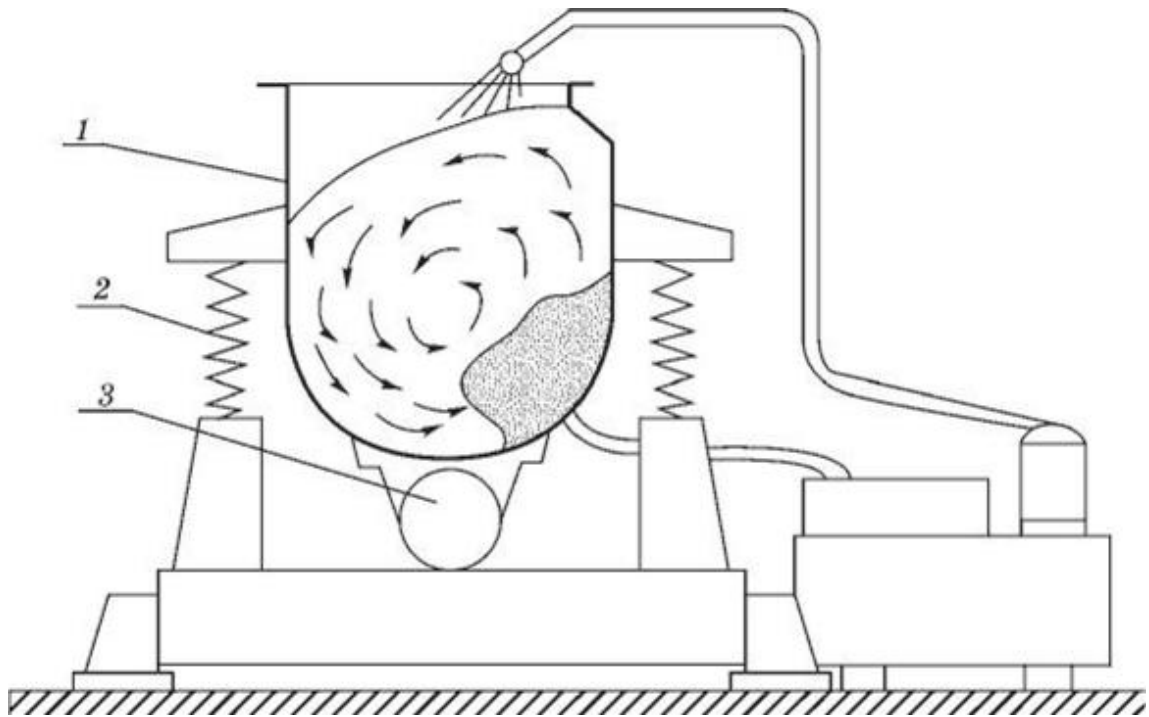


Рисунок 8 – Классификация методов обработки свободным абразивом [35]

Рассмотрим виды ОСА, применимые к ОПС изделий, полученных методами СЛС. Наиболее распространенным из данных методов является вибрационная обработка (ВиО) [36 - 38]. Во время ВиО происходит процесс механического или химико-механического съема мельчайших частиц поверхности обрабатываемого изделий и окислов поверхностного слоя. Помимо этого, происходит сглаживание микронеровностей за счет пластической деформации частицами рабочей среды, приобретающими в процессе работы колебательные движение.

Детали, подвергаемые обработке, загружаются в рабочую камеру, в которой находится рабочая среда, подбираемая исходя из свойств, требуемых для обработки. Установленная на упругой подвеске рабочая камера колеблется в различных направлениях, показанных на рисунке 9. Особенности ВиО являются одновременная обработка большого количества деталей без необходимости закрепления, так же возможно обрабатывать детали с тонкими стенками, т.е. детали малой жесткости, помимо этого возможно обработка деталей различных размеров.

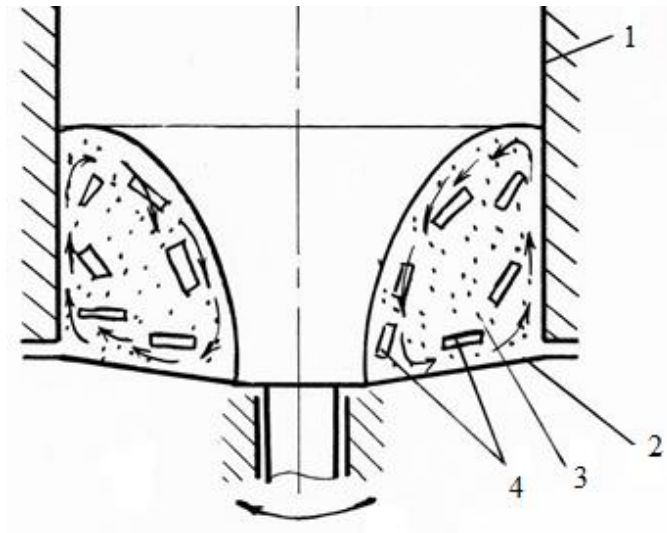


1 – рабочая камера, 2 – упругая подвеска, 3 – источник колебаний

Рисунок 9 – Схема установки ВиО

### Центробежно-ротационная обработка (ЦРО)

Метод объемной ЦРО [39] состоит в приведении во вращательное движение гранулированной обрабатывающей среды и детали вокруг вертикальной оси. Данная среда приобретает форму тора, со спиральными траекториями движения частиц обрабатывающих гранул [40]. Детали, подвергаемые обработке, загружаются в рабочую камеру без закрепления и двигаются вместе с рабочей средой. Съем припуска осуществляется за счет относительного перемещения и взаимодействия абразивных гранул и деталей, омываемых жидкостью, подаваемой в рабочую камеру непрерывно (рисунок 10). Метод ЦРО позволяет достичь высокой интенсивности обработки, так как скорости перемещения компонентов тороидально-винтового потока велики. Величина съема материала, во время процесса ЦРО, зависит от времени обработки, скорости вращения ротора, зернистости (размеров) частиц рабочей среды, объема рабочей камеры, механических свойств материала обрабатываемых деталей и используемого абразива (гранул) [41].

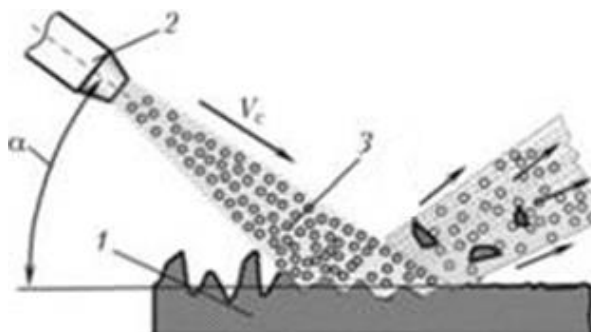


1 – рабочая камера, 2 – коническое дно, 3 – рабочее тело, 4 – обрабатываемые изделия

Рисунок 10 – Устройство ЦРО

### Струйно-абразивная обработка (САО)

Метод САО [42] использует эффект от удара частиц обрабатывающего материала об обрабатываемую поверхность. Процесс обработки аналогичен процессу износа материалов под действием потока, содержащего абразивные частицы. Помимо съема металла с поверхности, наблюдается упрочнение поверхностного слоя и изменение профилей микрогеометрии. При этом в после обработки проявляются остаточные напряжения сжатия, залегающие на небольшой глубине [43]. Схема процесса САО показана на рисунке 11 [44].



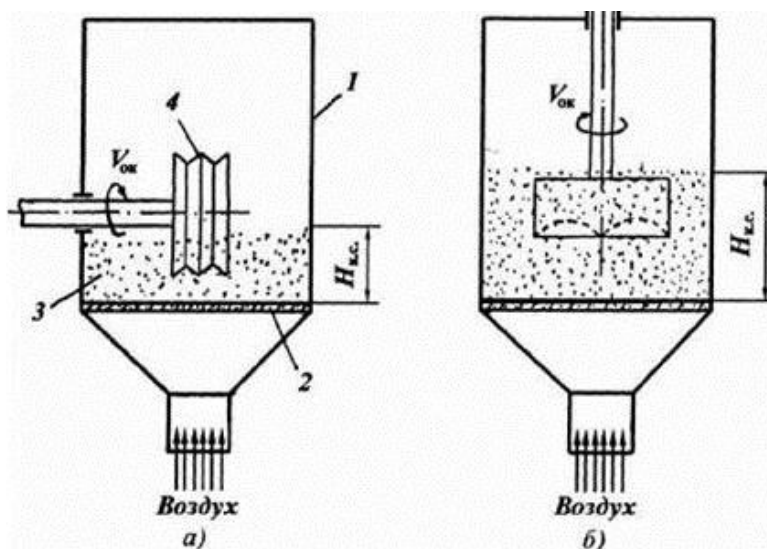
1 – обрабатываемая поверхность, 2 – сопло, 3 – рабочее тело

Рисунок 11 – Схема струйно-абразивной обработки

### Турбоабразивная обработка (ТАО)



Метод турбоабразивной обработки (ТАО) [35] основан на явлении псевдооживления сыпучих абразивных материалов, возникающего во время продува их воздухом. В данный абразивный кипящий слой помещают обрабатываемое изделие, и в зависимости от формы изделия, ему задают определенные виды движения, как показано на рисунке 12.



1 – камера обработки, 2 - воздухораспределительная решетка, 3 – рабочее тело, 4 – обрабатываемое тело

Рисунок 12 – Схема установки ТАО

### Химические методы обработки поверхности (ХО)

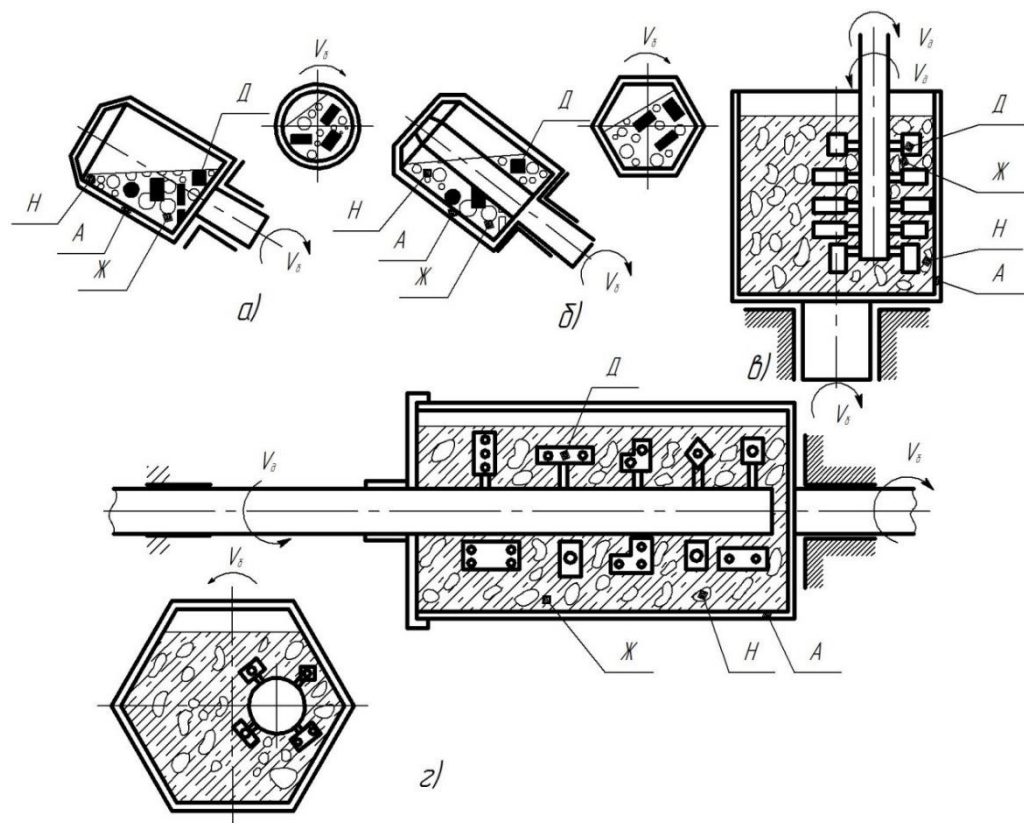
Химическая обработка материалов заключается в направленном растворении части поверхностного слоя, в результате которого происходит растворение пиков микронеровностей. Травление обрабатываемых изделий происходит в различных растворах щелочей и кислот. Комбинируя различные концентрации растворов, увеличивая или уменьшая их температуру можно добиваться необходимых эффектов во время обработки, ускорять или замедлять время химического растворения, для лучшего контроля за реакцией или же для ускорения процесса [45]. Для защиты не обрабатываемых поверхностей, их покрывают лаками, красками и другими химически стойкими покрытиями, исходя из свойств используемого для травления раствора. Обрабатываемые поверхности же наоборот стараются

очистить, используя обезжириватели, предварительную механическую обработку (например, пескоструйную обработку). Химическая обработка позволяет добиться нужного качества поверхностного слоя для изделий с тонкими, ажурными стенками, с труднодоступными поверхностями, которые нельзя обработать режущим инструментом. Процесс химического полирования происходит за меньший временной промежуток, чем при анодной обработке [46], при этом изделия, подвергаемые обработке можно обрабатывать в навал, что недопустимо при электрохимической обработке, речь о которой пойдет ниже.

#### Галтовочные методы (ГМ)

Галтовочные методы [47, 48] используют для операций полировки, безразмерного шлифования, зачистки и очистки, а также для создания упрочненного поверхностного слоя. В результате воздействия наполнителя и обрабатываемых изделий, находящихся в контейнере для обработки, происходит скольжение наполнителя по поверхности изделий, в результате этого процесса микрорезания происходит снятие металла.

В основном схемы обработки галтовочными методами представляют из себя круглые или граненые барабаны, вращающиеся вокруг оси, которая может иметь определенный угол наклона, либо быть вертикальной или горизонтальной. Данные схемы показаны на рисунке 13. Для интенсификации процесса обработки и перемешивания обрабатываемых изделий внутри барабанов делают поперечные ребра. Меняя галтовочные тела для последовательной обработки можно получать низкую шероховатость поверхностного слоя.



а - в наклонном круглом барабане; б- в наклонном граненом барабане; в - в круглом вертикальном барабане с закреплением и вращением деталей; г-в граненом горизонтальном барабане с закреплением и вращением деталей; А - контейнер; Д-детали; Ж - жидкостная среда; Н- твердый наполнитель

Рисунок 13 – Схемы обработки галтовочными методами

### Гидродинамические методы обработки (ГДО)

В группу данных методов входят: гидроабразивный, гидравлический, гидрокавитационный и гидрокавитационный-абразивный методы. Сущность данных методов – комплексное физико-химическое воздействие на поверхность детали твердых тел и жидкостной среды, подаваемых под давлением. Гидрокавитационный и гидрокавитационный-абразивный методы обработки обрабатывают поверхность изделия за счет возникновения пузырьков кавитации на стенки обрабатываемого изделия, а в случае с гидрокавитационно-абразивным методом идет дополнительное воздействие за счет зерен абразива,двигающихся с большой скоростью [49].

К гидродинамическим методам обработки можно так же отнести абразивно-экструзивную обработку (АЭО), но в отличии от гидроабразивных

методов обработки в качестве рабочей среды используется полимерная основа. С помощью использования различной концентрации и зернистости абразива можно варьировать механические свойства рабочей смеси [50, 51, 52, 53]. Помимо различия в использовании различных носителей для абразива, АЭО отличается невысокими скоростями передвижения рабочей среды относительно обрабатываемого изделия, сила резания при этом будет определяться реологическими свойствами рабочей среды и давлением, во время обработки, которое может достигать 4-14 МПа.

### Магнитно-абразивное полирование (МАП)

Обработка МАП заключается в использовании абразивного порошка с магнитными свойствами, которому сообщают принудительное действие за счет поля, либо же движения совершаются обрабатываемым изделием [54, 55, 56]. За счет силового воздействия магнитного порошка на поверхностный слой изделия и описанных выше движений относительно детали, происходит съем металла с поверхности. Данный метод обработки так же относится к безразмерным методам ОПС. К достоинствам МАП относится возможность исправления погрешностей формы детали, обработка деталей малых и средних размеров, к недостаткам МАП относится необходимость штучной обработки изделий, что ограничивает применимость данного метода; поверхность обрабатываемых изделий чаще всего представляет собой тела вращения, а также существует необходимость в закреплении и вращении изделия во время обработки.

### Электрические методы обработки (ЭХО)

Электрические методы обработки включают в себя: электрохимическую обработку, электроэрозионную обработку и их комбинации, и вариации. Данные методы хороши тем, что позволяют обработать поверхность без силового воздействия на нее и качество поверхности будет высоким, они дают возможность работать с очень прочными и твердыми материалами, которые невозможно обрабатывать

другими методами. Электроискровые и электроимпульсные станки используют для проведения процедур, инструментом является электрод, имеющий форму, соответствующую той, которую нужно придать обрабатываемой заготовке. Деталь помещается в ванную, наполненную жидкостью, не проводящей ток. Инструмент является катодом, а деталь – анодом, они подключаются к источнику тока, и сближаются. В определенный момент искровой промежуток становится настолько малым, что между анодом и катодом возникает электрический разряд. Это приводит к мгновенному нагреванию обрабатываемой поверхности до 10 000 градусов по Цельсию, материал локализовано плавится, испаряется и происходит выброс его микрочастиц с поверхности, похожий на микровзрыв, они моментально застывают в жидкости и опускаются на дно ванны.

Электрохимическая обработка проводится при помощи электролита – жидкости, проводящей ток, в которую помещается деталь. Под воздействием электролита верхние слои металла растворяются, этот эффект используется для полировки изделий, затачивания режущего инструмента, очистки поверхностей от ржавчины и оксидов, гравирования, профилирования заготовок, нанесения металлических покрытий и изготовления изделий с очень малой толщиной [46].

Комбинированные методы могут включать несколько из выше перечисленных методов обработки. В результате их совместного воздействия увеличивается эффективность процесса (например, ультразвуковая обработка увеличивает скорость химических реакций) и ее можно использовать для последовательной обработки поверхности, так как различные методы лучше работают на разных шероховатостях.

Анализируя вышеперечисленные методы обработки, можно составить сравнительную таблицу с недостатками и преимуществами каждого метода обработки (таблица 1). В некоторых случаях данных об отдельных видах обработки нет, так как они относительно новые и имеют небольшое распространение.

Таблица 1 - Технологические возможности методов обработки

Параметры обработки	Вид обработки					
	ВиО	ЦРО	ОСАУИС	МАП	ТАО	Плазменная обработка
Обработка внутренних поверхностей	возможна	возможна	возможна	невозможна	невозможна	иногда возможна
Обработка длинных каналов малого диаметра / каналов со сложным профилем	невозможна	невозможна	невозможна	невозможна	невозможна	невозможна
Обработка труднодоступных мест	возможна	невозможна	невозможна	невозможна	возможна	возможна
Максимальная исходная шероховатость (класс ГОСТ 2789- 73)	4-6	4-6	6-7	6-7	4-6	-
Минимальная заданная шероховатость (класс ГОСТ 2789- 73)	9-10	9-10	10-11	10-12	9-10	-
Тип производства	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко – крупно серийное	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко –крупно серийное (зависит от конфигурации установки)
Наличие базовых поверхностей	необязательны	необязательны	обязательны	обязательны	обязательны	необязательны (зависит от конфигурации)

Продолжение таблицы 1

Параметры обработки	Вид обработки					
	ГДО	ЭХО	ХО	САО	ГМ	АЭО
Обработка внутренних поверхностей	возможна	возможна	возможна	возможна	зависит от диаметра	возможна
Обработка длинных каналов малого диаметра / каналов со сложным профилем	возможна	иногда возможна	возможна	невозможна	невозможна	возможна
Обработка труднодоступных мест	возможна	возможна	возможна	возможна	возможна	возможна
Максимальная исходная шероховатость (класс ГОСТ 2789- 73)	-	-	-	6-7	-	-
Минимальная заданная шероховатость (класс ГОСТ 2789- 73)	-	10-12	9	10-11	11-14	10-12
Тип производства	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко –крупно серийное, массовое	единичное, мелко –крупно серийное, массовое
Наличие базовых поверхностей	обязательны	необязательны	необязательны	необязательны	необязательны	обязательны

## 1.5 Формулирование цели и задач исследования

Цель исследования: разработка технологии микрополирования изделий, полученных селективным лазерным сплавлением, прогнозных моделей получаемого после обработки поверхностного слоя и экономическое обоснование использования данного метода.

Задачи исследования:

- обзор, сбор, обработка и систематизация данных в области дефектов поверхности, получаемых при создании изделий СЛС;
- обзор данных по обработке поверхности данных изделий;
- проведение экспериментов с различными методами обработки и подборка оптимальных моделей;
- разработка прогнозных моделей обработки поверхностного слоя;
- экономические обоснования методов обработки.



## 2 Разработка модели операции технологического процесса

Для базового понимания, работает технология или нет, необходимо провести тестовый эксперимент. После данного эксперимента будет видна целесообразность использования данной технологии в дальнейшем. Для проведения опыта была собрана экспериментальная установка, представляющая собой замкнутую систему, перекачивающую по контуру рабочую жидкость вместе с абразивным наполнителем из абразивных зерен карбида кремния черного 54С, зернистость которого была. Схема одного из вариантов установки представлена на рисунке 14. Во время опыта установку запускали и без добавления абразива, чтобы посмотреть эффект от воздействия воды на поверхность изделий, полученных методом СЛС.

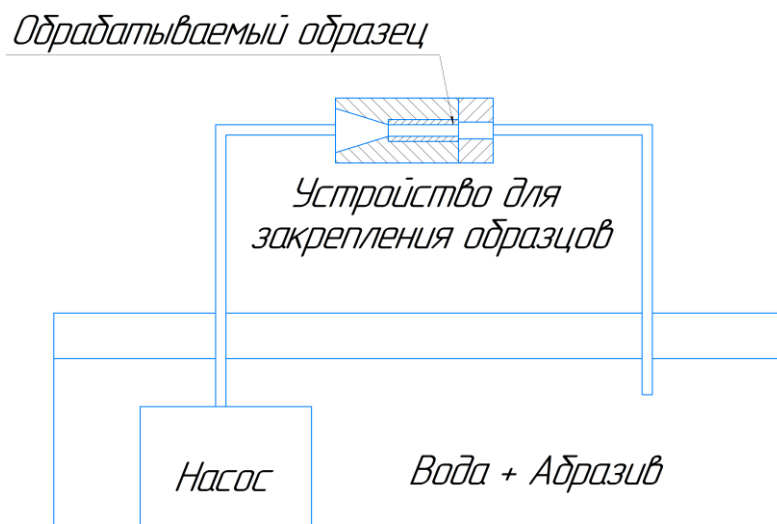


Рисунок 14 – Схема экспериментальной установки

В одном из вариантов установки были установлены манометры с измерением рабочего давления от 0 до 1 атмосферы. Манометры были установлены до и после устройства для держателя образца, до и после манометров были установлены шаровые краны, для регулирования рабочего давления в системе. Во время работы установки были зафиксированы значения давления на манометрах: манометр, стоящий до держателя образцов показывал давление в 0,7 атмосферы, а манометр стоящий после уходил в нуль, и если бы не было ограничения, то он бы показывал

отрицательное давление. По данным манометров можно сказать, что между двумя манометрами происходило явление кавитации. Для того, чтобы узнать точное местоположение появляющихся кавитационных пузырьков необходимо провести моделирование процесса обработки в ANSYS.

## 2.1 Формализованное описание модели

Вычислительная гидрогазодинамика (англ. Computational Fluid Dynamic - CFD) возникла на стыке вычислительной математики и теоретической гидромеханики и к настоящему времени оформилась как обособленный раздел науки, предметом которого является численное моделирование различных течений жидкости и газа и решение возникающих при этом задач при помощи методов, основанных на использовании компьютерных систем [57].

Современная вычислительная гидродинамика занимается разработкой таких актуальных направлений, как расчет движений вязкой жидкости, численное исследование течений газа с физико-химическими превращениями, изучение распространения ударных волн в различных средах, решение газодинамических задач при наличии излучения, связанные задачи типа «прочность - газовая динамика», «акустика - газовая динамика» и пр. Бурному росту CFD-расчетов, безусловно, способствуют совершенствование компьютерных технологий, создание универсальных, удобных в использовании и доступных широкому кругу исследователей программных CFD-комплексов, уверенно справляющихся с разнообразными типами задач. Подобные программы обладают неоспоримым преимуществом перед физическим экспериментом и иногда являются единственной возможностью ответить на интересующие вопросы.

Среди несомненных достоинств компьютерного моделирования можно отметить следующие:

- сокращение времени при проектировании и отработке модели;
- моделирование условий, невозможных при натуральных испытаниях;

- получение более полной и широкой информации об объекте исследования;

- экономическая эффективность компьютерных расчетов;

- возможность быстрой корректировки расчетной модели;

- эффективное использование времени исследователя.

В качестве расчетного модуля был выбран модуль ANSYS CFX, в котором уже есть базовые примеры моделирования процессов движения твердых частиц в жидкостях или газах. В дальнейшем часть расчетов проводилась в модуле ANSYS FLUENT, в котором так же есть примеры с движением твердых частиц в потоке жидкости или газа, но в отличие от модуля CFX, FLUENT имеет несколько другие модели эрозии, которые нам пригодятся в дальнейшем. Несмотря на различия в возможностях модулей, порядок проведения расчетов выглядит одинаково, и выглядит следующим образом:

а) подготовка расчетной модели, которая включает в себя:

1) создание геометрической модели, которая будет описывать расчетную область;

2) создание сетки на основе геометрии, полученной в прошлом пункте;

3) задание начальных и граничных условий;

4) выбор физической модели расчета - препроцессинг.

б) решение задачи в решателе;

в) постпроцессинг во время которого происходит анализ результатов расчета;

г) исправление данных в расчетной модели при необходимости;

д) повторный расчет с учетом введенных изменений.

Для определения местоположения кавитации использовалось моделирование небольшой области, а именно зоны, в которой происходило закрепление образцов. Контур состоит из простых геометрических фигур, поэтому может быть построен прямо в Ansys. Геометрия модели

представлена на рисунке 15. Моделирование небольшой зоны позволит ускорить процесс моделирования и расчета, но также не учитывает геометрию остальной части установки, из-за чего появляются неточности в движении частиц абразива. В последствии была сделана модель во FLUENT, с увеличенной зоной моделирования, которая позволила увидеть движение частиц, с влиянием геометрии рабочей установки.

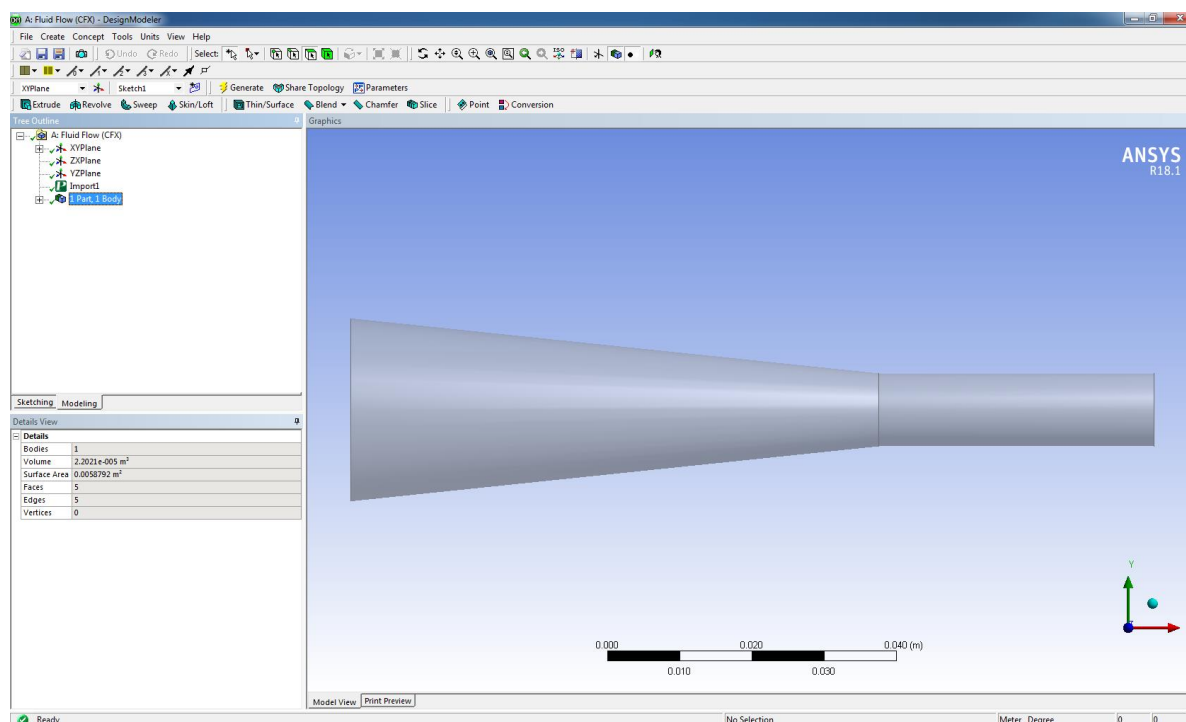


Рисунок 15 – Геометрия моделируемой зоны

Далее идет процесс построения сетки конечных элементов (КЭ), которое выполняется в модуле Meshing платформы Workbench. Первым шагом проводится предварительная разбивка области на конечные элементы. Также необходимо сделать разбивку на области: входную, выходную, стенку сопла и сам обрабатываемый образец. Процесс показан на рисунке 16.

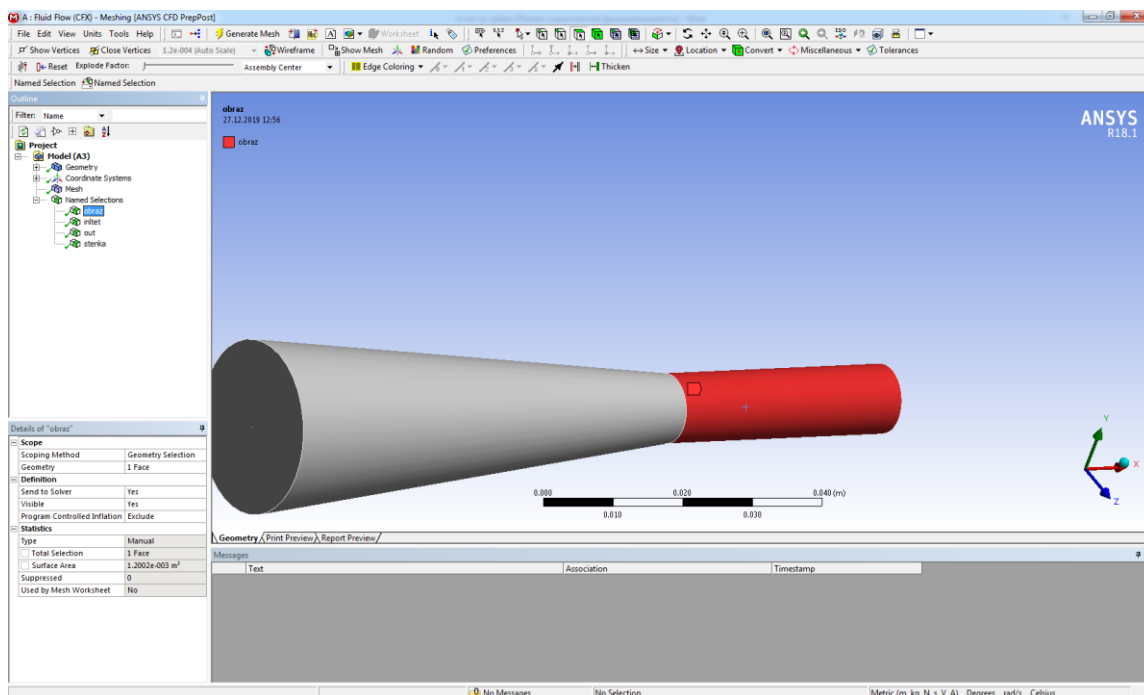


Рисунок 16 – Создание named selections в модуле Meshing

### Создание расчетной модели потока гидроабразива

Построение расчетной модели производится в модуле CFX – Pre платформы Workbench. Чтобы решить симуляцию, необходимо создать два набора одинаковых частиц. Первый набор будет полностью связан, чтобы предсказать влияние частиц на поле потока в непрерывной фазе и позволить частицам влиять на поле потока. Второй набор будет с односторонней связью, но будет содержать гораздо большее количество частиц, чтобы обеспечить более точный расчет объемной доли частиц и локальных сил на стенках, но без влияния на поле потока. Для повышения точности моделирования на входе будет задан профиль скорости, который имитирует полностью развитый пограничный слой. Параметры показаны в таблице 2. Свойства материала частиц абразива, используемых при моделировании, должны быть определены. Теплообмен и моделирование излучения не используются в этом моделировании, поэтому единственными свойствами, которые необходимо определить, являются плотность абразива и диапазон диаметров частиц. Данные о диаметрах частиц задаем из зернистости абразива. Параметры представлены на рисунке 17.

Таблица 2 – Параметры, задаваемые при создании материала

Basic Settings	Material Group	Particle Solids
		thermodynamic state
Material Properties	thermodynamic properties > equation of state > density	3,21 [g cm <sup>-3</sup> ]
	thermodynamic properties > specific heat capacity	(selected)
	thermodynamic properties > specific heat capacity > specific heat capacity	0 [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
	thermodynamic properties > reference state	(selected)
	thermodynamic properties > reference state > option	specified point
	thermodynamic properties > reference state > ref. temperature	300 [K]

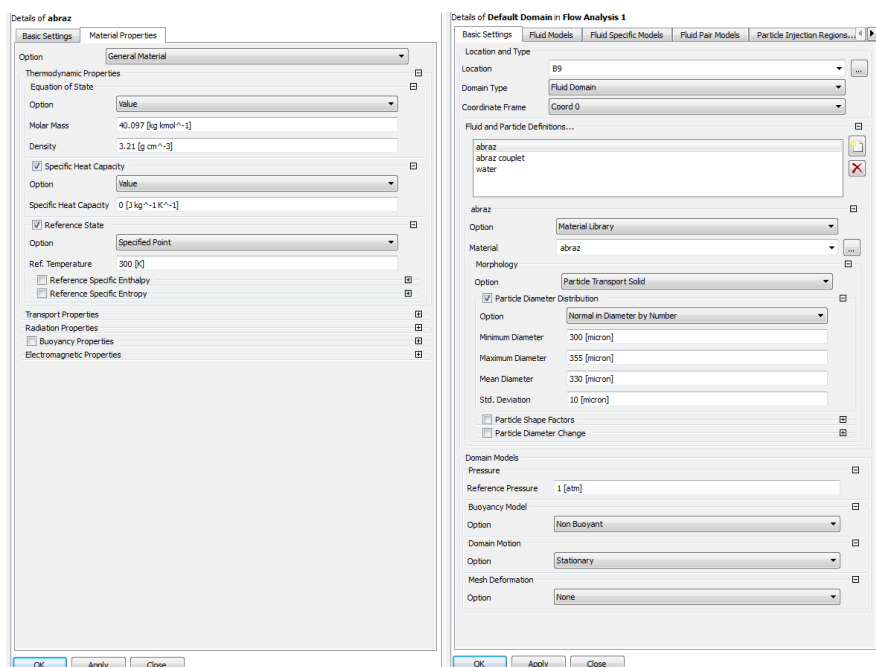


Рисунок 17 – Задание свойств абразива

Для более точного моделирования входного отверстия, определим профиль скорости на входе, чтобы пограничный слой уже полностью

развивался на входном отверстии. Степенной закон «одной седьмой» Кармана для расчета профиля скорости на входе в трубу 1:

$$U = W_{max} \left( 1 - \frac{r}{R_{max}} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (1)$$

$R_{max}$  – максимальный радиус трубы,  $r$  – расстояние от осевой линии.

Во вкладке expressions задаем максимальный радиус трубы ( $R_{max}$ ), максимальную скорость потока ( $W_{max}$ ) и формулу 1 ( $W_{prof}$ ). После задаем граничные условия. Пример задания параметров на входе в расчетную зону показаны на рисунке 18. Далее, после задания всех параметров, необходимо запустить модель на расчет.

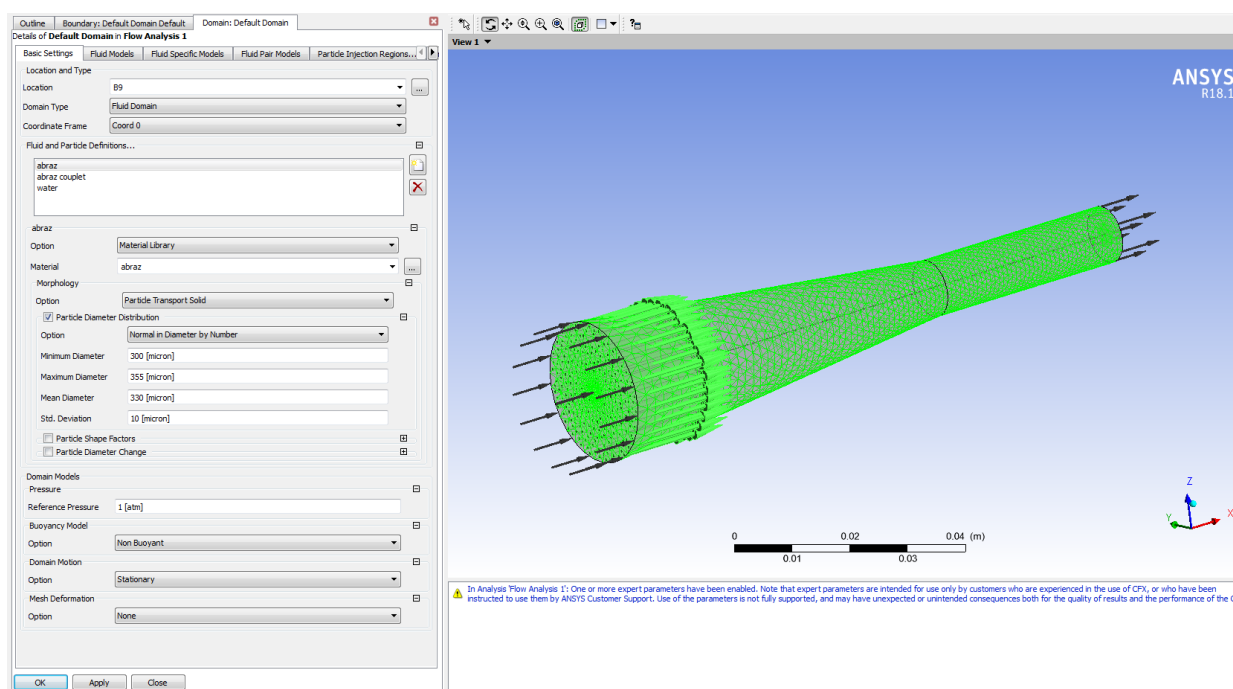


Рисунок 18 – Задание параметров на входе

## Анализ полученных результатов

Во вкладке Results представлены результаты расчета. В данной вкладке можно вывести интересующие нас параметры – траекторию движущихся частиц, столкновения частиц со стенками и с образцом, распределения

скорости и давления. На рисунке 18 показано распределение давления и треки частиц. Как видно из графика давления, на входе в обрабатываемый образец происходит резкое падение давления. Это происходит из-за явления кавитации в данной точке. Появление кавитации было замечено в натуральных опытах, с помощью двух манометров, установленных до и после обрабатываемой зоны. Показания манометра, установленного после образца, уходили в отметку «0» по давлению, что свидетельствовало о появлении кавитации, так как в зоне возникновения кавитации увеличивается гидравлическое сопротивление. Таким образом, моделирование также показывает наличие кавитации и для более точного расчета параметров кавитации необходимо использовать ее задание с помощью дополнительной пары материалов – водой и водяного пара, с указанием давления насыщенного водяного пара при данной температуре.

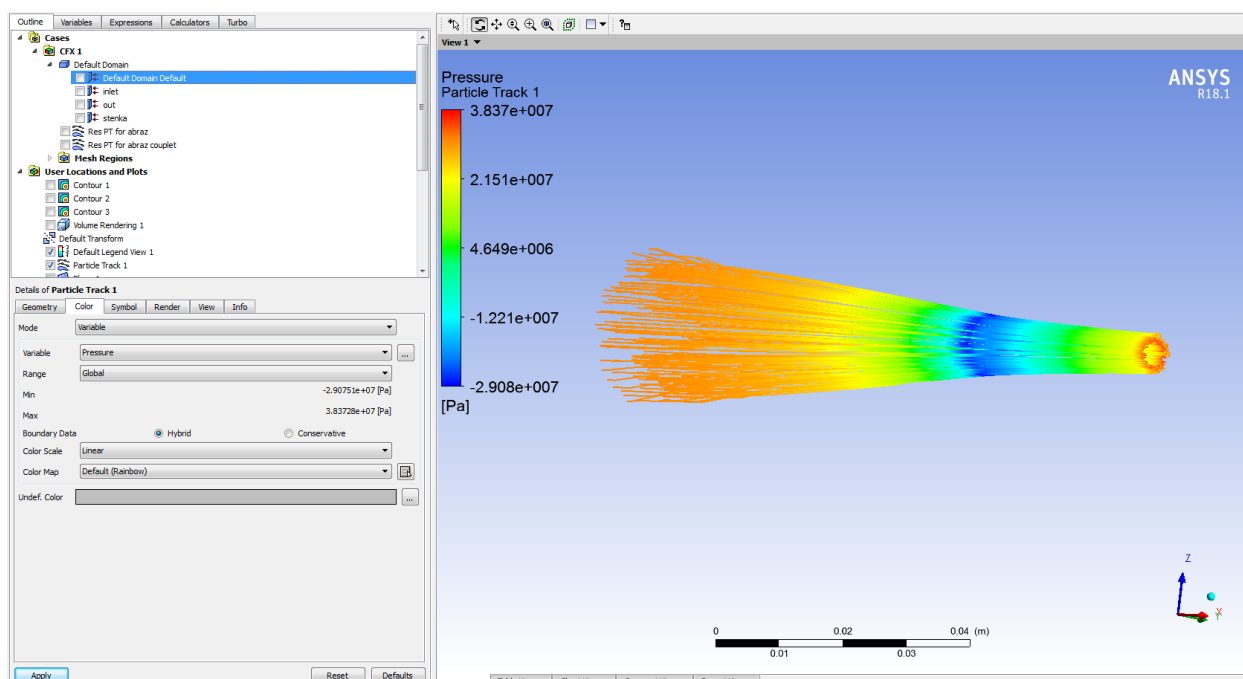


Рисунок 18 – График движения частиц в исследуемом образце

Данный расчет показал треки частиц, что в последствии поможет выбрать оптимальную форму сопла, для обеспечения углов атаки частицами, которые позволят наилучшим образом обрабатывать нужные поверхности. График распределения давления показал место возникновения кавитации, что



так же очень важно, так как в случае с обработкой деталей, полученных селективным лазерным сплавлением, существует большое количество не сплавившихся частиц, которые сбиваются на первом этапе даже без добавления абразива в воду. Из-за этого входная область образцов будет обрабатываться быстрее, чем та, что расположена на выходе. В каких-то случаях этот факт может быть критичным, и он будет учтен в будущей модели гидроабразивной обработки.

### 3 Экспериментальные исследования

#### 3.1 Постановка задачи эмпирического исследования с детализацией основных моментов исследования.

Так как для полноценного использования изделий, полученных методами СЛС необходимо чтобы они удовлетворяли требованиям по качеству поверхностного слоя, то в первых экспериментах необходимо узнать, будет ли происходить снижение шероховатости и волнистости данных изделий. Далее необходимо рассмотреть равномерность обработки по всей площади обрабатываемых образцах, чтобы понять, можно ли использовать данный метод для более ответственных изделий. После этого необходимо оценить величину снятия припуска, чтобы понять можно ли использовать данный метод для размерной обработки поверхности, или же износ поверхности слишком неравномерен и данный метод можно использовать только для безразмерной обработки. Исходя из этого формулируем задачи эксперимента.

Задачи первого эксперимента следующие:

- 1) определить происходит ли снижение шероховатости поверхности при использовании данного метода обработки;
- 2) определение оптимальной концентрации абразива и воды;
- 3) определение зон повышенного износа.

#### 3.2 Характеристика проводимых эмпирических исследований

Для определения шероховатости образцов до и после обработки был использован автоматизированный профилометр - профилограф модели БВ-7669. Из-за особенностей поверхности изделий, полученных методами СЛС, а именно появления эффекта балинга, который заключается в расплескивании ванны расплава и последующем комковании на поверхности из-за действия сил натяжения в расплаве, измерение шероховатости при помощи данного профилометра не является точным, так как измерение ведется по определенной линии в нескольких точках на образце. В итоге

может происходить ситуация, когда в точке измерения шероховатости будет находиться много «пиков» из прилипших частиц, которые могут изменить значение шероховатости.

Помимо определения шероховатости в данном опыте было проводилось взвешивание образцов каждые 15 минут обработки, измерение происходило на лабораторных весах САРТО ГОСМ ЛВ 210-А.

### 3.3 Разработка и обоснование плана эксперимента

Для эксперимента были изготовлены цилиндрические образцы с использованием технологии СЛС. Выращивание осуществлялось на режиме: мощность лазерного излучения  $P = 275$  Вт, скорость сканирования  $S = 805$  мм/с. Для лучшего протекания теплообменных процессов, исключающих коробление образца вследствие его отрыва от платформы построения, к образцу был добавлен припуск, так называемый «жертвенный» слой [58]. После выращивания, образцы вместе с платформой построения были подвергнуты термообработке в печи для снятия остаточных напряжений по следующему режиму: нагрев  $600^{\circ}\text{C}$  время 6 часов, выдержка 2 часа и охлаждение с печью 8 часов [59]. Затем образцы были отделены от платформы построения. Далее образцы были обработаны на токарном станке для удаления «жертвенного» слоя, производилось торцевание образцов в размер  $40_{-0,1}$  мм. Схема выращивания образцов показана на рисунке 19.

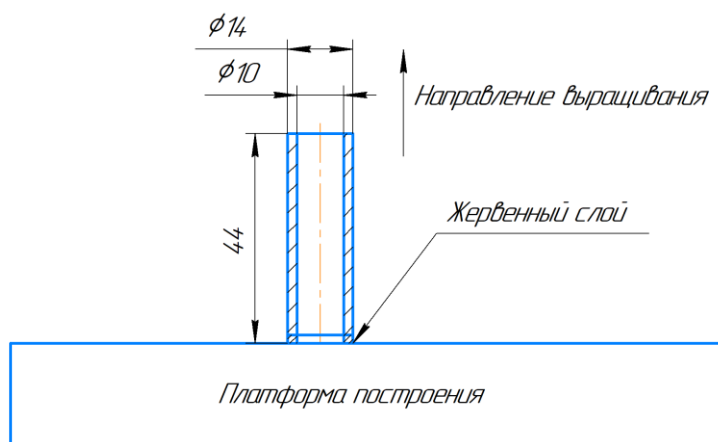


Рисунок 19 – Схема выращивания образцов

Как уже было сказано ранее в главе 2.1 был проведен предварительный эксперимент по обработки внутренней поверхности изделий, полученных методами СЛС. В том предварительном эксперименте, схема установки которого изображена на рисунке 14, образец расположен горизонтально, что как выяснилось влияет на обработку. При таком расположении образца рабочее тело под действием гравитации начинает расслаиваться – в верхней части потока располагается слой почти чистой воды, с незначительным содержанием абразива, а в нижней более концентрированный абразив и вода. Чтобы избежать неточности связанной с расслоением рабочего тела схема установки была переделана. Новая схема установки показана на рисунке 20. Устройство держателя образцов показано на рисунке 21.

Для обработки в данной лабораторной установке использовался тот же самый абразив с той же зернистостью, что и в главе 2.1. В данном опыте основной целью стояло определение оптимального соотношения абразива к воде для обработки, поэтому использовалась разная концентрация абразива. Концентрации абразива к воде определялась следующим образом: в резервуаре для рабочего тела замешивался абразив с водой в определенном процентном соотношении. Процентное содержание абразива к воде было следующим: 10% для первого образца, 15% для второго, 20% для третьего и 25% для четвертого. Контрольный пятый образец обрабатывался без абразива, за счет действия воды без примеси абразива. Это было необходимо для определения действия кавитации в отрыве от абразивного износа. Как было описано в статье [60] одновременное воздействие кавитации и абразива усиливает износ поверхности, так как микрочастицы абразива являются местом зарождения кавитации [61], а ударные волны, образующиеся во время схлопывания кавитационных пузырьков, могут ускорять абразивные частицы, и за счет дополнительной кинетической энергии частицы лучше обрабатывают поверхность [62]. Влияние совместного действия кавитации и абразива будет рассмотрено в следующих опытах.

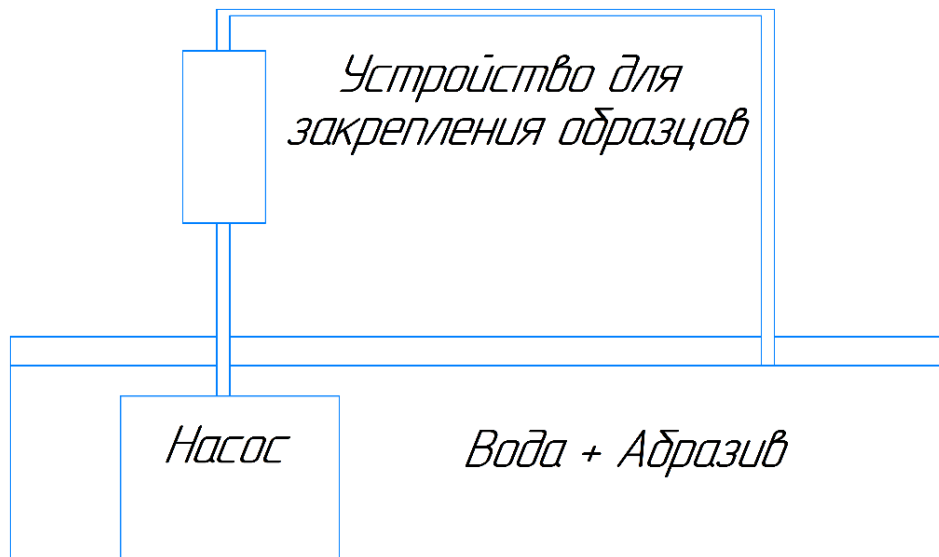


Рисунок 20 – Схема альтернативного варианта экспериментальной установки

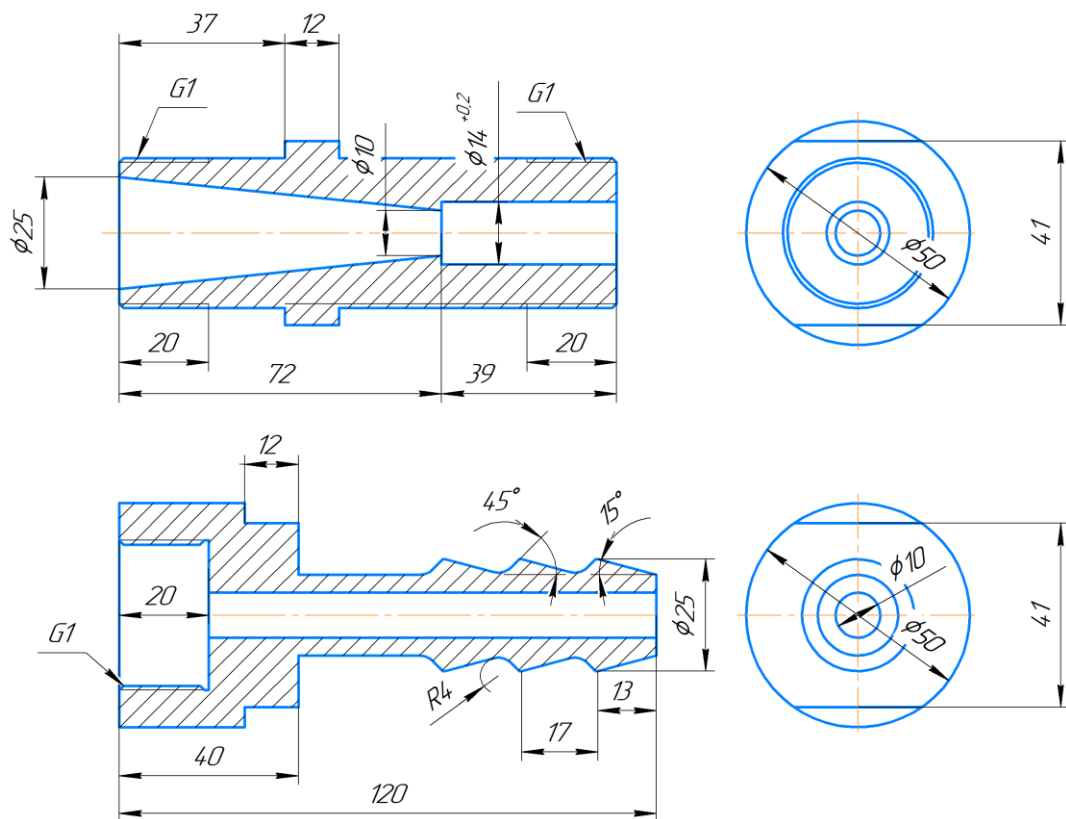


Рисунок 21 – Устройство для закрепления образцов

После взвешивания абразива и воды они смешивались в резервуаре, затем включался насос, и рабочее тело начинало проходить по контуру установки и обрабатывать образец. Как говорилось в пункте 3.2 насос останавливался каждые 15 минут, после чего держатель образцов

раскручивался и образец вынимался. Далее образец взвешивался и измерялась шероховатость его поверхности с двух концов – со стороны сопла и с противоположной стороны. Затем, после того как образец был обработан, в установку вставлялся следующий образец, и в резервуар досыпалась необходимая масса абразива, чтобы получить следующую концентрацию и действия по обработке, взвешиванию и измерению шероховатости повторялись.

### 3.4 Интерпретация результатов экспериментов

Результаты измерения массы образцов представлены в таблице 3. График изменения массы образцов показан на рисунке 22. Как видно из таблицы 3, наибольший съём материала происходил на образце 3, с концентрацией абразива к воде 20%. Изменение шероховатости образцов показано в таблица 4 и 5, в таблице 4 показано среднее значение шероховатости по всему образцу, в таблице 5 показано среднее значение шероховатости по сторонам образца. Рисунок 23 показывает изменения осредненной шероховатости образца  $R_a$  и  $R_z$  образцов во время эксперимента. Как видно по таблицам 4 и 5 образец номер 3 помимо наибольшего уменьшения массы во время обработки показывает наибольшее снижение шероховатости.

Таблица 3 – Изменение массы образцов во время обработки

№ образца	Масса, мг				Суммарная разница
	до обработки	после 15 минут	после 30 минут	после 45 минут	
1	12615,0±0,4	-	12577,7±0,4	-	37,3
2	12653,8±0,4	12621,6±0,4	12616,8±0,4	12597,9±0,4	55,9
3	12666,6±0,4	12622,0±0,4	12601,4±0,4	12596,4±0,4	70,2
4	12653,6±0,4	12610,2±0,4	12597,2±0,4	12588,3±0,4	65,3
5	12622,5±0,4	12617,3±0,4	12615,9±0,4	-	6,6

Таблица 4 – Изменение осредненной шероховатости образца во время обработки

Номер образца и концентрация абразива	Время обработки							
	без обработки		15 минут		30 минут		45 минут	
	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм
Образец 1 10%	5,60	42,30	3,62	29,38	3,29	26,20	-	-
Образец 2 15%	5,29	40,30	4,24	33,30	2,64	20,68	1,80	14,92
Образец 3 20%	5,25	40,00	2,37	19,40	1,03	10,29	1,20	10,88
Образец 4 25%	4,99	37,30	2,46	18,72	1,90	16,42	1,43	14,22
Образец 5 0%	4,78	36,80	4,26	31,50	4,12	29,98	-	-

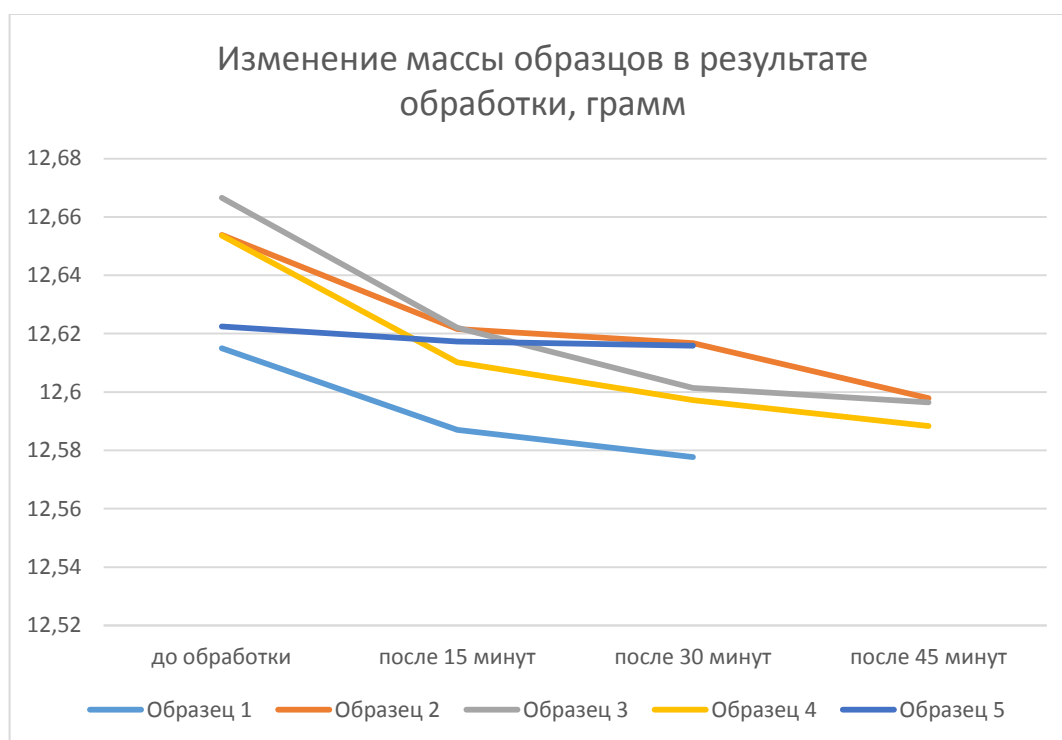


Рисунок 22 – График изменения массы образцов во время эксперимента

Таблица 5 – Изменение средней шероховатости по каждой стороне образца во время обработки

Номер образца и кон-ция абразива	15 минут				30 минут				45 минут			
	1 сторона		2 сторона		1 сторона		2 сторона		1 сторона		2 сторона	
	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм
Образец 1 10%	3,01	23,50	4,24	35,25	3,11	24,65	4,33	31,65	-	-	-	-
Образец 2 15%	4,41	31,20	4,07	35,40	2,57	20,05	2,99	23,75	1,39	12,23	2,21	17,60
Образец 3 20%	1,92	17,50	2,81	21,30	0,79	7,69	1,28	12,90	0,73	7,43	1,38	12,24
Образец 4 25%	2,12	15,63	2,80	21,80	1,79	15,23	2,00	17,60	1,41	13,00	1,46	15,43
Образец 5 0%	4,06	30,70	4,47	32,30	3,88	27,40	4,09	29,55	-	-	-	-

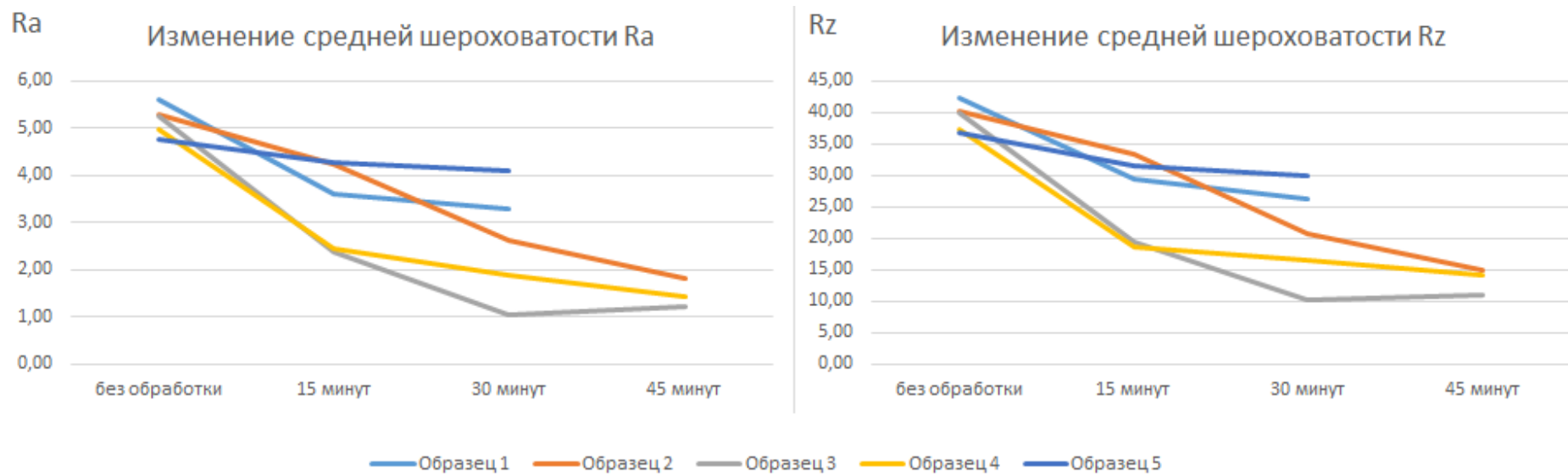


Рисунок 23 – График изменения средней по образцу шероховатости Ra и Rz образцов во время эксперимента



Как видно из выше представленных графиков и таблиц, оптимальной концентрацией в данном случае является 20% концентрация абразива к воде. Эта концентрация позволяет быстрее всего обработать поверхность образцов, но данная концентрация подходит для конкретной лабораторной установки с погружным дренажным насосом Sterwins Inox DW-3. Поэтому для другого насоса необходимо искать иную оптимальную концентрацию.

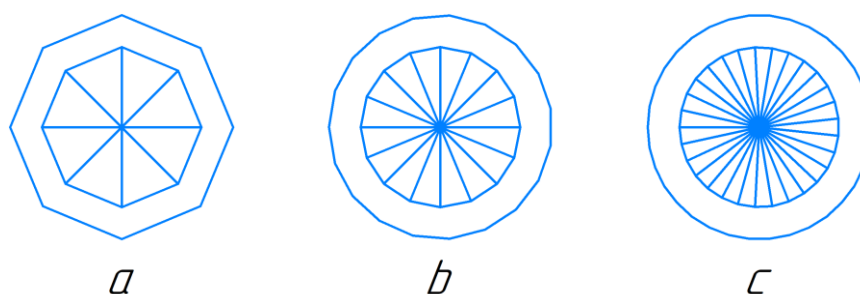
В последствии все обработанные образцы были измерены при помощи кругломера Mitutoyo Roundtest RA-1600. В результате измерения было определено, что образец 3 имеет наименьшее отклонение от цилиндричности среди всех обрабатываемых образцов, но из-за того, что образцы измерены только после обработки, и нет результатов измерения до опыта, данный эксперимент планируется провести с рассмотрением влияния на цилиндричность исходных образцов. Измерения кругломером по ГОСТ 17353—89, для замеров использовались три положения по высоте  $Z$  каждого образца, ближе к верхнему краю, в середине и ближе к нижнему краю образца. Среди 7 образцов были два образца, не подвергнутые обработке – образцы 6 и 7. Результаты измерения представлены в таблице 6. Из-за эффекта баллинга возникают пики из частиц порошка, которые были частично расплавлены во время выращивания, данный эффект по-разному проявляется на разных образцах, из-за чего значения круглости на необработанных образцах сильно отличаются, а после обработки гидроабразивом основные пики сбиваются. Пики после эффекта баллинга иногда сбиваются за счет действия кавитации, но так как данные порошинки сплавлены по-разному эффекты от обработки разные. Эффекты от обработки чистой кавитации меньше, чем от кавитации с гидроабразивом, так как во время гидроабразивно-кавитационной обработки идет ускорение зерен абразива схлопывающимися пузырьками водяного пара.

Таблица 6 – Данные по измерениям диаметров для анализа цилиндричности, в МКМ

z, мм	1	2	3	4	5	6	7
34-37	55,088	35,112	29,833	36,415	43,259	116,964	52,847
50-52	42,433	43,899	32,113	33,86	51,62	55,106	72,44
70-72	42,739	46,084	28,161	25,733	63,224	83,36	61,599

### 3.5 Гидроабразивная обработка образцов с большой величиной огранки поверхности

Для второго эксперимента было решено проверить, сможет ли гидроабразивная уменьшить огранку образцов. Поэтому для опыта были выращены образцы, с аналогичными режимами и размерами образцам из вышеописанного опыта. Единственное различие в данных образцах было в том, что данные образцы сохранялись в формате STL с другой линейной интерполяцией, что позволяло получить разное количество внутренних граней. Образцы 1,2,3 сохранялись с линейным отклонением 0,36. Количество внутренних граней было равно 8. Отклонение от круглости модели 0,36 мм. Образцы 4,5,6 сохранены линейным отклонением в 0,1, количество внутренних граней равно 16, отклонение от круглости модели равно 0,1 мм. Образцы, обрабатываемые в прошлых опытах, имели 29 граней с линейной интерполяцией в 0,03, при этом данное линейное отклонение связано не с сохранением в формате STL, а с настройками печати самой машины по выращиванию. Огранка образцов показана на рисунке 24.



а – образцы 1, 2, 3; б – образцы 4, 5, 6; в – образцы, обработанные в прошлых опытах

Рисунок 24 – Огранка образцов

После отделения от платформы построения и торцевания образцы была измерена шероховатость внутренней поверхности образцов перпендикулярно трекам выращивания. Измерение шероховатости поверхности осуществлялось на автоматизированном профилометре-профилографе модели hommel-etamic w55, помимо шероховатости была измерена круглость образцов на кругломере Mitutoyo Roundtest RA-1600 [63].

Рабочее тело, используемое в данном опыте, осталось прежним, концентрация абразива составляла 20% в массовом соотношении абразивного материала к воде, данная концентрация была в баке с рабочей жидкостью, реальная концентрация абразива, прокачиваемая насосом меньше – путем взвешивания мерного стакана с рабочим телом было обнаружено, что реальная концентрация абразива примерно равна 11,5%. В данном опыте не производилось перемешивание абразива венчиком как в прошлом опыте, так что результаты могут отличаться. Время обработки каждого образца 30 минут. В данном случае было применено горизонтальное расположение образцов, чтобы изучить влияние расслоения рабочего тела в зоне обработки. Зона обработки представлена на рисунке 25.

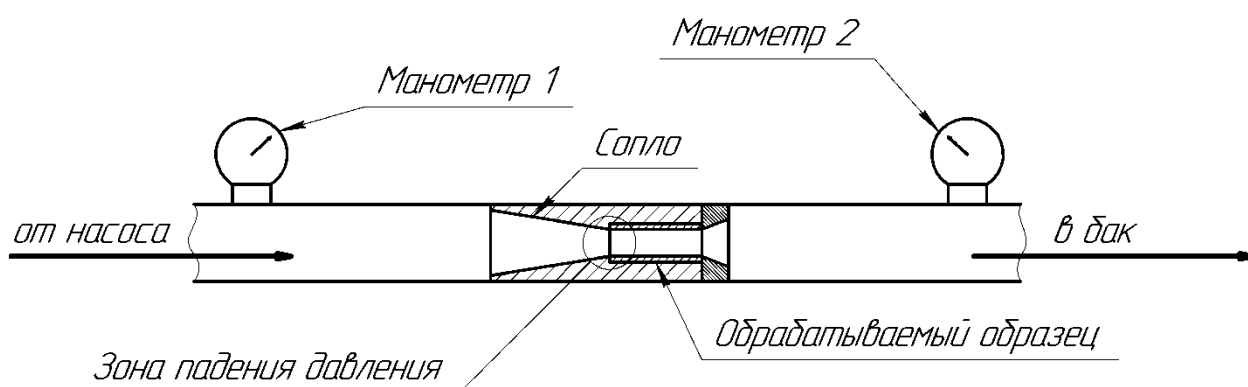


Рисунок 25 – Схема зоны обработки

Во время обработки температура воды возрастала с 20 °С до 45°С для проверки влияния кавитации на обработку. Как показало моделирование процесса гидроабразивной обработки в главе 2 падение давления происходит на участке перехода из сопла в образец, что означает, что кавитационные

пузырьки появляются как раз в этом месте. Модель была упрощенной, без моделирования процесса кавитации, поэтому есть вероятность что кавитационные пузырьки продвигались дальше по образцу. Влияние кавитационного износа будет частично затронуто в данном опыте.

### 3.6 Обработка результатов измерений

Измерения кругломером показывают, что уже на этапе выращивания образцы отличаются друг от друга по показаниям круглости (таблица 7). Из-за прилипающих частично расплавленных частиц порошка (эффект баллинга) в некоторых зонах на образце скопление таких частиц может быть больше, чем на других зонах, за счет чего распределение круглости и шероховатости по образцам будет неравномерно. Как видно на рисунке 26, некоторые углы искажены из-за эффекта баллинга.

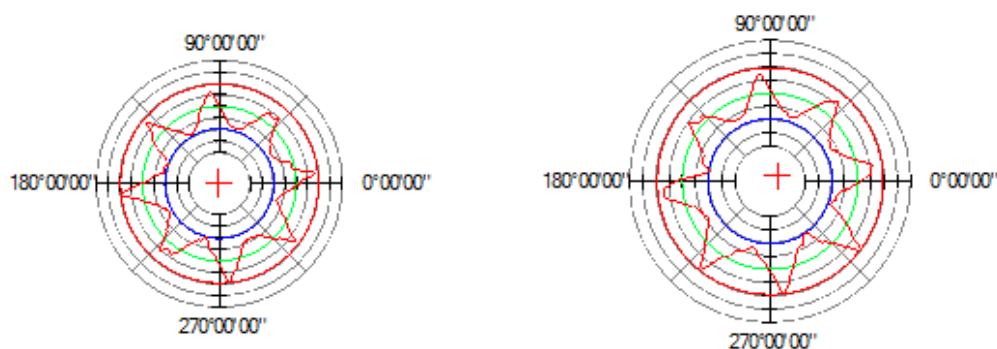


Рисунок 26 – Круглость первого образца

Таблица 7 – Данные по измерениям диаметров для анализа цилиндричности, в мкм

Z, мм	1	2	3	4	5	6
41,33	324,969	311,549	324,658	194,738	150,2	122,942
57,76	370,34	334,773	318,035	144,006	119,745	103,475
71,75	322,466	306,519	299,008	112,838	107,778	86,767
Среднее значение	339,26	317,61	313,9	150,53	125,91	104,39

Эффект балинга влияет не только на круглость образцов, но и на их шероховатость. В определенных точках появляются пики, и некоторые из них тяжело сбить с помощью гидроабразивно-кавитационной обработки. Пики с большей вероятностью появлялись в углах внутренних граней, что видно на графиках круглости. Поэтому на образцах 1-3 измерения шероховатости проходили в углах граней и на плоских поверхностях граней, чтобы увидеть снижение шероховатости в каждой из этих зон. Так же для лучшего понимания распределения зон повышенного износа образцы измерялись со стороны сопла и с противоположной стороны образца. Образцы 4-6 имели большее число граней, поэтому избирательно измерить шероховатость в углах и на гранях внутри образца было уже проблематично, поэтому были проведены несколько измерений примерно в одной зоне. И для того, чтобы рассмотреть влияние распределения снижения шероховатости по высоте образца, вследствие воздействия гравитации на поток гидроабразива и его расслоения были проведены измерения по высоте образца. Таким образом схема измерения образцов показана на рисунке 27.

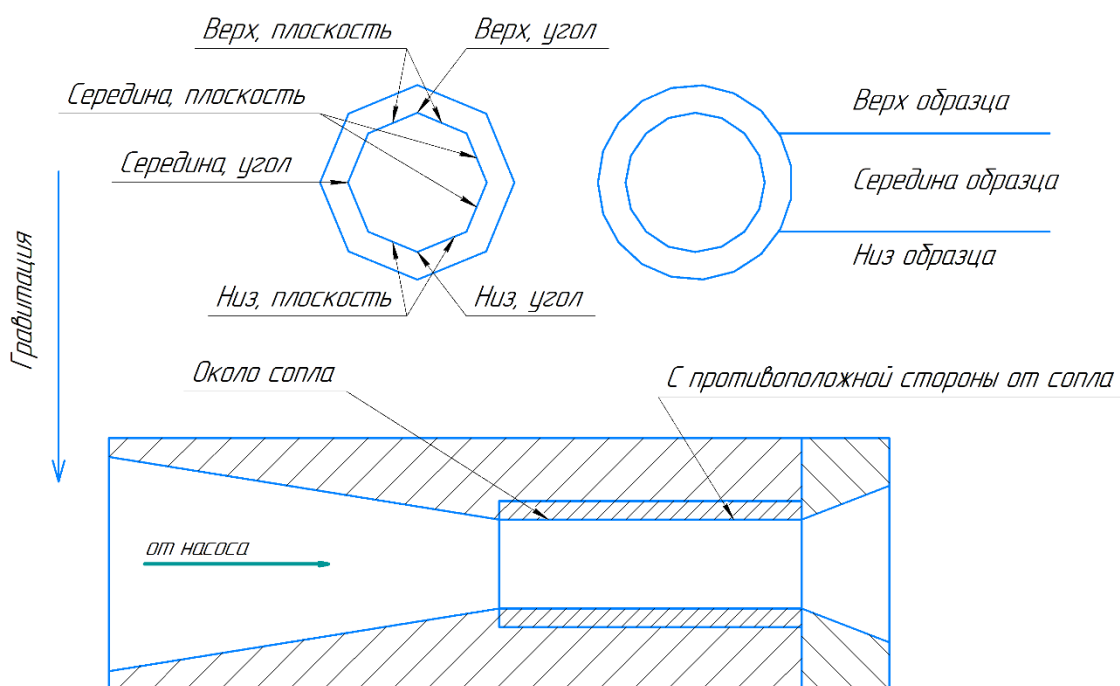


Рисунок 27 – Схема измерения образцов



увеличение шероховатости после обработки. Таки образом в очередной раз доказано, что гидроабразивная обработка может снижать шероховатость.

В таблице 8 приведено сравнение изменения шероховатости около сопла образца и с другой стороны от сопла. Для сравнения в каждом образце из среднего значения изменения шероховатости в каждой точке на сопле вычиталось значение изменения шероховатости с противоположной стороны, поэтому ячейки с отрицательным значением говорят о том, что в данной зоне около сопла обработка шла хуже, чем с противоположной стороны. По данной таблице видно, что снижение шероховатости около сопла меньше чем с противоположной стороны для 1 образца, больше для второго, и меньше для третьего.

Таблица 8 – Сравнение изменения шероховатости около сопла и с противоположной стороны образцов 1-3

	1 сопло - 1			2 сопло - 2			3 сопло - 3		
	низ	середина	верх	низ	середина	верх	низ	середина	верх
Ra	-1,91	-3,315	-1,0675	2,145	2,7425	5,3625	3,655	-0,835	-4,1725
Rz	-2,175	-13,78	-2,5025	-1,5675	13,2525	26,3475	15,8	-6,6325	-12,2475

Как уже говорилось выше в образцах 4-6 шероховатость измерялась уже без деления на углы и плоские поверхности, и минимальное значение шероховатости среди данных образцов было равно 9,58 мкм, максимальное 21,96 мкм, среднее значение – 12,09 мкм. После обработки результаты следующие: минимальное значение 5,67 мкм, максимальное – 20,73 мкм, среднее значение – 9,15 мкм. Разница между средними значениями до и после составляет 2,94 мкм, что меньше чем для образцов 1-3. Случаи, когда шероховатость растет после обработки, так же присутствуют и их причины аналогичны таковым для образцов 4-6. Сравнение профилей шероховатости до и после обработки показано на рисунке 29. В таблице 9 приведено сравнение изменения шероховатости около сопла образца и с другой стороны от сопла аналогичное сравнению в таблице 3. Как видно из данной таблицы снижение шероховатости на сопле меньше чем с противоположной стороны

образца. Поэтому для образцов 1, 3, 4 – 6 износ поверхности с противоположной стороны от сопла идет сильнее, чем на около сопла. Для образца 2 ситуация противоположная.

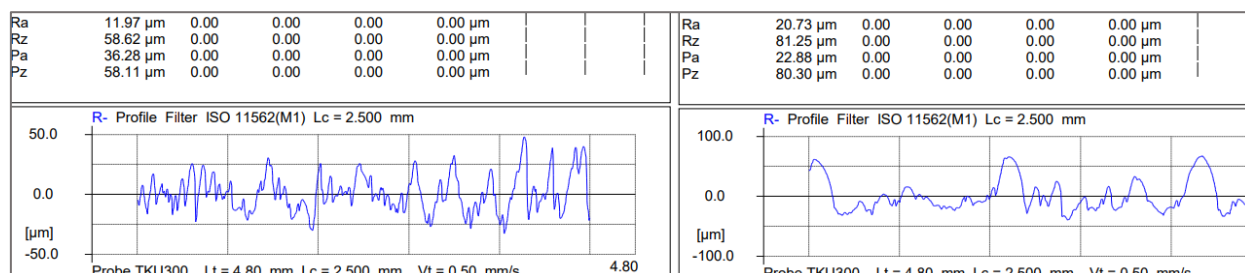


Рисунок 29 – Сравнение профилей шероховатости до и после обработки около сопла в 5 образце

Таблица 9 – Сравнение изменения шероховатости около сопла и с противоположной стороны образцов 4-6

	4 сопло - 4			5 сопло - 5			6 сопло - 6		
	низ	середина	верх	низ	середина	верх	низ	середина	верх
Ra	-1,36	-3,84	0,86	-7,21	1,95	-1,56	-3,59	-4,48	1,00
Rz	-4,64	-10,83	17,29	-31,11	7,65	-9,67	-13,85	-14,68	-1,26

#### Анализ воздействия кавитации на обработку образцов

Во время обработки измерялось давление в системе до обрабатываемых образцов, после зоны обработки. С увеличением температуры рабочей жидкости растет давление насыщенного водяного пара, и как итог увеличивается количество кавитационных пузырьков. Из-за появления кавитации и ее усиления в зоне обработки росло гидравлическое сопротивление, за счет чего давление на манометре 2 падало. Так как для измерения использовались манометры с шкалой от 0 до 0,1 МПа, давление в некоторых случаях падало до нуля, но, если использовать манометры с отрицательной шкалой давление на манометре 2 будет падать ниже нуля. Именно поэтому в таблице 3 в столбце с разницей давлений стоит знак больше. Давление на манометрах незначительно изменялось, во время кавитации происходили скачки давления из-за схлопывания и появления новых кавитационных пузырей. В таблицу 10 введены средние значения давления.



Таблица 10 – Давление и температура во время эксперимента

Образец	Манометр 1 (МПа)	Манометр 2 (МПа)	P1-P2 (МПа)	Температура (°C)
1	0,063	0,024	0,039	20±3
2	0,078	0,039	0,039	27±3
3	0,072	0,017	0,055	38±3
4	0,07	0	>0,07	45±3
5	0,074	0	>0,074	42±3
6	0,075	0	>0,075	47±3

По данным из таблицы 10 можно сказать что во время обработки образцов 4-6 в зоне обработки точно присутствовала кавитация, возможно и во время обработки образцов 1-3 кавитационные пузырьки присутствовали, но в меньшем количестве. Для оценки влияния кавитации на обработку необходимо сравнить изменение шероховатости на образцах с кавитацией и без нее. Образец 1 возьмем за базовый для сравнения, так температура на нем минимальна и поэтому кавитация имеет наименьшее влияние на обработку. Сравнение приведено в таблице 11:

Таблица 11 – Сравнение изменения шероховатости относительно первого образца

2 сопло - 1 сопло						2 - 1					
низ		середина		вверх		низ		середина		вверх	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
3,47	9,58	2,43	3,47	4,41	24,63	-0,58	8,97	-3,63	-23,57	-2,02	-4,22
3 сопло - 1 сопло						3 - 1					
низ		середина		вверх		низ		середина		вверх	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
5,50	25,61	6,74	24,13	-2,77	-2,83	-0,07	7,64	4,26	16,98	0,34	6,91
4 сопло - 1 сопло						4 - 1					
низ		середина		вверх		низ		середина		вверх	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
2,58	13,01	2,30	7,38	-1,17	3,66	2,03	15,48	2,82	4,44	-3,10	-16,14
5 сопло - 1 сопло						5 - 1					
низ		середина		вверх		низ		середина		вверх	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
-0,86	-0,09	6,40	23,66	-0,61	-3,04	4,44	28,84	1,14	2,23	-0,12	4,13
6 сопло - 1 сопло						6 - 1					
низ		середина		вверх		низ		середина		вверх	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
2,50	13,3	0,07	-3,13	-0,36	3,15	4,18	25,0	1,23	-2,23	-2,43	1,91

Отрицательные ячейки говорят о том, что в них образец в данной точке образец 1 обрабатывался лучше, чем сравниваемый образец, что говорит о том, что кавитация не влияет на обработку, ячейки с положительным значением говорят об обратном. Как результат, можно сказать, что образцы 3-6 обрабатывались лучше, чем образец 1, что может говорить о положительном влиянии кавитации на обработку поверхности.

После обработки гидроабразивом в течении 30 минут образцы повторно были измерены кругломером Mitutoyo Roundtest RA-1600. Данные измерения приведены в таблице 12. Сравнение с измерениями до обработки представлено в таблице 13. Так же в данной таблице показано отклонение от круглости исходной STL модели.

Таблица 12 – Данные по измерениям диаметров для анализа цилиндричности образцов после обработки в течении 30 минут, в мкм

Z, мм	1	2	3	4	5	6
41,33	315,916	316,021	317,526	95,237	98,035	144,013
57,76	306,076	318,066	308,53	98,433	106,823	77,487
71,75	304,329	301,636	309,434	88,294	85,804	85,006
Среднее значение	308,773	311,908	311,83	93,988	96,887	102,169

Таблица 13 – Сравнение цилиндричности образцов до и после обработки

Среднее значение	Номер образцов					
	1	2	3	4	5	6
До	339,2583	317,6137	313,9003	150,5273	125,9077	104,3947
После	308,7737	311,9077	311,83	93,988	96,88733	102,1687
Разница	30,48467	5,706	2,070333	56,53933	29,02033	2,226
Значение в CAD модели	360	360	360	100	100	100

Выводы по данному опыту:

- во время подготовки моделей к печати необходимо сохранять их в лучшем возможном качестве, не меньше чем позволяет печатать сама

машина по выращиванию. В нашем случае линейная интерполяция должна быть не меньше 0,03;

- внутренние углы имеют большую шероховатость поверхности, чем плоские внутренние грани, но скорость их обработки гидроабразивным методом одинакова;

- отдельные пики, возникшие из-за эффекта баллинга могут потребовать значительного увеличения времени на обработку (нет полной уверенности, что это поможет);

- кавитация может ускорять процесс снижения шероховатости образцов;

- ближе к соплу у образцов отсутствует повышенный износ, как предполагалась ранее. Возможно кавитационные пузырьки двигаются по длине образца или же зоной зарождения кавитации является переход в трубу после образцов. Это могло бы объяснить отсутствие повышенного износа в зоне, которая при упрощенном моделировании показывала наименьшее давление;

- в среднем показатели шероховатости  $R_a$  уменьшаются на 3-3,5 мкм за первые 30 минут обработки. При этом, как показали прошлые опыты дальнейшее увеличение времени обработки еще на 30 минут не приведет к дополнительному снижению шероховатости еще на 3-3,5 мкм;

- нижняя поверхность образцов 3-6 обрабатывалась незначительно лучше, чем остальные поверхности, так что говорить о сильном влиянии разделения гидроабразива на слои пока нельзя. Куда более важно изменение треков частиц после углового поворота потока.

### 3.7 Регрессионная модель обработки поверхности гидроабразивным методом

Данные для анализа взяты из первого опыта по гидроабразивную обработку. Результаты измерения введены в программу STATISTICA, после

чего проведена корреляция между всеми переменными. Результаты корреляции показаны на рисунке 30.

Correlations (Spreadsheet1)					
Marked correlations are significant at p < N=18 (Casewise deletion of missing data)					
Variable	Концентрация,%	t, мин	Ra	Rz	
Концентрация,%	1,00	0,19	-0,46	-0,44	
t, мин	0,19	1,00	-0,86	-0,86	
Ra	-0,46	-0,86	1,00	1,00	
Rz	-0,44	-0,86	1,00	1,00	

Рисунок 30 – Корреляции между переменными

Аппроксимация данных эксперимента методом наименьших квадратов

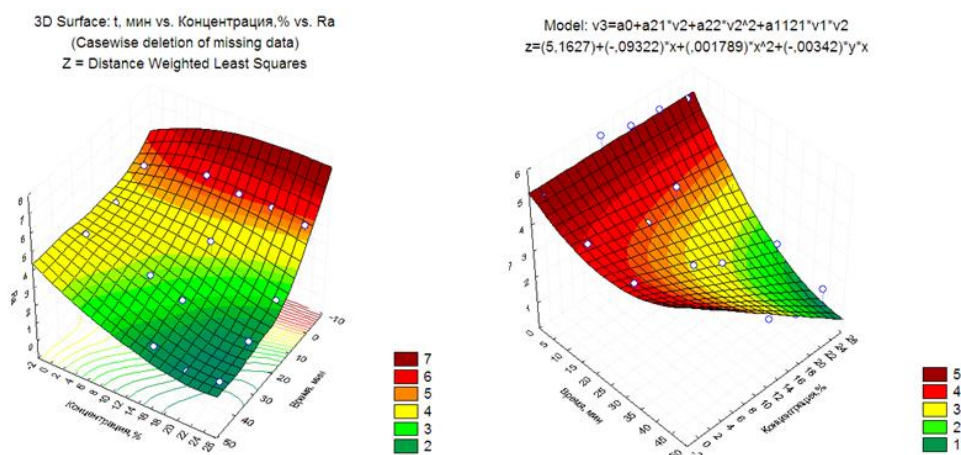


Рисунок 31 - Аппроксимация данных эксперимента методом наименьших квадратов и регрессионная модель обработки, построенная по ЭТИМ ДАННЫМ

Параметры модели показаны на рисунке 32. Как видно из рисунка, модель показывает высокую степень достоверности всех коэффициентов  $p < 0,05$ , коэффициент детерминации  $R = 0,95$ .

```

Model is: v3=a0+a21*v2+a22*v2^2+a1121*v1*v2
Dependent variable: Ra                Independent variables: 2
Loss function: least squares
Final value: 3,90322801
Proportion of variance accounted for: ,90220672    R = ,94984563
    
```

Model is: v3=a0+a21*v2+a22*v2^2+a1121*v1*v2 (Spreadsheet1)						
Dep. Var. : Ra						
Level of confidence: 95.0% ( alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 14	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	5,162700	0,230546	22,39341	0,000000	4,668229	5,657171
a21	-0,093218	0,025677	-3,63036	0,002729	-0,148290	-0,038146
a22	0,001789	0,000603	2,96634	0,010210	0,000495	0,003082
a1121	-0,003424	0,000722	-4,74367	0,000314	-0,004972	-0,001876

Рисунок 32 – Параметры регрессионной модели

Наблюдаемые и предсказанные по модели значения шероховатости показаны в левой части рисунка 33. Правая часть рисунка 33 демонстрирует проверку на нормальный закон распределения несвязок. По данному рисунку видно, что данная модель имеет высокую степень соответствия.

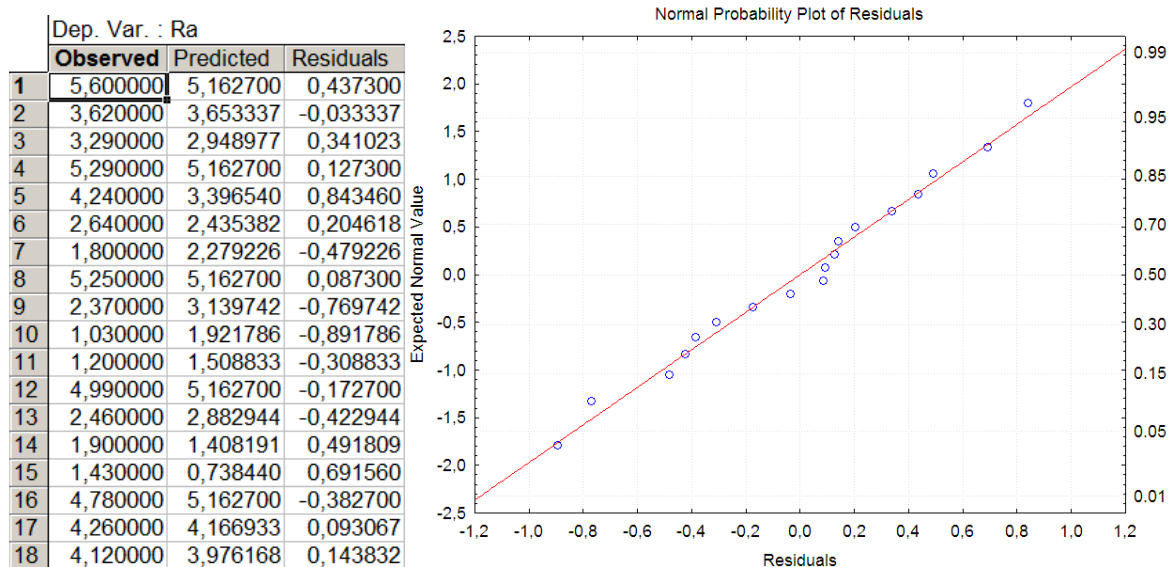


Рисунок 33 – Сравнение предсказанных и реальных значений шероховатости

По полученной модели можно сказать что показатель шероховатости Ra во время проведения обработки меняется по следующей формуле 2 (показания в мкм):

$$Ra = 5,1627 - 0,09322t + 0,001789t^2 - 0,00342tc \quad (2)$$

где t – время обработки образца, с – концентрация абразива.

4 Прикладные исследования для конкретного объекта с использованием разработанных моделей и методов

4.1 Разработка практических рекомендаций по результатам исследований

В результате проведения опытов были составлены следующие практические рекомендации:

- во избежание неравномерного съёма материала необходимо закреплять образец вертикально, дабы избежать «расслоения» рабочего тела из-за влияния гравитации. Влияние незначительное, в той схеме установки, которая была сделана нами, но в случае если образец будет закреплён горизонтально, на большом расстоянии от поворота трубы, то там может происходить неравномерный износ;

- на входе в образец скорость больше и из-за изменения диаметра сечения может возникать явление кавитации. Уменьшить влияние кавитации можно путем частично закрытия кранов до и после образца. Исчезновение кавитации можно обнаружить по исчезновению существенного перепада давления между двумя манометрами, так как кавитация увеличивает гидравлическое сопротивление;

- в случае с изделиями, с внутренними поверхностями, имеющими форму отличную от цилиндра, желательно по возможности выровнять давление и скорость по обрабатываемой поверхности изделия. В некоторых случаях этого можно достичь, используя напечатанные на FDM принтере пластиковые вставки, в случае же если поверхность сложная можно рассчитать величину снимаемого материала и нарастить припуск в нужных местах, но этом случае речь о точной размерной обработки идти не может. Места наибольшего износа можно увидеть при моделировании процесса обработки в ANSYS;

- обработка внутренних углов затруднительна, так как в углах скапливается большое количество частично расплавленных частиц. Поэтому желательно уходить от огранки внутренней поверхности;

- необходим контроль за температурой в системе, так как во время работы насос нагревает воду и во время долгой обработки может увеличиваться количество кавитационных пузырьков;

- периодически необходимо менять абразив, так как острые грани абразивных зерен сбиваются, и он становится менее эффективен;

- выдерживание определенной концентрации абразива в баке не дает гарантии сохранения концентрации в зоне обработки. В зависимости от интенсивности перемешивания, концентрация прокачиваемого абразива может быть разной, что может привести к разным результатам, при, казалось бы, одинаковой концентрации абразива в баке.

## 5 Выводы по этапам исследования

### 5.1 Экономическое сравнение методов обработки

Как уже рассматривалось выше, метод гидроабразивной прокачки можно использовать для модификации поверхностного слоя изделий, полученных методами аддитивного производства и не только. Если в случае с обработкой открытых поверхностей использование данного метода обработки менее целесообразно, чем, например, методов обработки свободным абразивом, то в случае с обработкой внутренних поверхностей, особенно длинных внутренних каналов сложной формы другие методы обработки применить нельзя. Гидроабразивную обработку за рубежом иногда называют Eco Pickled Surface (бескислотным травлением) [65] и поэтому альтернативой гидроабразивной обработке будет химическое полирование (кислотное травление) внутренней поверхности. Помимо гидроабразивной прокачки может использоваться АЭО, но в них используется меньший объем рабочего тела и его необходимо чаще менять. Это относится больше к установкам с двумя поршнями / мембранами, в некоторых других установках, работающих по данному принципу экструзия может производиться одним поршнем со свободным выходом рабочего тела из обрабатываемой детали. Возможно данные установки эффективнее обрабатывают поверхности, за счет использования более мощного оборудования, позволяющего получить большую скорость и давления, но вместе с ростом эффективности растет и стоимость обработки.

Для химического полирования используются кислоты разной степени опасности для человека, поэтому во время химического полирования необходимо использовать защитное снаряжение, вытяжной шкаф, специальную химическую посуду. Самыми часто используемыми кислотами для полирования являются азотная кислота ( $\text{HNO}_3$ ), серная ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и плавиковая кислота ( $\text{HF}$ ). Классы опасности данных кислот по ГОСТ 12.01.007 следующие: для азотной кислоты класс опасности 3 – умеренно



опасные вещества; для серной кислоты класс опасности 2 – высоко опасные вещества и для плавиковой кислоты класс опасности 1 – чрезвычайно опасные вещества, ПДК которых составляет менее 0,1. Доза менее 15 мг/кг какого-либо вещества, относящегося к этому классу токсичности, при попадании в желудок, будет достаточной для достижения летального исхода. При попадании на кожу всего 100 или менее миллиграммов данного вещества приводит к летальному исходу. Таким образом для использования химического полирования необходимо соблюдать требования безопасности, несоблюдение которых может повлечь за собой смерть. Помимо повышенных требований к безопасности увеличиваются требования к рабочему персоналу. Для химических операций требуется чтобы у травильщика был 3-4 разряд (согласно профстандарту 40.098), а это повышает требуемую заработную плату для рабочего, плюс необходимы доплаты за вредные условия труда.

В отличие от химического полирования, гидроабразивная обработка использует рабочие тела, не представляющие угрозы для человека. Рабочий абразив можно даже утилизировать как бытовые отходы, так как он не наносит такого вреда окружающей среде, как кислоты, используемые для химического полирования. Класс опасности гидроабразива – 4, малоопасные вещества. В настоящий момент лабораторная гидроабразивная установка собрана из дюймовых сантехнических труб и фитингов, для сборки установки подходит слесарь 1-2 разряда. В дальнейшем планируется упрощение схемы гидроабразивной установки, с использованием быстро разборных конструкций. Таким образом, организовать работу по модификации поверхности с использованием гидроабразивной обработки легче, чем в случае с химическим полированием. Исходя из вышеперечисленного можно провести экономическое сравнение двух видов обработки.

В качестве исследуемых образцов использовались изделия из титанового сплава Вt6, который можно полировать составом, включающим в

себя растворы азотной и плавиковой кислот в воде, с массовой долей каждой из кислот в 10% [66]. Так как используется плавиковая кислота, класс опасности данной смеси будет равен 1, поэтому необходимо использовать вытяжной шкаф, защитные перчатки, маску, очки и химический халат. Минимальные цены на данное оборудование [67] представлены в таблице 14:

Таблица 14 - Используемое оборудование для химического полирования

Покупное изделие	Цена	Срок службы
Защитные очки	400 руб	6 месяцев
Хим. фартук	400 руб	6 месяцев
Перчатки	300 руб	6 месяцев
Респиратор	1250 руб	не более года
Сменные фильтры	1000 руб	-
Фильтрующий противогаз марки В (взамен очков и респиратора)	2200 руб	не более года
Сменный патрон противогаза	-	время защитного действия 30-50 минут
Химическая посуда из полиэтилена/фторпласта	от 500 рублей	-
Пирометр	от 2500 руб	более 3 лет
Вытяжной шкаф	от 30 000 руб [68]	более 6 лет
Лабораторные весы	от 15 000 руб	более 10 лет
Итого	более 50 350 руб	

Сроки службы взяты примерно, либо из нормативных документов. Например, для защитных очков используется ГОСТ Р 12.4.013-97, который устанавливает срок службы на уплотнители очков в 6 месяцев (аналогично для перчаток, респираторов, противогазов). Для сменного патрона противогаза время службы указано для больших концентраций вредных веществ в воздухе. Стоимость закупки на начало эксплуатации больше 50

тысяч рублей. При использовании линейного способа амортизации оборудования цена часа обработки на оборудовании будет начинаться от 5,355 руб.

Помимо стоимости оборудования необходимо учесть стоимость расходных элементов – химических кислот. Плавиковая кислота концентрацией 40% стоит от 150 рублей [69] за килограмм при оптовой закупке. 56% азотная кислота стоит от 56 рублей [70] за килограмм. Помимо стоимости самих кислот необходимо учитывать стоимость их утилизации и пассивации [71]. Нейтрализацию азотной кислоты можно проводить в лабораторных условиях путем добавления щелочей или щелочных солей слабых кислот, например, пищевой содой, после чего нейтрализованный раствор с нейтральным рН можно сливать в канализацию. При этом при нейтрализации могут выделяться газы - продукты реакции и много тепла, поэтому необходимо использовать ванную со льдом. Плавиковую кислоту утилизировать самостоятельно нельзя, так как получаемые после нейтрализации фториды токсичны и подлежат утилизации.

Для метода гидроабразивной установки необходимо следующее оборудование [72] таблица 15:

Таблица 15 – Используемое оборудование для гидроабразивной обработки

Покупное изделие	Цена	Срок службы
Насос дренажный	4300 руб	более 3 лет
Термометр	540 руб	более 10 лет
Манометр 2 х	1500 руб	18 месяцев
Бак оцинкованный	600 руб	более 5 лет
Трубы, фитинги, переходники	более 3500 руб	более 5 лет
Весы лабораторные	от 15 000 руб	более 10 лет
Итого	более 25 440 руб	

Расходными материалами для гидроабразивной обработки будет абразивное зерно. В данном случае использовался карбид кремния, цена за который находится в диапазоне начиная от 60 и до 250 рублей за килограмм абразива, в зависимости от его фракции. В отличие от химических растворов абразив используется неоднократно, время до потери у зерен острых граней довольно велико. При использовании линейного способа амортизации оборудования цена часа обработки на оборудовании будет больше 2,479 руб.

Сравнивать стоимость часа каждого вида обработки довольно трудно, так как многое зависит от параметров обрабатываемого изделия. В некоторых случаях, в изделиях с каналами, имеющими повороты, методу химического полирования требуется доработка – необходимо встряхивать изделие, переворачивать его, либо производить прокачку химического реактива по обрабатываемому каналу, так как в некоторых участках может происходить скопление газов – продуктов реакции, из-за чего обработка будет менее равномерной. Воздушные карманы, состоящие из водорода (при полировке титана только HF, либо же при полировке других металлов другими кислотами), оксида азота (NO<sub>2</sub> в случае использования раствора 10% / 10%), либо же из других газов-продуктов реакции могут закрывать большие объемы в случаях с большими объёмами обработки. Для примера можно разобрать случай с охлаждаемыми пресс формами, для которых иногда используют SLM, чтобы получить сложную внутреннюю сеть охлаждающих каналов. Чаще всего их форма такова, что при любом случае их расположения в химической посуде, будут оставаться области, заполненные газом. Примеры формы, конформных каналов охлаждения пресс форм показаны на рисунке 34.

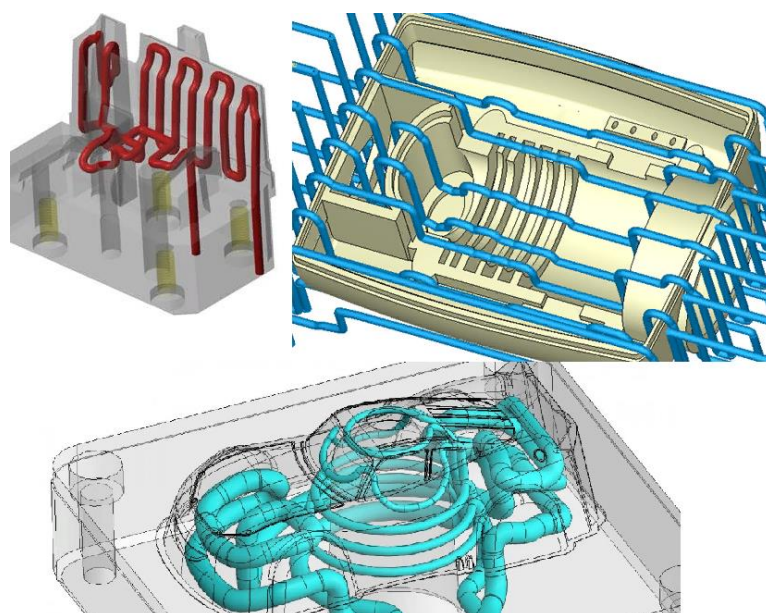


Рисунок 34 – Конформные каналы охлаждения пресс форм

Для примера расчета возьмем маленький участок каналов охлаждения, с диаметром 7 мм. Данный участок показан на рисунке 35. Возьмем данные из статьи [73] по химическому полированию сплава ВТ6. Химическая формула (3) обработки:

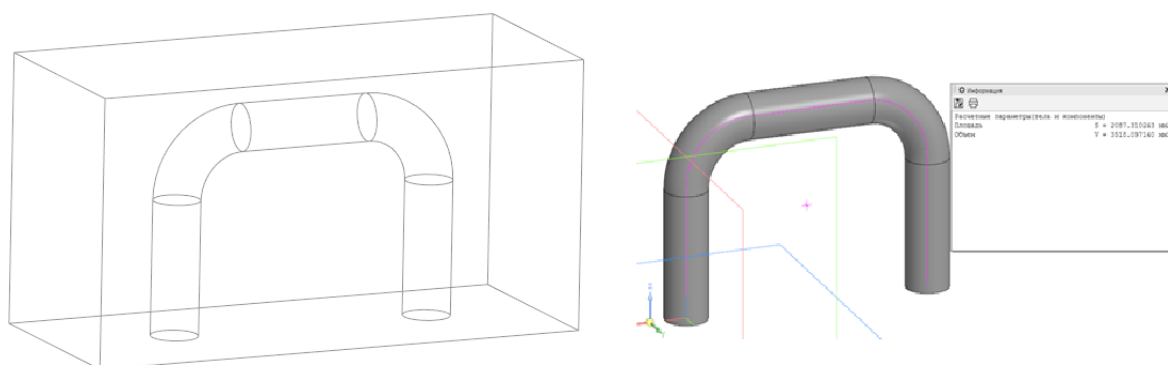
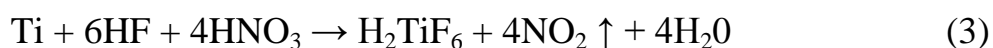


Рисунок 35 – Участок канала охлаждения

Найдем количество оксида азота, выделяющееся с одного квадратного сантиметра поверхности обрабатываемого титанового изделия. Скорость травления в [73] была примерно 0,008 мм/мин, тогда объем снимаемой поверхности с одного квадратного сантиметра будет равен 0,8 мм<sup>3</sup>/мин, что

равно 0,0036 граммам снимаемого титана в минуту. Найдем количество вещества обрабатываемого титана по формуле 4:

$$\nu(Ti) = \frac{m}{\mu} = \frac{0,0036(\text{г})}{47,9 \left( \frac{\text{г}}{\text{моль}} \right)} = 7,5 \times 10^{-5} \text{ моль} \quad (4)$$

Исходя из формулы 3 по отношению молярных масс титана и оксида азота можно найти объем выделяемого оксида азота по формуле 5 и 6:

$$\nu(NO_2) = 4 \times \nu(Ti) = 2,99 \times 10^{-4} \text{ моль} \quad (5)$$

$$V_{\text{теор}}(NO_2) = \nu(Ti) \times 22,4 \left( \frac{\text{л}}{\text{моль}} \right) = 6,7 \times 10^{-3} \text{ л} = 6700 \text{ мм}^3 \quad (6)$$

Участок, показанный на рисунке 35 имеет объем 3518 мм<sup>3</sup>, что означает, что данный участок заполнится газом менее чем за минуту обработки, так как площадь данного участка 2087 см<sup>3</sup>. Таким образом, можно сделать вывод, что для качественной и равномерной обработки поверхности методом химического полирования некоторые изделия придется постоянно переворачивать (кантовать), либо осуществлять прокачку химического реактива через обрабатываемую поверхность. В случае переворота изделия вручную нагрузка на рабочего увеличивается, так как ему придется не только контролировать температуру раствора, но еще и встряхивать все обрабатываемые изделия, что затрудняет использование данной технологии при обработке нескольких изделий разом. Для прокачки реактива необходимо использовать химически стойкие насосы, или насосы, не контактирующие с реагентом, такие как перистальтические насосы. Цена на такие насосы начинается от 5,7 тыс. рублей [74]. Такие насосы могут прокачивать до 260 мл жидкости в минуту, чего может быть недостаточно

при больших размерах обрабатываемого изделия. В таких случаях придется использовать большей мощности, которые могут стоить намного дороже (более 40 тысяч рублей за версию насоса, прокачивающую 1,3 л жидкости в минуту).

Метод гидроабразивной обработки получается дешевле на старте, и более выгоден для единичного и мелкосерийного производства. Помимо высокой цены на оборудование, метод химического полирования требует большей квалификации рабочего персонала, разряд травильщика должен быть 3 или 4, что влечет за собой увеличение трат на заработную плату. При всем сравнении стоимости оборудования, химическое полирование позволяет получить за 15-30 минут результаты, которые получаются за 45 минут с использованием метода гидроабразивной обработки, но при этом метод гидроабразивной обработки более автоматизирован, и нуждается в меньшем контроле со стороны человека, во время химического полирования может резко повыситься температура, из-за чего скорость реакции увеличится – в одном из опытов [75] температура на одном из образцов поднялась выше чем необходимо, из-за чего травление проходило в разы более интенсивно и в итоге образец с повышенной температурой потерял 0,3 мм металла с каждой стороны, когда как образец с «правильной» температурой раствора за тоже самое время потерял 0,105 мм с каждой стороны. Такой разброс по величине съема материала делает невозможной размерную обработку.

Для более точного сравнения цены обработки придется использовать следующие допущения:

1) так как во время гидроабразивной обработке использовались цилиндрические образцы, измерения шероховатости велись только поперек трека сканирования. Таким образом будут сравниваться значения шероховатости, измеренные поперек трека сканирования в обоих случаях;

2) из-за цилиндрической форму образцов влияние эффекта баллинга выше, так как ванна расплава разбрызгивалась на соседние участки

внутренней поверхности образца, из-за чего появлялись большие пики, которые тяжело сбивались. Поэтому в некоторых случаях шероховатость цилиндрических образцов выше и снижается она хуже;

3) плоские образцы проще обрабатываются в химическом растворе, так как отведение продуктов реакции происходит значительно проще. В случае с обработкой цилиндрических образцов скорость реакции будет ниже, при вертикальном расположении образцов, при расположении в горизонтальном положении будут зоны, обработанные хуже, так как одна из поверхностей будет покрываться пузырьками газа-продукта реакции.

Опорные значения шероховатости образцов и времени их обработки при химическом полировании будут взяты из следующих опытов:

1) последовательная обработка в двух растворах  $\text{HF} + \text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF} + \text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$  по 15 минут в каждом [75], в данном опыте шероховатости изменялась следующим образом: до обработки  $R_a = 5,64$  мкм,  $R_a = 5,43$  мкм,  $R_a = 5,44$  мкм. После обработки  $R_a = 0,41$  мкм,  $R_a = 0,46$  мкм,  $R_a = 0,43$  мкм;

2) последовательная термообработка, удаление окалины и альфированного слоя с помощью раствора едкого натра, с последующей полировкой в двух растворах 5%  $\text{HF}$  + 10%  $\text{HNO}_3$  в течении 7 минут, 10%  $\text{HF}$  + 10%  $\text{HNO}_3$  15 минут, в результате чего шероховатость поперек трека изменилась со значения  $R_a = 5,19$  мкм, до 3,89 мкм после термообработки, после удаления окалины шероховатость была равной 2,83 мкм, и после химического полирования она стала равной 0,55 мкм [76].

Как уже говорилось выше, для данных видов обработки требуются рабочие разных разрядов. Помимо того, что для химического полирования требуется травильщик 3-4 разрядов, необходимо выплаты за вредные условия труда. Согласно ст. 92 Трудового кодекса РФ для рабочих, занятых на вредных производствах требуется сокращение рабочих часов в неделю до 36



часов. Помимо этого, по статье 117 Трудового кодекса РФ такому рабочему дополнительно увеличивают оплачиваемый отпуск не менее чем на 7 дней. Кроме того, по первой части статьи 146 и первой части 147, необходимо увеличивать оплату труда рабочего не менее чем на 4% от оклада. Возьмем максимальный коэффициент равным 2. Количество разрядов у травильщика равно 5, у слесаря максимальный разряд равен 6. В 2020 году среднее число рабочих часов в месяц по 40 часовой рабочей недели составляет 165 часов, по 36 часовой 148 часов. Минимальная оплата труда в месяц с 2020 года составляет 12 130 руб., возьмем за минимальный оклад сумму в 15 тыс. руб., исходя из чего и используя равномерную разницу между коэффициентами различных разрядов получаем, что слесарь 1 разряда будет получать 15 000 руб., 2 разряда 17500 тыс. руб. Травильщик 3 разряда будет получать 24 тыс. руб., 4 разряда 27 тыс. руб. без учета выплат за вредность. Таким образом составим таблицу стоимостей часа обработки каждым методом.

Таблица 16 – Сравнение стоимостей обработки методов ОПС

	Стоимость	
	химическое полирование	гидроабразивная обработка
Амортизация оборудования в час (линейным способом)	более 5,355 руб./час	более 2,479 руб./час
Стоимость рабочего тела 1	более 4,7 руб./см <sup>2</sup> (HF 10%/HNO <sub>3</sub> 10%)*	24** руб./час
Стоимость рабочего тела 2	1,85 руб./см <sup>2</sup> (NaOH 600 г/л)	-
Стоимость рабочего тела 3	0,451 руб. / см <sup>2</sup> (80 г/л NH <sub>4</sub> F·HF 200 г/л NH <sub>2</sub> OH·HCl) [77]	-
Часовая ставка рабочего	169 – 190*** руб./час	91 – 106 руб./час
Итоговая минимальная цена	174,6	117,5

\* Для выполнения минимальных требований по соотношению площади поверхности и рабочего реактива. Для реального применения придется использовать такое количество раствора, которое будет покрывать всю поверхность обрабатываемого изделия в выбранной химической посуде;

\*\* Принимаем, что сбивание граней абразива произойдет через 10 часов после начала обработки;

\*\*\* С учетом выплаты за вредность, но без учета отпуска.

Несмотря на то, что стоимость химического полирования выше, эффективность данного метода (в случае с опытом из статьи [75]), так как за 30 минут обработки достигается шероховатость поверхности, которая достигается методом гидроабразивной обработки за 50-60 минут. В случае с опытом, в котором проводилась термообработка, времени требуется значительно больше, так как одна термообработка будет длиться 24 часа, после чего необходимо снять слой окалины в течении 2 часов, используя раствор едкого натра, после чего последовательно провести травление в двух растворах по 7 и 15 минут [76]. Количество последовательных операций слишком велико, что увеличивает трудозатраты. При этом нельзя не отметить, что в отдельных случаях может происходить намного более качественная обработка, со значением шероховатости после обработки  $Ra = 0,15$  мкм [76], но данные случаи не всегда повторимы. При сравнении обработки конкретных изделий, а именно цилиндрических образцов, площадь внутренней поверхности которых равна ровно  $10 \text{ см}^2$ , получаем что достижение одинаковых уровней шероховатости примерно равных  $Ra = 0,5$  мкм будет стоить более 117,5 рублей для гидроабразивной обработки, и 138,5 рублей для химической обработки (раствор 10/10, с последующим травлением в растворе кислого фтористого аммония и солянокислого гидроксилamina). Если использовать раствор едкого натра, тогда стоимость обработки (без учета термообработки, с полировкой одного цилиндра) вырастет до 508 рублей. Таким образом, метод гидроабразивной обработки оказался дешевле, чем метод химической полировки при полировании единичного образца. Одновременная обработка нескольких образцов и в химическом полировании и в гидроабразивной обработке будет намного дешевле, но при этом одновременная обработка нескольких образцов пока

что еще не была изучена мной, а во время обработки химическими методами усложняется контроль за протеканием реакции.

## 5.2 Выводы по проделанному исследованию

1) проведен аналитический обзор и систематизированы данные по типовым дефектам поверхности, получаемых при выращивании деталей методом СЛС. Показано, что в труднодоступных для инструмента местах шероховатость поверхности для процесса СЛС превышает величину  $Rz = 50$ , что требует направленного воздействия подвижной средой (абразивной, химической или иной) для её снижения;

2) разработана и изготовлена конструкция экспериментального стенда для гидроабразивной обработки внутренних полостей деталей, имеющих значительную шероховатостью поверхности;

3) разработана конечно-элементная модель гидроабразивной обработки в ПО ANSYS, проведен численный эксперимент с её использованием, который выявил явление кавитации при обработке внутренних полостей, подтвержденное затем экспериментально;

4) проведена серия натурных экспериментов, по результатам которой получена регрессионная зависимость качества поверхностного слоя по параметрам шероховатости от управляющих воздействий (перепада давления, концентрации абразива, времени экспозиции) методом регрессионного анализа;

5) по результатам регрессионного анализа определена оптимальная концентрация абразива в воде для экспериментальной установки;

6) даны практические рекомендации по организации участка гидроабразивной обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод гидроабразивной обработки подходит для обработки внутренних каналов и полостей, изделий, полученных методами аддитивного производства, при единичном и мелкосерийном производстве, за счет низкой цены на комплектующие и низкой стоимости обработки. Альтернативные методы требуют более дорогого оборудования и в случае с химической и электрохимической обработкой, защитного снаряжения с вытяжными системами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аддитивные технологии // Снип1. [2019—2019]. Дата обновления: 20.08.2018. URL: <http://snip1.ru/additivnye-texnologii/>
2. Как Чак Халл изобрел 3D-печать // habr. [2019—2019]. Дата обновления: 20.08.2018. URL: <https://habr.com/ru/company/smileexpo/blog/420713/> (дата обращения: 04.03.2019).
3. STL (формат файла) // Википедия. [2019—2019]. Дата обновления: 04.03.2019. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=98446728> (дата обращения: 04.03.2019).
4. Burns Marshall, Automated Manufacturing, Improving Productivity in Manufacturing, PTR Prentice Hall, 1993
5. Kochan Detlef, Solid Freeform Manufacturing; Advanced Rapid Prototyping, Elsevier, 1993
6. Технология селективного лазерного плавления (SLM) // IQB technologies [2019—2019] URL: <https://blog.iqb.ru/slm-technology/>
7. Технологии лазерного аддитивного производства металлических изделий // habr. URL: <https://habr.com/ru/post/218271/>
8. 3D-принтеры по металлу, технологии и стоимость // TOP3DSHOP. URL: <https://top3dshop.ru/blog/metal-3d-printing-techs-and-cost.html>
9. Двигатель LEAP-1B компании CFM прошел двойную сертификацию EASA / FAA // Safran [2019-2019] Дата обновления: 05/04/2016 [https://www.safran.ru/media/20160504\\_dvigatel-leap-1b-kompanii-cfm-proshel-dvoynuyu-sertifikaciyu-easa/faa](https://www.safran.ru/media/20160504_dvigatel-leap-1b-kompanii-cfm-proshel-dvoynuyu-sertifikaciyu-easa/faa) (дата обращения: 04.03.2019).
10. Первый полет Boeing 737 MAX с двигателями LEAP-1B // 3D Pulse [2016]. URL: <http://www.3dpulse.ru/news/promyshlennost/pervyi-polet-boeing-737-max-s-dvigatelyami-leap-1b-detali-kotoryh-napechatany-na-3d-printere/> (дата обращения: 04.03.2019).
11. C. Cui, B. Hu, L. Zhao, S. Liu. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development Mater. Des. 32 (3) (2011), pp. 1684-1691.

12. F. Bartolomeu, S. Faria, O. Carvalho, E. Pinto, N. Alves, F.S. Silva, G. Miranda, Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by selective laser melting, *Mater. Sci. Eng. A* 663 (2016) 181–192
13. N. Tolochko, S. Mozzharov, I. Yadroitsev, Balling processes during selective laser treatment of powders, *Rapid Prototyp. J.* 10 (2004) 78–87.
14. Гончаров Е.С., Балякин А.В. Технологическая наследственность во время процесса селективного лазерного сплавления // Молодежный Вестник УГАТУ. Уфа. 2019. Вып. 21. № 2. С. 38-42
15. Назаров А. П. Области применения технологии селективного лазерного спекания // Материалы всероссийской молодежной конференции «Инновационные технологии в машиностроении». Москва. 2011. Октябрь. С. 252-259.
16. W. Xu, M. Brandt, S. Sun, J. Elambasseril, Q. Liu, K. Latham, K. Xiad and M. Qiana. Additive manufacturing of strong and ductile Ti–6Al–4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. // *Acta Materialia* 85 (2015) 74–84 с.
17. J. Han, J. Yang, H. Yu, J. Yin, M. Gao, Z. Wang, X. Zeng. Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density // *Rapid Prototyp. J.*, 23 (2017), pp. 217-226.
18. G. Kasperovich, J. Haubrich, J. Gussone, G. Requena. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting // *Mater. Des.*, 105 (2016), pp. 160-170.
19. H. Attar, M. Calin, L.C. Zhang, S. Scudino, J. Eckert. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium // *Mater. Sci. Eng. A*, 593 (2014), pp. 170-177.
20. H. Attar, M. Bönisch, M. Calin, L.C. Zhang, S. Scudino, J. Eckert. Selective laser melting of in situ titanium-titanium boride composites: processing, microstructure and mechanical properties // *Acta Mater.*, 76 (2014), pp. 13-22.
21. R. Cunningham, S.P. Narra, C. Montgomery, J. Beuth, A.D. Rollett. Synchrotron-based x-ray microtomography characterization of the effect of

processing variables on porosity formation in laser power-bed additive manufacturing of Ti-6Al-4V // *Jom* (2016), pp. 2-7.

22. H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G.D. Janaki Ram, T. Starr, B. Stucker. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting // *Mater. Des.*, 86 (2015), pp. 545-554.

23. B. Song, S. Dong, B. Zhang, H. Liao, C. Coddet. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V // *Mater. Des.*, 35 (2012), pp. 120-125.

24. D. Gu, Y.C. Hagedorn, W. Meiners, G. Meng, R.J.S. Batista, K. Wissenbach, R. Poprawe. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium // *Acta Mater.*, 60 (2012), pp. 3849-3860.

25. L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J Van Humbeeck, J.P. Kruth. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V // *Acta Mater.*, 58 (2010), pp. 3303-3312.

26. H. Gong, K. Rafi, T. Starr, B. Stucker. The Effects of Processing Parameters on Defect Regularity in Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting (2013).

27. G. Kasperovich, J. Haubrich, J. Gussone, G. Requena. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting // *Mater. Des.*, 105 (2016), pp. 160-170.

28. C. Qiu, C. Panwisawas, M. Ward, H.C. Basoalto, J.W. Brooks, M.M. Attallah. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting // *Acta Mater.*, 96 (2015), pp. 72-79.

29. H. Gong, K. Rafi, N.V. Karthik, T. Starr, B. Stucker. Defect morphology in Ti-6Al-4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting // 24rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—an Additive Manufacturing Conference, Austin, TX, Aug (Austin, Tx) (2013), pp. 12-14.

30. X. Zhao, S. Li, M. Zhang, Y. Liu, T.B. Sercombe, S. Wang, Y. Hao, R. Yang, L.E. Murr. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-

- 6Al– 4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting // *Jmade*, 95 (2016), pp. 21-31.
31. B. Song, S. Dong, B. Zhang, H. Liao, C. Coddet. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V // *Mater. Des.*, 35 (2012), pp. 120-125.
32. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин/ А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. – ISBN 5-217-00060-0
33. Импульсно-плазменная модификация поверхности деталей и инструмента. Комплекс оборудования импульсно-плазменной модификации поверхности деталей и инструмента / Ю. Тюрин, О. В. Колисниченко – 2020, DOI: 10.13140/RG.2.2.29223.29601
34. Способ плазменного упрочнения внутренней цилиндрической поверхности [Текст]: заявка 2017129030 Рос. Федерация МПК С23С 16/34 С23С 16/513 Писарев А.А., Мозгрин Д. В., Борисюк Ю. В., Орешникова Н. М., Степанова Т. В. Заявитель Государственная корпорация по атомной энергии "РОСАТОМ", Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ") заявл. 2017.08.14, опубл. 2018.11.01.
35. Павлюкова Н.Л. Повышение эффективности отделочной обработки художественных изделий из медных сплавов свободными абразивами/ Н.Л. Павлюкова, В.А. Полетаев, М.Ю. Волкова; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 100 с.
36. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. — М: Машиностроение, 1974 -134с.
37. Бабичев А.П. Проблемы вибрационной технологии// Вестник ДГТУ. - 2001. - Т.1. №2(8) - С.5 - 2!



38. Бабичев А.П., Зеленцов Л.К., Самодумский Ю.М. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей. — Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1981 - 160с.
39. Тамаркин В.О. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Дис. докт. техн. наук. — Ростов-на-Дону, 1995. — 285с.
40. Трилисский, В. О. Объемная центробежно-ротационная обработка деталей / В. О. Трилисский [и др.]; НИИмаш. — М., 1983. — 53 с.
41. Тищенко Э.Э. Влияние основных технологических параметров отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки на качество поверхности обработанных деталей // Известия ВГТУ, 2007. 122-125 с.
42. Аракелян А.А., Агасарян Р.Р. Сокращение ручного труда с помощью струйно-абразивной обработки: Учебн. пособие. — М.: Машиностроение, 1987 -32с.
43. Струйно-абразивное устройство [Текст]: заявка номер 4122094, В24С 5/04 СССР Мещеряков А.В., Шманев В.А., Шулепов А.П., Второв Е.А. Заявитель КуАИ им. акад. С.П. Королева, опубл. 23.07.1989.
44. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин // - Киев: Техника, 1989. -177 с.
45. Щиголев П.В. Электролитическое и химическое полирование металлов. - М.: Академия наук СССР, 1959. - 189 с.
46. Электрохимическое и химическое полирование: Теория и практика. Влияние на свойства металлов / Грилихес С.Я. - М.: Машиностроение, 1987 - 231с.
47. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник/ Под ред. А.Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. - 391с.
48. Виноградов В.Н. и др. Абразивное изнашивание/ Виноградов В.Н., Сорокин Т.М., Колокольников М.Г. — М.: Машиностроение, 1990. - 224с.
49. Отделочно-зачистная обработка деталей [Текст] / Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. — М., Машиностроение, 1979, 216 с.

50. Pat. 3521412 US, ISC B24B 1/00, 19/00. Method of honing by extruding/ R.W. McCarty; 05.11.1965; 21.07.1970.
51. Pat. US2006205329 US, Method and apparatus for abrading the region of intersection between a branch outlet and a passageway in a body / L.J. Rhoades (US); 14.09.2006; 27.02.2007.
52. Pat. 105043 SG ISC B24C 3/00, 3/02, 3/04,7/00, 9/00. Abrasive flow machining apparatus, method and system / Y.M. Wan; 20.02.2009; 27.08.2009.
53. Cherian, J. Advances in abrasive flow machining: an overview / J. Cherian, J. Missac // International Journal Metallurgical & Materials Science and Engineering (IJMMSE). – 2014. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 15–24.
54. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. - Л.: Машиностроение, 1975. - 128с.
55. Тараненко (Павлюкова) Н.Л. Применение магнитно-абразивной обработки при финишной отделке деталей сложной формы // Состояние и перспективы развития электротехнологии (11 Бенардосовские чтения). Тезисы докладов межд. научн.-практ. конф. — Иваново: ИГЭУ, 2003. — С.146
56. Тульчинский Л.Н., Наливка Г.Д. Магнитные характеристики магнитно-абразивных материалов // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытаний. - Киев: Институт проблем материаловедения АН УССР, 1980. -С. 98-104.
57. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent: методическое пособие, А.М. Зиганшин Казань, 2013.
58. Балякин А.В., Гончаров Е.С. Гидроабразивная обработка титановых образцов ВТ6, полученных методом СЛС // Автоматизированное проектирование в машиностроении 2019 112-116.
59. Авиационные материалы [Текст]: справочник: в 9 т. заслуж. деятель науки и техники РСФСР, член корр. АН СССР А. Т. Туманова; авиац. индустриальный СССР. Всесоюзный. Науч.-исслед. ин-т авиац. материальный. - 6-е изд., перераб. и добавить. - Москва: ОНТИ, 1973. - 22 см.

Том. 5: сплавы магния и титана / научный. эд. д-ра техн. наук МБ Альтман, д-р техн. наук С. Г. Глазунов, д-р техн. наук С. И. Кишкина. - 1973. - 583 С.

60. K.L.Tan, S.H.Yeo. Surface modification of additive manufactured components by ultrasonic cavitation abrasive finishing // *Wear* volumes 378–379, 15 May 2017, Pages 90-95.

61. C. Haosheng, W. Jiadao, C. Darong. Cavitation damages on solid surfaces in suspensions containing spherical and irregular microparticles // *Wear*, 266 (1–2) (2009), pp. 345-348

62. J.R. Laguna-Camacho, R. Lewis, M. Vite-Torres, J.V. Méndez-Méndez. A study of cavitation erosion on engineering materials // *Wear*, 301 (1–2) (2013), pp. 467-476

63. Балякин А.В., Балякин Д.М., Гончаров Е.С. Погрешность формы на этапе моделирования, изготовления и постобработки изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления // *Автоматизированное проектирование в машиностроении* 2020, 38-41с.

64. A. Balyakin, E. Zhuchenko, E. Nosova, Study of heat treatment impact on the surface defects appearance on samples obtained by selective laser melting of Ti-6Al-4V during chemical polishing, *Materials Today: Proceedings* Vol.19, Part 5, 2019, Pages 2307-2311 2019, pp 2307-2311.

65. Гидроабразивная очистка - «EPS» – Eco Pickled Surface (эко-травление поверхностей) // ООО Гидроабразив URL: <https://www.gidroabraziv.com/>

66. A. Balaykin, A. Shvetcov, E. Zhuchenko. Chemical polishing of samples obtained by selective laser melting from titanium alloy Ti6Al4V MATEC Web of Conferences 224(1), 2018.

67. Респираторы // Все инструменты точка ру. URL: [https://samara.vseinstrumenti.ru/spetsodezhda/siz/organov-dyhaniya/respiratory/page2/?utm\\_referrer=https%3a%2f%2fsamara.vseinstrumenti.ru%2fspetsodezhda%2fsiz%2forganov-dyhaniya%2frespiratory%2f#goods](https://samara.vseinstrumenti.ru/spetsodezhda/siz/organov-dyhaniya/respiratory/page2/?utm_referrer=https%3a%2f%2fsamara.vseinstrumenti.ru%2fspetsodezhda%2fsiz%2forganov-dyhaniya%2frespiratory%2f#goods) (дата обращения: 21.05.2020).

68. Шкафы вытяжные // Simple-pro URL: [https://simple-pro.com/catalog/vytyazhnye\\_shkafy/?utm\\_source=yandex&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=30441722&utm\\_content=4849154978\\_none&utm\\_term=вытяжной%20шкаф%20для%20химической%20лаборатории&roistat=direct7\\_search\\_4849154978\\_вытяжной%20шкаф%20для%20химической%20лаборатории&roistat\\_referrer=none&roistat\\_pos=premium\\_1&\\_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTszMDQ0MTcyMjs0ODQ5MTU0OTc4O3lhbmRleC5ydTpwcmVtaXVt&yclid=3097849747322735134](https://simple-pro.com/catalog/vytyazhnye_shkafy/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=30441722&utm_content=4849154978_none&utm_term=вытяжной%20шкаф%20для%20химической%20лаборатории&roistat=direct7_search_4849154978_вытяжной%20шкаф%20для%20химической%20лаборатории&roistat_referrer=none&roistat_pos=premium_1&_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTszMDQ0MTcyMjs0ODQ5MTU0OTc4O3lhbmRleC5ydTpwcmVtaXVt&yclid=3097849747322735134) (дата обращения: 21.05.2020).
69. Кислота плавиковая // Пульс цен. URL: <https://samara.pulscen.ru/price/040401-kislota-ftoristovodorodnaja> (дата обращения: 29.05.2020).
70. Кислота азотная в Самаре // tiu.ru URL: <https://samara.tiu.ru/Kislota-azotnaya.html> (дата обращения: 29.05.2020).
71. Как правильно утилизировать кислоту и щелочь // Экологический портал. URL: <https://ecologia.life/othody/opasnye/utilizatsiya-kislot-i-shhelochej.html> (дата обращения: 21.05.2020).
72. Фитинги и трубы // Леруа Мерлен. URL: <https://leroymerlin.ru/> (дата обращения: 21.05.2020).
73. Балякин А.В. Жученко Е.И. Скуратов Д.Л. Химическое полирование образцов из сплава ВТ6, полученных методом лазерного сплавления порошковых материалов / А.В. Балякин, Е.И. Жученко, Д.Л. Скуратов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 12-14 сентября 2018г. - Самара: Изд-во «Самарский университет», 2018 – С. 174-176.
74. Камор КСР PRO-2 24V лабораторная интеллектуальная перистальтическая Регулируемая Насосная машина с мини головкой насоса для эксперимента // Алиэкспресс. URL: <https://clck.ru/PLuY3>.
75. Гончаров Е.С., Балякин А.В., Жученко Е.И. The effect of preprocessing on surface quality in the chemical polishing of parts from titanium alloy produced by SLM // Materials today: proceedings. — 2019. — Т. 19. Вып. 5. — С. 2291-2294.

76. Скуратов Д.Л., Балякин А.В., Жученко Е.И., Швецов А.Н. Химическое полирование изделий из титанового сплава ВТ6, изготовленных методом селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-1. С. 61-69.

77. Кузьмичева Е.В. Химическое полирование титана ВТ1-0 с возможностью корректировки рабочего раствора: дисс. кан. тех. наук: 5.17.03., утверждена 21.05.2012, защищена 7.06.2012, Иваново, 2012, - 153с.