

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Шевчук Евгений Олегович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ИНСТРУМЕНТОМ С КЕРАМИЧЕСКИМ ВОРСОМ И ОХЛАЖДЕНИЕМ
ВОЗДУШНО-ЭМУЛЬСИОННОЙ СМЕСЬЮ**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Куликов Михаил Юрьевич

Москва– 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА I. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1. Качество деталей, полученных посредством аддитивных технологий.....	12
1.2. Полимерные композиционные материалы.....	13
1.3. Изготавливаемые детали и требования к ним.....	17
1.3.1 Детали БПЛА.....	17
1.3.2 Общемашиностроительные детали.....	20
1.4. Обеспечение качества деталей из полимерных композиционных материалов	22
1.5. Анализ технологии обработки деталей из ПКМ.....	26
1.5.1 Особенности механической обработки деталей из ПКМ	26
1.5.2 Инструменты для абразивной обработки деталей из ПКМ.....	30
1.5.3 Гибкий абразивный инструмент	31
1.6. Охлаждение деталей из ПКМ при механической обработке	34
1.7. Цели и задачи исследования	36
ГЛАВА II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	37
2.1 Технологические параметры и факторы обработки деталей из ПКМ.....	37
2.2 Оборудование, используемое при механической обработке.....	37
2.3 Измерительные приборы.....	39
2.4 Выводы по главе.....	43

ГЛАВА III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ ИНСТРУМЕНТОМ С ГИБКИМ КЕРАМИЧЕСКИМ ВОРСОМ.....	44
3.1 Модель процесса обработки деталей из ПКМ типа «Черный ящик».....	44
3.2 Схема взаимодействия гибких керамических волокон с обрабатываемой поверхностью.....	45
3.3 Разработка математической модели теплообмена между инструментом с керамическим ворсом и обрабатываемой поверхностью	47
3.3.1 Схема расчётной области с принятыми во внимание факторами	47
3.3.2 Определение зависимости теплового потока и равновесной температуры от скорости обработки детали из ПКМ	52
3.3.3 Определение необходимой скорости подачи воздушно-эмульсионной смеси	55
3.3.4 Аналитическое решение уравнения теплопроводности	57
3.3.5 Определение необходимого объёма поступающей смеси для соблюдения теплового режима детали	62
3.4 Имитационная модель распределения потоков воздушно-эмульсионной смеси внутри инструмента	64
3.5 Выводы по главе.....	67
ГЛАВА IV ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТА И СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ.....	68
4.1 Влияние площади поперечного сечения единичного керамического волокна и его вылета из корпуса инструмента на шероховатость обработанной поверхности	68
4.2 Влияние способа охлаждения на параметры точности детали, получаемую шероховатость и влагопоглощение материала	74
4.2.1 Обработка без охлаждения	74

4.2.2	Исследование влияния направленных потоков эмульсионной смеси	77
4.2.3	Исследование влияния ионизирующего воздуха	81
4.2.4	Исследование влияния распыления воздушно-эмульсионной смеси на шероховатость обработанной поверхности.....	84
4.2.5	Снижение влагопоглощения за счёт изменения состава воздушно-эмульсионной смеси.....	87
4.3	Исследование влияния режимов резания и износа инструмента на шероховатость обработанной поверхности.....	91
4.4	Выводы по главе.....	96
ГЛАВА V. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ИНСТРУМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ		
		98
5.1	Описание конструкции и принципа работы спроектированного инструмента	98
5.2	Технологические рекомендации.....	100
5.2.1	При необходимости обеспечения стабильной производительности обработки	100
5.2.2	При необходимости обеспечения минимальной шероховатости	101
5.2.3	При необходимости обеспечения снижения эффекта минимального влагопоглощения.....	102
5.2.4	Общие рекомендации по обработке деталей из ПКМ	102
5.3	Апробация разработанной технологии	104
5.3.1	Производственные испытания.....	104
5.3.2	Внедрение технологии обработки.....	105
5.3.3	Расчёт экономического эффекта	105
5.4	Выводы по главе.....	112

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	115
Приложение 1. Патент на полезную модель	132
Приложение 2. Акт производственных испытаний.....	133
Приложение 3. Акт внедрения технологии обработки	135
Приложение 4. Анализ поэлементного состава керамического волокна.....	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Ранее изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ) получали методом литья под давлением в специальных формах. Именно от качества самой матрицы зависела итоговая поверхность деталей. Поэтому вопрос дальнейшей механической обработки не рассматривался.

На сегодняшний день развитие аддитивных технологий привело к тому, что узлы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (носовой обтекатель, крыло, вертикальная законцовка крыла, цельноповоротное оперение), а также множество деталей из общего машиностроения (тела вращения, с элементами зубчатого зацепления, корпусные детали, технологическая оснастка), всё чаще изготавливаются с помощью послойного выращивания. К таким изделиям предъявляются высокие требования к геометрическим размерам и аэродинамическим характеристикам, а также к получаемой шероховатости поверхности

Малая себестоимость и высокие физико-механические характеристики позволили широко применять полимерные композиционные материалы в качестве основного.

Из-за сложного профиля изделия при послойном выращивании возникают дефекты на поверхностном слое, а шероховатость поверхности находится в пределах 1,2-1,8 мкм, что может повлиять на требуемые характеристики. Для устранения указанных недостатков применяют последующую абразивную обработку поверхности. В процессе выращивания изделия может закладываться определённый припуск на ответственные поверхности, поэтому последующая механическая обработка необходима для окончательной доработки для получения требуемого размера и взаимного расположения элементов детали.

В операции «шлифование» применение абразивных кругов на жёсткой основе приводит к разрушению обрабатываемого слоя ввиду высокой нагрузки на

поверхность в процессе обработки, причём сложный профиль обработать не представляется возможным из-за особенностей инструментов. Поэтому, чаще всего применяются эластичные ленты или шкурки. Перспективным способом обработки является использование инструмента с гибким керамическим ворсом с абразивными включениями, который обладает явными преимуществами по сравнению с металлическим и полимерным ворсом по характеру (механизму) съема материала. Из-за способности материалов из ПКМ к влагопоглощению имеются ограничения на использование специальных-охлаждающих технологических сред (СОТС). Полный отказ от охлаждения приводит к повышению температуры в зоне обработки, как в следствие, к перегреву поверхности.

Поэтому исследование обработки деталей из ПКМ инструментом с гибким ворсом и определение его конструктивных параметров, а также разработка и применение рационального способа охлаждения с учетом влагопоглощающего свойства обрабатываемого материала, необходимо для обеспечения стабильных результатов обработки, а именно соответствия шероховатости, геометрической формы и размеров готового изделия предъявляемым требованиям. Следовательно, данное исследование является актуальным для дальнейшего развития страны.

Степень разработанности темы.

Диссертационная работа основывается на результатах теоретических и экспериментальных исследований механической обработки деталей из ПКМ В.И. Дрожжина, И.Г. Баскакова, М.Ф. Семко, Д.И. Токаева, В.И. Курдюкова, В.А. Вавилина, К.А. Пасечника, А.Ю. Пушкарева, Н.А. Амельченко, Н.В. Козулько, А.Е. Мешкаса, В.И. Баранчикова и другие.

Цель исследования.

Совершенствование обработки деталей из полимерных композиционных материалов за счёт использования инструмента с гибким керамическим ворсом и разработки эффективного способа охлаждения, позволяющих обеспечить заданную шероховатость и производительность обработки, минимальное влагопоглощение и отклонение размеров и формы изделия.

Задачи исследования.

1. Разработать наиболее эффективный способ охлаждения при обработке деталей из ПКМ инструментом с гибким керамическим ворсом, позволяющий обеспечить низкую температуру в зоне резания при минимальном влагопоглощении обрабатываемого материала.
2. Выявить закономерности теплообмена между инструментом с гибким керамическим ворсом и обрабатываемой деталью из ПКМ
3. Разработать имитационную модель распределения потоков охлаждающей смеси при обработке деталей из полимерных композиционных материалов инструментом с гибким керамическим ворсом.
4. Разработать инструмент с рациональным расположением блоков гибкого керамического ворса.
5. Выявить закономерности влияния конструкторско-технологических факторов: площади поперечного сечения единичного керамического волокна, скорости обработки, натяга и подачи инструмента с гибким керамическим ворсом, на результаты обработки деталей из полимерных композиционных материалов.
6. Разработать технологические рекомендации по обработке деталей из полимерных композиционных материалов инструментом с гибким керамическим ворсом

Объект исследования.

Инструмент с гибким керамическим ворсом и технология его применения для обработки деталей из ПКМ.

Предмет исследования.

Выявление рациональных параметров инструмента с гибким ворсом и эффективных условий охлаждения зоны обработки из условия обеспечения заданной шероховатости и производительности обработки, минимальных влагопоглощения и отклонений размеров и формы изделия.

Научная новизна работы:

1. Выявлены рациональные значения факторов (площадь поперечного сечения единичного керамического волокна, скорость обработки, подача

инструмента), направленные на совершенствование процесса абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов гибким инструментом – щёткой с радиально-диаметральным расположением блоков ворса из керамических волокон и организацией внутренней подачи аэрозоля воздушно-эмульсионной смеси, что позволяет обеспечить заданную производительность, шероховатость и точность обработки (п. 3, 7 паспорта научной специальности 2.5.5).

2. Установлены закономерности теплообмена между инструментом с керамическим ворсом и деталью в процессе ее обработки, учитывающие фактический радиус рабочей части инструмента; плотность воздушно-эмульсионной смеси на обрабатываемой поверхности, а также необходимое время его замещения из условия теплового режима обработки (п.2 паспорта научной специальности 2.5.5).

3. Разработана имитационная модель распределения потоков воздушно-эмульсионной смеси по каналам корпуса инструмента в процессе обработки, посредством которой определены рациональные параметры инструмента и целесообразное соотношение ВОДУХ:ЭМУЛЬСИЯ, обеспечивающие эффективное охлаждение детали и минимальное влагопоглощение, оказывающее определяющее влияние на точность и шероховатость обрабатываемой поверхности (п. 2, 4 научной специальности 2.5.5).

Практическая значимость работы:

1. Технологические рекомендации по составу воздушно-эмульсионной смеси, которые обеспечивают требуемую шероховатость и предотвращают влагопоглощение в зависимости от требований к обрабатываемой детали;

2. Конструкция инструмента с радиально-диаметральным расположением блоков ворса из керамических волокон, и организацией подачи аэрозоля воздушно-эмульсионной смеси в зону резания с помощью внутреннего канала с отверстиями;

3. Технологические рекомендации по режимам абразивной обработки деталей из ПКМ инструментом с гибким керамическим ворсом в среде обработки воздушно-эмульсионной смеси

4. Результаты апробации инструмента и технологии его применения на промышленных предприятиях.

Методология и методы исследования.

В исследованиях использованы основные положения теории резания и технологии машиностроения.

Итоговая обработка теоретических и экспериментальных данных производилась с использованием современной компьютерной техники и пакетов программ SolidWorks Flow Simulation, Mathcad, КОМПАС-3D.

Научные результаты, выносимые на защиту:

- обоснование целесообразности предложенной технологии обработки деталей из ПКМ и охлаждения воздушно-эмульсионной смесью;
- разработанная математическая модель теплообмена между инструментом с керамическим ворсом и обрабатываемой деталью;
- разработанная конструкция гибкого инструмента – щётки с радиально-диаметральным расположением блоков ворса из керамических волокон и организацией внутренней подачи аэрозоля воздушно-эмульсионной смеси;
- технологические рекомендации по режимам абразивной обработки деталей из ПКМ инструментом с гибким керамическим ворсом в среде обработки воздушно-эмульсионной смеси.

Степень достоверности результатов исследования.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов и средств исследований, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, успешной апробацией результатов работы на действующих промышленных предприятиях.

Апробация работы.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- Ежегодных заседаниях кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»;
- XIV Всероссийской конференции «Машиностроение: традиции и инновации (Москва, МТИ – 2021);
- Международной научно-практической конференции «Трибология и проблемы МЧС России», (Иваново 2022 г.);
- XV Всероссийской конференции «Машиностроение: традиции и инновации (Москва, МТИ – 2022).

Публикации результатов работы: материалы диссертационной работы изложены в 10 научных работах, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Объем и структура работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 144 наименования, и приложений (8 страниц), включает 139 страниц машинописного текста, 76 рисунков и 10 таблиц.

ГЛАВА I. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Качество деталей, полученных посредством аддитивных технологий

В работе Д.В. Гусева по обеспечению качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий [24], изучается влияние условий 3D-печати на показатели качества поверхности изделий.

В работе было установлено, что, варьируя технологическими параметрами процесса прототипирования толщиной слоя z и углом выращивания α , можно направленно изменять параметр шероховатости поверхности изделия. Уменьшение толщины наращиваемого слоя и повышение угла выращивания до 8° приводит к снижению параметра шероховатости Ra .

Повышение параметра шероховатости Ra при увеличении угла выращивания свыше 8° объясняется сдвигами в слоях не полностью затвердевшего наращиваемого материала. Установлено, что при изготовлении изделий с углом выращивания α , равным нулю, шероховатость поверхности изделия значительно хуже, чем на образцах, полученных в других условиях. Это объясняется тем, что при угле выращивания $\alpha = 8^\circ$ площадь наращиваемого слоя меньше, чем при угле выращивания $\alpha = 0^\circ$ и в процессе отлипания от контактного окна воздействие последующего слоя на предыдущий слой, который еще до конца не заполимеризовался, минимально. При угле выращивания более 8° отрицательное воздействие на параметр шероховатости Ra оказывает сила тяжести слоя, которая вызывает сдвиги в еще не затвердевшем слое фотополимера.

Полученная в ходе работы Д.В. Гусева регрессионная модель свидетельствует о влиянии условий 3D-печати на величину шероховатости получаемых изделий. Однако механизм ее формирования позволяет установить минимальный предельный уровень величины Ra на поверхности детали полученной с помощью 3D-печати. Он значительно выше, чем получается при

традиционной механической обработке. Поэтому дальнейшее улучшение шероховатости может достигаться комбинированным формообразованием с помощью аддитивных технологий и последующей механической обработки, произведенных на одной технологической платформе.

Для достижения необходимого качества деталей, предварительно полученных с помощью аддитивных технологий, использование механической обработки требует изучения особенностей обработки деталей из ПКМ.

1.2. Полимерные композиционные материалы

В работе исследовалась механическая обработка следующих видов полимерных композиционных материалов:

1. PLA (Полилактид) — биоразлагаемый полимер, основным сырьём для производства которого служат кукуруза и сахарный тростник, обладает низкой температурой размягчения 54–58 °С, прочность на изгиб и разрыв составляет 55,3 Па, 57,8 Па соответственно. Пример детали после печати представлен на рисунке 1.1.

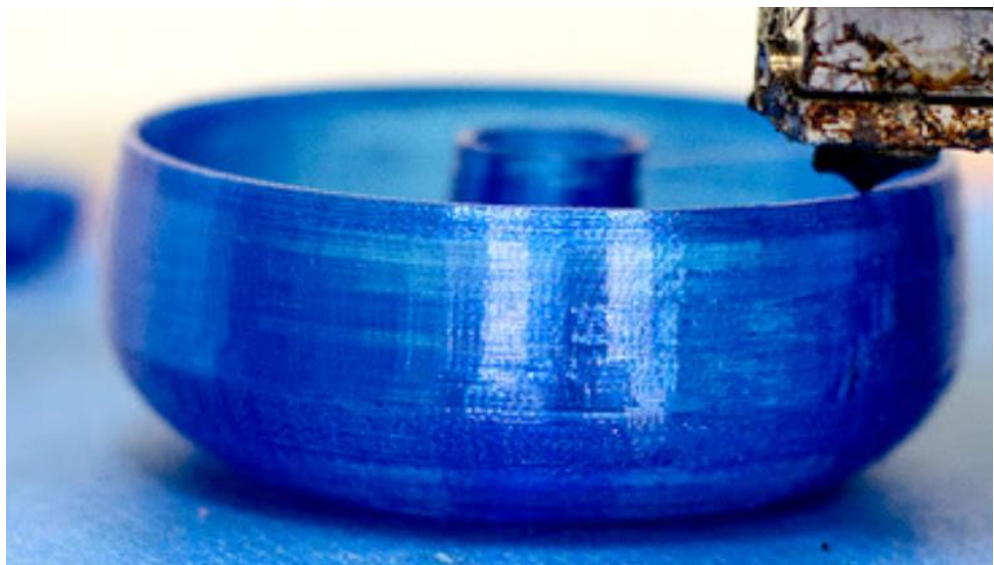


Рисунок 1.1 – Деталь из материала PLA

Влагопоглощение полимером составляет до 50 %. Готовое изделие достаточно прочное и гибкое. После печати присутствуют ярко выраженная волнистость, сложно удаляемые поддержки.

2. ABS (акрилонитрил бутадиен стирол) — ударопрочный полимер, достаточно теплостойкий — 103 °С. Пример детали после печати представлен на рисунке 1.2



Рисунок 1.2. – Деталь из материала ABS

Достаточно долговечный, более устойчивый к влагопоглощению (до 10 %).

3. PETG (Полиэтилентерефталат) — гибкий, менее жёсткий полимер. Менее долговечен, чем ABS. Температура размягчения — 80–85 °С. Пример детали после печати представлен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3. – Деталь из материала PETG

Влагопоглощение полимером составляет до 30 %. После изготовления остаётся много лишнего материала, который необходимо удалять механическим путём.

4. TOTAL-PRO GF-30 — стеклонаполненный (30 %) ударопрочный полимер. Температура размягчения — 130 °С. Хорошо подходит для механически нагруженных деталей. Пример изделия после печати представлен на рисунке 1.4

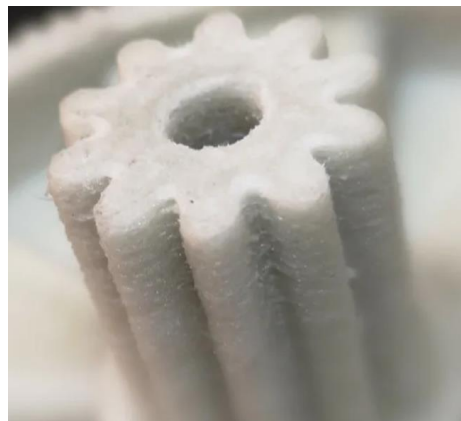


Рисунок 1.4. – Деталь из материала TOTAL-PRO GF-30

После изготовления имеет очень высокую шероховатость, что требует обязательной последующей механической обработки. Влагопоглощение полимером составляет 15 %.

5. TOTAL-PRO GF-10 — стеклонаполненный полиуретан (10 %). Температура размягчения — 110 °С. Пример детали после изготовления представлен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5. Деталь из материала TOTAL-PRO GF-10

Ударопрочный, хорошо подходит для использования в виде корпусов и шестерён. Влапоглощение полимером составляет до 30 %.

6. TOTAL-PRO CF-5 — угленаполненный ударопрочный полимер. Температура размягчения — 120 °С. Пример детали после печати представлен на рисунке 1.6.

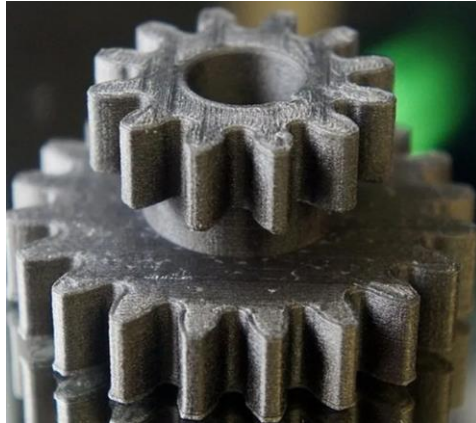


Рисунок 1.6. – Деталь из материала TOTAL-PRO CF-5

Может использоваться для печати помехозащищённых корпусов. Влапоглощение полимером составляет до 20 %.

7. TITAN GF-12 содержит 12 % рублёного стекловолокна, хрупкий на изгиб. Температура размягчения — 118 °С. Пример детали после печати представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7. – Деталь из материала TITAN GF-12

Влагопоглощение составляет до 30 %. После изготовления присутствует характерная волнистость и рифление.

8. VFBronze — металлонаполненный полимер. Содержит 20 % бронзы. Температура размягчения — 110 °C. Пример детали после печати представлен на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8. – Деталь из материала VFBronze

Поверхность после изготовления требует обязательной механической обработки. Влагопоглощение составляет до 10 %

Представленные материалы отличаются своими физическими и механическими свойствами. Анализируя полученную информацию, можно отметить два важных параметра — это температура размягчения и влагопоглощение.

1.3. Изготавливаемые детали и требования к ним

1.3.1 Детали БПЛА

На сегодняшний день растущая популярность и развитие аддитивных технологий привело к тому, что послойным выращиванием изготавливают многие

узлы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Возможность производства без специальных матриц и отсутствие больших затрат на подготовку к печати лишь подкрепляют дальнейшее развитие в этой области. К таким деталям предъявляются высокие требования к качеству поверхности для снижения уровня дополнительного сопротивления в воздухе.

Одним из основных узлов БПЛА является крыло (рисунок 1.9), имеющая сложную форму. Основная задача этого узла – создание подъёмной силы, которая обеспечивает необходимую поддержку летательного аппарата в воздухе. Чем выше аэродинамические характеристики крыла, тем меньше лобовое сопротивление. При этом значительная роль отводится шероховатости получаемой поверхности.

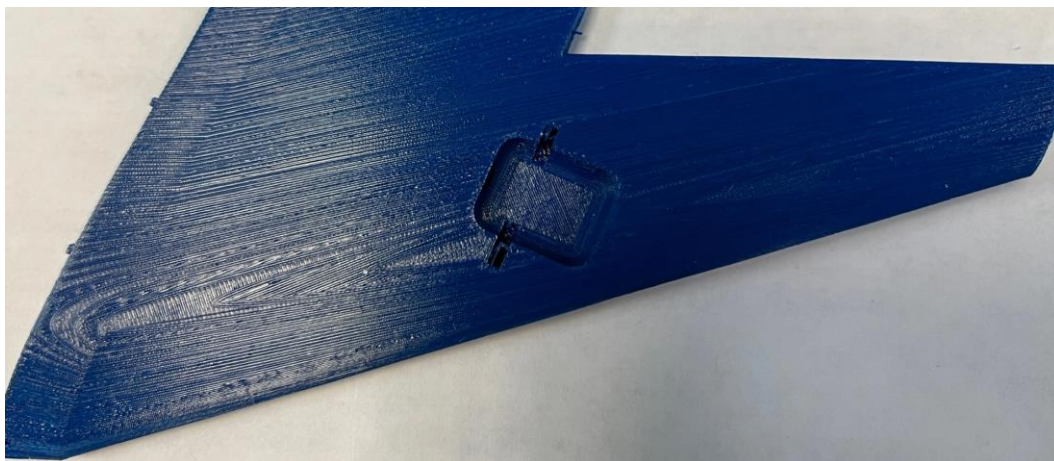


Рисунок 1.9 – Фрагмент крыла БПЛА из материала PETG

На рисунке 1.9 показано крыло, изготовленное послойным выращиванием. Ввиду особенностей технологии, наглядно видны следы слоёв на поверхности. Они представляют собой линии расположенные на разной высоте и зависят от представленной 3d модели, а также от программных настроек. Согласно предъявляемым требованиям, любая неровность на внешней поверхности создаёт дополнительное сопротивление. Шероховатость поверхности Ra после обработки должна составлять 1 мкм или менее. Величина допустимого значения показателя зависит от высоты полёта.

Вертикальная законцовка крыла (рисунок 1.10), представляет собой дополнительную деталь, расположенную на концах крыла БПЛА. Благодаря установке такого элемента можно уменьшить индуктивное сопротивление, улучшить характеристики набора высоты, а также увеличить аэродинамическое качество.

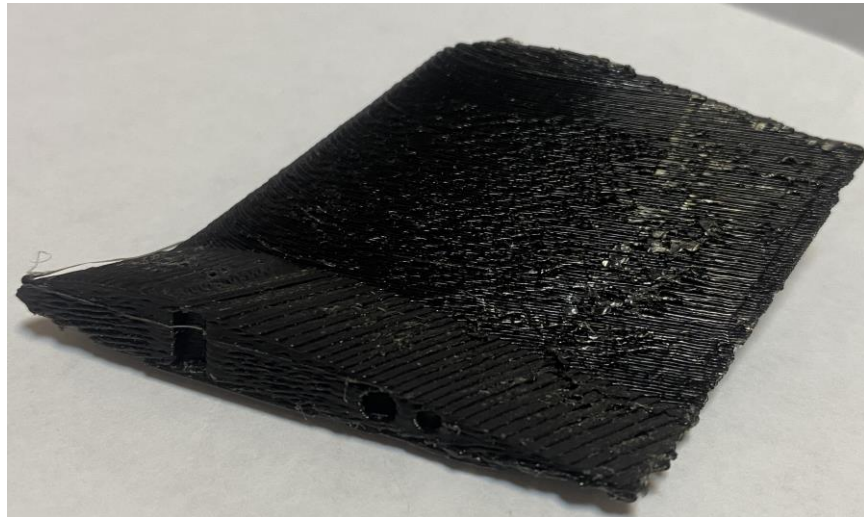


Рисунок 1.10 – Вертикальная законцовка Крыла, из материала TOTAL GF-15

На рисунке 1.10 представлена деталь после изготовления. Ввиду сложной формы таких элементов дешевле и проще всего на данный момент изготавливать их с помощью аддитивных технологий. Однако, поверхность получается не всегда однородной, что приводит к ухудшению аэродинамических характеристик. Отклонение от формы обтекаемого тела пагубно влияет на сопротивление давлению, а увеличение шероховатости приводит к росту сопротивления трения.

Корпус датчика (рисунок 1.11) представляет собой короб, внутрь которого помещается плата управления. С целью снижения затрат, проще всего изготовить его с помощью технологии послойного выращивания, любой формы и любых размеров, которые позволят наиболее эффективно разместить его внутри корпуса летательного аппарата.

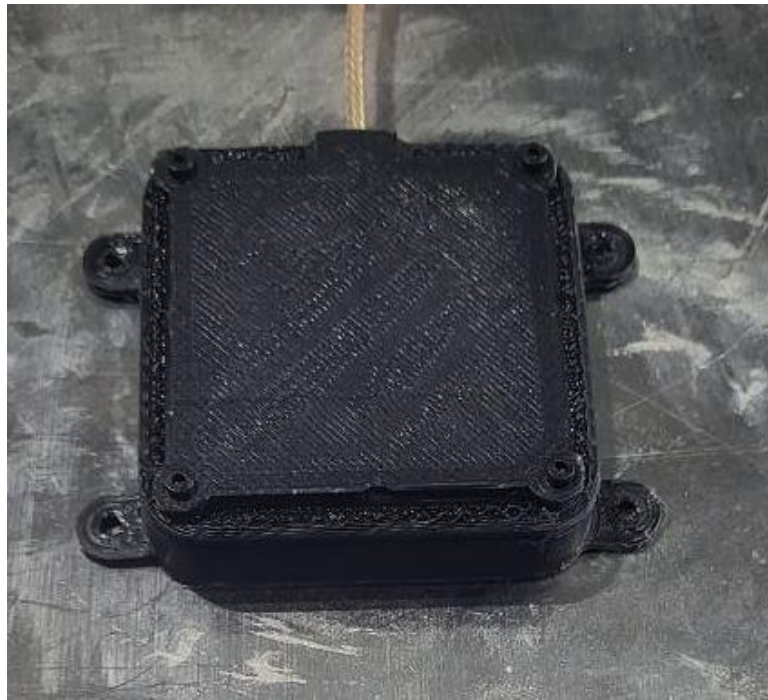


Рисунок 1.11 – Корпус датчика БПЛА, из материала PETG

На рисунке 1.11 представлен корпус датчика в сборе, необходимость дальнейшей механической обработки данного узла объясняется доработкой конкретных посадочных мест для установки платы управления.

1.3.2 Общемашиностроительные детали

Помимо узлов БПЛА, с помощью аддитивных технологий изготавливается большое количество деталей общего машиностроения, уменьшая при этом трудоёмкость процесса и себестоимость. На рисунке 1.12 представлена косозубая шестерня. После печати на поверхностях зубьев могут наблюдаться неровности и дефекты на поверхности из-за сложного профиля изделия, что будет негативно сказываться на передаче вращательного движения. Установочное отверстие, может быть «загрязнено» в процессе перебегов головы станка во время изготовления, что будет влиять на установку шестерни на вал.

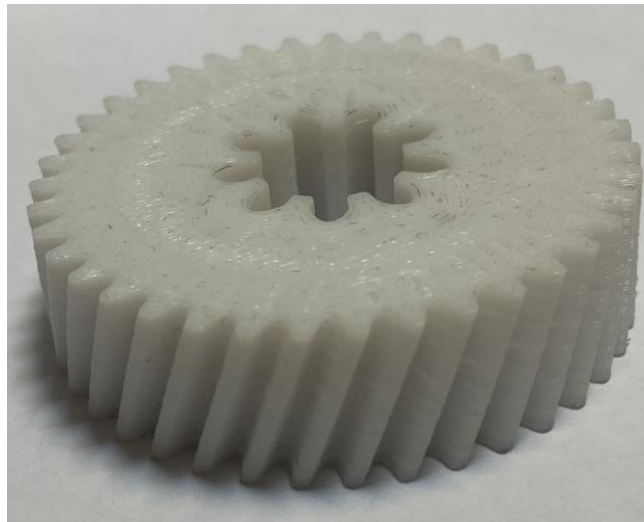


Рисунок 1.12 – Шестерня редуктора, из материала PETG

Помимо шестерен, изготавливаются корпуса сложной формы (рисунок 1.13), причём в процессе выращивания будет появляться необходимость размещения поддержек в конкретных частях (их необходимо устанавливать в местах с нависанием, а также при отсутствии жесткого основания).



Рисунок 1.13 – Корпус волнового редуктора, из материала TOTAL GF-15

На рисунке 1.13 представлен корпус волнового редуктора сложной формы. Обычно в процессе послойного выращивания при установке детали на рабочий стол станка выбирается наименее ответственное место, на котором будет

размещена поддержка. После ее удаления, на поверхности часто наблюдается расслоение, а также большое количество заусенцев.

Изготавливаемые детали зачастую имеют сложную форму, включающую в себя множество разных типов поверхностей (рисунок 1.14)

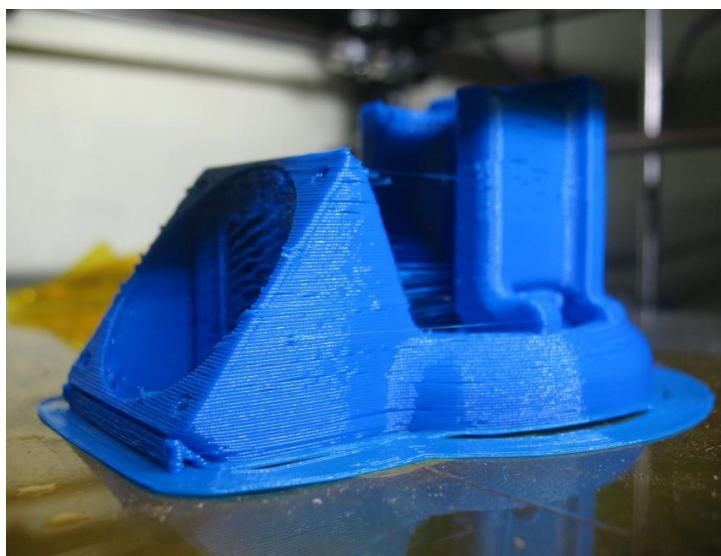


Рисунок 1.14 – Корпус двигателя с патрубком, из материала PETG

На рисунке 1.14 представлен корпус двигателя с патрубком. Применение технологии выращивания хоть и позволяет исключить большое количество сборочных операций, но требует дальнейшей механической обработки. Использование ручного труда для устранения дефектов приводит лишь к увеличению времени, а задействование гибкого инструмента позволит «обойти» контур детали, снять лишние заусенцы и минимизировать дефекты.

1.4. Обеспечение качества деталей из полимерных композиционных материалов

Вопросу увеличения обрабатываемости полимерных композиционных посвящено большое количество работ:

Так В.М. Ярославцев в работе под названием «Методы интенсификации обработки полимерных композиционных материалов» [141] установил, что интенсификация процесса резания как один из основных элементов увеличения производительности труда решается двумя путями: повышением скорости резания и увеличением сечения срезаемого слоя. Вместе с тем к специфическим свойствам ПКМ относится их низкая термостойкость. При температурах более 250...350 °С происходит интенсивная термодеструкция — химическое разложение полимерного связующего КМ, которое сопровождается выделением газов.

Это приводит к резкому ухудшению свойств материала, появлению прижогов и возникновению большого по толщине дефектного слоя. Поэтому при обработке ПКМ режимные параметры, а в первую очередь скорость резания, назначают из условия отсутствия термоокислительной деструкции материала, что является одним из обязательных требований обеспечения качества поверхностного слоя изделия.

Для интенсификации процесса резания ПКМ путем увеличения сечения срезаемого слоя в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод широких срезов (МШС), при котором припуск на обработку удаляется с заготовки инструментом, длина главной режущей кромки которого составляет 100–300 мм и более. Резец в этом случае на операции «точение» работает с поперечной подачей по тангенциальной или радиальной схемам фасонной обработки.

Метод широких срезов используют для обработки изделий из стекло-, углеорганопластиков, удельные силы резания которых (удельное давление резания, сила на единицу длины режущей кромки) существенно (в 10–60 раз) меньше, чем при обработке металлов. Скорость резания в этом случае выбирают из рекомендаций для обычной обработки, подачу — исходя из точности с учетом деформаций технологической системы.

Применение такого способа наиболее эффективно в условиях серийного и массового производств. Метод позволяет обрабатывать протяженные части детали. В отдельных случаях — одновременно все подлежащие формообразованию

поверхности изделия, состоящие из участков разной конфигурации и имеющих разные требования к обработанной поверхности по точности.

В.А. Кондратюк в работе «Технология пяти координатной механической обработки древесины и полимерно-композиционных материалов и пластмасс и создание опытного образца обрабатывающего центра» [52] рекомендует увеличивать при обработке пластмасс задний угол резца до $15\text{--}25^\circ$, меньший угол приводит к быстрому износу режущей кромки и повышенному тепловыделению. Если обрабатывать детали из ПКМ фрезой, то инструмент должен иметь как можно меньше зубьев, что увеличивает объём стружечных канавок. Передний угол следует выбирать из диапазона $10\text{--}15^\circ$.

При необходимости зона резания охлаждается дополнительно струей воздуха.

А.С. Дударев в работе «Определение микропрофиля поверхности, образованной механической обработкой лезвийным и алмазно-абразивным инструментом» [28] произвёл аналитический разбор микропрофиля поверхности, которая получается при обработки абразивным и лезвийным инструментом

При механической обработке деталей ПКМ происходит нарушение целостности поверхностного слоя как за счёт снятия имеющегося на поверхности отформованного изделия из ПКМ (например, оболочки, полученной методом намотки) слоя полимеризованного связующего, выполняющего защитную функцию от воздействия внешних факторов, так и за счёт перерезания армирующих волокон.

При работе алмазных сверл, фрез, т.е. торцовой обработке, геометрический фактор является преобладающим в формировании шероховатости поверхности в ПКМ. Однако в отличие от обработки лезвийным инструментом, где для описания параметров шероховатости поверхностей используются законы классической механики, состояние рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента непостоянно. Это обусловлено изменением координат вершин зерен и их геометрии вследствие их разрушения и скалывания, что указывает на

недостаточность применения традиционных методов механики для изучения образования шероховатости шлифованных поверхностей.

И.В. Злобина, Н.В. Бекренёв в работе «Повышение производительности и качества механической обработки изделий из полимерных композиционных материалов путем СВЧ-модифицирования» [35] изучали влияния кратковременного воздействия СВЧ, которое способствует существенному повышению качества поверхности, характеризующееся уменьшением поверхностных дефектов.

Модифицирование отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле позволяет не только повысить механические характеристики изделий из них, но и улучшить обрабатываемость резанием за счет сближения технологических характеристик матрицы и наполнителя и повышения однородности структуры матрицы, что способствует существенному снижению кромочных дефектов и, как следствие, — уменьшению трудоемкости доделочных операций и повышению качества изделий. Это происходит при увеличении поверхности контакта «матрица–волокно» и увеличении количества надмолекулярных образований, снижении их размеров и сближении.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о снижении времени сверления опытных образцов углепластика на 10–33 %, что позволяет повысить производительность обработки или сократить число переточек инструмента.

Введение в технологический процесс изготовления изделий из ПКМ операции СВЧ модифицирования перед механической обработкой может обеспечить повышение эффективности и качества конструктивных элементов перспективных образцов авиационной и ракетно-космической техники из углепластика и других групп ПКМ.

1.5. Анализ технологии обработки деталей из ПКМ

1.5.1 Особенности механической обработки деталей из ПКМ

В фундаментальной работе «Механическая обработка пластмасс» В.И. Дрожжин, И.Г. Баскаков, М.Ф. Семко [27] выделили особенности обработки таких материалов резанием:

Небольшая плотность и твердость, малая теплостойкость, крайне низкая теплопроводность, высокое сопротивление воздействию вибраций, истирающее воздействие на режущие кромки инструмента — все эти обстоятельства необходимо учитывать при назначении режимов резания и выборе геометрических параметров инструмента.

1) При обработке слоистых пластических масс в связи с их низким сопротивлением сжатию и срезу сила резания по сравнению с обработкой металлов невелика, что позволяет работать с большими сечениями среза.

2) При увеличении скорости резания приходится считаться со значительным выделением тепла в зоне резания. Последнее связано с тем, что при обработке слоистых пластмасс основная доля работы резания затрачивается на трение и диспергирование снимаемого слоя.

3) Низкая температура размягчения пластмасс очень часто служит причиной образования задиров на обрабатываемой поверхности изделия, а при работе на высоких режимах резания могут иметь место значительное разогревание обрабатываемого материала и появление «прижогов», вследствие низкой температурной стойкости входящих в состав слоистых пластических масс органических связующих.

Д.И. Токарев в работе «Особенности точения пластиков» [115] анализирует результаты экспериментального исследования и сравнительные стойкостные испытания различных марок режущей части инструмента (быстрорежущая сталь P18, твердый сплав BK8, алмаз CVD) проводились в производственных условиях

при точении деталей типа «кольцо» из трех различных марок пластиков (Ф-4, ПА-6, Ф-4К20).

Предварительно в лабораторных условиях подбирались оптимальные режимы резания с точки зрения обеспечения максимальной стойкости и производительности обработки. При этом необходимо было обеспечивать требуемые параметры качества детали (точность размеров и шероховатость поверхности).

Результаты экспериментальных исследований показали, что при обработке пластиков нужно использовать острую режущую кромку, чтобы избежать подмятия обрабатываемого материала, что достигается большими значениями переднего ($5-8^\circ$) и заднего ($6-10^\circ$) углов режущей пластины. Оптимальное значение радиуса при вершине резца — $0,5-0,8$ мм.

На точность обработки полимеров точением существенное влияние оказывают конструктивные особенности деталей, такие как длина обработки (вылет от шпинделя), толщина стенок детали, поскольку пластики обладают повышенной упругой деформацией (маленькой жесткостью). Вследствие этого при проектировании операции следует предусматривать технологические способы повышения жесткости детали при обработке люнеты, пробки, ребра жесткости. С целью предотвращения деформации тонкие детали необходимо зажимать равномерно по окружности вместо зажима их в трех точках. Для обеспечения точности размеров необходимо учитывать температурные деформации пластиков, которые возникают при нагреве детали в процессе обработки и последующем охлаждении.

Для уменьшения температурных деформаций при точении применяют жидкостное или воздушное охлаждение. Поскольку большинство пластиков отличается высоким коэффициентом теплового расширения, контроль размеров осуществляют на охлажденных деталях.

Кроме того, пластики сильно подвержены образованию остаточных напряжений в поверхностном слое детали, которые приводят к существенным (по сравнению с металлами) деформациям вследствие последующего

перераспределения остаточных напряжений. Для снятия остаточных напряжений детали из пластиков рекомендуется подвергать отпуску при температуре 50 °С с выдержкой 24 ч. После термообработки выполняют окончательные операции по точению.

Различные марки пластиков необходимо разделять по критерию обрабатываемости резанием на группы, соответствующие выбранной марке режущей части инструмента: легкообрабатываемые пластики — быстрорежущие стали, среднеобрабатываемые пластики — твердые сплавы, труднообрабатываемые пластики — сверхтвердые материалы.

Обрабатываемость резанием в первую очередь характеризуется степенью интенсивности износа режущего инструмента.

В.И. Курдюков в работе «Сила резания и температура при шлифовании» [63] выявил, что высокая скорость микрорезания при шлифовании способствует тому, что практически вся механическая работа, совершаемая абразивными зернами, преобразуется в тепло. Это создает большое число высокотемпературных очагов в поверхностном слое детали, обуславливающих его интенсивный нагрев.

Полученная тепловая энергия распределяется между деталью, инструментом, стружкой и окружающей средой. При этом в деталь уходит до 80 % этого тепла.

Высокие температуры шлифования могут вызывать дефекты на поверхностном слое шлифуемой детали (прижоги, трещины и т.п.), снижающие ее качество. В связи с этим температурный фактор приобретает важнейшее значение.

Нгуен Ван Кыонг в работе «Влияние технологических параметров на шероховатость изделий при обработке пластмасс» [76] рассмотрел параметры, влияющие на шероховатость при точении пластмасс.

При токарной обработке пластмасс на шероховатость изделий влияют многие факторы, такие как материал и геометрия резцов, режимы резания, износ режущих инструментов, режимы охлаждения.

Глубина резания и скорость подачи на шероховатость существенного влияния не оказывают. При работе неровность поверхности оформляется по определенному правилу (принципу) из-за колебаний резца. Тем не менее для

каждого обрабатываемого материала можно установить скорость резания, обеспечивающую минимум неровностей.

В.А. Вавилин, К.А. Пасечник, А.Ю. Пушкарёв, Н.А. Амелъченко в работе «Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов» [15] выявили, что в процессе механической обработки ПКМ склонны к расслоению из-за их слоистости, структурной неоднородности, высокой твердости материала наполнителя, низкой пластичности связующего и др. При фрезеровании контура изделия важно учитывать направление расположения волокон.

Необходимо помнить, что встречное фрезерование приводит к повышению шероховатости и разрыву нитей при кромочной обработке. Применение лазерной и гидроабразивной резки для кромочной обработки тоже не обеспечивает достижения желаемых результатов.

М.И. Чижов, М.С. Огурцов, А.В. Сергеенко в работе «Влияние режимов резания и жесткости конструкции на точность механической обработки деталей из ПКМ на станках с ЧПУ» [123] установили, что недостаточная жесткость деталей в зоне обработки является основной причиной возникновения вибраций и их деформации. Заусенцы могут образовываться как из-за неверно подобранной скорости резания, так и из-за геометрии режущей кромки.

Инструмент, применяемый при обработке конструкций из ПКМ на станках с ЧПУ, относительно дорогой, и увеличение ресурса его работы уменьшает стоимость обработки и время, затрачиваемое на смену инструмента.

А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин в работе «Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов» [68] провели анализ процесса деформации композиционного материала и установили, что в отличие от металла, у композиционных материалов наблюдаются следующие особенности:

1. Анизотропия свойств материалов, вследствие чего деформации не передаются через слоистую структуру и связующую смолу, а происходит разрушение структуры материала в виде продольных трещин и отделения мелких

частиц пыли на передней поверхности инструмента вместо стружки. Такие композиционные материалы редко встречаются. Используются волокна дискретные, с неоднородным распределением напряжений по длине. Напряжение на концах отсутствует, но возникают касательные на границе волокно – матрица, которые постепенно вовлекают структуру в работу. Рост растягивающих напряжений в структуре продолжается до тех пор, пока они не достигнут среднего уровня напряжений, наблюдающихся в непрерывном волокне.

2. Высокая твердость и хорошие прочностные характеристики стекло-углеволокна композиционных материалов препятствуют нормальному процессу обработки и вызывают рост силы сопротивления резания.

3. Высокая твердость наполнителя и его абразивное воздействие на режущий инструмент вызывают повышенный износ.

4. Низкая теплопроводность композитов, которая существенно влияет на соотношение составляющих теплового баланса при резании, в отличие от металла. При повышенных температурах, сопровождающих обработку резанием, это вызывает нарушение устойчивости и разрушение химических связей молекулярных цепей полимера, появление прижогов с образованием коксового слоя, выделением газообразных продуктов распада связующего, что сопровождается потемнением поверхности материала. Для ответственных изделий ракетно-космической техники это является недопустимым дефектом.

5. Высокие упругие свойства композиционных материалов приводят к тому, увеличивается износ инструмента по задней поверхности из-за интенсивных контактных явлений.

1.5.2 Инструменты для абразивной обработки деталей из ПКМ

При обработке деталей из ПКМ необходимо учитывать сложность получения высокого качества поверхности, вследствие невысоких прочностных

характеристик. Слоистая структура полимеров не позволяет производить обработку абразивным инструментом на жёсткой основе (рисунок 1.15).

В результате механической обработки будут образовываться трещины между волокнами обрабатываемой детали. Твёрдое связующее оставляет глубокие царапины на поверхности, следовательно, улучшить шероховатость поверхности Ra не представляется возможным.



Рисунок 1.15. – Примеры жёстких абразивных инструментов

На рисунке 1.15 показаны некоторые виды абразивных инструментов на жёсткой основе. Стружка в виде пыли, образующаяся при обработке, забивается в поры абразивной связки инструмента, что отрицательно сказывается на производительности и износе. Поэтому обработку деталей из ПКМ рекомендуется производить инструментом с гибкими волокнами.

1.5.3 Гибкий абразивный инструмент

Такой инструмент позволяет работать на сложнофасонной поверхности, гибкие ворсинки, в процессе обработки, способны захватывать все неровности при соответствующем вылете волокон из корпуса.

Вылет также можно регулировать при определенных условиях и задачах, повышая производительность обработки и регулируя натяг. Уменьшение длины

гибкой режущей части приводит к более точечной и грубой обработке поверхности, при увеличении волокна «распушаются» и охватывают большую плоскость со всеми неровностями.

Такой инструмент не нарушает слоистую структуру полимеров, царапины при обработке не остаются, а стружка в виде пыли не может попасть в поры абразивной связки ввиду малого размера множественных волокон.

В зависимости от требуемых задач и обрабатываемого материала необходимо выбирать как диаметр инструмента, так и материал режущей части. Такие волокна могут быть изготовлены из латуни, стали, нейлона и керамики.

Поставленная задача по совершенствованию обработки деталей из ПКМ сразу отбрасывает абразивные волокна, изготовленные из латуни и стали. На рисунке 1.16 показаны примеры абразивных инструментов, режущая часть которых изготовлена из латуни и стали. Однако слоистая структура полимера и его маленькая прочность не позволяют получить низкое значение шероховатости Ra , мкм.



Рисунок 1.16 – Пример инструмента с абразивными волокнами из латуни и стали

При обработке с металлической режущей частью происходит деструкция поверхностного слоя и образуются царапины. Всё это приводит к браку изделия.

Учитывая особенности деталей из ПКМ, рекомендуется обрабатывать их с помощью инструмента, режущая часть которого изготовлена из керамических волокон (рисунок 1.17).

Керамические волокна позволяют работать при больших температурах, однако не рассчитаны на обработку с серьёзной механической нагрузкой. Они обладают достаточной гибкостью, что прекрасно подходит для обработки поверхностей сложной формы.



Рисунок 1.17 – Абразивный инструмент с керамическими волокнами

На рисунке 1.17 показан пример инструмента, режущая часть которого представляет из себя керамические волокна с вкраплениями абразивных зёрен.

В работе были подробно изучены керамические волокна фирмы Хебес (рисунок 1.18).

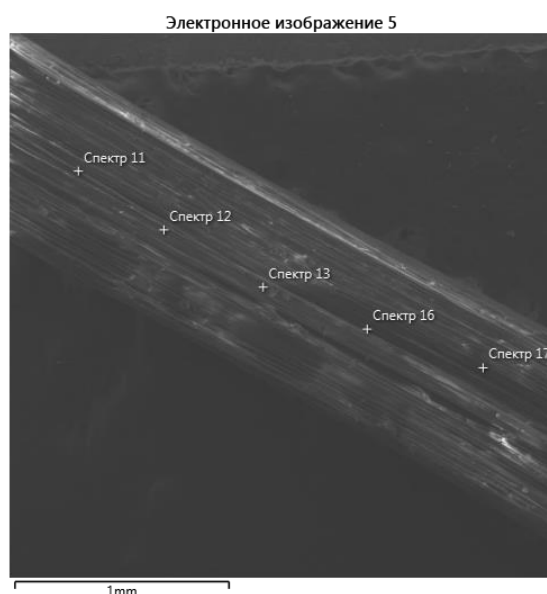


Рисунок 1.18 – Анализ состава керамического волокна

На рисунке 1.18 показано электронное изображение, полученное с помощью спектрального анализа на разных участках волокна. Это позволило определить состав и объём содержащихся элементов (рисунок 1.19).

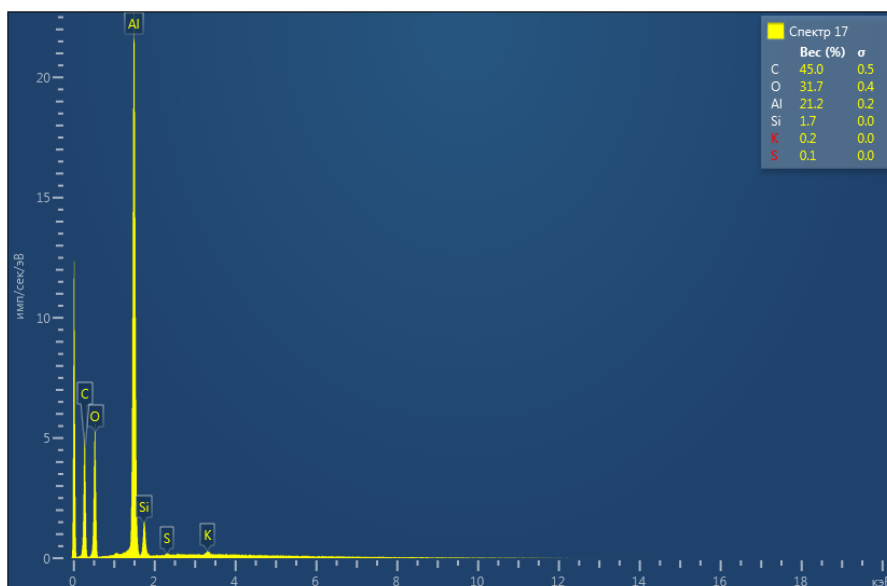


Рисунок 1.19 – График распределения веса элементов в составе керамического волокна (%).

На рисунке 1.19 представлен график распределения веса элементов (%), содержащихся в исследуемом образце. Анализ, показал, что керамический ворс состоит из оксида алюминия Al_2O_3 и диоксида кремния $2SiO_2$. В состав подобных волокон дополнительно могут входить оксиды щелочных металлов, а также карбид бора, необходимый для повышения режущих способностей.

1.6. Охлаждение деталей из ПКМ при механической обработке

В.И. Баранчиков в своей работе «Обработка специальных материалов в машиностроении» [8] описывал низкую теплопроводность деталей из ПКМ, указывая на возникающие, в результате механической обработки, тепловые процессы. Это приводит к неизбежной деструкции связующего, а также массовый

разрыв химических связей, в результате чего образуется вязкотекучий в микрообъёмах полимер, являющийся поверхностно-активным веществом (ПАВ). Из-за этого возникает адсорбционный износ инструмента, он характерен только при обработке полимерных материалов.

Чаще всего не допускается применение СОТС, так как полимеры имеют такое свойство, как влагопоглощение, поэтому применение жидкостного охлаждения во многих случаях влечёт за собой введение дополнительной операции — сушки изделия.

И.А. Хрульков в работе «Особенности резки полимерных композиционных материалов алмазными кругами» [98] описывает такой фактор деталей из ПКМ, как влагопоглощение. Его предложением стало использование кратковременного попадания ПКМ во влагонасыщенную среду с последующей их сушкой при комнатных условиях в течение суток.

Также, по его мнению, можно заменить жидкость на воздух или инертные газы. Однако применение инертных газов увеличивает стоимость процесса из-за требований по защите персонала, а использование воздуха или не содержащих воду жидкостей повышает пожароопасность процесса механической обработки.

А.Е. Мешкас в работе «Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов» [71] рассказывает о способе охлаждения зоны резания азотом с добавлением присадок, которое оказывает водоотталкивающее действие на детали и тем самым способствует уменьшению эффекта влагопоглощения. Однако автором были обнаружены оплавленные участки с подтёками из-за высокой температуры в зоне резания, что показывает низкую эффективность предложенного вида охлаждения.

Автор предлагает способ охлаждения с помощью применения масляных СОТС и оптимизацию необходимого количества распыляемой жидкости.

1.7. Цели и задачи исследования

Анализ научной литературы позволил сформулировать цель настоящего исследования: «Совершенствование обработки деталей из полимерных композиционных материалов за счёт использования инструмента с гибким керамическим ворсом и разработки эффективного способа охлаждения, позволяющих обеспечить заданную шероховатость и производительность обработки, минимальное влагопоглощение и отклонение размеров и формы изделия».

Ввиду принятого во внимание факторов при изучении научных работ ученых, представленных ранее, были сформированы следующие задачи:

1. Разработать наиболее эффективный способ охлаждения при обработке деталей из ПКМ инструментом с гибким керамическим ворсом, позволяющий обеспечить низкую температуру в зоне резания при минимальном влагопоглощении обрабатываемого материала
2. Выявить закономерности теплообмена между инструментом с гибким керамическим ворсом и обрабатываемой деталью из ПКМ
3. Разработать имитационную модель распределения потоков охлаждающей смеси при обработке деталей из полимерных композиционных материалов инструментом с гибким керамическим ворсом
4. Разработать инструмент с рациональным расположением блоков гибкого керамического ворса
5. Выявить закономерности влияния конструкторско-технологических факторов: площади поперечного сечения единичного керамического волокна, скорости обработки, натяга и подачи инструмента с гибким керамическим ворсом, на результаты обработки деталей из полимерных композиционных материалов
6. Разработать технологические рекомендации по обработке деталей из полимерных композиционных материалов инструментом с гибким керамическим ворсом.

ГЛАВА II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

2.1 Технологические параметры и факторы обработки деталей из ПКМ

В результате проведения традиционного анализа научной литературы был выявлен ряд факторов, которые необходимо учитывать при механической обработке деталей из полимерных композиционных материалов:

1. Обрабатываемый материал, который отличается температурой размягчения, механическими свойствами и влагопоглощением;
2. Величина снимаемого слоя материала в процессе обработки;
3. Используемый инструмент – щётка с гибкими керамическими волокнами, с целью исключения деструкции поверхностного слоя (образования царапин и трещин) на обрабатываемой поверхности;
4. Недопустимость повышения температуры в зоне обработки, которая приводит размягчению обрабатываемой поверхности и выхода материала за границы детали;
5. Обязательный отвод образовавшейся стружки в виде пыли из зоны обработки;
6. При выборе обрабатываемого контура необходимо учитывать расположение слоёв;
7. Недопустимо присутствие в зоне обработки большого количества охлаждающей смеси.

2.2 Оборудование, используемое при механической обработке

В работе использовался высокоточный станок с программным управлением Micron NPM 600U (рисунок 2.1). Управление осуществляется посредством

специальной стойки на базе Heidenhain, она предназначена, прежде всего, для синхронизации всех узлов фрезерного станка.



Рисунок 2.1 – фрезерный обрабатывающий центр с ПУ Micron 600U

На рисунке представлен фрезерный обрабатывающий центр с ПУ. С помощью него производилась механическая обработка исследуемых деталей из ПКМ с помощью гибкого инструмента. Характеристики представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические параметры вертикального фрезерного станка с ПУ

№ п/п	Технический параметр	Значение	Единицы измерения
1	Максимальная скорость вращения шпинделя	20000	Об/мин
2	Диаметр рабочей поверхности стола	500	мм
3	Максимальный диаметр инструмента	80	мм
4	Максимальный (вылет) инструмента,	350	мм
5	Точность позиционирования X, Y, Z	8	мкм

Рабочая камера станка представляет собой область, внутри которой располагается: станина,двигающаяся по несколько направлениям; шпиндель, в котором закрепляется инструмент; лазерная система измерения.

Схема обработки представлена на рисунке 2.2.

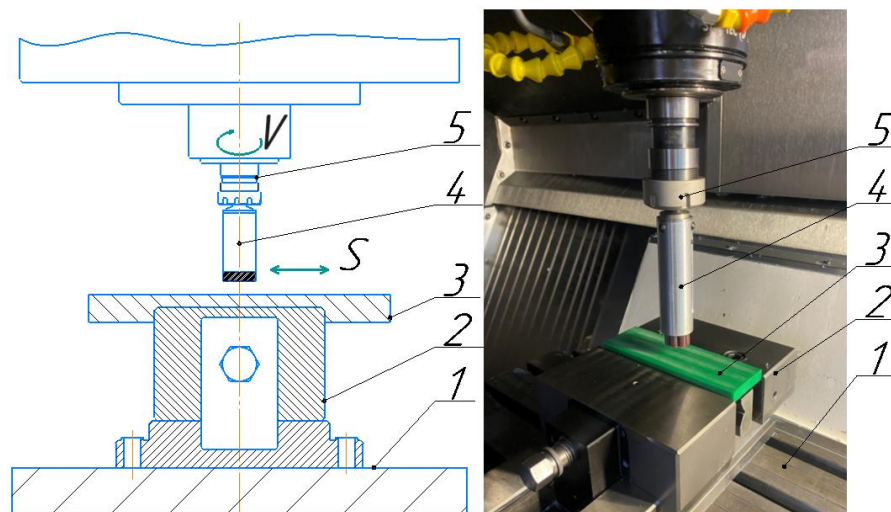


Рисунок 2.2 – схема обработки. 1 — Станина, 2 — приспособление для закрепления детали (тиски), 3 — обрабатываемая деталь, 4 — щётка с гибким керамическим ворсом, 5 — шпиндель.

На рисунке 2.2 представлена схема обработки и рабочая камера станка. На станине 1 установлены тиски 2, необходимые для закрепления обрабатываемой детали 3. Сверху расположена щётка с гибким керамическим ворсом 4, закреплённая в цанговый патрон, пневматически закреплённый в шпиндель 5.

2.3 Измерительные приборы

Поверхность изучалась с помощью микроскопа Altami CM0745 (рисунок 2.3). Он имеет рабочее расстояние: 118 мм без объектива, с дополнительной оптикой до 275 мм; диапазон плавного увеличения от 7 до 45, с дополнительной оптикой от 2.59 до 270 крат. Дополнительно к нему подключается камера для вывода изображения на экран монитора.



Рисунок 2.3 – Микроскоп Altami: 1 — микроскоп; 2 — исследуемый образец; 3 — рабочая область измерения

На рисунке 2.3 показан процесс измерения с помощью микроскопа. На рабочую область был помещён исследуемый образец. Регулируя фокусное расстояние, получалось четкое изображение исследуемой поверхности.

Шероховатость поверхности после обработки была измерена с помощью профилометра Mahr Marsurf PS 10 (рисунок 2.4) с диапазоном показаний Ra $0,02 \div 10$ мкм (предел допускаемой погрешности 5%).

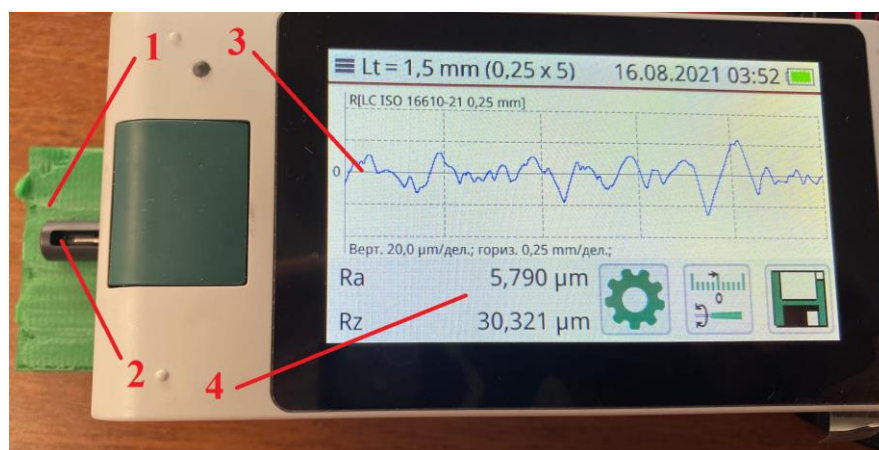


Рисунок 2.4 – Рабочее окно прибора в процессе измерения: 1 — измеряемая заготовка; 2 — чувствительная игла; 3 — график рельефа поверхности по базовой длине; 4 — результат измерения.

На рисунке 2.4 показан процесс измерения профилометром. На заготовке 1 размещается профилометр. С помощью чувствительной иглы 2 прибор проходит по заданной длине профиля поверхности. Профилометр строит график по совокупности неровностей 3, характеризующий рельеф поверхности на базовой длине L_t . Полученное значение шероховатости Ra выводится на экран 4.

Размеры детали после изготовления и обработки контролировались с помощью штангенциркуля Mahr 16U (рисунок 2.5). Прибор обладает ценой деления 0,01 мм с пределом допускаемой погрешности 0,04 мм.



Рисунок 2.5 – Штангенциркуль Mahr 16U

На рисунке 2.5 представлен штангенциркуль с круговой шкалой. Обнуление происходит благодаря поворота циферблата и дальнейшей фиксацией его с помощью зажимного нижнего винта.

Более точные замеры детали из ПКМ до обработки и после производились с помощью микрометра Mitutoyo 422-230-30 (рисунок 2.6) с шагом измерения 0,001мм (погрешность 0,003 мм). Проверка точности показаний и настройка прибора перед работой производилась с помощью эталона, по необходимости корректировалась ключом из комплекта.



Рисунок 2.6 – Микрометр Mitutoyo 422-230-30

Исследование изменения температуры в процессе обработки производилось с помощью тепловизора Satir HotFind-LR (рисунок 2.7), имеющим диапазон измерений от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (погрешность показаний $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Рисунок 2.7 – Тепловизор Satir HotFind-LR

Процесс измерения проходил в ручном режиме. В момент остановки программы открывалась рабочая камера станка, значения температуры фиксировались тепловизором. Записанные на карту памяти данные выгружались в специальное программное обеспечение SatIrReport для окончательной расшифровки и обработки измерений.

2.4 Выводы по главе

Проведенный анализ научной литературы и изучение особенностей механической обработки деталей из полимерных композиционных материалов, позволил сформировать основные этапы подготовки:

1. Изготовление образцов готовых изделий из материалов PLA, ABS, PETG, TOTAL GF-10, отличающихся между собой механическими свойствами, материалом наполнителя, влагопоглощением и температурой размягчения
2. Измерение размеров изготовленных образцов с помощью штангенциркуля и микрометра
3. Подготовка инструмента: закрепление щётки в цанговом патроне, ввод данных на стойке фрезерного станка и последующее обнуление лазерной системой ЧПУ
4. Выбор оптимального способа закрепления, для надёжной установки детали будут использоваться тиски. Слишком сильный зажим губками исключается
5. Размещение в камере исследуемых установок охлаждения (установка направленной ионизации и установка распыления)
6. Подготовка рабочего места, размещение тепловизора для быстрой и удобной фиксации температуры в зоне обработки
7. Преобразование постпроцессором и стойкой траектории движения инструмента.

ГЛАВА III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ ИНСТРУМЕНТОМ С ГИБКИМ КЕРАМИЧЕСКИМ ВОРСОМ

3.1 Модель процесса обработки деталей из ПКМ типа «Черный ящик»

Исследование закономерностей началось с формирования модели процесса обработки, учитывающее принятые во внимание факторы, для достижения требуемого результата (рисунок 3.1).

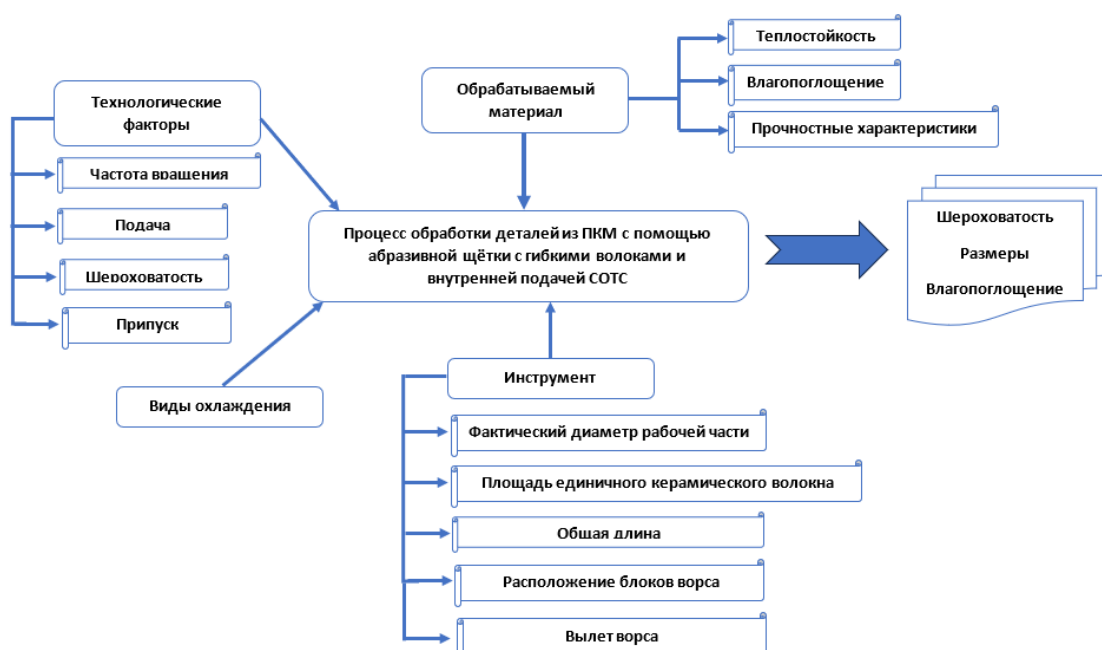


Рисунок 3.1 – Модель процесса обработки с принятыми во внимание параметрами

Модель процесса обработки, включает в себя:

1. Технологические факторы:

- шероховатость не более $Ra\ 1,5\ \mu\text{м}$;
- скорость обработки V в диапазоне $100\div 500\ \text{м/мин}$;
- подача S в диапазоне $2\div 8\ \text{мм/об}$;
- глубина t резания в диапазоне $0,01\div 0,05\ \text{мм}$.

2. Обрабатываемый материал:

- теплостойкость $50 \div 120$ °С;
- влагопоглощение $10 \div 50\%$;
- механические характеристики.

3. Инструмент – щётка с гибким с керамическим ворсом:

- фактический радиус рабочей части $r = 30$ мм;
- площадь сечения единичного керамического волокна $s = 2,32; 0,65; 0,15$ мм²;
- общая длина $L = 120$ мм;
- тип расположения волокон;
- вылет ворса из корпуса $h = 8 \div 15$ мм.

4. Виды охлаждения:

- охлаждение с помощью направленных потоков эмульсионной смеси;
- охлаждение ионизирующим воздухом;
- охлаждение с помощью распыления.

3.2 Схема взаимодействия гибких керамических волокон с обрабатываемой поверхностью

При обработке с использованием охлаждения с заданной скоростью $V = 405$ м/мин и подачей $S = 4$ мм/об можно выразить следующее взаимодействие гибких керамических волокон на схеме (рисунке 3.2).

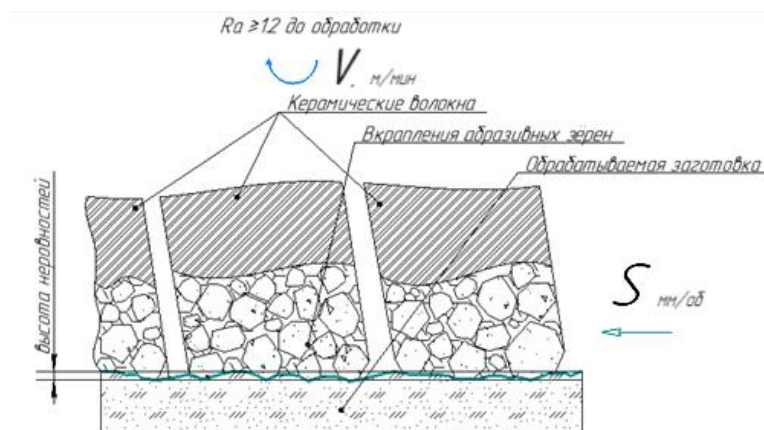


Рисунок 3.2 – Схема взаимодействия гибкого керамического волокна с заготовкой

На рисунке 3.2 показано взаимодействие абразивного зерна, расположенного на рабочей части инструмента. В процессе обработки гибкие керамические волокна, плотно наполненные абразивными зёрнами, при минимальном припуске проходят по микрорельефу поверхности детали, отклоняясь в противоположную сторону движения. Деструкция поверхностного слоя при этом не наблюдается из-за маленькой жёсткости режущей части инструмента.

При механической обработке без охлаждения повышаются температуры в зоне резания (рисунок 3.3).

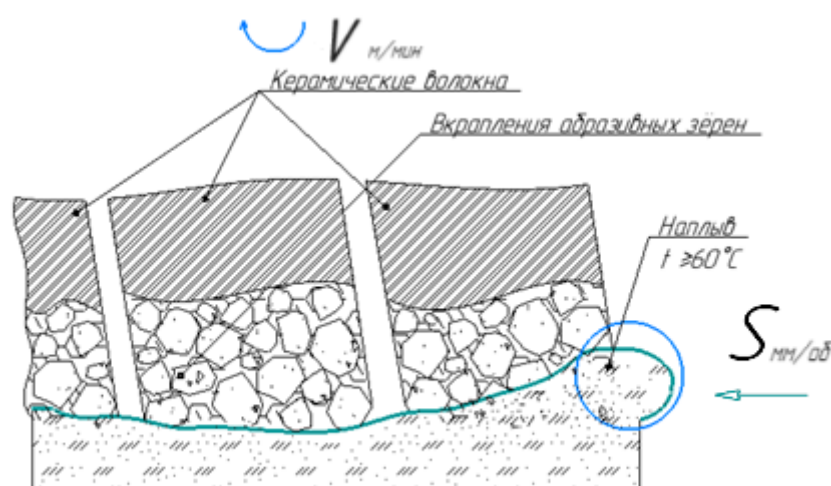


Рисунок 3.3 – Схема образования напльва при обработке без охлаждения

На рисунке 3.3 показано образование напльва из-за увеличения температуры в зоне резания. Абразивные волокна выдавливают материал за границы заготовки. На ворс налипают расплавленный полимер, что приводит к увеличению износа.

Загрязнённые керамические волокна теряют свои режущие свойства, для последующей работы необходимо производить очистку налипшего полимера. Снижение шероховатости обработанной поверхности при этом не происходит. Всё это приводит к неисправимому браку изделия, обрабатывать без специального охлаждения детали из ПКМ не рекомендуется.

3.3 Разработка математической модели теплообмена между инструментом с керамическим ворсом и обрабатываемой поверхностью

Чтобы установить закономерности теплообмена, между инструментом и обрабатываемой деталью, необходимо было решить ряд задач:

1. Определить какое тепло возникает вследствие трения инструмента о деталь в процессе обработки, в зависимости от радиуса и скорости вращения, в течение определённого времени;
2. Определить тепловой поток, который возникает на единицу площади, учитывая, что полимеры обладают низким коэффициентом теплопроводности;
3. Определить равновесную температуру, при воздействии инструмента с керамическим ворсом, и доказать необходимость охлаждения;
4. Определить время прогрева слоя смеси, который ложится на заготовку в процессе обработки, и время его замещения.

3.3.1 Схема расчётной области с принятыми во внимание факторами

На основании модели процесса обработки было составлено схематическое изображение расчётной области в задаче о прогреве инструмента (рисунок 3.4).

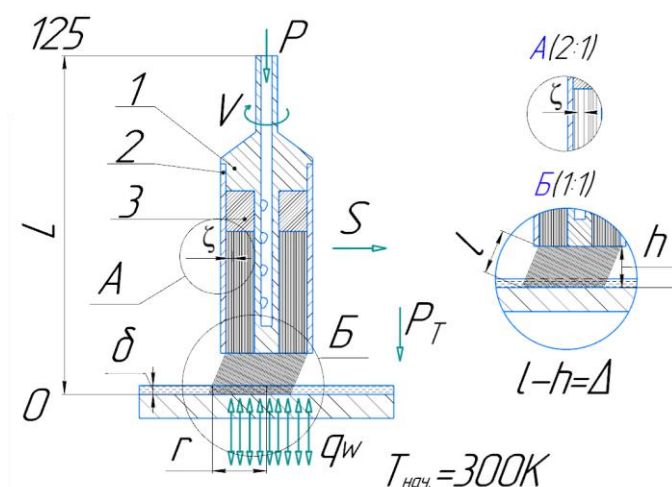


Рисунок 3.4 – Схематическое изображение расчётной области: 1 — стержень, 2 — цилиндрический корпус, 3 — металлическое основание с пазами.

Факторы, принятые во внимание: L – длина расчётной области, мм; r – фактический радиус щётки, мм; V – скорость обработки, м/мин; P – давление, с которым подаётся воздушно-эмульсионная смесь, Па; δ – толщина слоя смеси на поверхности обрабатываемой детали, мм; P_T – давление инструмента на обрабатываемую поверхность Па; q_w – тепловой поток, возникающий при воздействии инструмента на поверхность, кВт/м²; ζ – коэффициент сопротивления, учитывающий пустое пространство между керамическим ворсом, h – вылет керамического волокна из корпуса, мм; l – фактическое значение длины ворса в процессе обработки, мм; Δ – величина натяга, мм.

При обработке материалов из ПКМ, механическим способом, волокна нагреваются от трения. Это приводит к возникновению тепловых напряжений и деформаций. Повышение температуры может вызвать деструкцию слоёв или фазовые переходы, в том числе плавление. Это в первую очередь относится к полимерам, чья температура размягчения менее 90 °С. В работе рассматривается следующий ряд материалов: PLA, ABS, PETG, TOTAL GF-10, TOTAL GF-30.

Очевидным способом охлаждения материала является обдувание его в процессе обработки потоком воздуха или эмульсии. При этом могут возникнуть следующие проблемы:

1. Поток воздуха будет подводить кислород, что может привести к возгоранию обрабатываемой детали.
2. Эмульсия обладает бóльшей удельной теплоёмкостью, бóльшим коэффициентом теплопроводности, чем воздух, но может забивать поры материала и ухудшать его технологические характеристики. Из-за способности материалов из ПКМ поглощать влагу, происходит расслоение и набухание слоёв.

Поэтому в данной работе предлагается использовать двухфазную воздушно-эмульсионную смесь под большим давлением.

На рисунке 3.5 показан общий вид рабочей области с обрабатываемой поверхностью.

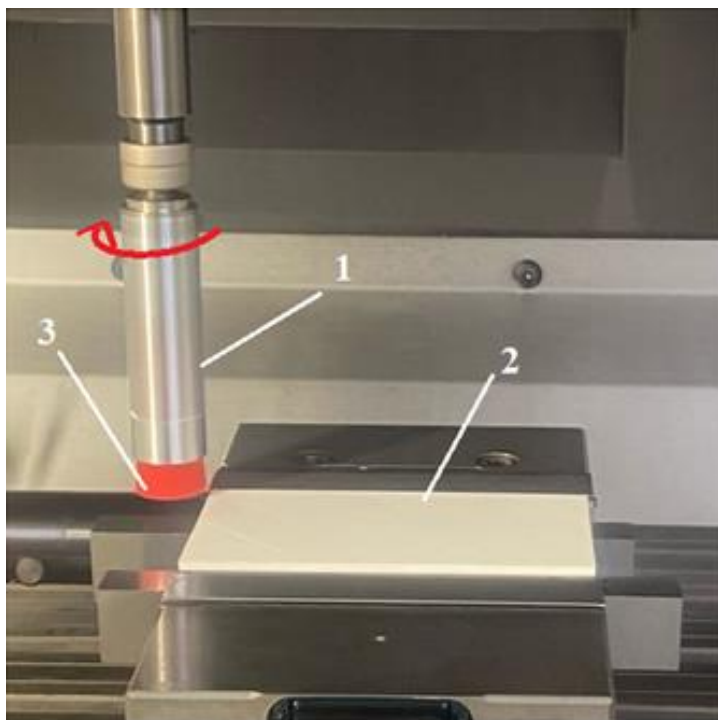


Рисунок 3.5 – Рабочая область эксперимента 1 — корпус щётки с подаваемой смесью, 2 — обрабатываемая деталь, 3 — гибкий керамический ворс.

При обработке поверхности, принципиальное значение имеет получающаяся шероховатость. Разрабатываемое оборудование должно позволять получать малую величину R_a .

В настоящее время в РФ действует ГОСТ 2789-73, где регламентированы требования определения шероховатости по шести параметрам: три высотных (R_a , R_z , R_{max}), два шаговых (S_m , S) и параметр относительной опорной длины профиля (t_p). Этот ГОСТ направлен в первую очередь на использование в обрабатывающей промышленности. Основные параметры, описывающие шероховатость, приведены на рисунке 3.6.

Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a — это среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \text{ или } R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|, \quad (3.1)$$

где l – базовая длина;

n – число выбранных точек профиля на базовой длине.

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z — это сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |Y_{pm_i}| + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |Y_{vm_i}|, \quad (3.2)$$

где Y_{pm_i} – высота i -го наибольшего выступа профиля;

Y_{vm_i} – глубина i -ой наибольшей впадины профиля.

Остальные параметры, приведённые на рисунке 3.6: наибольшая высота профиля R_{max} — расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины; средний шаг неровностей профиля; S_m — среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины; средний шаг местных выступов профиля; S — среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины; относительная опорная длина профиля; t_p — отношение опорной длины профиля к базовой длине:

$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i. \quad (3.3)$$

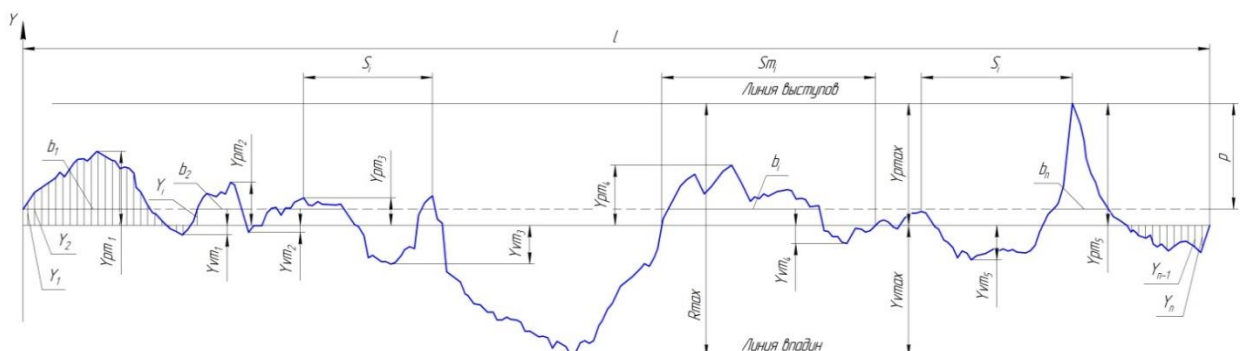


Рисунок 3.6 – Параметры, описывающие шероховатость поверхности

Параметры R_a и R_z представляют собой среднюю высоту неровностей профиля (R_a — всех неровностей, R_z — наибольших), параметр R_{max} — полную высоту профиля. Параметры S и S_m характеризуют взаимное расположение (расстояние) характерных точек неровностей — вершин и точек пересечения профиля со средней линией. Характеристика t_p содержит информацию о высотных свойствах профиля и в продольном направлении показывает фактическую площадь контакта поверхностей на заданном уровне сечения.

Основными методами (инструментами) получения профиля шероховатости поверхности являются сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), атомно-силовой микроскоп (АСМ), профилометр, а также 3D-сканер. Оптические и электронные микроскопы позволяют лишь визуально изучать поверхность, получение профиля в этом случае затруднительно.

В настоящее время возможности исследований структуры поверхностей с наноразмерными рельефами профиля значительно расширились благодаря развитию нанотехнологий (СТМ, АСМ).

Следует отметить, что профилометр может царапать поверхность, искажая профиль её шероховатости, также и СТМ может при чрезмерно большом туннельном токе модифицировать поверхность. Трёхмерное сканирование имеет существенные (доли миллиметра) ограничения на минимальный размер получаемой шероховатости модели.

В начале работы температура комнатная, для наихудшего варианта она взята равной 27 °С. В зоне резания, в случае отсутствия охлаждения, температура поднимается, при достижении критического значения, которое зависит от полимера (обычно ~60 °С), происходит размягчение поверхности материала. Необходимо определить расход воздушно-эмульсионной смеси, чтобы обеспечить охлаждение детали до приемлемых $t < 50$ °С.

Эмульсия имеет следующие свойства: содержание минерального масла — 54 %, содержание воды — 6 %, плотность при 20 °С — 0,95 г/см³, температура возгорания — 140 °С. Слой смеси по всей поверхности располагается равномерно и составляет 0,01 мм.

Частота вращения определяется как:

$$\omega = \frac{2\pi N}{t} = 471,2 \text{ с}^{-1}, \quad (3.4)$$

где N – число оборотов за время t .

3.3.2 Определение зависимости теплового потока и равновесной температуры от скорости обработки детали из ПКМ

Был проведен эксперимент для определения силы давления щётки на поверхность, в процессе которого изменялся слой снимаемого материала за проход. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.1, где m — нагрузка, которую показал прибор (масса, с которой инструмент давит на заготовку) в процессе измерения определения силы давления на заготовку P .

Таблица 3.1 – Сила, действующая на поверхность обрабатываемой детали при вращении щётки

№ п/п	Глубина резания t , мм	m , кг	$P = mg/S$, МПа
1	0,01	0,026	0,0089
2	0,02	0,039	0,0133
3	0,03	0,046	0,0157
4	0,04	0,056	0,0191
5	0,05	0,063	0,0215
6	0,06	0,074	0,0253
7	0,07	0,093	0,0317
8	0,08	0,109	0,0372

Фактический радиус инструмента в рабочем состоянии был измерен лазерной системой станка в момент ее вращения с частотой 4500 и составляет $r = 14,36$ мм. Предложено считать площадь обрабатываемой поверхности исходя из

площадей всех ворсинок в щётке. Площадь одной ворсинки — $0,65 \text{ мм}^2$, всего ворсинок 350, тогда площадь общего контакта $S = 0,65 * 350 = 227,5 \text{ мм}^2$. Для этой площади получаем радиус:

$$R_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \approx 8,5 \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Тем не менее далее радиус брался $r = 14,36 \text{ мм}$. Это обосновано тем, что в расчёте необходимо было учитывать фактический радиус инструмента в процессе его работы.

Сила трения P_T связана с силой давления на деталь P как:

$$P_T = fP, \quad (3.6)$$

где f – коэффициент трения.

Коэффициент трения при жёстком сцеплении с материалом поверхности $f \sim 0,1 \div 0,5$. В дальнейшем для оценок максимального воздействия использовалось значение $f = 0,5$.

Возникающее вследствие трения инструмента о поверхность образца тепло, это и есть работа, совершаемая силой трения. Работа силы определяется:

$$dA = Fvdt, \quad (3.7)$$

При вращении скорость точки, находящейся на расстоянии r от центра инструмента, равна:

$$v = \omega r, \quad (3.8)$$

где ω – частота вращения с^{-1} ;

r – фактические радиус инструмента, мм.

Сила, действующая на поверхность при вращении инструмента в течение времени t , определялась интегрированием по всей площади контакта керамического ворса с деталью:

$$A = 2\pi \int_0^r P_T r dr \omega t = 2\pi P_T \omega t \int_0^r r^2 dr = \frac{2}{3} \pi r^3 P_T \omega t, \quad (3.9)$$

где P_T — сила трения с поверхностью детали, Па;

ω — частота вращения с^{-1} .

Средний тепловой поток, проходящий на единице площади с поверхностью детали, равен:

$$\frac{Q}{St} = q = \frac{A}{St} = \frac{2}{3} \frac{\pi r^3}{\pi r^2} P_T \omega = \frac{2}{3} r P_T \omega = \frac{2}{3} r f P \omega. \quad (3.10)$$

В худшем случае считалось, что обрабатываемая деталь — это теплоизолятор с малым коэффициентом теплопроводности. Тогда тепло будет отводиться на нагрев охлаждающей смеси и излучение будет минимальным.

В случае отсутствия воздушно-эмульсионной смеси равновесная температура поверхности детали T_w получается из условия:

$$q = \varepsilon \sigma T_w^4 \Rightarrow T_w = \sqrt[4]{\frac{q}{\varepsilon \sigma}}, \quad (3.11)$$

где $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2/\text{К}^4$ — постоянная Стефана-Больцмана;

ε — степень черноты поверхности. Ввиду отсутствия данных по ε , принято рекомендуемое значение $\varepsilon = 0,8$ для оценок.

Из условий $r = 14,36$ мм, $P = 10^4$ Па, $f = 0,5$, $\omega = 471$ с⁻¹ тепловой поток при воздействии инструмента на поверхность равен $q \sim 22,6$ кВт/м², график получившейся зависимости показан на рисунке 3.7.

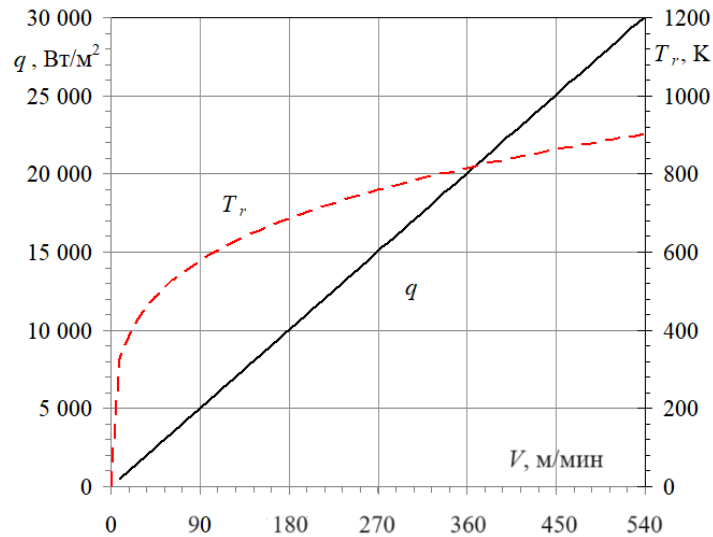


Рисунок 3.7 – Зависимость теплового потока и равновесной температуры в зависимости от скорости обработки

При этом мгновенная температура на поверхности составит $T_w = 834$ К. Это довольно высокая температура даже для металла, не говоря уже о полимерах. Очевидно, что требуется охлаждение.

Далее, при расчёте прогрева охлаждающей смеси, в качестве граничного условия использовался полученный ранее тепловой поток.

3.3.3 Определение необходимой скорости подачи воздушно-эмульсионной смеси

Расход двухфазной воздушно-эмульсионной смеси определяется как:

$$G = \frac{dm}{dt} = \rho U S_t, \quad (3.12)$$

где ρ — плотность смеси, кг/м³;

S_t — площадь, через которую вытекает двухфазная смесь, мм²;

U — скорость её подачи мм/с.

Диаметр канала для подачи смеси $d_t = 7,8$ мм, $S_t = 47,78$ мм².

Количество тепла, которое может снять смесь в приближении бесконечно быстрого распространения тепла к смеси, равно:

$$Q = \rho U S_t t C_P (T_f - T_0), \quad (3.13)$$

где t — время работы установки, с;

C_P — теплоёмкость воздушно-эмульсионной смеси, Дж/кг/К;

T_f — температура нагретой смеси после контакта с поверхностью, К;

T_0 — температура смеси до контакта с поверхностью, К (комнатная температура).

Скорость подачи воздушно-эмульсионной смеси, необходимой для обеспечения охлаждения, можно оценить, приравняв (3.10) и (3.13):

$$q\pi r^2 t = \rho U S_t t C_P (T_f - T_0) \Rightarrow U = \frac{q\pi r^2}{\rho S_t C_P (T_f - T_0)}, \quad (3.14)$$

где $T_f - T_0$ — приемлемая для обрабатываемого материала разница температур, возникающая при нагревании подаваемой двухфазной смеси, К;

r — радиус инструмента, мм.

Для охлаждения необходима смесь, имеющая высокую теплоёмкость и теплопроводность.

Для воздушно-эмульсионной смеси $C_P = 4166$ Дж/кг/К, $\rho = 1000$ кг/м³: максимальная допустимая разница температур $T_f - T_0 = 27$ К; площадь канала для

подачи смеси $S = 47,78 \text{ мм}^2$, тогда из (6) следует, что требуемая скорость подачи $U \sim 2,7 \times 10^{-3} \text{ м/с} = 2,7 \text{ мм/с}$. Расход смеси в соответствии с (1) должен составлять $G = 0,13 \text{ г/с}$, что вполне может быть обеспечено технологически.

Воздушно-эмульсионная смесь должна подаваться до начала обработки детали для того, чтобы не допускать нагрева поверхности и испарения. Из-за этого может реализоваться режим плёночного кипения, что резко уменьшит съём тепла и приведёт к расплавлению материала детали.

Давление, с которым подаётся воздушно-эмульсионная смесь, примерно 3–4 бара, т.е. перепад давлений $\Delta P = 2\text{--}3 \text{ атм}$. По закону Бернулли скорость смеси равна:

$$U = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \sim 20 \text{ м/с}. \quad (3.15)$$

Так как смесь проходит между волокнами инструмента, скорость её подачи будет ниже в соответствии с законами гидравлики:

$$U = \zeta \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (3.16)$$

где ζ — коэффициент сопротивления.

Даже с учётом малости коэффициента ζ , скорость подачи заведомо превышает необходимую для охлаждения величину, давление подачи хоть и может быть уменьшено, но всё равно должно обеспечить определённый ранее необходимый для охлаждения расход.

3.3.4 Аналитическое решение уравнения теплопроводности

С учетом малых расходов и маленькой скорости подачи воздушно-эмульсионной смеси, задача о тепловом режиме инструмента с керамическим

ворсом решалась в предположении неподвижной области. Схематическое изображение расчётной области в задаче о прогреве щётки приведено на рисунке 3.8. Теплофизические свойства воздушно-эмульсионной смеси приведены в таблице 3.2.

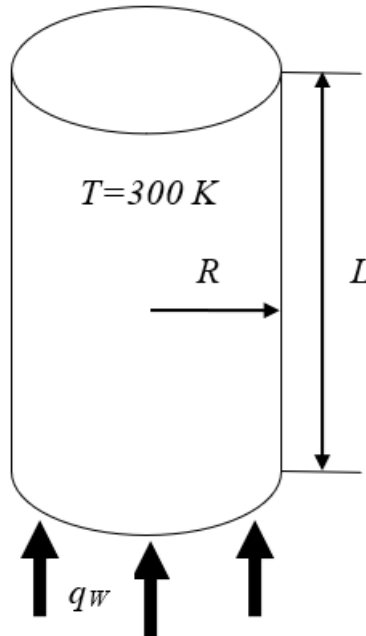


Рисунок 3.8 – Схематическое изображение расчётной области в задаче о прогреве щётки

Таблица 3.2. – Теплофизические свойства смеси

$T, \text{ K}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\lambda, \text{ Вт/(м*град)}$	$C_p, \text{ Дж/(кг*град)}$
293	1000	0,56	4166

Уравнение теплопроводности имеет вид [42, 65]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (3.17)$$

где ρ , C_p , λ — плотность, теплоёмкость и теплопроводность материала;

T — температура материала.

Граничные условия второго рода следующие:

$$\begin{aligned} T(x=L) &= T_0, \\ \frac{\partial T}{\partial x}(x=0) &= q. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Предполагается, что $x=L=125$ мм соответствует верхней точке инструмента, где подаётся охлаждающая воздушно-эмульсионная смесь, а $x=0$ — точка контакта щётки с поверхностью детали. На боковых поверхностях ставятся условия теплоизоляции, так как они окружены воздухом. При такой постановке задача является одномерной. Начальное условие — комнатная температура в детали $T_0=300$ К:

$$T(t=0, x) = T_0. \quad (3.19)$$

Для численного решения уравнения теплопроводности необходимо записать уравнение в конечных разностях. Используемые ранее численные схемы решения уравнения (3.17) в общем виде можно записать как:

$$\begin{aligned} & \rho_i C_{Pi} (x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}) \left(\left(1 + \frac{s}{2}\right) \frac{(T_i^n - T_i^{n-1})}{(t_n - t_{n-1})} - \frac{s}{2} \frac{(T_i^{n-1} - T_i^{n-2})}{(t_{n-1} - t_{n-2})} \right) = \\ & = \theta \left(\lambda_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{x_{i+1} - x_i} - \lambda_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{x_i - x_{i-1}} \right) + (1-\theta) \left(\lambda_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1}^{n-1} - T_i^{n-1}}{x_{i+1} - x_i} - \lambda_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_i^{n-1} - T_{i-1}^{n-1}}{x_i - x_{i-1}} \right), \end{aligned} \quad (3.20)$$

где плоскость (t, x) отображается на плоскость (n, i) . В общем случае схема (3.20) является трёхслойной по времени.

Вязкие коэффициенты в полуцелых точках $i+0,5$ вычисляются по формуле [100]:

$$\lambda_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1} (V_i + V_{i+1})}{\lambda_i V_{i+1} + \lambda_{i+1} V_i}, \quad (3.21)$$

где λ_i и V_i — коэффициент теплопроводности и объём i -ой ячейки.

В одномерном случае:

$$\lambda_{i+0.5} = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1} (x_{i+1} - x_i)}{\lambda_{i+1} (x_{i+0.5} - x_i) + \lambda_i (x_{i+1} - x_{i+0.5})}, \quad (3.22)$$

Коэффициент теплопроводности $\lambda_{i+0.5}$ вычислялся на стыке двух материалов (двух ячеек с номерами i и $i + 1$) с разными теплофизическими свойствами, где x_i и x_{i+1} — центры ячеек i и $i + 1$, $x_{i+0.5}$ — координата их общей границы. В таблице 3.3 представлены различные схемы, следующие из уравнения 3.20.

В данной работе используется неявная схема. Эта схема устойчива при любом шаге по времени и имеет первый порядок точности, как по времени, так и по пространству.

Таблица 3.3. — Некоторые схемы решения уравнения теплопроводности [100]

Схема	s	θ	Ошибка аппроксимации	Устойчивость
Явная	0	0	$O(\Delta x^2) + O(\Delta t)$	$Fo \frac{\Delta t}{\Delta x^2} < \frac{1}{2}$
Неявная	0	1	$O(\Delta x^2) + O(\Delta t)$	Устойчива
Кранка и Николсона	0	0.5	$O(\Delta x^2) + O(\Delta t^2)$	Устойчива
Адамса	1	1	$O(\Delta x^2) + O(\Delta t^2)$	Устойчива

После аппроксимации исходных уравнений конечноразностными уравнениями получается система уравнений с трёхдиагональной матрицей вида:

$$a_i T_{i-1}^n - b_i T_i^n + c_i T_{i+1}^n = d_i, \quad (3.23)$$

где n — временной индекс;

i — индекс вдоль координаты.

Система уравнений (3.23) решается с помощью прогонки [100, 103, 118]. Для того, чтобы результирующая расчётная схема не имела ограничений величины шага по времени, возникающих из условия устойчивости численного решения,

правая часть уравнения записывается на $n + 1$ шаге по времени, т.е. является полностью неявной.

Уравнение теплопроводности (3.17) с граничным условием второго рода (3.18), в случае постоянных теплофизических свойств, имеет аналитическое решение [67]:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{2q}{\lambda} \sqrt{at} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right),$$

$$\operatorname{ierfc}(u) = \int_u^\infty \operatorname{erfc}(\xi) d\xi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u(1 - \operatorname{erf}(u)), \quad \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\xi^2} d\xi, \quad (3.24)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}.$$

По результатам расчётов был получен график изменения температуры через $t = 120$ с после начала работы инструмента при условии неподвижной смеси (рисунок 3.9).

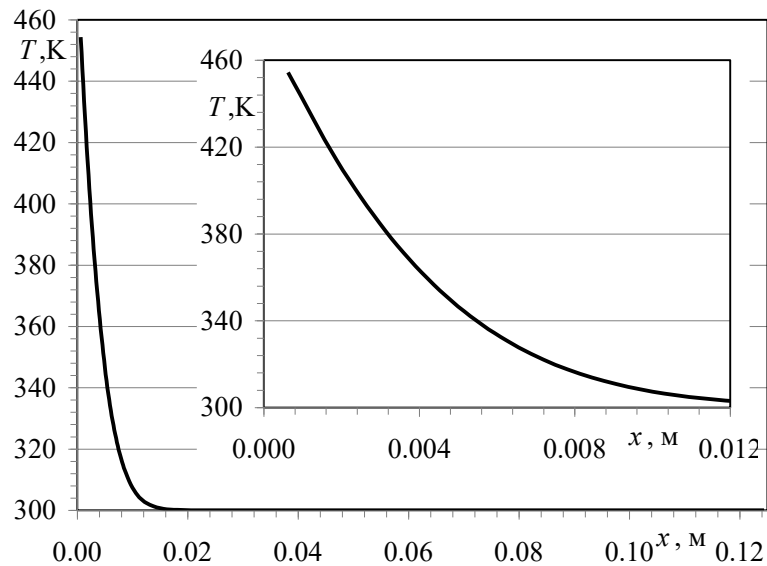


Рисунок 3.9 – Прогрев щётки через $t = 120$ с после начала работы

Температура на поверхности детали увеличилась на 154 градуса, при этом прогрелось 12 мм от длины инструмента.

С учётом определённого ранее расхода, смесь за время t сдвинется на величину $dx = U \left(\frac{d_t}{2R} \right)^2 t = 24$ мм, что больше ранее прогретой толщины. Таким образом, весь прогретый смеси будет вытекать из инструмента и температура внутри него повышаться не будет.

3.3.5 Определение необходимого объёма поступающей смеси для соблюдения теплового режима детали

Как уже ранее говорилось, слой воздушно-эмульсионной смеси на поверхности ложится с толщиной $\delta = 0,01$ мм. Из равенства числа Фурье единицы

$Fo = \frac{\lambda t}{\rho C_p \delta^2} = 1$ определим время прогрева этого слоя смеси:

$$t = \frac{\rho C_p \delta^2}{\lambda}. \quad (3.25)$$

Для воздушно-эмульсионной смеси это время составит $7 \times 10^{-4} \text{с} = 0,7$ мс, т.е. за такое время слой толщиной δ можно считать равномерно прогретым.

Проведём расчёт прогрева слоя смеси с толщиной δ при воздействии теплового потока $q \sim 22$ кВт/м² (рисунок 3.10).

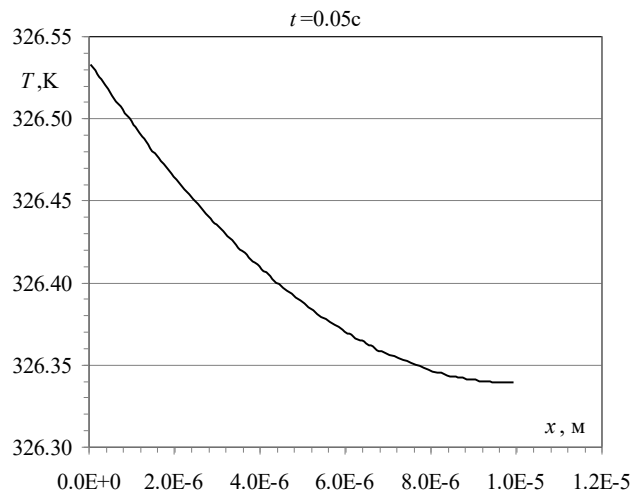


Рисунок 3.10 – Прогрев слоя воды толщины $\delta = 0.01$ мм через $t = 50$ мс после начала обработки

Как следует из рисунка 3.10, при этом тепловом потоке, смесь слоем $\delta = 0,01$ мм прогреется до 27 °С через $t = 50$ мс после начала обработки. Перепад температур поперёк слоя составляет всего $0,25$ К. (рисунок 3.10)

Для обеспечения теплового режима детали весь прогретый слой воздушно-эмульсионной смеси на поверхности должен быть смыт вновь поступающей. Для этого объём, поступающей к поверхности, должен быть больше уже находящегося под инструментом, т.е. смесь полностью должна быть замещена:

$$Ut \frac{1}{4} \pi d^2 > \delta \pi R^2, \quad (3.26)$$

где U – скорость подачи смеси, м/с;

t – время работы установки, с;

d – диаметр канала для подачи смеси, мм;

δ – толщина слоя воздушно-эмульсионной смеси, мм;

r – радиус инструмента, мм.

При расчете с конкретными параметрами получилось значение:

$$\frac{\delta}{Ut} \left(\frac{2R}{d} \right)^2 = 1,061 \text{ м/с.}$$

Это означает, что расход воздушно-эмульсионной смеси позволяет полностью заместить слой на поверхности детали и тепловой режим детали обеспечивается. Для большей надёжности скорость подачи смеси рекомендуется несколько увеличить.

В соответствии с формулой (3.16) и имеющимися перепадами давлений, необходимая скорость подачи воздушно-эмульсионной смеси может быть обеспечена с большим запасом.

3.4 Имитационная модель распределения потоков воздушно-эмульсионной смеси внутри инструмента

При постановке задачи разработке имитационной модели необходимо было решить ряд задач:

1. В начальных условиях необходимо задать, полученный экспериментальным путем, состав воздушно-эмульсионной смеси
2. Учесть полученную толщину слоя смеси, которая ложится на заготовку в процессе обработки
3. Задать, в начальных условиях, ранее рассчитанную скорость потока воздушно-эмульсионной смеси
4. Определить направление потоков смеси внутри каналов инструмента
5. Получить визуализированную работу инструмента внутри имитационной модели
6. Рассмотреть несколько вариантов расположения блоков керамического ворса
7. Получить расчётные температуры в зоне обработки
8. По итогам построения модели теплообмена и имитационного распределения потоков воздушно-эмульсионной смеси провести эксперимент и сравнить полученные данные.

На рисунке представлены варианты компоновки блоков керамического ворса, исследуемые с помощью имитационной модели (рисунок 3.11). Прототип исследуемой щётки имеет компоновку типа *a*, тип *б* и *в* – это попытки оптимизации и модернизации режущих и охлаждающих способностей инструмента.

На рисунке стрелками обозначено направление движения потоков воздушно-эмульсионной смеси, цветовым спектром обозначены области с разной температурой внутри корпуса инструмента.

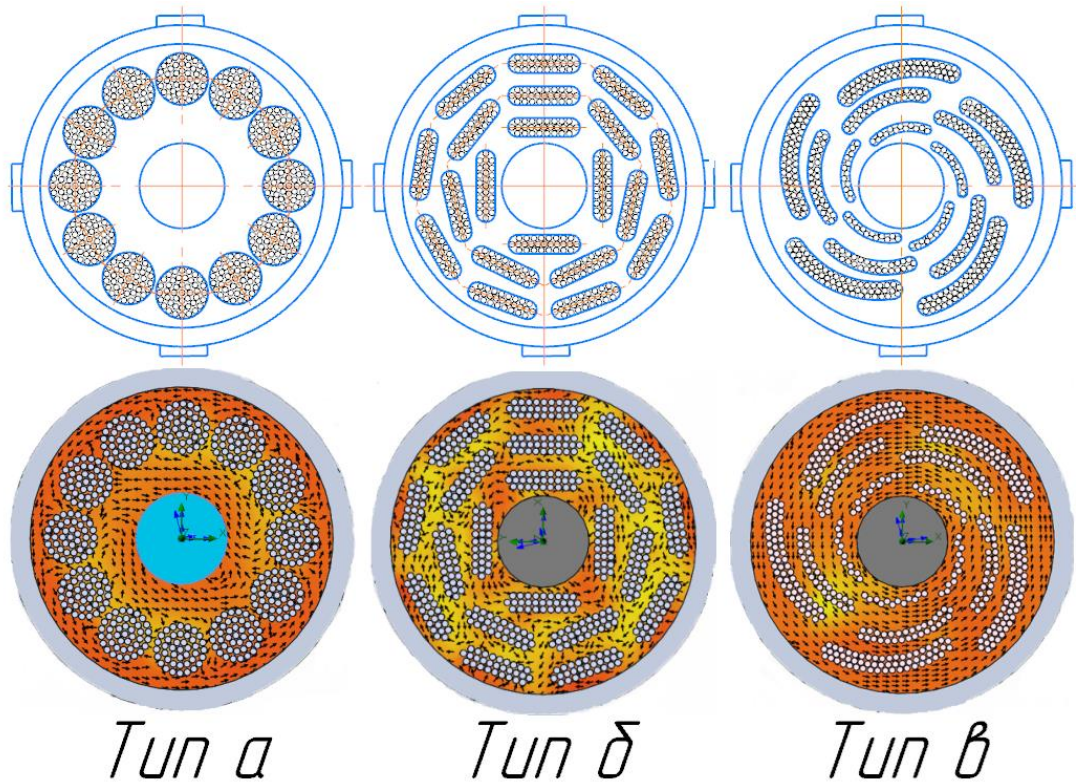


Рисунок 3.11 – Варианты расположения блоков керамического ворса

Выполненные исследования показали, что воздушно-эмульсионная смесь при расположении блоков керамического ворса *типа а* концентрируется в центральной области и практически не омывает волокна. В результате длительного контакта поверхности детали со смесью влагопоглощение полимером увеличивается.

При использовании компоновки *типа б* воздушно-эмульсионная смесь распределяется хаотично между волокнами, в результате снижается скорость замещения уже нагретого объема смеси новым холодным, следовательно, для обеспечения той же температуры обрабатываемой поверхности, требуется ее более длительный контакт с большим объемом смеси, при этом влагопоглощение растёт.

Компоновка пазов *типа в* позволяет наиболее эффективно распределить подводимую воздушно-эмульсионную смесь внутри корпуса инструмента, обеспечивая необходимое охлаждение волокон и быстрое замещение уже нагретой смеси на поверхности, минимизируя влагопоглощение.

Модель распределения течения потоков смеси в сечении показана на рисунке 3.12. Общая длина щётки с учётом вылета ворса — 125 мм. Сами волокна выдвинуты на 12 мм.

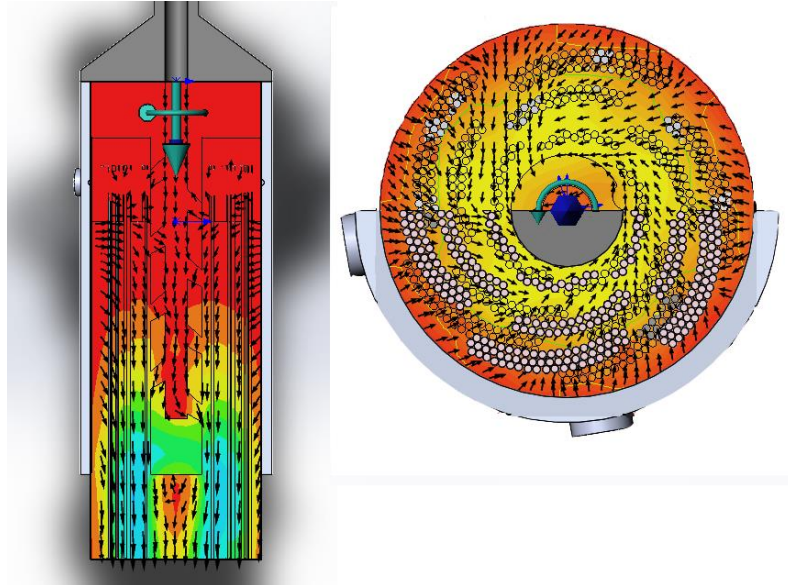


Рисунок 3.12 – Имитационная модель распределения в сечении

На рисунке стрелками обозначено движение потоков воздушно-эмульсионной смеси по внутренним каналам. Воздушно-эмульсионная смесь сначала обволакивает керамические волокна и лишь потом попадает на заготовку.

Модель траектории потока в объёмной области показано на рисунке 3.13

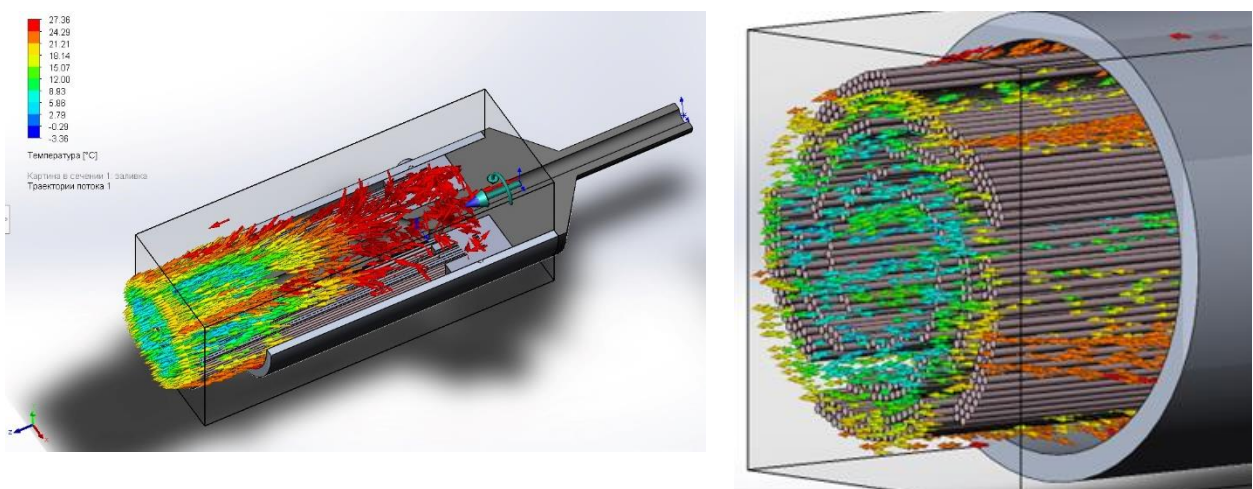


Рисунок 3.13 – Модель траектории потока в объёмной области

На рисунке 3.13 показана объёмная имитация распределения потока воздушно-эмульсионной смеси внутри каналов инструмента. Расчётная температура не превышает 30 °С.

3.5 Выводы по главе

1. Получены закономерности теплообмена и определены параметры подачи воздушно-эмульсионной смеси:

- тепловой поток, возникающий при трении инструмента о поверхность обрабатываемой детали;

- равновесная температура, до которой прогреется поверхность в случае отсутствия охлаждения;

- определена скорость подачи воздушно-эмульсионной смеси и ее расход, для соблюдения теплового режима детали.

2. Разработана имитационная модель распределения потоков воздушно-эмульсионной смеси по каналам внутри корпуса инструмента.

3. Установлено влияние расположения блоков ворса внутри корпуса инструмента на влагопоглощение и эффективность распределения смеси.

4. Спроектирован инструмент – гибкая щётка с радиально-диаметральным расположением блоков ворса из керамических волокон и организацией подачи аэрозоля воздушно-эмульсионной смеси.

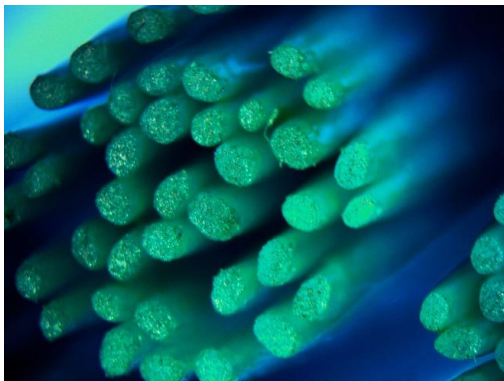
ГЛАВА IV ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТА И СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ

4.1 Влияние площади поперечного сечения единичного керамического волокна и его вылета из корпуса инструмента на шероховатость обработанной поверхности

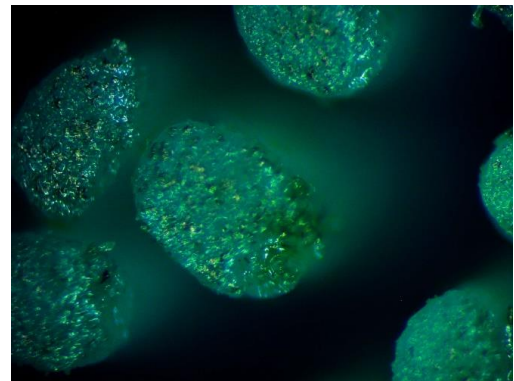
Керамический ворс изготавливают с разной площадью поперечного сечения единичного волокна и соответственно от этого зависит его жёсткость.

В работе подробно изучены и испытаны три варианта сечения волокон.

Ворс с площадью поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 0,65 \text{ мм}^2$ (рисунок 4.1).



a)



б)

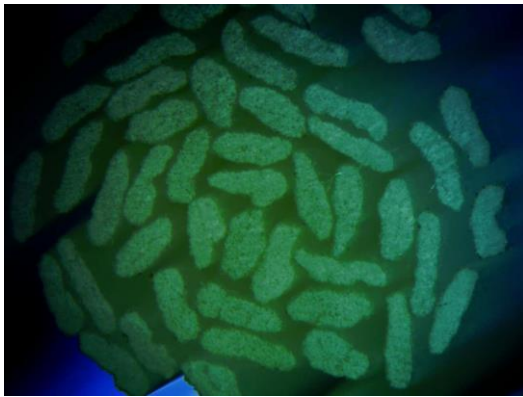
Рисунок 4.1 – Волокно площадью $s = 2,32 \text{ мм}^2$ под микроскопом

На рисунке 4.1 *a* под микроскопом с увеличением $\times 400$ наглядно видно расположение множественных режущих волокон, диаметр режущей кромки которых $D = 0,86 \text{ мм}$, а площадь поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 2,32 \text{ мм}^2$.

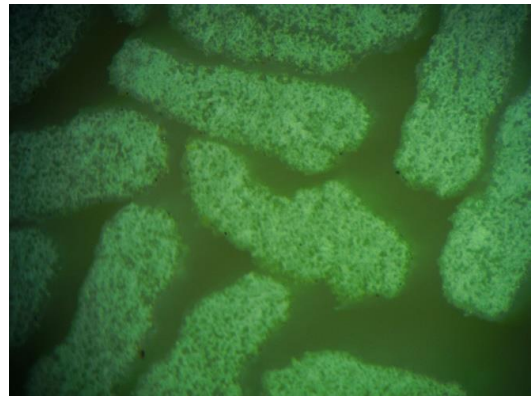
На рисунке 4.1, б, благодаря увеличению $\times 600$ подробно видна связка инструмента с расположенными на торце режущими кромками.

Такая площадь поперечного сечения единичного керамического волокна, позволит обрабатывать материалы с большой глубиной резания ввиду увеличенной жёсткости волокон. Ворс сечением $s = 2,32 \text{ мм}^2$ применять для предварительной, а также последующей доработки поверхности с уменьшение глубины резания.

Ворс с площадью поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 0,65 \text{ мм}^2$ показан на рисунке 4.2



а)



б)

Рисунок 4.2 – Волокно площадью $s = 0,65 \text{ мм}^2$ под микроскопом

На рисунке 4.2 а под микроскопом с увеличением $\times 400$ наглядно видно расположение множественных режущих волокон, которые теперь представляют собой растянутые в виде каплевидной формы круги, средняя длина которых 1,3 мм, а ширина 0,5 мм.

На рисунке 4.2 б, благодаря увеличению $\times 600$, можно подробно рассмотреть керамический ворс с расположенным на торце множеством вкраплений абразивных зёрен.

Обработка керамическим ворсом с $s = 0,65 \text{ мм}^2$ позволяет производить получистовую обработку поверхности. Волокна обладают меньшей жёсткостью, чем ранее рассматриваемый ворс с сечением $s = 2,32 \text{ мм}^2$, а их увеличенное количество способствует увеличению пятна контакта при шлифовании.

Шероховатость обрабатываемой поверхности при этом гораздо меньше, чем при обработке волокнами с сечением $s = 2,32 \text{ мм}^2$;

Ворс с площадью поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 0,65 \text{ мм}^2$ показан на рисунке 4.3.

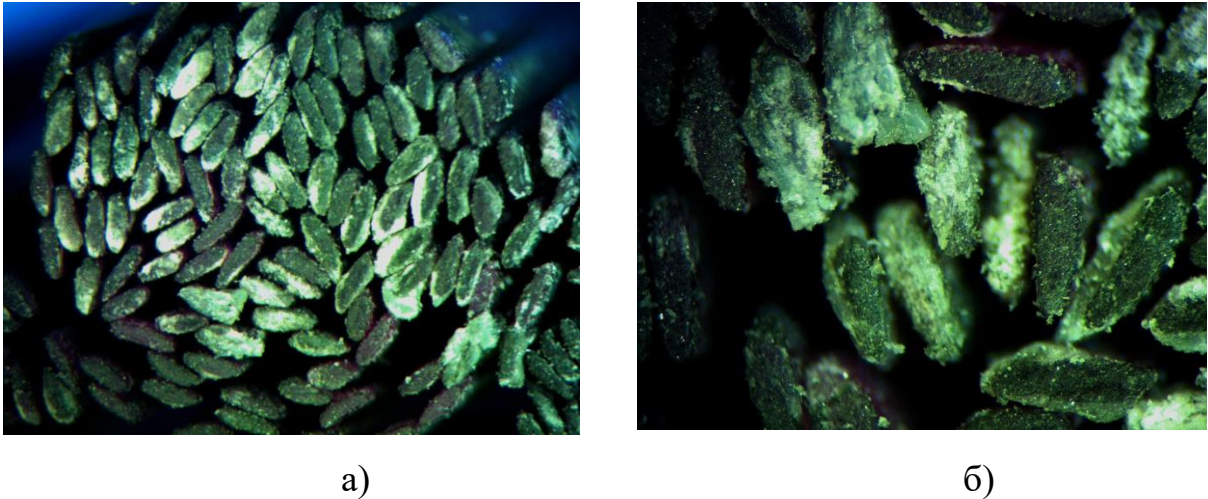


Рисунок 4.3 – Волокно площадью $s = 0,15 \text{ мм}^2$

На рисунке 4.3 *а* под микроскопом с увеличением $\times 400$ наглядно видно расположение множественных режущих волокон. Исследуемый ворс всё также представляет собой растянутые в виде каплевидной формы круги, средняя длина которых $0,6 \text{ мм}$, а ширина $0,25 \text{ мм}$.

На рисунке 4.3 *б*, благодаря увеличению $\times 600$, можно подробно рассмотреть керамический ворс с расположенным на торце множеством вкраплений более мелких абразивных зёрен.

Присутствие сложных и высоких заусенцев усложняет обработку, что сказывается на времени и количестве проходов. Поэтому рекомендуется использовать керамический ворс с площадью поперечного сечения единичного волокна $s = 2,32 - 0,65 \text{ мм}^2$, а потом уже дорабатывать, используя сечение $s = 0,15 \text{ мм}^2$ для уменьшения шероховатости обработанной поверхности.

Ниже приведена сравнительная таблица получаемой шероховатости поверхности, в зависимости от используемой площади поперечного сечения единичного керамического волокна. (таблица 4.1).

Таблица 4.1 — Шероховатость поверхности Ra на исследуемом образце

№ точки измерения	Шероховатость поверхности Ra , мкм до обработки	Площадь поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 2,32, \text{мм}^2$	Площадь сечения поперечного единичного керамического волокна $s = 0,65, \text{мм}^2$	Площадь сечения единичного поперечного керамического волокна $s = 0,15, \text{мм}^2$
1лк	1,943	1,291	0,576	0,96
2лк	2,838	1,334	0,762	0,982
3лк	2,321	1,291	0,658	1,105
4лк	2,674	1,243	0,694	0,786
1цт	3,928	1,453	0,709	1,340
2цт	2,743	1,205	0,68	0,896
3цт	2,260	1,104	0,58	1,003
4цт	2,119	1,050	0,743	0,985
1пк	5,362	1,230	0,765	1,425
2пк	2,201	1,150	0,789	1,097
3пк	3,429	1,365	0,837	1,258
4пк	2,190	1,5	0,676	1,090

Из таблицы 1 следует, что уменьшение поперечного сечения единичного керамического волокна до определенного значения ($s = 0,15 \text{ мм}^2$) снижает шероховатость обработанной поверхности Ra , мкм.

Экспериментальные исследования показали, что используя ворс с площадью поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 2,32 \text{ мм}^2$, можно обрабатывать детали из ПКМ на большой глубине резания, но слоистая структура полимера при этом портится, возникают царапины.

Использование ворса с поперечным сечением единичного керамического волокна $s = 0,65 \text{ мм}^2$ позволяет улучшить поверхность обрабатываемого полимера. Уменьшение жёсткости ворса позволяет более точно обходить поверхность детали.

Использование ворса с поперечным сечением единичного керамического волокна $s = 0,15 \text{ мм}^2$ не позволяет обрабатывать сложные большие заусенцы и дефекты на поверхностном слое. Рекомендуется производить предварительную обработку ворсом с большим сечением, а мягкую связку использовать только в случае доработки конкретных мест на детали.

Обработанные результаты, полученные в ходе экспериментов, были занесены на график (рисунок 4.4).

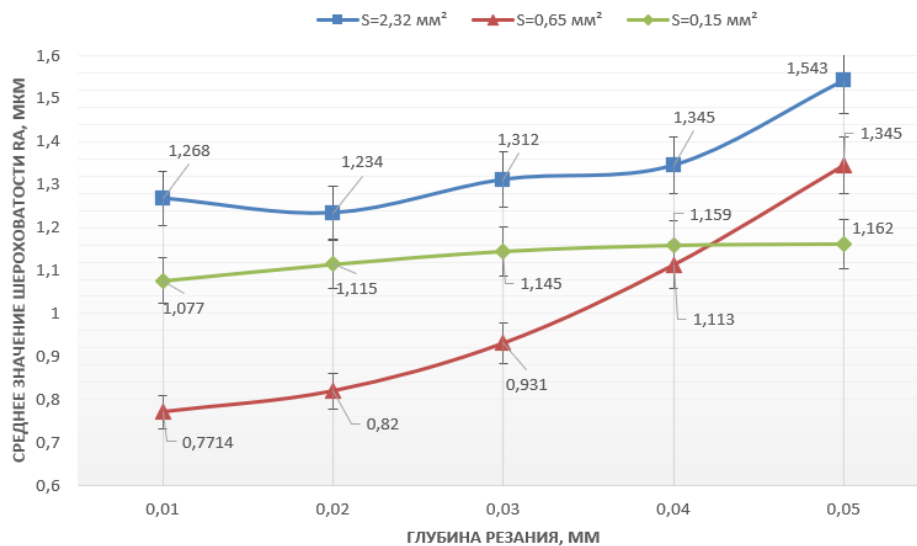


Рисунок 4.4 – Влияние площади поперечного сечения единичного керамического волокна на шероховатость

На рисунке 4.4 на горизонтальной оси абсцисс занесены точки, соответствующие глубине резания, мм. На вертикальную ось ординат занесены точки, соответствующие среднему значению шероховатости поверхности. Таким образом, увеличение глубины резания приводит к росту производительности

обработки, но шероховатость обрабатываемой поверхности при этом увеличивается.

Гибкий инструмент с рассматриваемым в работе перспективным керамическим ворсом имеет малую жёсткость, поэтому его способность изгибаться под влиянием сил, возникающих в процессе резания, характеризует его гибкость.

В процессе механической обработки возникает явление под названием «Натяг» (рисунок 4.5). Натяг – это увеличение линейного размера рабочей части инструмента в процессе обработки щётки с гибкими керамическими волокнами.

Коррекция этого значения, в случае необходимости, требуется для повышения точности обрабатываемой поверхности, а также для увеличения производительности и снижения шероховатости.

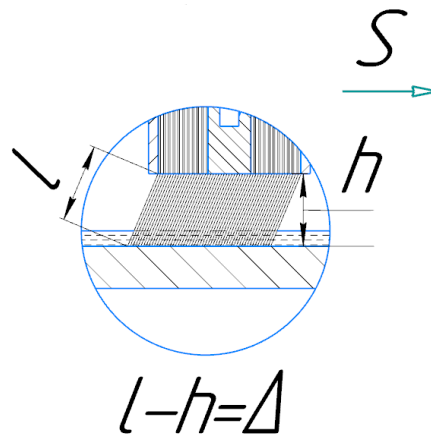


Рисунок 4.5 – Схема образования натяга во время обработки инструментом с гибким керамическим ворсом

На рисунке 4.5 схематично изображена область обработки с помощью инструмента с гибкими керамическим ворсом и поверхностью, направление подачи обозначено буквой S , мм/об. Керамические волокна выдвигаются из корпуса на высоту h , мм, ограничивающим фактором здесь будет являться цилиндрический корпус. Во время обработки волокна щётки отклоняются в противоположную, под действием сил трения, сторону на длину l , мм. Именно

разница в длине отклонения l и высоте вылета h характеризует величину натяга Δ , мм.

В процессе экспериментов установлено, что уменьшение натяга до $\Delta < 1$ мм приводит к деструкции поверхностного слоя детали (образованию трещин и царапин), а его увеличение свыше $\Delta > 4$ мм снижает производительность обработки и приводит к появлению необработанных мест на поверхности.)

4.2 Влияние способа охлаждения на параметры точности детали, получаемую шероховатость и влагопоглощение материала

4.2.1 Обработка без охлаждения

Низкая теплопроводность деталей из ПКМ создает определенные условия для механической обработки. Высокие температуры, сопровождающие процесс шлифования, приводят к неизбежной деструкции и образованию наплывов на поверхности (рисунок 4.6).

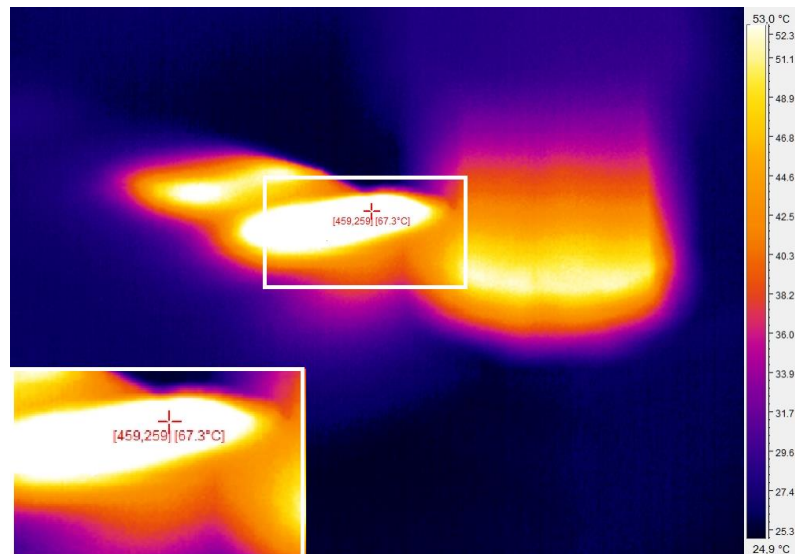


Рисунок 4.6 – Образование температурных полей в процессе обработки

На рисунке 4.6 спектром цветов показаны температуры, образовавшиеся в зоне резания. Наглядно видно, что нагреву подвержена вся обрабатываемая

поверхность детали, а точки с самой высокой зафиксированной температурой 52,0 °С соответствуют следу инструмента в момент времени обработки.

Полученная поверхность после обработки показана на рисунке 4.7, где под цифрой 1 показан наплыв, вышедший за границы заготовки при достижении температуры 67,3 °С в результате размягчения поверхности. Под цифрой 2 показаны вкрапления абразива, который застыл и остался на поверхности детали после обработки.

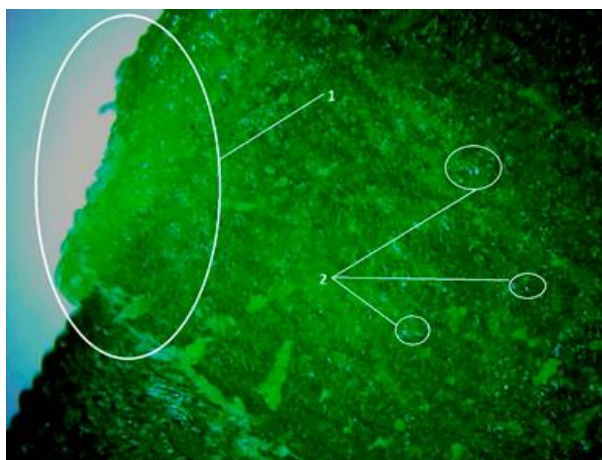


Рисунок 4.7 – Поверхности после обработки под микроскопом: 1 — наплыв;
2 — вкрапления абразивных зёрен

В ходе изучения поверхности, показанной на рисунке 4.7, можно однозначно сказать о необходимости применения охлаждения.

Керамический ворс, в результате повышения температуры в зоне резания и размягчения поверхности обрабатываемого полимера, сильно подвержен износу (рисунок 4.8).

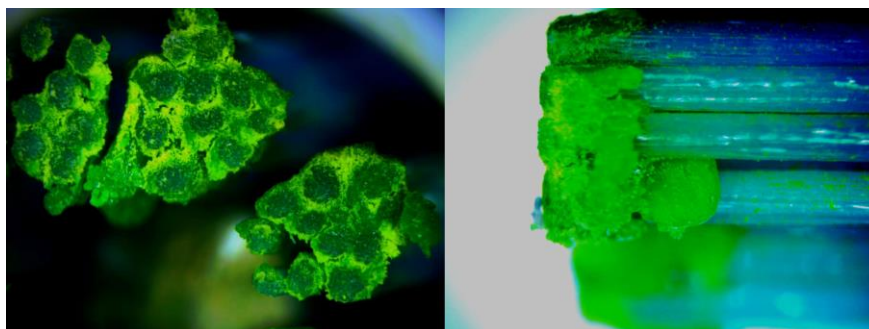


Рисунок 4.8 – Инструмент после обработки без использования охлаждения

На рисунке 4.8 показан вид инструмента с торца и сбоку соответственно. В результате повышения температуры, размягчённая поверхность полимера начинает налипать на керамический ворс инструмента. Некоторая часть керамического волокна может остаться и застыть в структуре заготовки (ранее было показано на рисунке 4.7). Производительность инструмента при этом снижается и значительно увеличивается износ, что приводит к разрушению керамического ворса.

После измерения профилометром обработанной поверхности детали, результаты были занесены на график (рисунок 4.8), где на горизонтальной оси абсцисс показано расположение точки на плоскости. На вертикальную ось ординат занесены точки, соответствующие замерам шероховатости поверхности Ra мкм.

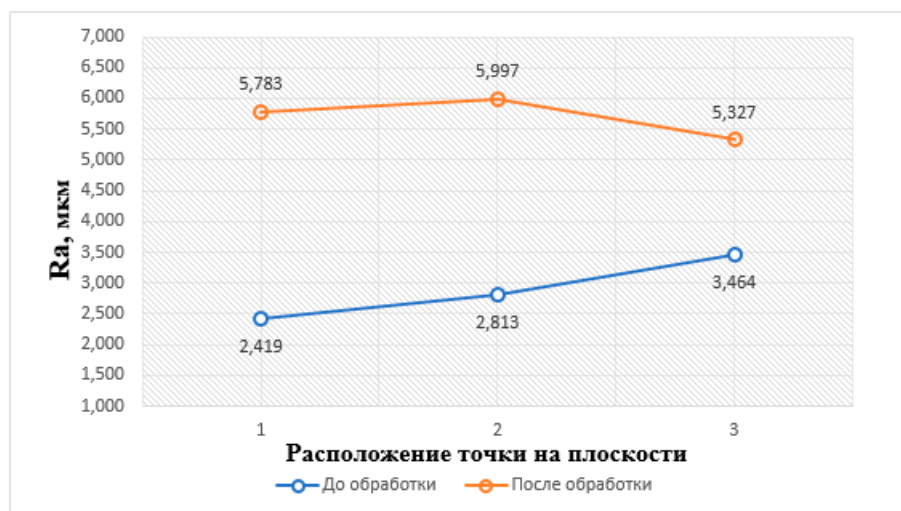


Рисунок 4.8 – График изменения шероховатости после обработки

Синей линией отмечены значения до обработки, которые соответствуют значениям, полученным после послойного выращивания. Рыжим цветом отмечены итоговые значения после обработки.

Анализ приведенного графика показывает значительное ухудшение шероховатости Ra примерно в 2–2,5 раза. Обработка ПКМ без использования охлаждения приводит к перегреву поверхности и в следствие к ее размягчению и браку.

4.2.2 Исследование влияния направленных потоков эмульсионной смеси

Механическая обработка деталей из ПКМ без использования охлаждения приводит к перегреву поверхности и, как следствие, к размягчению обрабатываемой поверхности и образованию наростов.

Керамические волокна, в результате увеличения температуры в зоне резания, подвержены интенсивному износу, на ворс налипает полимер, эффективность обработки падает.

Эксперимент с охлаждением с помощью направленных потоков эмульсии проходил закрытой камере станка при обильном охлаждении (рисунок 4.9).



Рис. 4.9 – Обработка с использованием штатной системы охлаждения станка

На рисунке 4.9 показана рабочая зона станка, в которую была помещена заготовка 1 и инструмент с керамическим ворсом 2. В процессе работы с помощью направленных потоков эмульсии 3 происходит активное охлаждение и удаление стружки в виде пыли.

Данный способ охлаждения значительно снижает температуры в зоне резания, что показано на рисунке 4.10 распределением температурных зон.

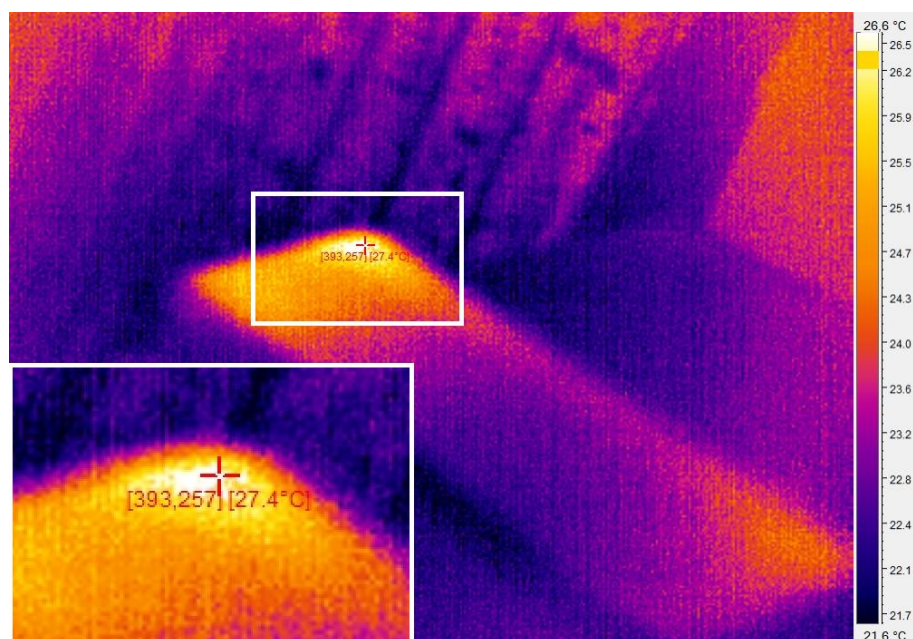


Рисунок 4.10– Распределение температурных зон при обработке с охлаждением

На рисунке 4.10 спектром цветов показаны температурные зоны: синий и оранжевый цвет соответствует участкам температуры на шкале. Максимальное зафиксированное значение $t = 27,4$ °С.

Обработку с использованием направленных потоков эмульсии можно производить, не опасаясь за размягчение поверхности и загрязнения полимером керамических волокон.

Однако при таком виде охлаждения возникает эффект влагопоглощения (рисунок 4.11). После обработки, через некоторое время, расслаивается структура и набухают волокна. Всё это приводит к неисправимому браку изделия.



Рисунок 4.11 – Нарушение структуры детали вдоль слоёв

Вдоль слоёв наблюдается деструкция поверхности в результате впитывания влаги.

На рисунке 4.12 видна расслоившаяся, плотно уложенная структура полимера. Слои, полученные при печати увеличились в размере. Деталь теряет свою первоначальную жёсткость.

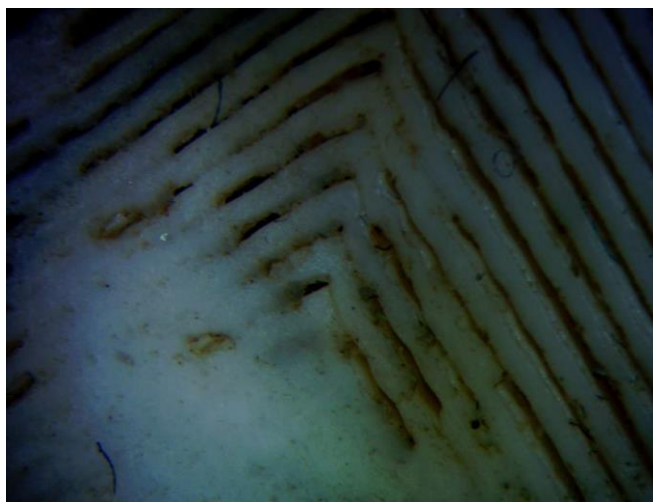


Рисунок 4.12 – Расслоившаяся структура полимера под микроскопом (увеличение x300)

На рисунке 4.12 наглядно видны набухшие слои, нарушившие структуру детали. Таким образом, даже использование последующей сушки не даст положительного результата. Наблюдаемый дефект приводит к неисправимому браку.

Помимо набухания слоёв на поверхности, деталь из ПКМ подвержена изменению геометрической формы и размеров (рисунок 4.13). Аддитивные технологии не позволяют изготавливать цельнолитые детали, поэтому всегда при послойном выращивании имеется стенка некоторой толщины. Этот параметр хоть и можно варьировать при печати, но влагопоглощение всё равно приведёт ее смещению.



Рисунок 4.13 – Отслоение контура детали

На рисунке 4.13 наглядно показан отслоившийся контур. Целостность детали при этом нарушена. Отслоение стенки от внутреннего контура приводит к неисправимому браку.

На рисунке 4.14 можно рассмотреть ещё один дефект, возникающий вследствие влагопоглощения.



Рисунок 4.14– Образование трещины вдоль волокон детали

На рисунке 4.14 наглядно показана образовавшаяся трещина в результате впитывания влаги полимером. Из-за особенностей технологии выращивания, чаще всего такие дефекты будут возникать именно вдоль слоёв, что может привести к разлому всей детали.

Результатом проведения экспериментов стало исследование изменения размеров детали из ПКМ в результате эффекта влагопоглощения (рисунок 4.15).



Рисунок 4.15– График изменения геометрических размеров заготовки от влагопоглощения

На рисунке 4.15 отражён график, на горизонтальной оси абсцисс которого показано время от начала эксперимента до момента полного высыхания с шагом в час. На вертикальную ось ординат занесены точки, соответствующие изменению геометрических размеров.

В результате замера на шестом часу эксперимента установлено снижение геометрических размеров в результате сушки полимерных волокон, но к изначальным параметрам исследуемый полимер не возвращается.

Обработка поверхности без использования эмульсии приводит к повышению температуры поверхности. В результате образуются наросты и происходит налипание полимера на зёрна абразивного инструмента. Исследование способа охлаждения с помощью направленных потоков эмульсии приводит к набуханию исследуемой поверхности. Шероховатость Ra , мкм снижается, но ввиду последующего расслоения структуры и насыщения влагой волокон деталь не допускается применять в дальнейшую работу.

4.2.3 Исследование влияния ионизирующего воздуха

С целью устранения эффекта влагопоглощения был проведён поиск альтернативного охлаждения, полностью исключая попадание влаги на

обрабатываемую деталь из ПКМ. В результате предложен способ подачи охлаждения распылённым воздухом (рисунок 4.16).

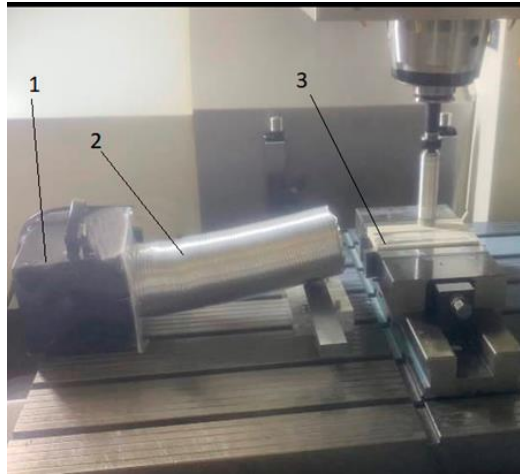


Рис. 4.16 – Экспериментальная установка с направленной ионизацией

На рисунке 4.16 представлена экспериментальная установка 1 с направленной ионизацией, которая была установлена в камере станка. Принцип её работы заключается в том, что ионизированный воздух подаётся непосредственно в зону резания с помощью кожуха 2 на заготовку 3. Предполагалось, что при этом будет охлаждаться керамические волокна инструмента и обрабатываемый деталь из ПКМ. Результаты замера температур представлены на рисунке 4.17, где цветовой палитрой показан тепловой след в зоне обработки, в обведенной области температура достигла 52 °С, что привело к началу процесса размягчения и кристаллизации.

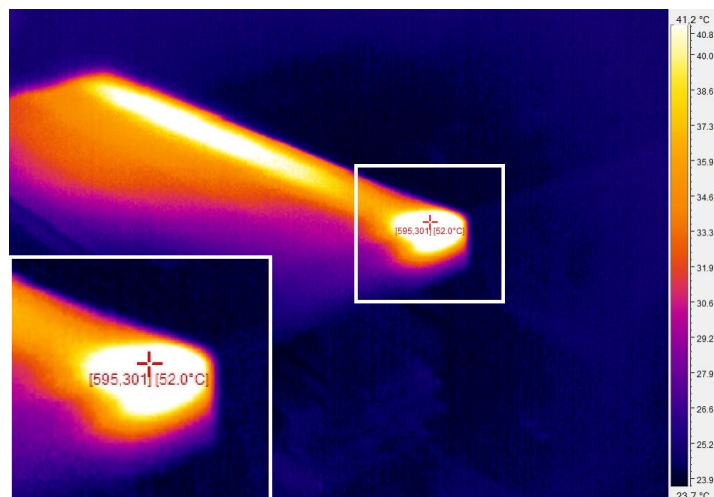


Рисунок 4.17 – Тепловой след в эксперименте с ионизатором

Между инструментом и заготовкой происходит постоянный теплообмен. Если в зоне резания повышается температура до той величины, при которой происходит размягчение полимера, он также начинает налипать на керамические волокна (рисунок 4.18). В эксперименте с потоком ионизирующего воздуха замер был произведён уже после остановки обработки, поэтому температуры несколько ниже (~ 10 °C).

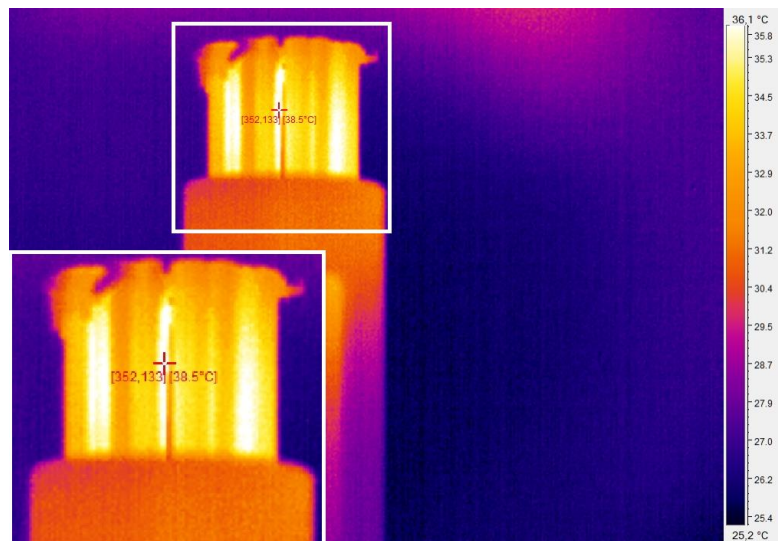


Рисунок 4.18 – Температурные зоны на рабочей части инструмента

На рисунке 4.18 спектром цветов указаны тепловые зоны на рабочей части щётки. Исследование показало, что в течение 15–30 с полимер застывает на керамического ворсе инструмента, очистка возможна только механическим способом. Повторный нагрев до температуры размягчения с целью освобождения от налипшего полимера может пагубно сказаться на режущей способности керамических волокон.

После изучения спектра возникших температур, зафиксированных в процессе механической обработки детали из ПКМ, была подробно рассмотрена с помощью микроскопа полученная поверхность (рисунок 4.19).



Рисунок 4.19 – Поверхность после ионизации

На рисунке 4.19 наглядно видно полосы, соответствующие траектории движения инструмента. Они образуют между собой наплывы, которые значительно отличаются от эксперимента без использования охлаждения, так как температура в зоне обработки меньше за счёт направленного потока ионизирующего воздуха.

Однако, как видно по рисунку 4.17-4.18 и обработанной поверхности 4.19, использование такого способа охлаждения не позволяет снизить температуру до температуры <50 °С. Стружка в виде пыли оседает на режущей части инструмента, что приводит к перегреву и повышению его износа.

Снижение шероховатости Ra при данном способе охлаждения достигнуто быть не может.

4.2.4 Исследование влияния распыления воздушно-эмульсионной смеси на шероховатость обработанной поверхности

Предложено совместить два ранее изученных способа. Таким образом, эмульсия и воздух должны образовать специальную воздушно-эмульсионную

смесь и снижать концентрацию влаги. Данный эффект был реализован с помощью экспериментальной установки распыления (рисунок 4.20).

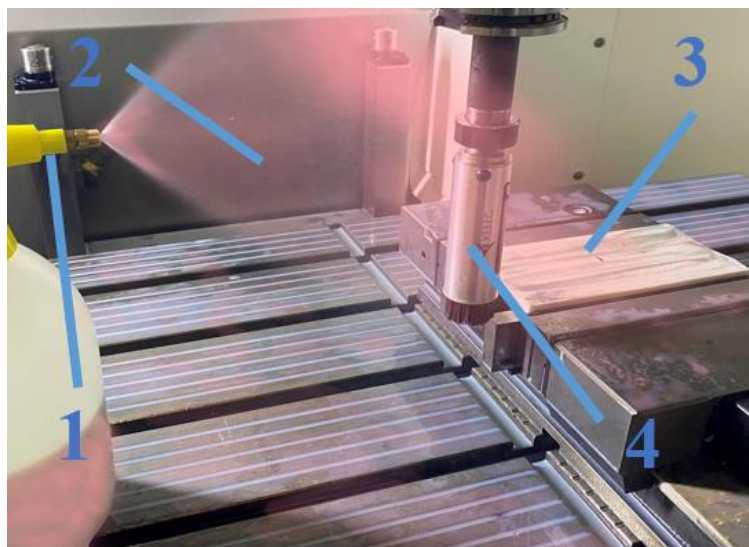


Рисунок 4.20 – Экспериментальная установка распыления воздушно-эмульсионной смеси

На рисунке 4.20 наглядно показана экспериментальная установка 1, заготовка 3 и инструмент с гибким керамическим ворсом 4, которые находятся внутри среды насыщенного аэрозоля воздушно-эмульсионной смеси 2.

Такой способ охлаждения позволяет обрабатывать деталь из ПКМ, не опасаясь за набухание и расслоение волокон заготовки. Эффект влагопоглощения при таком способе значительно ниже, чем при использовании направленных потоков эмульсии.

В ходе проведения обработки было отмечено, что насыщенное облако позволяет удалить стружку в виде пыли, препятствуя ее оседанию на заготовке и керамических волокнах, что в результате снижает температуру. Износ ворса при этом уменьшается, эффективность обработки остаётся на прежнем уровне.

Распределение температуры в зоне резания было подробно изучено с помощью тепловизора. Обработанные результаты представлены на рисунке 4.21.

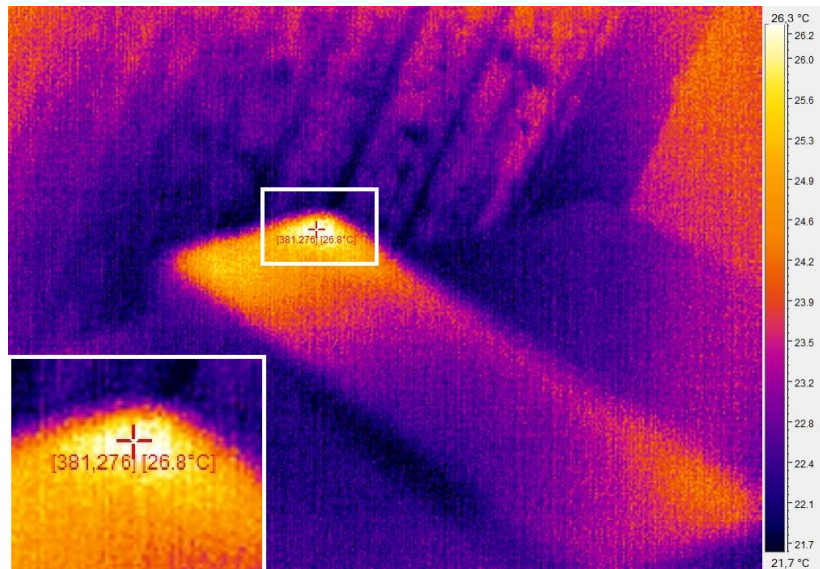


Рисунок 4.21 – Распределение температурных зон в облаке воздушно-эмульсионной смеси

На рисунке 4.21 выделенный фрагмент соответствует максимальной зафиксированной температуре 26,8 °С. Температура обработанной поверхности детали из ПКМ, зафиксированная в опыте с использованием направленной эмульсии, хоть и соответствует текущему, но использование охлаждения в облаке воздушно-эмульсионной смеси снижает влагопоглощение полимером.

Шероховатость после эксперимента была измерена с помощью профилометра. Результаты обработки были совмещены, построенный график показан на рисунке 4.22.

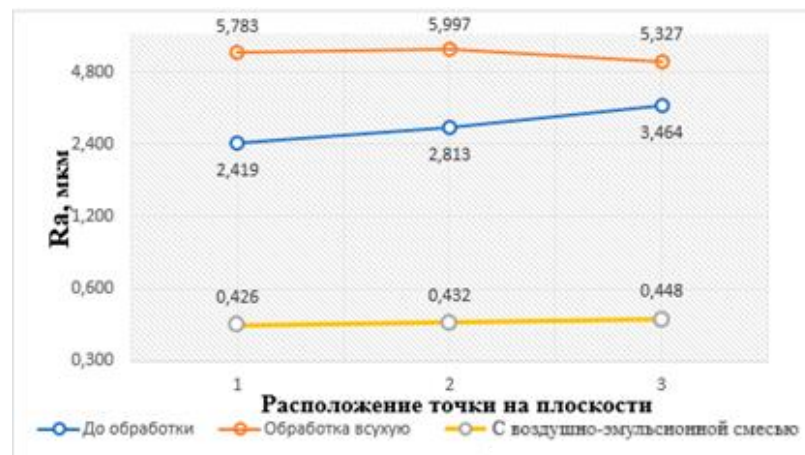


Рисунок 4.22 – График изменения качества поверхности после проведённых испытаний

Анализ данных по рисунку 4.22 показывает снижение значения шероховатости Ra после обработки в опыте с использованием воздушно-эмульсионной смеси относительно обработки без охлаждения.

4.2.5 Снижение влагопоглощения за счёт изменения состава воздушно-эмульсионной смеси

Для более точной оценки охлаждения распылением, необходимо выбрать оптимальное соотношение ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ при формировании воздушно-эмульсионной смеси.

При в соотношении ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 50:50% график изменения геометрических размеров и шероховатости обработанной поверхности выглядит следующим образом (рисунок 4.23).

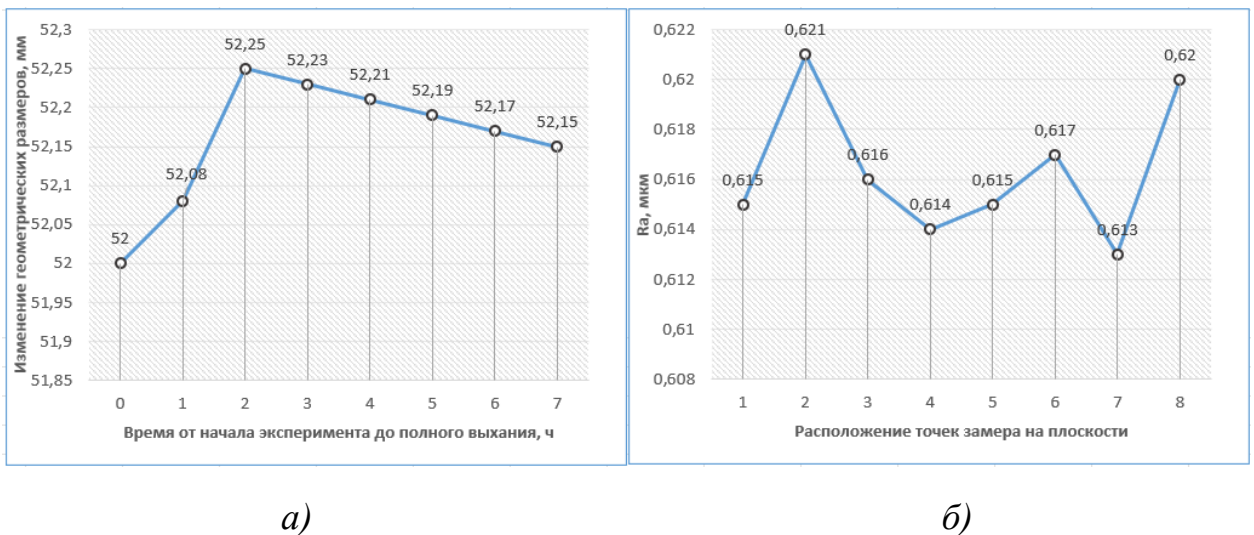


Рисунок 4.23 – Изменение геометрических размеров заготовки и получаемой шероховатости поверхности при соотношении ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 50:50%

На рисунке 4.23 а на горизонтальной оси абсцисс показано время от начала эксперимента до момента полного высыхания с шагом в час. На вертикальную ось ординат занесены точки, соответствующие изменению геометрических размеров.

По графику видно, что заготовка после обработки и полного высыхания увеличилась в размерах.

Далее следовало понять эффективность механической обработки, результатом стал замер профиля поверхности профилометром, результаты которого отражены на графике (рисунок 4.23 б). Минимальное зафиксированное значение шероховатости $Ra = 0,613$ мкм.

Расход воздушно-эмульсионной смеси при таком соотношении:

$$Q = 0,139 \text{ м}^3 / \text{с} .$$

Для уменьшения влагопоглощения было снижен состав эмульсии в смеси, для чего было установлено следующее соотношение ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 60:40%. Результаты изменения геометрических размеров и получаемой шероховатости были занесены на график (рисунок 4.24).

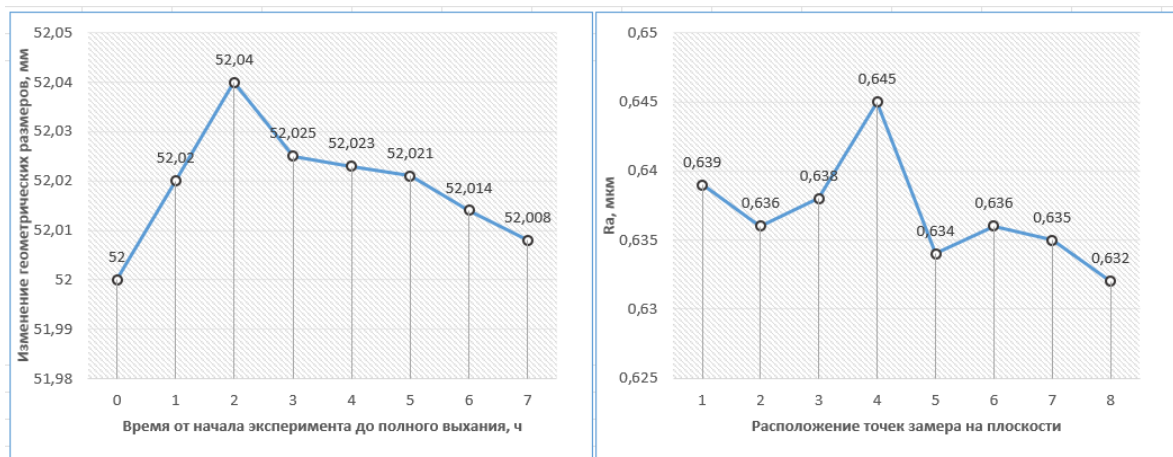


Рисунок 4.24 – Изменение геометрических размеров заготовки и получаемой шероховатости при соотношении ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 60:40%

Анализируя данные, полученные с графиков 4.24, установили, что при таком соотношении геометрические размеры увеличились на 0,008 мм там, где набухание наблюдалось в большей степени.

Шероховатость обработанной поверхности, напротив, начала снижаться $Ra = 0,632$ мкм. С учетом результатов влагопоглощения такой состав является более предпочтительным.

Расход воздушно-эмульсионной смеси при таком соотношении снизился:

$$Q = 0,111 \text{ м}^3 / \text{с} .$$

При выбранном соотношении ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 70:30% график изменения геометрических размеров и шероховатости обработанной поверхности выглядит следующим образом (рисунок 4.25).

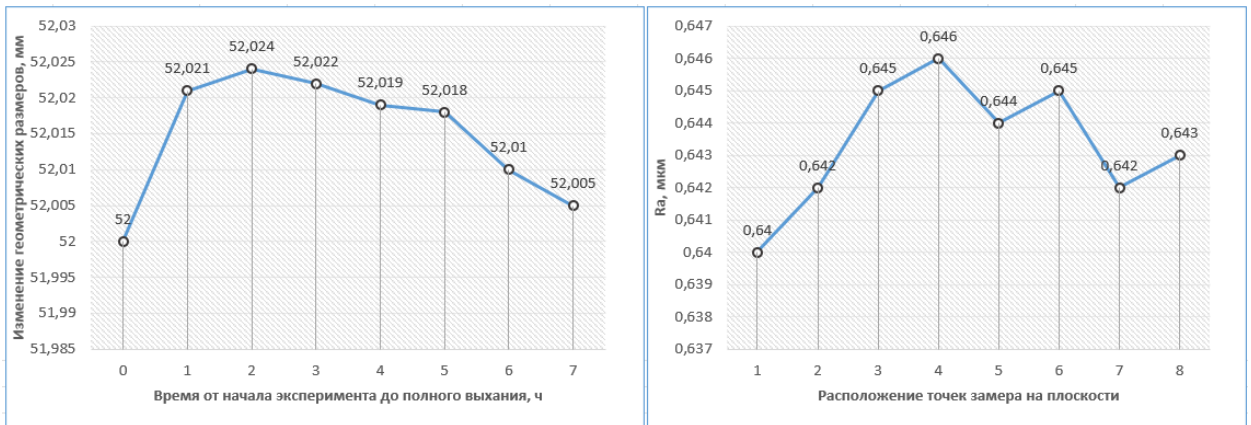


Рисунок 4.25 – Изменение геометрических размеров заготовки и получаемой шероховатости при соотношении ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 70:30%

Анализируя данные, полученные с графиков 4.25, установлено что при таком соотношении геометрические размеры увеличились лишь на 0,005 мм, что является лучшим результатом.

Шероховатость поверхности при этом продолжает снижаться. Замеры показали, что теперь наибольшее значение установилось равным $Ra = 0,646$ мкм. Этот результат по-прежнему соответствует поставленной в ходе исследований задаче.

Расход воздушно-эмульсионной смеси при таком соотношении:

$$Q = 0,084 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Исследование соотношения ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 80:20% (рисунок 4.26) и график изменения геометрических размеров и качества обработанной поверхности выглядят следующим образом:

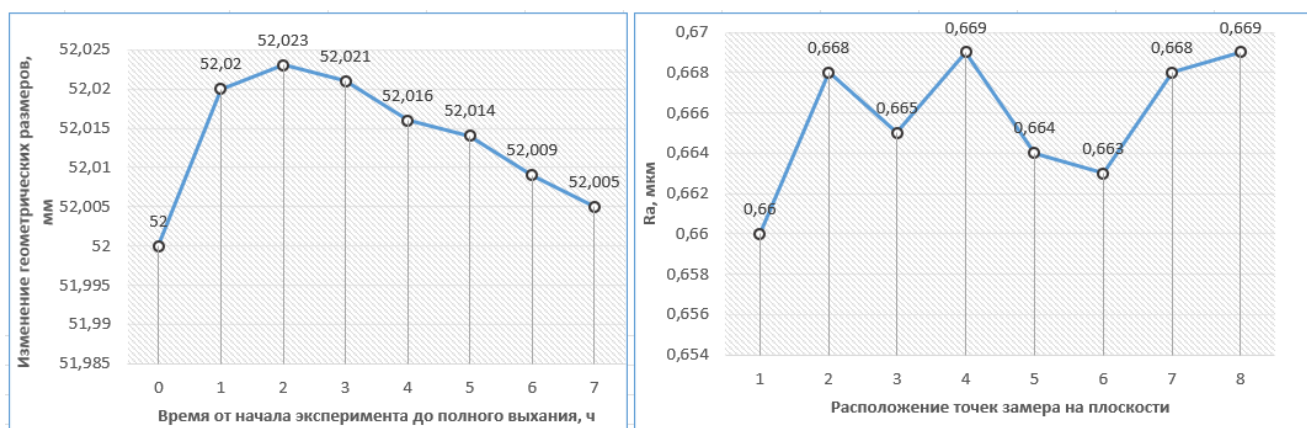


Рисунок 4.26 – Изменение геометрических размеров заготовки и получаемой шероховатости при соотношении ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 80:20%

После анализа данных, полученных с графика изменения геометрических размеров 4.26, установлено, что размеры заготовки сохранили прежние значения, как и при соотношении ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ 70:30%.

Шероховатость поверхности увеличилась $Ra = 0,669$ мкм. Этот результат хоть соответствует поставленной задаче в ходе исследования.

Расход воздушно-эмульсионной смеси при таком соотношении:

$$Q = 0,056 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Исследование влагопоглощения проводилось на материалах, отличающихся по своим свойствам, поэтому с целью формирования рекомендаций по обработке был составлен график(рисунок 4.27).

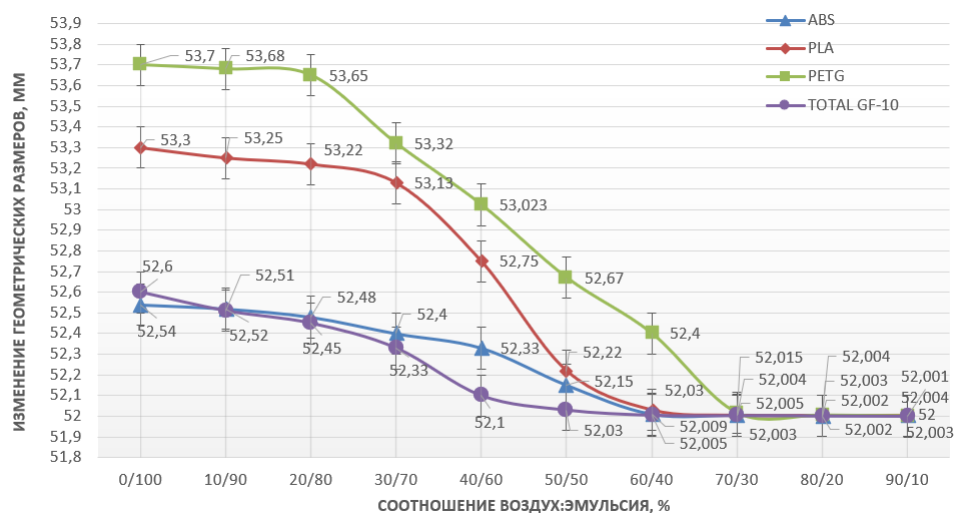


Рисунок 4.27 – Влияние соотношения ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ на изменение геометрических размеров

На рисунке 4.27 на горизонтальной оси абсцисс располагаются точки, соответствующие определенному соотношению ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ, %. На вертикальную ось ординат занесены точки, отражающие изменение геометрических размеров детали, мм. По графику наглядно видно, что при соотношении воздушно-эмульсионной смеси 60:40% интенсивно снижается процесс влагопоглощения, снижая влияние на изменение геометрических размеров и сохранение требуемой геометрической формы детали. Снижение соотношения эмульсии в смеси до значений <20% приводит к интенсивному росту температур в зоне обработки.

4.3 Исследование влияния режимов резания и износа инструмента на шероховатость обработанной поверхности

С целью обеспечения заданной производительности, шероховатости и точности обработки, необходимо выявить рациональные значения скорости обработки и подачи инструмента.

При проведении опытов использовались изготовленные, методом послойного выращивания, образцы деталей из ПКМ, поверхность которых была

подробно исследована с помощью профилометра в 12 точках. В результате получены данные, представленные в таблице 4.2.

Таблица 4.2. —Шероховатость поверхности Ra на исследуемом образце

№ точки измерения	Шероховатость поверхности, мкм
1лк	1,943
2лк	2,838
3лк	2,321
4лк	2,674
1цт	3,928
2цт	2,743
3цт	2,260
4цт	2,119
1пк	5,362
2пк	2,201
3пк	3,429
4пк	2,190

Полученные значения показывают, что шероховатость поверхности неоднородна, в некоторых точках имеются значительные ухудшения Ra , мкм. Увеличенная с помощью микроскопа поверхность представлена на рисунке 4.28.

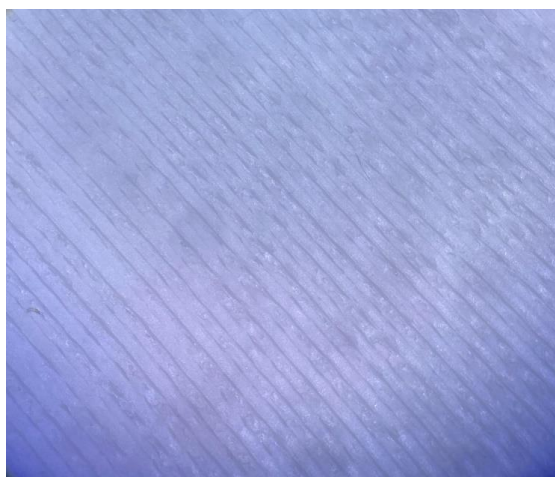


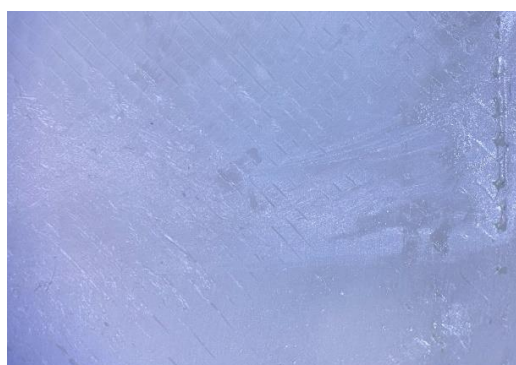
Рисунок 4.28 – Поверхность, полученная после послойного выращивания

На рисунке 4.28, наглядно, видны поверхностные слои изделия до начала эксперимента, сформированные при послойном выращивании.

При проведении опытов изменялись следующие режимы обработки: скорость обработки V — м/мин, подача S — мм/об, общий слой снимаемого $t = 0,2$ мм, за один проход глубина резания составила $t = 0,05$ мм. Таким образом всего было 4 прохода. Вылет инструмента из корпуса $h = 12$ мм.

Для охлаждения использовалась воздушно-эмульсионная смесь. Процент перекрытия инструментом составил 100 %, таким образом щётка работала всей своей рабочей частью.

Результаты экспериментов при использовании режимов: $V = 215$ м/мин, подача $S = 7,5$ мм/об представлены на рисунках 4.29 а, б.



а



б

Рисунок 4.29 – Результаты экспериментов при использовании режимов:

$$V = 215 \text{ м/мин, подача } S = 7,5 \text{ мм/об}$$

На рисунке 4.29 а под микроскопом с увеличением показана поверхность, полученная после обработки. Более детальное изучение дало понять, что структура неоднородна и присутствуют следы слоёв, полученные на этапе изготовления изделия, а также царапины после обработки.

На рисунке 4.29 б показан график шероховатости обработанной поверхности. R_a находится в диапазоне 0,809–1,334 мкм.

В следующем эксперименте результате увеличена скорость обработки, которая теперь составляет $V=450$ м/мин, а также уменьшена подача до $S=5$ мм/об (рисунок 4.30).



а)



б)

Рисунок 4.30 – Результаты экспериментов при использовании режимов:
 $V=450$ м/мин, подача $S=5$ мм/об

На рисунке 4.30 а под микроскопом с увеличением показана поверхность, полученная после обработки, на ней видно, что структура неоднородна и присутствуют впадины, заметные рыхлости в виде пор.

На рис 4.30 б показан график, составленный после измерения профилометром в 12 точках поверхности детали, значения Ra находятся в диапазоне 0,7–1,15 мкм.

При таких режимах рекомендуется увеличить количество проходов для достижения лучшего результата. Однако, это значительно скажется на общем времени.

Следующим этапом стало снижение числа оборотов до $V=405$ м/мин и подачи до $S=4$ мм/об, полученные результаты представлены на рисунке 4.31 а, б.



а)

б)

Рисунок 4.31– Результаты экспериментов при использовании режимов:

$$V = 405 \text{ м/мин, подача } S = 4 \text{ мм/об}$$

На рисунке 4.31 а под микроскопом с увеличением показана поверхность, полученная после обработки. При таких режимах обработки она получилась наиболее однородной, следов от инструмента не наблюдается.

Как показал график 4.32 б, значения Ra находятся в диапазоне 0,576–0,92 мкм, таким образом, удалось улучшить поверхность примерно в 2,5 раза.

В результате исследования влияния режимов обработки на получаемую шероховатость был получен график (рисунок 4.33), отражающий полученную зависимость.

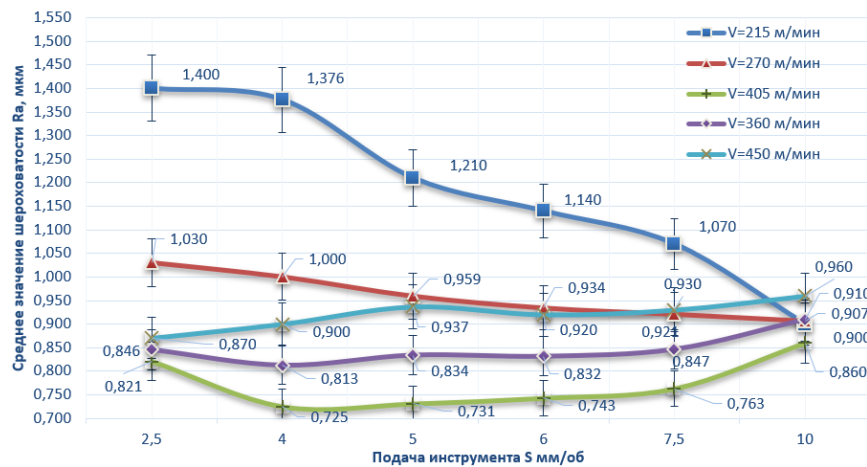


Рисунок 4.33 – Влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности

На рисунке 4.33 представлен график. На оси абсцисс нанесены точки, соответствующие подаче, на оси ординат точки соответствующие полученному среднему значению шероховатости обработанной поверхности. Цвет линии графика соответствует определённому значению скорости обработки.

Исследование износа режущего части инструмента проходило при изменении поперечного сечения единичного керамического волокна и глубины резания. Полученная зависимость показана на рисунке рисунок 4.34.

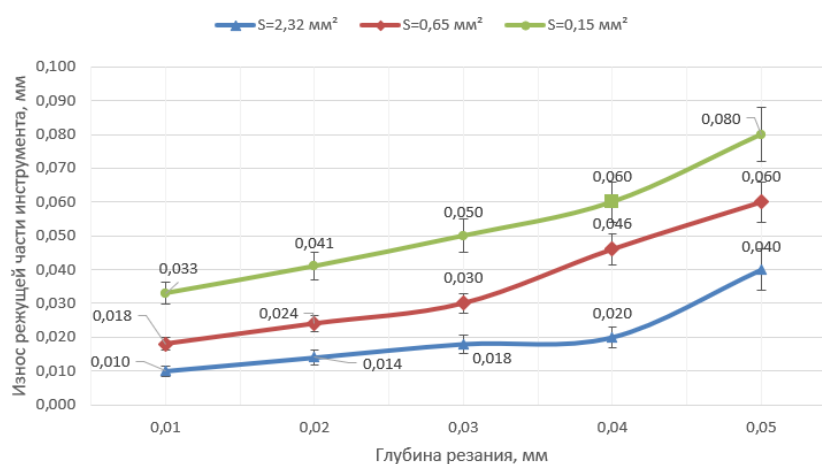


Рисунок 4.34 – Зависимость глубины резания и площади поперечного сечения единичного керамического волокна от износа инструмента

На рисунке 4.34 по оси абсцисс значения соответствуют глубине резания, а ось ординат величине износа режущей части инструмента. При увеличении значения слоя материала снижается время обработки, но происходит стачивание рабочей части, причём, чем больше поперечное сечение единичного керамического волокна, тем меньше будет величина износа.

4.4 Выводы по главе

1. Обработка деталей из ПКМ без охлаждения приводит к значительному росту температур в зоне резания. В результате происходит размягчение поверхности и налипание полимера на керамические волокна инструмента

2. Использование охлаждения направленной эмульсией снижает температуры в зоне обработки до оптимальных значений. Однако, особенность полимерных композиционных материалов поглощать влагу приводит к набуханию и расслоению структуры, что в результате способствует возникновению неисправимого брака

3. Использование охлаждения с направленной ионизацией полностью исключает поглощение в процессе обработки, однако не может обеспечить эффективное снижение температуры в зоне резания

4. Использование охлаждения воздушно-эмульсионной смесью, при содержании эмульсии 20÷40 % снижает эффект влагопоглощения до минимальных значений. Температуры в зоне обработки при таком не превышают 30 °C.

ГЛАВА V. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ИНСТРУМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ

5.1 Описание конструкции и принципа работы спроектированного инструмента

Инструмент с гибким керамическим ворсом (рисунок 5.1) представляет собой цилиндр, внутри которого располагаются керамические волокна. Конструкция подразумевает регулировку вылета с помощью четырёх винтов, обеспечивающих надёжное закрепление без смещения рабочей части во время обработки, что позволяет обрабатывать поверхности сложной формы.

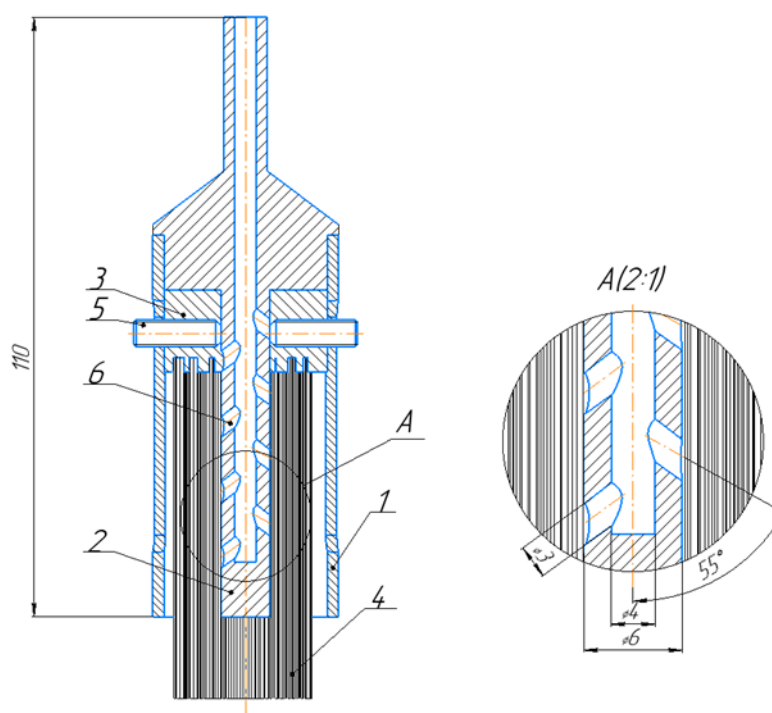


Рисунок 5.1– Спроектированный инструмент с гибким с керамическим ворсом

На рисунке 5.1 показана щётка для механической обработки поверхностей: состоящая из корпуса *1* в виде цилиндра с наружным диаметром 34 мм и толщиной

стенки 2 мм, внутри корпуса расположен стержень 2, с несквозным каналом, по всей длине которого в шахматном порядке расположены отверстия б, необходимые для подвода воздушно-эмульсионной смеси, поступающей из шпинделя станка. Внутри металлического основания 3 с радиально-диаметральным расположением пазов. Внутри пазы максимально плотно заполнены керамическими волокнами 4.

Таким образом, конструкция щётки с растянутыми по окружности пазами и регулировкой вылета позволит производить обработку сложных по форме поверхностей, обеспечивая гораздо большую площадь контакта. Внутренний канал с отверстиями, расположенными в шахматном порядке позволит правильно распределить воздушно-водяную смесь между волокнами абразивных зёрен, ограничивая способность полимеров к влагопоглощению.

Было исследовано три варианта расположения блоков ворса из керамических волокон (рисунок 5.2)

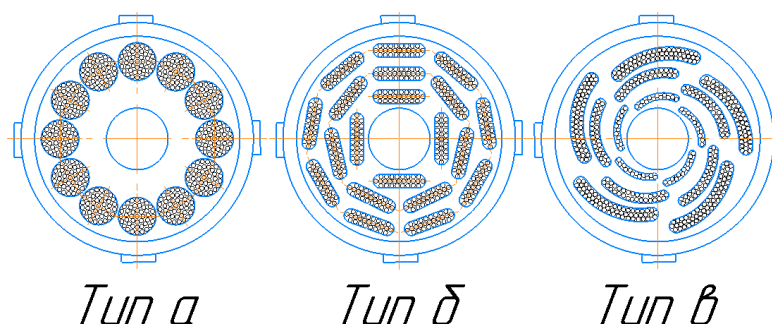


Рисунок 5.2 – Варианты расположения блоков ворса из керамических волокон

Эксперименты показали, что расположение *типа а* имеет меньшее пятно контакта, в результате чего увеличивается количество проходов для достижения требуемого результата. *Тип б* имеет увеличенную площадь контакта, однако после обработки наблюдаются пропуски необработанного материала на поверхности, необходима дальнейшая доработка таких мест, что негативно сказывается на общем времени. При расположении *типа в* участвует наибольшее количество абразивных волокон, повышается производительность, что положительно сказывается на шероховатости получаемой поверхности.

5.2 Технологические рекомендации

5.2.1 При необходимости обеспечения стабильной производительности обработки

Результатом проведенных экспериментов стало формирование технологических рекомендаций по коррекции величины вылета инструмента, с целью обеспечения стабильной обработки через определенное время (таблица 5.1).

Таблица 5.1 Технологические рекомендации по времени обработки до рекомендуемой коррекции вылета волокна, T , мин, обеспечивающие стабильную работу инструмента без потери производительности (вылет ворса $12 \div 14$ мм, натяг $2 \div 3$ мм)

Площадь поперечного сечения единичного керамического волокна, s , мм ²	Глубина резания t , мм				
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
2,32	200	143	111	100	50
0,65	111	83	67	43	33

Износ керамического ворса приводит к уменьшению натяга Δ , мм. Если допустить снижение этого показателя ниже 1 мм, то будет происходить деструкция поверхностного слоя детали (образованию трещин и царапин). Поэтому в соответствии с таблицей 5.1 через указанное время, рекомендуется измерять величину вылета керамического ворса и при необходимости производить коррекцию.

5.2.2 При необходимости обеспечения минимальной шероховатости

При использовании ворса с площадью поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 2,32 \text{ мм}^2$ на поверхности могут возникнуть царапины, и достичь значения шероховатости ниже $Ra = <1 \text{ мкм}$ не представляется возможным. При обработке ворсом с площадью $s = 0,65 \text{ мм}^2$ шероховатость поверхность уменьшается, с такими параметрами можно обрабатывать поверхность без царапин и задиров. Применять ворс $s = 0,15 \text{ мм}^2$ рекомендуется только в случае доработки конкретных мест на детали, керамические волокна с такими параметрами не способны обрабатывать сложные и большие заусенцы из-за малой жёсткости.

В зависимости от требуемой шероховатости рекомендуется изменять сечение единичного керамического волокна и корректировать режимы обработки (таблица 5.2).

Таблица 5.2 Рекомендуемые режимы обработки в зависимости от требуемой шероховатости (при вылете ворса $12 \div 14 \text{ мм}$, натяге $2 \div 3 \text{ мм}$)

№ п/п	Требуемый показатель шероховатости Ra , мкм	V , м/мин	S , мм/об	Рекомендуемое сечение единичного керамического волокна s , мм ²	Ø инструмента, мм
1	1,3÷1,5	215	2,5-4	2,32	30
2	1,2÷1,1	215	6-7,5	2,32-0,65	
3	0,9÷0,8	360	6	0,65	
4	0,8÷0,7	405	4	0,65	

По таблице 5.2 наглядно видно, что в зависимости от заданной шероховатости, необходимо использовать разную площадь поперечного сечения единичного керамического волокна щётки. Целесообразно, применять при этом рекомендуемые режимы обработки с целью предотвращения возникновения царапин и трещин на обработанной поверхности.

5.2.3 При необходимости обеспечения снижения эффекта минимального влагопоглощения

Рассмотренные ранее марки материалов имеют разную степень влагопоглощения и теплостойкость, поэтому с целью предотвращения процесса набухания и расслаивания сформированы технологические рекомендации по соотношению ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Технологические рекомендации при выборе соотношения ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ в зависимости от обрабатываемого материала

№ п/п	Обрабатываемый материал	Соотношение ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ, %
1	PLA	70:30
2	ABS	60:40
3	PETG	80:20
4	TOTAL GF-10	60:40

Содержание эмульсии в смеси должно находиться в пределах 20÷40% по отношению к воздуху. Снижение содержания эмульсии меньше 20% приводит к значительному росту температуры в зоне резания, а увеличение выше 40% к интенсивному влагопоглощению материала.

5.2.4 Общие рекомендации по обработке деталей из ПКМ

Высокая сложность механической обработки деталей из ПКМ накладывает определенные ограничения:

1. Следует использовать инструмент с гибким керамическим ворсом

2. Выбирать площадь поперечного сечения единичного керамического волокна следует отталкиваясь от заданной шероховатости и производительности
3. Охлаждение при обработке необходимо, но использование эмульсии недопустимо, из-за способности материалов из ПКМ к влагопоглощению
4. Режимы обработки и глубина резания влияют на получаемую шероховатость поверхности и на обеспечение стабильной производительности и обеспечения необходимой величины натяга

Ниже приведена схема, включающая в себя оптимальные параметры, которые рекомендуется использовать при механической обработке деталей из ПКМ инструментом с гибким керамическим ворсом (рисунок 5.3).

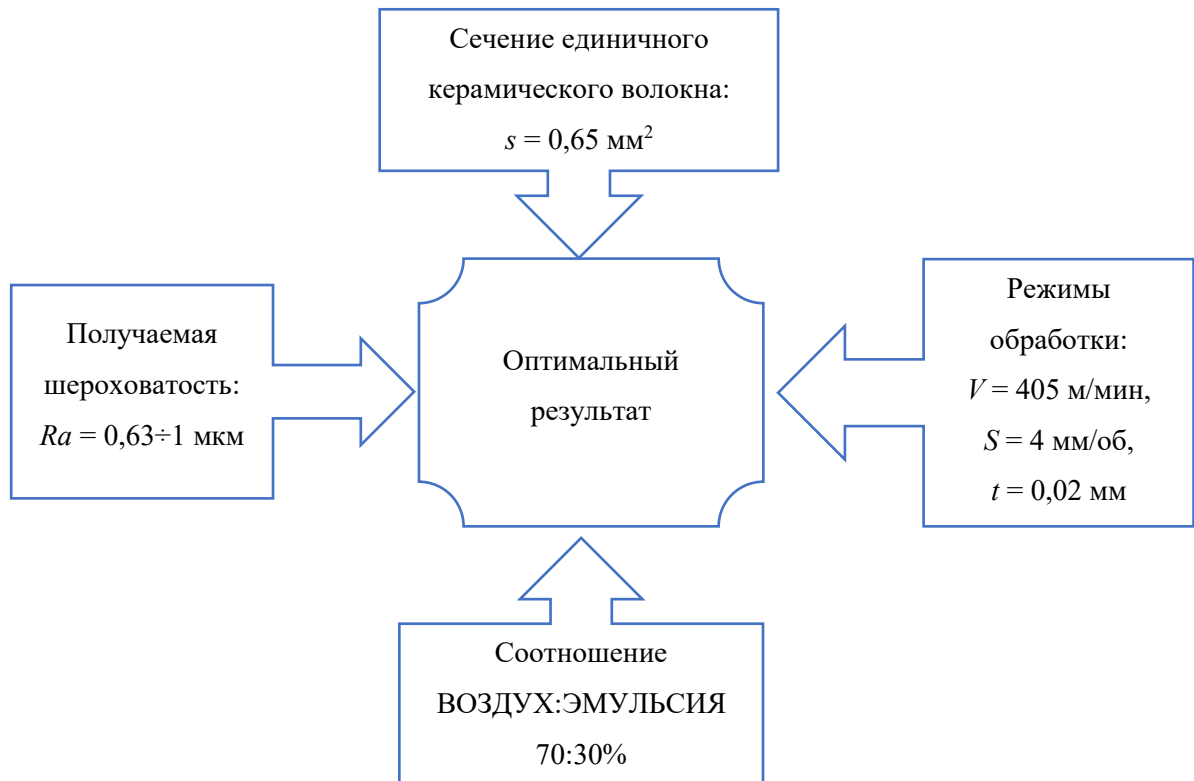


Рисунок 5.3 – Технологические рекомендации по значениям основных параметров

Рекомендуется использовать сечение единичного керамического волокна $0,65 \text{ мм}^2$, для исключения образования трещин и царапин на поверхности. Глубину резания следует взять $t = 0,02 \text{ мм}$, таким образом, инструмент сможет работать стабильно без потери производительности $T = 83 \text{ мин}$. По прошествии

рекомендуемого времени, рекомендуется измерить вылет волокна из корпуса инструмента, при необходимости скорректировать до значения $h = 12 \div 14$ мм.

Соотношение воздушно-эмульсионной смеси 70:30 % подойдёт для большинства обрабатываемых материалов.

Таким образом шероховатость обработанной поверхности будет находиться в пределах $Ra = 0,63 \div 1$ мкм, влагопоглощение будет минимальным.

5.3 Апробация разработанной технологии

5.3.1 Производственные испытания

Способ улучшения абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов за счёт использования распыленных СОТС успешно прошёл испытания на производственном оборудовании АО «НИИ ТП». (приложение 2).

Испытания данного способа проводились при обработке деталей из ПКМ, изготовленных из материала TOTAL-PRO GF-30 (ударопрочный стеклонаполненный композит на основе TPU). Применяется при послойном выращивании шерстерён, корпусов).

Испытания проходили на рекомендуемых режимах: подача (S) 4 мм/об, скорость обработки (V) 400 м/мин, глубина резания (t) 0,05 мм, с помощью специально разработанной абразивной щётки с гибкими керамическими волокнами и внутренней подачей воздушно-эмульсионной смеси

В процессе испытаний исследовалось влияние структуры воздушно-эмульсионной смеси на точность геометрических размеров деталей из ПКМ после обработки. Установлено, что изменение процентного соотношения ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ оказывает существенное влияние на влагопоглощение деталей из ПКМ.

5.3.2 Внедрение технологии обработки

Технология абразивной обработки деталей из ПКМ с использованием гибкого абразивного инструмента и распылённых СОТС была успешно внедрена на предприятии АО «Альбатрос».

Использование технологии на предприятии позволило улучшить шероховатость обработанной поверхности и повысить аэродинамические характеристики испытываемых образцов.

Удалось снизить эффект влагопоглощения за счёт подвода воздушно-эмульсионной смеси. Производительность обработки значительно увеличилась за применения автоматизированных систем (Приложение 3)

5.3.3 Расчёт экономического эффекта

Расчёт экономического эффекта от внедрения технологии абразивной обработки деталей из ПКМ с использованием гибкого абразивного инструмента и распылённых СОТС на предприятии АО «Альбатрос»:

При существующей технологии на обработку ручным способом уходит примерно 30-40 минут на деталь.

Основные этапы изготовления крыла БПЛА сейчас выглядят след образом:

1. Приобретение угленаполненного материала (себестоимость 1кг составляет 6000 руб., общие затраты при заданной программе выпуска $C1 = 60000$)
2. Изготовление детали с помощью послойного выращивания
3. Выполнение финишной обработки поверхности (себестоимость инструмента и оснастки $C2=20000$ руб.)

При используемой технологии изготовления брак, связанный с первым этапом выращивания составляет около 1~3%, на этапе финишной обработки вручную около ~7-8%.

Внедрение разработанной технологии абразивной обработки деталей из ПКМ с использованием гибкого абразивного инструмента и распылённых СОТС позволит значительно снизить процент брака, возникающим на третьем этапе, за счёт автоматизации процесса шлифования.

Для определения экономического эффекта от внедрения технологии можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$\mathcal{E} = \sum_{t=1}^T (\Delta\Pi_t - \mathcal{Z}_t) \times a_t, \quad (5.1)$$

где T – расчетный период;

$\Delta\Pi_t$ – прирост прибыли предприятия в t -ом году в связи с внедрением технологии обработки;

\mathcal{Z}_t – затраты t -года, сопровождающие внедрение и использование рассматриваемого мероприятия;

a_t – коэффициент приведения по фактору времени.

Прирост прибыли предприятия в результате внедрения технологии в первом приближении можно принять постоянной величиной, неизменной по годам:

$$\Delta\Pi_t = \Delta\Pi = const. \quad (5.2)$$

В рассматриваемом случае можно считать, что прирост прибыли предприятия эквивалентен снижению текущих затрат, связанных с несвоевременным выявлением брака при реализации базовой технологии:

$$\Delta\Pi = \Delta C = (C_1 - C_2) \times N_{\text{оп}} \quad (5.3)$$

где C_1 и C_2 – себестоимость после реализации второго и третьего этапов технологического процесса;

$N_{бр}$ – количество бракованных деталей.

Количество бракованных деталей определяется выражением:

$$N_{бр} = (5 \div 8\%) \times N_{пр}, \quad (5.4)$$

где $N_{пр}$ – годовая приведенная программа выпуска детали.

Годовую приведенную программа выпуска детали можно определить:

$$N_{пр} = \frac{N_{\min} + N_{\max}}{2} \times 12, \quad (5.5)$$

где N_{\min} , N_{\max} – минимальная и максимальная месячная программа выпуска деталей.

Подставляя значения в формулы 5,5; 5.4; 5.3, получим:

$$N_{пр} = \frac{6+17}{2} \times 12 = 138 \text{ шт} / \text{год}$$

$$N_{бр} = 0,03 \times 360 = 10,8 \text{ шт} / \text{год}$$

$$\Delta\Pi = (60000 - 12000) \times 10,8 = 518400 \text{ руб.}$$

Величина затрат, сопровождающих внедрение и использование нововведения, определяется:

$$Z_t = \Delta C_{\text{экспл}} + H_t + K_t, \quad (5.6)$$

где $\Delta C_{\text{экспл}}$ – затраты на содержание и эксплуатацию;

H_t – налоговые выплаты t-го года;

K_t -единовременные (капитальные) затраты, связанные с совершенствованием технологического процесса в t- ом году.

Величину $\Delta C_{\text{экспл}}$ можно принять неизменной по годам расчетного периода:

$$\Delta C_{\text{экспл}} = \Delta C_{\text{экспл}} = \text{const} , \quad (5.7)$$

$\Delta C_{\text{экспл}}$ можно выразить как сумму затрат:

$$\Delta C_{\text{экспл}} = C_{\text{ам}} + C_{\text{зн}} + C_{\text{тек}} , \quad (5.8)$$

где $C_{\text{ам}}$ – амортизация нового оборудования;

$C_{\text{зн}}$ – заработная плата рабочего, эксплуатирующего станок;

$C_{\text{тек}}$ – текущие затраты, связанные с эксплуатацией станка.

$$C_{\text{ам}} = H_a \times \frac{m \times Цоб}{100} , \quad (5.9)$$

где H_a – 33,3% норма амортизации

m – количество оборудования,

$Цоб$ – цена оборудования (10000 руб.).

Амортизация нового оборудования в результате:

$$C_{ам} = 33,3 \times \frac{3 \times 10000}{100} = 9990 \text{ руб.}$$

Затраты на оплату труда рабочих, обслуживающих станок, определим по формуле:

$$C_{з.н.} = N_{np} \times \frac{t_k^{cp}}{60} \times C_{ч.т.} \times K_{np} \times K_{дон} \times K_{нач}, \quad (5.10)$$

где $C_{ч.т.}$ - часовая тарифная ставка рабочего;

t_k^{cp} – среднее время выполнения контрольной операции, $t_k^{cp} = 10$ мин.;

K_{np} – коэффициент, учитывающий премиальные выплаты, $K_{np} = 1,3$, при величине премии 30 %;

$K_{дон}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную заработанную плату, $K_{дон} = 1,15$, при величине дополнительной заработной платы 15 %;

$K_{нач}$ – коэффициент, учитывающий начисления на заработную плату, $K_{нач} = 1,5$, при величине дополнительной заработной платы 50%.

Таким образом, получим:

$$C_{з.н.} = 360 \times \frac{10}{60} \times 25 \times 1,3 \times 1,15 \times 1,5 = 3363,75 \text{ руб}$$

Величину прочих текущих затрат можно принять 7% от стоимости, тогда:

$$C_{тек} = \frac{7 \times 10000}{100} = 700 \text{ руб,}$$

В результате разовые эксплуатационные расходы составят:

$$\Delta C_{\text{экспл}} = 9990 + 700 + 3363,75 = 14053,75 \text{ руб}$$

Величина налоговых выплат определяется выражением:

$$H = \frac{P}{100}(\Delta\Pi - \Delta C_{\text{экспл}}), \quad (5.11)$$

где P – ставка налоговых платежей (в расчетах примем $P=30\%$).

$$H = \frac{30}{100}(518400 - 14053,75) = 151303,9 \text{ руб}$$

Единовременные затраты K_t имеют место только в первый год реализации мероприятия и могут быть определены по следующей зависимости:

$$K_t = K_{\text{об}} + K_{\text{раб}} + K_{\text{подг}}, \quad (5.12)$$

Где $K_{\text{об}}$ – стоимость внедряемого (при внедрении) оборудования,
 $K_{\text{об}} = 10000 \text{ руб};$

$K_{\text{раб}}$ – затраты на роботизацию и автоматизацию технологического процесса;
 $K_{\text{раб}} = 5000 \text{ руб};$

$K_{\text{подг}}$ – затраты, связанные с подготовкой производства, $K_{\text{подг}} = 8000 \text{ руб}.$

$$K_t = 10000 + 5000 + 8000 \text{ руб}.$$

Сравнение двух технологий по рассчитанным показателям представлен в таблице 4.1

Таблица 4.1 Результат расчета сравнения двух технологий обработки

№п/п	Показатель	Старая технология, руб	Новая технология обработки, руб
1	Затраты на освоение новой технологии	0	23000
2	Дополнительная прибыль от увеличения операционного дохода	2880000	3801600
3	Затраты на содержания и эксплуатацию	21064,8	14053,75
4	Налог	425680,6	151303,9
5	Приращение доходов от инвестиций	2433255	3636242
6	Чистые денежные потоки	2433255	3613242
7	Экономический эффект	1179988	

Таким образом, экономический эффект от внедрения составил 1 179 988 в год, со ожидаемым снижением брака до 7%, что подтверждает экономическую целесообразность внедрения технологии абразивной обработки деталей из ПКМ с использованием гибкого абразивного инструмента и распылённых СОТС на предприятии.

5.4 Выводы по главе

1. Сформированы технологические рекомендации по режимам механической обработки в зависимости от требуемой шероховатости, при рекомендуемом значении вылета ворса $h = 12 \div 14$ мм и натяга $\Delta = 2 \div 3$ мм.

2. Сформированы технологические рекомендации по времени обработки до рекомендуемой коррекции вылета волокна, T , мин, обеспечивающие стабильную работу инструмента без потери производительности

3. Сформированы технологические рекомендации при выборе соотношения ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ в зависимости от обрабатываемого материала из ПКМ

4. Сформированы общие технологические рекомендации по обработке деталей из ПКМ инструментом с гибким керамическим ворсом, включающие в себя обобщённые факторы и параметры.

5. Апробация результатов обработки на промышленных предприятиях с расчётом экономического эффекта и ожидаемого снижения брака

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены технические и технологические решения, направленные на совершенствование процесса обработки деталей из полимерных композиционных материалов, имеющие существенное значение для машиностроения.

Это подтверждается следующими научными и практическими результатами:

1. Предложен эффективный способ охлаждения воздушно-эмульсионной смесью с помощью организации внутренней подачи аэрозоля через специальные каналы инструмента, эффективно снижающий температуры в зоне резания до $t = 30^{\circ}\text{C}$)

2. Установлено оптимальное соотношение подаваемой воздушно-эмульсионной смеси в зависимости от обрабатываемого материала из ПКМ, обеспечивающее уменьшение отклонения формы и геометрических размеров. Содержание эмульсии в смеси должно находиться в пределах 20÷40% по отношению к воздуху. Снижение содержания эмульсии меньше 20% приводит к значительному росту температуры в зоне резания, а увеличение выше 40% к интенсивному влагопоглощению материала)

3. Установлены закономерности теплообмена между инструментом с гибким керамическим ворсом и деталью. Для обеспечения благоприятного теплового режима ($t \leq 30^{\circ}\text{C}$), необходимо, чтобы прогретый слой смеси на обрабатываемой поверхности толщиной $\delta = 0,01$ мм в течение $t = 50$ с замещался холодной смесью большего объёма. Определены расчетом значения конструктивных параметров инструмента.

4. Разработана имитационная модель распределения потоков воздушно-эмульсионной смеси. В результате анализа имитационной модели процесса выявлено наиболее рациональное радиально-диаметральное расположение блоков ворса, при котором поступающая по внутренним каналам инструмента воздушно-

эмульсионная смесь обволакивает сначала керамические волокна и лишь потом попадает на обрабатываемую заготовку. Такая компоновка блоков ворса обеспечивает высокую производительность при низкой теплонапряженности процесса обработки.

5. Выявлены рациональные значения факторов, позволяющие обеспечивать заданную производительность, шероховатость и точность обработки. Рекомендуемый вылет волокна из корпуса инструмента составляет $h = 12$ мм, натяг $\Delta = 1 \div 4$ мм. Рекомендуемая скорость обработки $V = 405$ м/мин, подача $S = 4$ мм/об.

6. Установлено, что уменьшение натяга до $\Delta < 1$ мм приводит к деформации поверхностного слоя детали (образованию трещин и царапин), а его увеличение свыше $\Delta > 4$ мм снижает производительности обработки и приводит к появлению необработанных мест на поверхности.)

7. Применение более жесткого ворса с площадью поперечного сечения единичного керамического волокна $s = 2,32$ мм² позволяет увеличить производительность обработки и получить шероховатость поверхности $Ra = 1 \div 1,25$ мкм при натяге $\Delta = 1,5 \div 2$ мм. Обработка ворсом с $s = 0,65$ мм² при натяге $\Delta = 2 \div 3$ мм обеспечивает снижение шероховатости обработанной поверхности до $Ra = 0,63 \div 1$ мкм, но снижает производительность обработки.

8. Разработанная технология прошла апробацию на промышленном предприятии – АО «НИИ ТП». Внедрение на предприятии АО «АЛЬБАТРОС» позволило получить экономический эффект 1 179 988 рублей в год, с ожидаемым снижением брака до 7%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Моделирование процесса теплообмена полимерно-абразивной щетки и поверхности / Ю.Д. Абрашкевич, Л.Е. Пелевин, Г.М. Мачишин // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. научн.-техн. конф. 2014. – С. 3–7.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
3. Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова Е.В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее / Ю.П. Адлер, Ю.В. Грановский, Е.В. Маркова. – М. : Знание, 1982. – 64 с.
4. Александрова И.С. Исследование возможностей для управления микрогеометрией режущей поверхности абразивных инструментов / И.С. Александрова // Вестник Национального технического университета 357 Украины «Киевский политехнический институт». Серия Машиностроение. – 2010. – № 58. – С. 282–288.
5. Андреев М.В., Шитюк А.А. Особенности высокоскоростной обработки полимерных композиционных материалов / М.В. Андреев, А.А. Шитюк // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 89–93.
6. Аснос Т.М. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем применения микрокапсулированных СОТС в активированной воздушной среде : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.03.01 / [Место защиты: Иван. гос. ун-т]. – Иваново, 2003. – 21 с
7. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения : учебник / Б.С. Балакшин. – 3-е изд., доп. – М. : Машиностроение, 1969. – 561 с.
8. Баранчиков В.И., Жариков А.В., Юдина Н.Д. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов,

Г.А. Харламов; под общей редакцией В.И. Баранчикова. – М. : Машиностроение, 2002 г. – 264 с.

9. Баурова Н.И., Макаров К.А. Механическая обработка деталей машин из полимерных композиционных материалов / Н.И. Баурова, К.А. Макаров // Технология металлов. – 2017. – № 2. – С. 15–19.

10. Бахарев П.П. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем применения воздушных сред активированных коронным разрядом : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.03.01 / Бахарев П.П.; [Место защиты: Иван. гос. ун-т]. – Иваново, 2005. – 16 с.

11. Бейнертс З.К., Рудзит Я.А., Кризберг Ю.Я. Исследование вероятностных характеристик кривизны микронеровностей при высоких уровнях поверхности / З.К. Бейнертс, Я.А. Рудзит, Ю.Я. Кризберг // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Рига : Рижский политехнический институт, 1981. – С. 5–21.

12. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов : справочник / Е.Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.

13. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога / Л.Н. Брянский, А.С. Дойников. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 79 с.

14. Буторин Г.И. Полимерно-композитные материалы в машиностроении / Г.И. Буторин // Прогрессивные технологии в машиностроении: сборник научных трудов – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 33–36.

15. Вавилин В.А. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов / В.А. Вавилин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Том 1. – 12-14 с.

16. Гончаров А.Б. Опыт применения передовых технологий с использованием полимерных композиционных материалов на фирме «Мосинтраст» / А.Б. Гончаров // Сварочное производство. – 1999. – № 10. – С. 17–24.

17. Гордиенко А.В., Козулько Н.В. Обработка деталей из полимерных композиционных материалов лепестковыми кругами различной зернистости под операцию склеивание / А.В. Гордиенко, Н.В. Козулько // Технологии, инновации и предпринимательство: сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической междисциплинарной конференции. НОО «Профессиональная наука». г. Санкт-Петербург. 2017. – С. 69–77.
18. Горелов В.Н., Кокорев И.А. Построение чертежей и 3D-моделей в системе КОМПАС-3D: учебное пособие / В.Н. Горелов, И.А. Кокорев. – Самара : Самарский гос. технический ун-т, 2011. – 109 с.
19. ГОСТ 10356-63 Отклонения формы и расположения поверхностей. – М. : Изд-во стандартов, 1963.
20. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М. : Изд-во стандартов, 1973.
21. ГОСТ 27964-88 Измерение параметров шероховатости. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
22. ГОСТ Р 50.1.040.–2002 Статистические методы. Планирование эксперимента. Термины и определения. – М., 2002. – 78 с.
23. Гринченко М.И. Метод определения механических остаточных напряжений и его перспективы для создания эталона единицы механического остаточного напряжения / М.И. Гринченко // Вестник метролога. – 2016. – № 4. – С. 19–23.
24. Гусев Д.В. Повышение показателей качества изготавливаемых изделий при использовании технологии быстрого прототипирования: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Денис Витальевич Гусев; Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2019. – 116 с.
25. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров / пер. с англ. А.Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1979. – 567 с.
26. Дмитриев А.Я., Высоцкая М.В. Робастное проектирование испытаний технических объектов / А.Я. Дмитриев, М.В. Высоцкая // Эффективные системы

менеджмента: качество, инновации, образование: материалы VII Международного научно-практического форума / под редакцией И. И. Антоновой. Казань 2018. – С. 93–96.

27. Дрожжин В.И. Механическая обработка пластмасс / В.И. Дрожжин. – М. : Машиностроение, 1965. – 131 с.

28. Дударев А.С. Определение микропрофиля поверхности, образованной механической обработкой лезвийным и алмазно-абразивным инструментом / А.С. Дударев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 1. – 20-29 с.

29. Дьяконов А.А. Математическая модель температурного поля детали в зоне шлифования / А.А. Дьяконов // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 10. – С. 63–65.

30. Дядя С.И. и др. Обоснование выбора полимерно-абразивного инструмента для выполнения отделочных операций / С.И. Дядя // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2010. – № 2. – С. 145–148.

31. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.

32. Елисеева А.В., Ровкин А.М., Тимошенко М.Д., Морев Д.С. Оптимальная обработка изделий из композиционных материалов / А.В. Елисеева, А.М. Ровкин, М.Д. Тимошенко, Д.С. Морев // Молодой ученый. – 2017. – № 52(186). – С. 41–45.

33. Житник Н.И. Современные конструкционные полимерные материалы и прогрессивные технологические процессы обработки / Н.И. Житник. – К. : Знание, 1980. – 17 с.

34. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров. / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

35. Злобина И.В. Повышение производительности и качества механической обработки изделий из полимерных композиционных материалов путём СВЧ модифицирования / И.В. Злобина // Вестник СГТУ. – 2021. – № 1(88). – 93-102 с.

36. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Особенности технологии механической обработки углепластиков / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев, А.С. Заостровский // Science intensive technologies in mechanical engineering. – 2016. – № 5. – Р. 30–33.
37. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч. 1. Упруго-пластические деформации / Репр. воспр. текста изд. 1948 г. – М. : Логос, 2004. – 388 с. 376.
38. Иголеви́ч В.А. Повышение производительности и точности обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ на основе учета динамических свойств процесса шлифования: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Иголеви́ч. – Челябинск, 1992. – 150 с.
39. Использование полимерных материалов при ремонте сельскохозяйственной техники / В.В. Курчаткин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 8. – С. 22–24
40. Исследование режущих кромок шлифовального круга // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. В. – 1964. – № 4. – Г. 86. – С. 80–92.
41. Калинин Е.П. Максимальная контактная температура в зоне шлифования / Е.П. Калинин, В.Д. Архипов // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: труды II Международной научн-техн. конф. (Резниковские чтения): в 2-х частях. –Тольятти: ТГУ, 2008. – Ч. 1. – С. 289–293.
42. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твёрдых тел / Э.М. Карташов. – М. : Высшая школа, 2001. – 552 с.
43. Клушин М.И. Применение распыленных жидкостей при резании металлов / М.И. Клушин, М.Б. Гордон, доценты, кандидаты техн. наук. – Иваново : Кн. изд-во, 1960. – 50 с.
44. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием / Сокращ. перев. с англ. П.А. Кунина. – М. : Машиностроение, 1974. – 192 с.
45. Козлов А.А., Козлов А.М., Василенко Ю.В. Моделирование обработанной поверхности при шлифовании некруговым торцовым абразивным

инструментом / А.А. Козлов, А.М. Козлов, Ю.В. Василенко // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 54–62.

46. Козулько Н.В., Семиниченко К.В. Влияние зернистости лепесткового ишлифовального круга на формирование шероховатости поверхности деталей из стеклопластика под операцию «склеивание» / Н.В. Козулько, К.В. Семиниченко // Проблемы и перспективы студенческой науки. – 2017. – № 1. – С. 21–23.

47. Козулько Н.В., Семиниченко К.В. Параметры шероховатости поверхностей стеклопластиковых деталей, обработанных лепестковыми кругами различной зернистости под операцию склеивание / Н.В. Козулько, К.В. Семиниченко // Высокие технологии и модернизация экономики: достижения и новые векторы развития: сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург, 2017. – С. 309–311.

48. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зависимостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми кругами по результатам факторного эксперимента / В.П. Кольцов, Д.А. Стародубцева, М.В. Козырева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 1(96). – С. 32–41.

49. Комельков В.А. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем применения ионизированного воздуха с включением микродоз масла И-20А : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.03.01, 05.02.04 / [Место защиты: Иван. гос. ун-т]. – Иваново, 2006. – 18 с.

50. Комплексная разработка методов повышения эффективности обработки труднообрабатываемых материалов за счет совершенствования режущих инструментов и условий их применения: отчет о научно-исследовательской работе / Сумск. гос. ун-т. Сумы : СумГУ, 2015. – URL: <https://pandia.ru/text/80/580/14374-2.php> (дата обращения: 15.12.2023)

51. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнапольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.

52. Кондратюк В.А. Технология пятикоординаной механической обработки древесины, полимерных композитных материалов и пластмасс и создание опытного образца обрабатывающего центра / В.А. Кондратюк // Лесной вестник. – 2012. – № 8. – 31-37 с.

53. Корчагин А.В. Исследование процесса резания в газовых контролируемых средах : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.03.01 / Корчагин Александр Васильевич; [Место защиты: Рос. ун-т дружбы народов]. – Москва, 2009. – 18 с.

54. Кошин А.А. Применение полимерно-композитных материалов для ремонта механического и энергетического оборудования на предприятиях южного Урала / А.А. Кошин, Г.И. Буторин // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 3–11.

55. Кравченко Ю.Г., Савченко Ю.В. Расчет параметров исходного рельефа режущей поверхности абразивных инструментов / Ю.Г. Кравченко, Ю.В. Савченко // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: труды 2-й Междунар. науч.-техн. конф. (Резниковские чтения). – Тольятти, 2008. – Ч. 1. – С. 124–127.

56. Кремнев О.А. Воздушно-водоиспарительное охлаждение оборудования / О.А. Кремнев, А.Л. Стахановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1967. – 235 с.

57. Криштопа Н.А. и др. Обработка отверстий в композиционных и неметаллических материалах / Н.А. Криштопа. – Киев : Тэхника, 1980. – 126 с.

58. Куликов М.Ю. Исследование закономерностей формирования точностных параметров деталей при прототипировании / М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 2(50). – С. 104–107.

59. Куликов М.Ю. Улучшение качества поверхностей деталей из полимерно-композитных материалов с использованием СОТС / М.Ю. Куликов, Е.О. Шевчук, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев, И.А. Александров // Металлообработка. – 2022. – № 1.

60. Курапов К.В. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем применения охлажденного ионизированного воздуха : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.07 / Курапов Константин Викторович; [Место защиты: Иван. гос. ун-т]. – Иваново, 2011. – 18 с.

61. Кургузов Ю.И. Анализ контактного взаимодействия вращающейся щетки с обрабатываемой поверхностью / Ю.И. Кургузов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4(3). – С. 794–798.

62. Кургузов Ю.И., Сундуков Д.Ю. Моделирование процесса обработки механическими щетками / Ю.И. Кургузов, Д.Ю. Сундуков // Материалы Всеросс. науч.-техн. интернет-конф. с междунар. участием «Высокие технологии в машиностроении». 20–23 окт. 2009 г. Самара, 2009. – С. 31–34.

63. Курдюков В.И. Сила резания и температура при шлифовании. Редакционно-издательский центр КГУ, г. Курган, 2013. - 10 с

64. Лобанов Д.В. Технологическая подготовка инструментального обеспечения при обработке композиционных материалов сборным фрезерным инструментом / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сборник научных трудов, Краматорск. – 2010. – Вып. 27. – С. 112–118.

65. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

66. Макаров В.Ф. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники / В.Ф. Макаров // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т.17, № 2. – 30-41 с.

67. Макаров В.Ф., Виноградов А.В. Измерение профиля скругленных кромок образцов при исследовании обработки кромок дисков ГТД абразивно-полимерными щетками / В.Ф. Макаров, А.В. Виноградов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Том 12, № 2. – С. 106–115.

68. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов / В.Ф. Макаров, А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин // Вестник ПНИПУ. – 2015. – С. 14–22.

69. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7(37). – С. 3–8.

70. Металлополимерные композиционные материалы для ремонтно-восстановительных работ технологического оборудования / С.В. Кручинин [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 1. – С. 37–41.

71. Мешкас А.Е., Ширинкин В.В., Макаров В.Ф. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов / Мешкас А.Е., Ширинкин В.В., Макаров В.Ф. // Известия ТулГУ. – 2016. – № 8 ч.2 – С. 14–22.

72. Митясов Л.В. Особенности обработки углепластика / Л.В. Митясов // Главный механик. – 2018. – № 6. С. 25-28.

73. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике / Ю.А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2013. – 720 с.

74. Михайлов В.Е. и др. Технология финишной обработки, качество поверхностного слоя и прочностные свойства лопаток паровых и газовых турбин / В.Е. Михайлов // Тяжелое машиностроение. – 2015. – № 5. – С. 7–10.

75. Мордвин М.А. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов / М.А. Мордвин, С.В. Якимов, С.М. Баклушин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 26–29.

76. Нгуен Ван Кыонг. Влияние технологических параметров на шероховатость изделий при обработке пластмасс / Нгуен Ван Кыонг // Известия ТУЛГУ. Технические науки. – 2016. – Вып. 8, ч. 1. – 356 с.

77. Николаенко А.А. Моделирование сил резания при шлифовании с учетом характеристик круга / А.А. Николаенко // Прогрессивные технологии в машиностроении: тематический сб. науч. тр. – Челябинск, 2003. – С. 50–53.

78. Новоселов Ю.К., Братан С.М. Моделирования процессов взаимодействия шлифовального круга и заготовки при чистовом шлифовании / Ю.К. Новоселов, С.М. Братан. – Вестник СевНТУ. – 2011. – № 118. – С. 92–106.

79. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках: в 3 ч. – Ч. 3: Протяжные, шлифовальные и доводочные станки. – 3-е изд. – М. :

80. Пажи Д.Г. Распылители жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М. : Химия, 1979. – 216 с.

81. Палей М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М.М. Палей и др. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с.

82. Пб.Цыплаков О.Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов. – Часть 1. – Пермь : Пермское книжное изд-во, 1974. – 316 с.

83. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К.Е. Перепелкин. – М. : Научные основы и технологии, 2009. – 658 с.

84. Петрова А.П., Кондрашов Э.К., Коротков Ю.В. Склеивание инструмента и оснастки в машиностроении/ А.П. Петрова, Э.К. Кондрашов, Ю.В. Коротков. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.

85. Петруха П.Т., Чубаров А.Д. Обработка резанием высокопрочных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей / П.Т. Петруха, А.Д. Чубаров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1980. – 169 с.

86. Повышение стойкости режущих инструментов изменением трибологических параметров ювенильных поверхностей направленным воздействием активированных газовых сред : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.07 / Пагин Максим Петрович; [Место защиты: Рос. ун-т дружбы народов]. – Москва, 2010. – 18 с.

87. Подашев Д.Б. Оценка качества поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов после обработки эластичными полимерно-абразивными кругами / Д.Б. Подашев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Том 22, № 4. – С. 75–86.

88. Подашев Д.Б. Экспериментальное исследование влияния режимов обработки и сил резания на шероховатость поверхности деталей из алюминиевых сплавов при зачистке торцевыми полимерно-абразивными щетками / Д.Б. Подашев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Том 24, № 4. – С. 41–48.

89. Подашев Д.Б., Маркгейм Ю.В. Эластичный абразивный инструмент для финишной обработки деталей / Д.Б. Подашев, Ю.В. Маркгейм // В сборнике статей «V Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». г. Иркутск. 16–18 апреля 2015. – С. 117–125.

90. Полетика М.Ф. Механика контактного взаимодействия инструмента со стружкой и заготовкой в связи с его прочностью / М.Ф. Полетика, В.А. Бутенко, В.Н. Козлов // Исследование процесса резания и режущих инструментов: Межвуз. науч.-техн. сб. – Томск, 1984. – С. 85–91.

91. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / под ред. А.А. Берлина. – СПб: Профессия, 2009. – 560 с.

92. Потапов В.А. Применение механической обработки с минимальным количеством СОТС на германских заводах / В.А. Потапов // Машиностроитель. – 1999. – № 11. – С. 46–52.

93. Приписнов Я.А., Гришина О.И. Современные методы механической обработки композиционных материалов (обзор) / Я.Н. Приписнов, О.И. Гришина // Труды ВИАМ. – 2018. – № 10(70). – Ст. 07. – URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.

94. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Технологические возможности шлифования полимераабразивными кругами / А.Е. Проволоцкий, С.Л. Негруб // Научно-технические проблемы станкостроения, производства технологической оснастки и инструмента: материалы Международная. науч.-техн. конф. Одесса–Киев, 2002. – С. 102–104.
95. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л., Старостин Д.А. Повышение производительности процесса обработки полимер-абразивными инструментами / А.Е. Проволоцкий, С.Л. Негруб, Д.А. Старостин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2006. – № 1(32). – С. 193–199.
96. Производство изделий из полимерных материалов: учебное пособие / В.К. Крыжановский [и др.] – СПб. Профессия, 2004. – 464 с.
97. Проскураков Ю.Г. Тонкораспыленное охлаждение режущих инструментов / Ю.Г. Проскураков, В.Н. Петров. – М. : Машгиз, 1962. – 112 с.
98. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. – 2016. – № 9(45). – Ст. 12. – URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2023).
99. Режимы резания и геометрия инструмента для обработки пластмасс, применяемых в станкостроении / под ред. П.П. Грудова. – М. : ЦБТИ, 1956. – 48 с.
100. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортон. – М. : Мир, 1972. – 420 с.
101. Руднев А.В. Влияние структуры и физико-механических свойств стеклопластиков на их относительную обрабатываемость при точении / А.В. Руднев, А.А. Королев // Механическая обработка стеклопластиков / под ред. К.П. Имшеника. – М. : ВНИИ, 1965. – С. 65.
102. Рыкалин Н.Н. Расчет и моделирование температурного поля в изделии при шлифовании и фрезеровании / Н.Н. Рыкалин, А.В. Подзей, Н.Н. Новиков, В.Е. Логинов // Вестник машиностроения. – 1963. – № 11. – 296с.
103. Рябенский В.С. Введение в вычислительную математику / В.С. Рябенский. – М. : Физматлит, 2000. – 295 с.

104. Сидорова А.В. Модель управления точностью обработки на операции фрезерования кромок на РТК / А.В. Сидорова // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017. – С. 246–250.

105. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием : справочник / под ред. С.Г. Энтелиса, Э.Н. Берлинера. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.

106. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 584 с.

107. Справочник по машиностроительным материалам: в 4 т. – Т. 4: Неметаллические материалы / под ред. Г.И. Погодина-Алексеева. – М. : МАШГИЗ, 1960. – 723 с.

108. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов / А.А. Степанов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1987. – 176 с.

109. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава ВТ8-М / Д.Н. Степанов // Новые материалы и технологии в металлургии в машиностроении. – 2012. – № 2. – С. 87–90.

110. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1987. – 105 с.

111. Суслов А.Г. Технология машиностроения : учебник / А.Г. Суслов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2007. – 430 с.

112. Тамаркин М.А., Козулько Н.В., Верченко А.В. Механизация процесса абразивной обработки деталей из композитных материалов / М.А. Тамаркин, Н.В. Козулько, А.В. Верченко // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2(41). – С. 75–82.

113. Терехова Н.Ю., Сафин Д.Ю. Современные технологии 3D-моделирования и быстрого прототипирования оборудования и его элементов:

методическое пособие к выполнению практического занятия «Моделирование оборудования и технологических процессов машиностроения» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2013. – 19 с.

114. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, Ц. Су, А.М. Салман, С.В. Гайст, М.В. Андреев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т.22, № 4. – С. 31–40. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44320543> (дата обращения: 15.05.2023).

115. Токарев Д.И. Особенности точения пластиков / Д.И. Токарев // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 2. – 35-42 с.

116. Трошин Ф.В. Некоторые особенности применения щеток из полимерно-абразивного ворса / В.Ф. Трошин // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 8. – С. 35.

117. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Управление тепловыми режимами при обработке плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками / Д.Ф. Устинович, В.М. Голуб // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 90–94.

118. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику / Р.П. Федоренко. – М. : Издательство МФТИ, 1994. – 328с.

119. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 134 с.

120. Хамханов К.М. Основы планирования эксперимента : методическое пособие / К.М. Хамханов. – Улан-Удэ, 2001. – 54 с.

121. Худобин Л.В. Поэтапное применение СОЖ и твердых смазочных материалов при шлифовании / Л.В. Худобин, А.В. Леонов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сборник трудов Международной научно-технической конференции «Шлифабразив-2000». – Волжский: Волжск ИСИ, 2000. – С. 172–174.

122. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей / А.П.

Чапышев, А.В. Иванова, А.В. Крючкин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, 2013. – Т. 15, № 6(2). – С. 533–537.

123. Чижов М.И. Влияние режимов резания и жесткости конструкции на точность механической обработки деталей из ПКМ на станках с ЧПУ / М.И. Чижов, М.С. Огурцов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 6. – 48-50 с.

124. Шамин В.Ю. Физико-химические процессы в зоне шлифования / В.Ю. Шамин // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сборник научн. тр. Челябинск: ЧПИ, – 1974. – № 145. – С. 19–21

125. Шевчук Е.О. Обеспечение качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий / Е.О. Шевчук, М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев, // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 12(97). – С. 4–10.

126. Шевчук Е.О. Улучшение качества поверхности деталей, полученных с помощью аддитивных технологий / Е.О. Шевчук, В.В. Погорельский // Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2021): сборник докладов. – М. : ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2021. – С. 357–366 с.ч

127. Шевчук Е.О. Улучшение шероховатости поверхностей деталей из полимерных материалов, полученных с помощью аддитивных технологий / Е.О. Шевчук, М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 7(104). – С. 12–18.

128. Шмидт И.В. Модель напряженного состояния полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием / И.В. Шмидт // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 4. – С. 46–48.

129. Шмидт И.В. Особенности температурных полей при шлифовании слоистых систем / И.В. Шмидт // Проведение научных исследований в области машиностроения: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Тольятти, 27–28 ноября 2009 г.: в 3-х ч. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч. 2. – С. 426.

130. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л.Ш. Шустер. – М. : Машиностроение, 1988. – 96 с.
131. Щеголев В.А. Эластичные абразивные и алмазные инструменты (теория, конструкция, применение) / В.А. Щеголев, М.Е. Уланова – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 184 с.
132. Эккерт Э.Р. Теория тепло- и массообмена / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк ; пер.с англ. ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергоиздат, 1961. – 681 с.
133. Ющенко Д.А., Лобанов Д.В. Методы лезвийной обработки изделий из композиционных материалов их специфика и перспективы / Д.А. Ющенко, Д.В. Лобанов // Технологии и материалы. – 2015. – № 3. – С. 30–35.
134. Якимов А.В. Расчет температур при шлифовании / А.В. Якимов, Ю.А. Казимирчик, В.А. Сипайлов // Вестник машиностроения. – 1966. – № 8. – С. 73–74.
135. Янке Е., Эмде Ф. Таблицы функций с формулами и кривыми / Е. Янке, Ф. Эмде. – М. : Физматгиз, 1959. – 344с.
136. Янюшкин А.С. Автоматизация технологии подготовки сборного инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении. – Воронеж : ВГТУ, 2010. – С. 173–177.
137. Янюшкин А.С. Моделирование режущего инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Вестник Иркутского регионального отделения академии наук высшей школы России. – 2009. – № 2(15). – С. 159–162.
138. Янюшкин А.С. Пути решения проблем формообразования режущего инструмента для обработки неметаллических композитов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Н.В. Мулюхин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 36–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-36-46.
139. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов : учебное пособие / В.М. Ярославцев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. – С. 4–6.

140. Ярославцев В.М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов : учебное пособие / В.М. Ярославцев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 180 с.

141. Ярославцев М. Методы интенсификации обработки полимерных композитных материалов / М. Ярославцев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2018. – № 6. – 60-67 с.

142. Яшков В.А. Повышение эффективности работы сборного абразивного инструмента для внутреннего шлифования путем интенсификации действия СОТС в зоне обработки : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.07 / Яшков Валентин Александрович; [Место защиты: Моск. гос. технол. ун-т «Станкин»]. – Москва, 2016. – 19 с.

143. Ящерицин П.И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицин, А.К. Цокур, М.Л. Еременко. Минск : Наука и техника, 1973. – 184 с.

144. Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в техно-логических системах : учебник для вузов / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Высшая школа, 1990. – 512 с.

Приложение 1. Патент на полезную модель



Приложение 2. Акт производственных испытаний



Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт точных приборов»
(АО «НИИ ТП»)

Декабристов ул., вл. 51, Москва, 127490
Почтовый адрес: Декабристов ул., вл. 51, Москва, 127490
тел.: +7 495 231-38-22, факс: +7 499 204-79-66, E-mail: info@niitp.ru, http://www.niitp.ru
ОКПО 11482462, ОГРН 1097746735481, ИНН/КПП 7715784155/771501001

27.09.23 № 0575-729
На № _____ от _____

Г _____ Т _____

АКТ
производственных испытаний
«Способа улучшения абразивной обработки деталей из полимерно-композиционных материалов за счёт использования распыленных СОТС»

Комиссия, состоящая из представителей акционерного общества «Научно-исследовательский институт точных приборов», г. Москва, составила настоящий акт о нижеследующем:

1. В августе 2023 г. на производственном оборудовании АО «НИИ ТП» был испытан способ увеличения точности геометрических размеров деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ), полученных с помощью аддитивных технологий, используя механическую обработку гибким абразивным инструментом. Способ заключается в применении специально разработанного гибкого инструмента с внутренней подачей смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

2. Испытания данного способа проводились при обработке деталей из ПКМ, изготовленных из материала TOTAL-PRO GF-30 на режимах чистового фрезерования, а именно подача (S) 800 мм/об. частота вращения шпинделя (n) 4500 об/мин глубина резания (t) 0,05 мм, с помощью специально разработанной абразивной щётки с гибкими волокнами и внутренней подачей СОТС.

3. В процессе испытаний исследовалось влияние структуры СОТС на точность геометрических размеров деталей из ПКМ после обработки. Установлено, что изменение процентного соотношения ВОЗДУХ:СОТС оказывает существенное влияние на влагопоглощение деталей из ПКМ. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

23519

4. В настоящий момент комиссия констатирует, что применение данного способа позволяет:

- существенно снизить эффект влагопоглощения, что позволяет исключить расслоение и набухание волокон обработанной поверхности;
- добиться существенного увеличения точности геометрических размеров обработанной поверхности деталей из ПКМ;
- избавиться от дефектов, получаемых в процессе послойного выращивания.

Таблица 1 - Результаты испытаний изменения соотношения водо-воздушной смеси

№п /п	Соотношение ВОЗДУХ:СОТС %	Изменение геометрических размеров в результате влагопоглощения, мм	Изменение веса детали в результате влагопоглощения	
			Вес до обработки	Вес после обработки
1	50:50	0,15	105	114
2	60:40	0,010	105	110
3	70:30	0,005	105	105,5
4	80:20	0,005	105	105,03

Подписи членов комиссии:

Заместитель генерального
директора АО «НИИ ТП» по науке
д.т.н, д.в.н, профессор

Начальник НТК-5-
главный технолог, к.т.н.

Начальник отдела, к.т.н.



В.Ф. Кострюков
В.Ф. Кострюков

В.Д. Ходжаев
В.Д. Ходжаев

М.Н. Дерябин
М.Н. Дерябин

Приложение 3. Акт внедрения технологии обработки

Общество с ограниченной ответственностью «Альбатрос»

ИНН: 5038127220 КПП: 167401001

Юридический адрес: 423601, Республика Татарстан, муниципальный район Елабужский, городское поселение город Елабуга, территория ОЭЗ Алабуга, ул. Ш-2, стр.5/12, пом. 253

Фактический адрес: 423601, Республика Татарстан, муниципальный район Елабужский, городское поселение город Елабуга, территория ОЭЗ Алабуга, ул. Ш-1, стр.8/1

E-mail: info@alb.aero

Сайт: www.alb.aero

Телефон: 8-800-222-33-16

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ
технологии абразивной обработки деталей из ПКМ с
использованием гибкого абразивного инструмента и распылённых
СОТС**

Настоящим актом подтверждается внедрение в производство технологии обработки деталей из ПКМ на предприятии ООО «Альбатрос».

Использование разработанной технологии позволило улучшить шероховатость поверхности, что в свою очередь, повысило аэродинамические характеристики испытываемых образцов.

Достигнуто снижение тепловых деформаций за счет увеличения интенсивности теплоотвода из зоны обработки благодаря подводу водовоздушной смеси через специальные каналы инструмента без потери производительности и применения сложных механизированных систем.

Суммарных годовой эффект, обусловленный экономией материальных и экономических ресурсов, составил 1 179 988 рублей в год, с ожидаемым снижением брака до 7%, что подтверждает экономическую целесообразность использования технологии абразивной обработки деталей.

С уважением,

Генеральный директор ООО «Альбатрос»

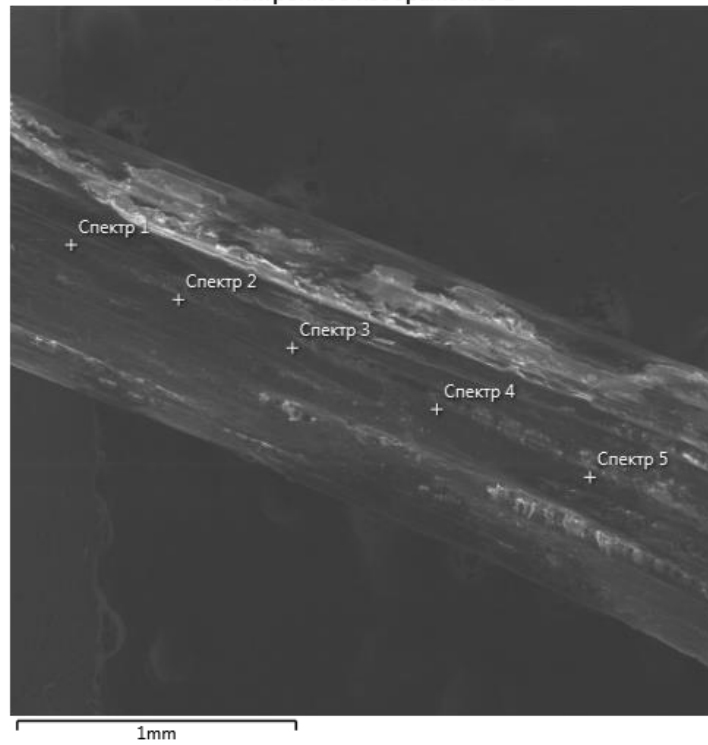
М.П.



Флоров А.В.

Приложение 4. Анализ поэлементного состава керамического волокна

Электронное изображение 1



Электронное изображение 2

