

На правах рукописи

с. 11

✓

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» (ФГБОУ ВО «РУТ (МИИТ)»).

Научный Руководитель:

Куликов Михаил Юрьевич
Доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Носенко Владимир Андреевич
Доктор технических наук, профессор
Заведующий кафедрой «Технология и
оборудование машиностроительных
производств»
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический
университет»

Селеменов Михаил Федорович
Кандидат технических наук, доцент
Председатель цикловой методической
комиссии
БПОУ ОО «Орловский автодорожный
техникум»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО Московский государственный
технологический университет
«СТАНКИН»,
(г. Москва)

Защита состоится «17» апреля 2024 г. в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.277.01 созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», а также на сайте университета

<https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/shevchuk-evgeniy-olegovich>

Автореферат разослан « »

2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.277.01
доктор технических наук, доцент

Нагоркин Максим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, выявлены проблемы при обработке деталей из ПКМ, поставлена цель и определены задачи исследований, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту, представлена апробация полученных результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической литературы по современному состоянию вопроса обеспечения качества поверхности деталей из ПКМ. Раскрыты основные свойства полимеров и проблемы, выявляемые при механической обработке.

В работах 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 др. были представлены основные положения результатов исследования механической обработки деталей из ПКМ. Однако, вопросы обработки с использованием распылённых СОТС, учитывающие снижение эффекта влагопоглощения, который приводит к набуханию слоёв и расслоению поверхности практически не рассматриваются.

Выделены основные особенности обработки деталей из ПКМ: малая теплостойкость и низкая теплопроводность приводят к формированию определённых условий при назначении режимов резания; образование высокотемпературных очагов в процессе шлифования приводит в возникновению дефектов в виде трещин и наплывов; склонность к расслоению структуры связана с неправильным выбором конструкции режущей части инструмента; применение охлаждающей смеси в процессе обработки приводит к влагопоглощению, а следовательно во многих случаях влечёт за собой введение дополнительной операции - сушки изделия.

Выполнен анализ основных свойств исследуемого материала, из чего определены граничные условия обработки, для выполнения поставленной задачи. Изучены требования к параметрам качества поверхности деталей из ПКМ. Пример обрабатываемых деталей показан на рисунке 1.

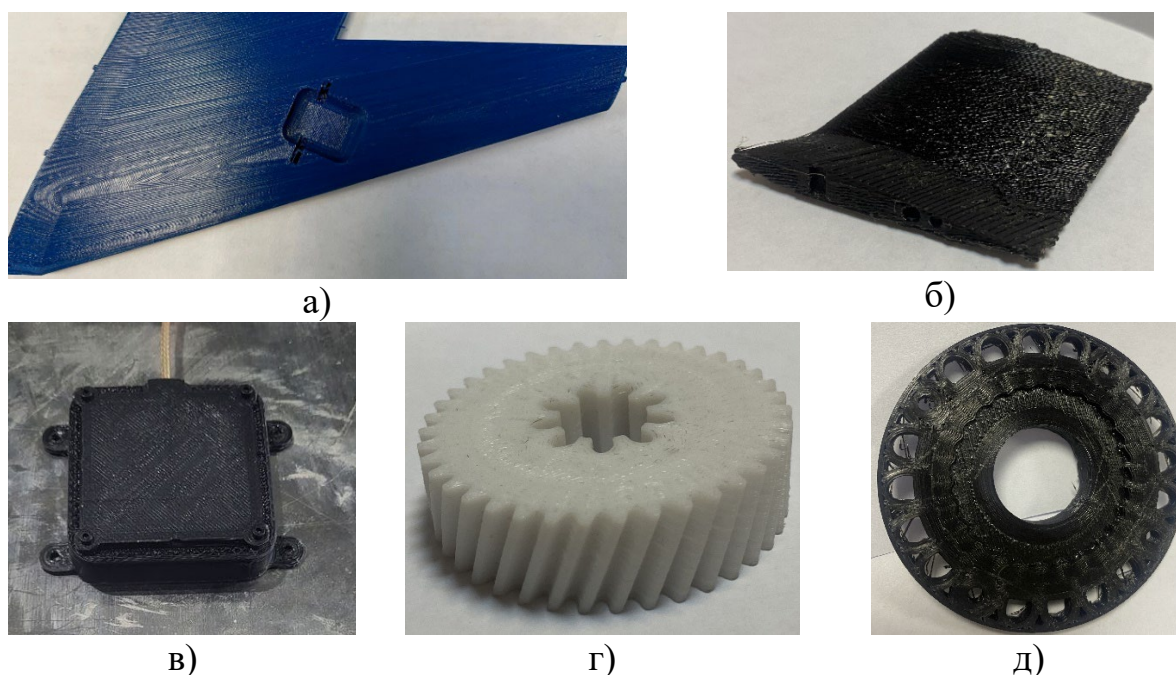


Рисунок 1 – Примеры обрабатываемых деталей: а – фрагмент крыла БПЛА, из материала PETG; б – вертикальная законцовка крыла, из материала TOTAL GF-15; в – корпус датчика БПЛА, из материала PETG; г- шестерня редуктора, из материала PETG; д – корпус волнового редуктора, из материала TOTAL GF-15.

Установлено, что для обеспечения заданной производительности, шероховатости и точности обработки (с целью улучшения аэродинамических характеристик); с сохранением точности формы и геометрических размеров

детали необходима последующая обработка поверхности, эффект влагопоглощения должен быть минимален для исключения расслоения и набухания поверхностного слоя.

Во второй главе представлена методика исследования, технологические факторы, влияние их на результат; дано описание оборудования и инструмента.

Исследования были проведены на фрезерном обрабатывающем центре с ПУ MIKRON HPM 600U.

Шероховатость поверхности после обработки была измерена с помощью профилометра Mahr Marsurf PS 10 с диапазоном показаний Ra 0,02÷10 мкм (предел допускаемой погрешности 5%). Геометрические размеры зафиксированы с помощью штангенциркуля Mahr 16U с ценой деления 0,01 мм (предел допускаемой погрешности 0,04 мм), более точные замеры были произведены с помощью микрометра Mitutoyo 422-230-30 с шагом измерения 0,001мм (погрешность 0,003 мм).

Поверхность до и после обработки была исследована с помощью электронного микроскопа Альтами CM0745.

Исследование изменения температуры в процессе обработки производилось с помощью тепловизора Satir HotFind-LR, имеющим диапазон измерений от -20 °С до 250 °С (погрешность показаний ± 2 °С).

В заключении были сформированы основные этапы подготовки к обработке. Выявлены факторы и параметры влияющие на итоговый результат.

Во третьей главе была разработана модель процесса обработки, рассчитано силовое и тепловое воздействие на обрабатываемую поверхность, разработана имитационная модель распределения потоков.

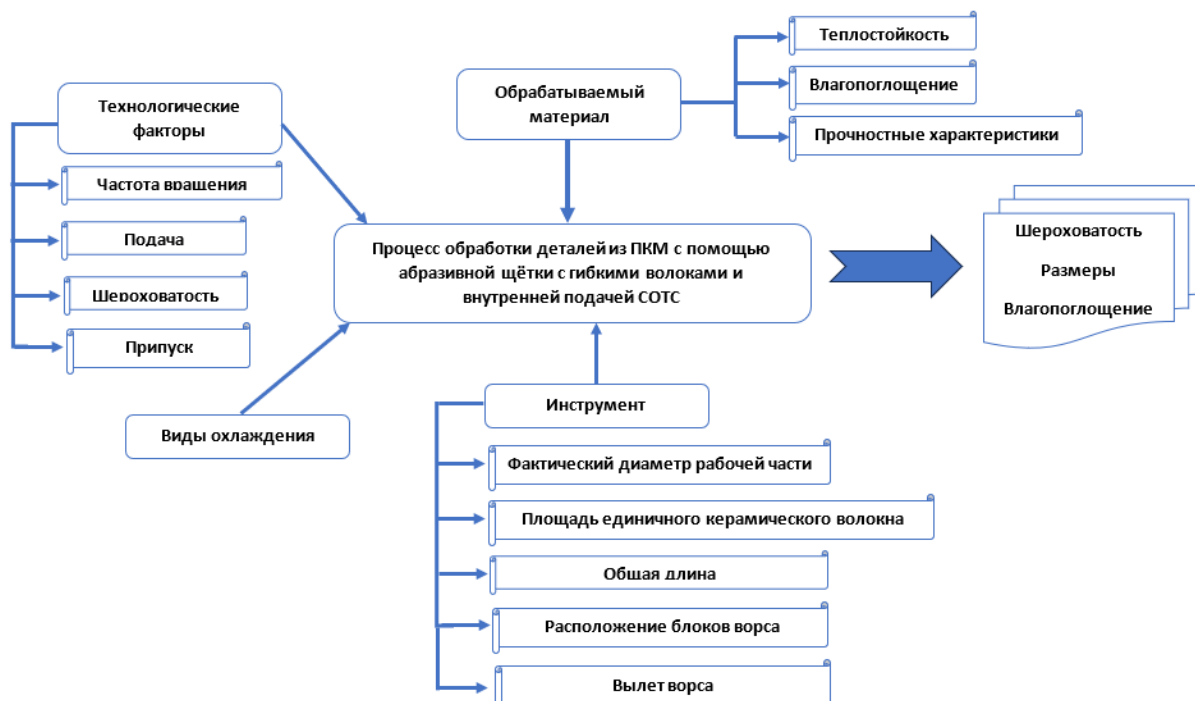


Рисунок 2 – Модель процесса обработки с принятыми во внимания параметрами

На основании модели процесса было составлено схематическое изображение расчётной области в задаче о прогреве инструмента (рисунок 3)

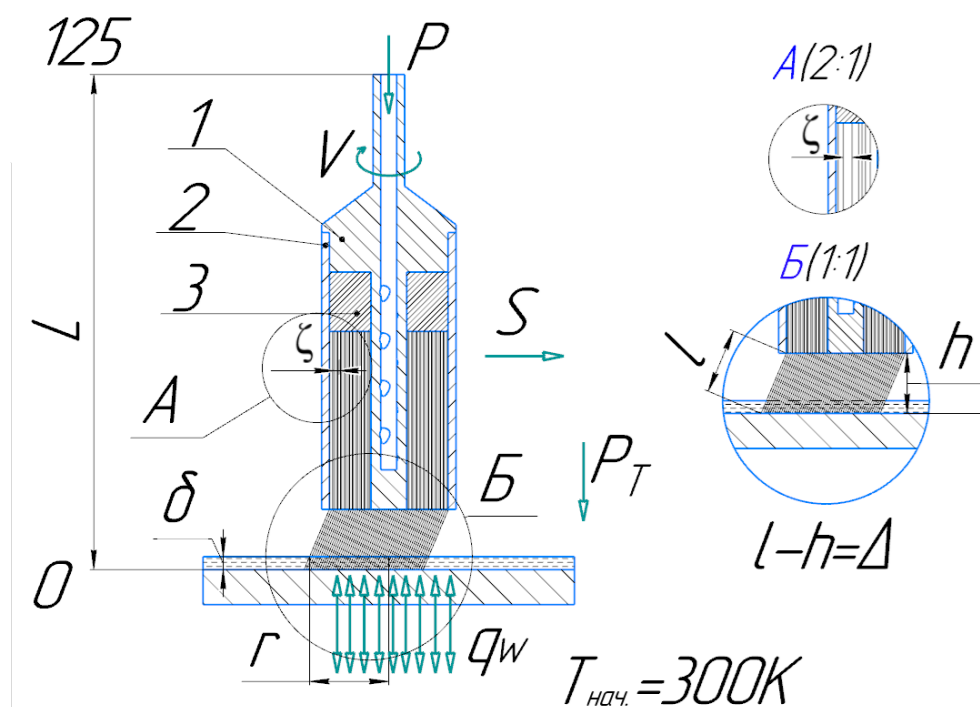


Рисунок 3 - Схематическое изображение расчётной области: стержень 1, цилиндрический корпус 2, металлическое основание с пазами 3

Факторы, принятые во внимание: L – длина расчётной области, мм; r – фактический радиус щётки, мм; V – скорость обработки, м/мин; P – давление, с которым подаётся водо-воздушная 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.

Исходя из параметров работы щётки с керамическим ворсом был проведён эксперимент для определения силы давления инструмента на поверхность в процессе обработки.

Тепло, возникающее вследствие трения инструмента о поверхность образца, это и есть работа, совершаемая силой трения. Работа силы определялась:

$$dA = Fvdt, \quad (1)$$

где v – скорость вращения точки.

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

$$v = \omega r, \quad (2)$$

где ω – частота вращения с^{-1} ;

r – фактический радиус инструмента, мм.

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

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

где P_T – сила трения с поверхностью детали;

ω – частота вращения с^{-1} .

Средний тепловой поток проходящий на единице площади поверхности детали:

$$\frac{Q}{St} = q = \frac{A}{St} = \frac{2}{3} \frac{\pi r^3}{\pi r^2} P_T \omega = \frac{2}{3} r P_T \omega = \frac{2}{3} r f P \omega. \quad (4)$$

В худшем случае считалось, что обрабатываемая деталь – это теплоизолятор с малым коэффициентом теплопроводности. В этом случае тепло будет отводиться на нагрев охлаждающей смеси, излучение будет минимальным. В случае отсутствия воздушно-эмульсионной смеси температура на поверхности детали T_W получается из условия:

$$q = \varepsilon \sigma T_W^4 \Rightarrow T_W = \sqrt[4]{\frac{q}{\varepsilon \sigma}}, \quad (5)$$

где $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2/\text{К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана;

ε – степень черноты поверхности. Ввиду отсутствия данных принято рекомендуемое значение $\varepsilon = 0.8$ для оценок.

Из условий $r = 14.36 \text{ мм}$, $P = 10^4 \text{ Па}$, $f = 0.5$, $\omega = 471 \text{ с}^{-1}$ тепловой поток при воздействии инструмента на поверхность равен: $q \sim 22.6 \text{ кВт/м}^2$.

При этом мгновенная температура на поверхности составит $T_W = 834 \text{ К}$. Это довольно высокая температура даже для металла, не говоря уже о ПКМ. Очевидно, что требуется охлаждение.

По результатам расчетов была построена зависимость теплового потока и радиационно-равновесной температуры в зависимости от скорости обработки (рисунок 4).

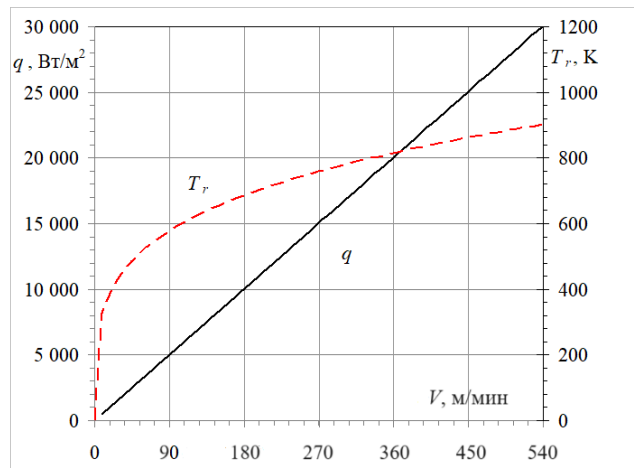


Рисунок 4 - Зависимость теплового потока и радиационно-равновесной температуры в зависимости от скорости обработки

По полученным расчётам была разработана математическая модель теплообмена при трении инструмента о поверхность обрабатываемой детали.

С учетом малых расходов и маленькой скорости подачи воздушно-эмульсионной смеси задача о тепловом режиме инструмента с керамическим ворсом решалась в предположении неподвижной смеси.

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (6)$$

где ρ , C_P , λ – плотность, теплоёмкость и теплопроводность материала;
 T – температура материала.

Граничные условия второго рода следующие:

$$\begin{aligned} T(x=L) &= T_0, \\ \frac{\partial T}{\partial x}(x=0) &= q. \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$T(t=0, x) = T_0. \quad (8)$$

Коэффициент теплопроводности λ вычислялся на стыке двух материалов с разными теплофизическими свойствами.

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

Уравнение теплопроводности (6) с граничным условием второго рода (7) в случае постоянных теплофизических свойств имеет аналитическое решение:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho C_P t}} \cdot \int_0^{\infty} \operatorname{erfc}(\xi) d\xi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\xi^2} d\xi \right) \cdot \left(\frac{x}{2 \sqrt{\frac{\lambda}{\rho C_P t}}} \right), \quad (13)$$

По результатам расчётов был получен график изменения температуры через $t = 120$ с после начала работы инструмента при неподвижной смеси, который показан на рисунке 5а. Температура на поверхности детали увеличилась на 154 градуса, при этом прогрелось 12 мм от длины щётки.

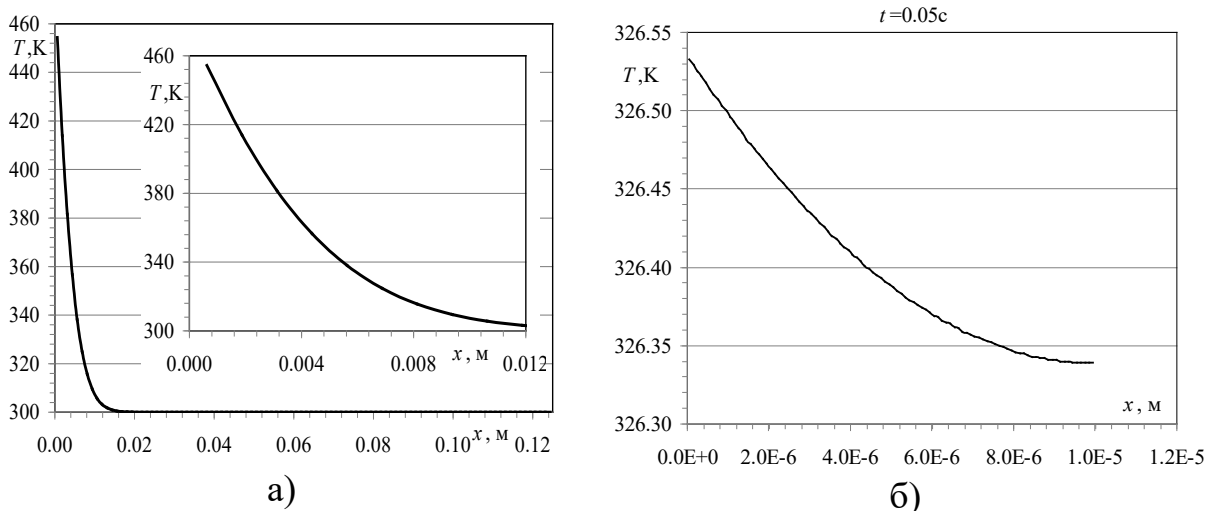


Рисунок 5 – а - Прогрев слоя воздушно-эмульсионной смеси толщиной $\delta = 0,01$ мм при условии неподвижной смеси через $t = 120$ с после начала работы инструмента; б - Прогрев слоя смеси толщиной через $t = 50$ мс после начала работы инструмента при условии движения смеси на величину 24 мм

С учётом определённого ранее расхода, смесь за время t сдвинется на величину:

$$dx = U \left(\frac{d_t}{2R} \right)^2 t = 24 \text{ мм},$$

что больше прогретой толщины слоя. Таким образом, весь прогретый слой смеси будет вытекать из инструмента, и температура внутри него повышаться не будет.

Как уже ранее говорилось, слой воздушно-эмульсионной смеси на поверхности детали в процессе обработки 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:

$$t = \frac{\rho C_P \delta^2}{\lambda}. \quad (13)$$

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 толщиной δ при воздействии теплового потока $q \sim 22$ кВт/м². Как следует из рисунка 5б, при этом тепловом потоке смесь слоем $\delta = 0,01$ мм прогреется до 27 °С через $t = 50$ мс после начала работы щётки. Перепад температур поперёк слоя составляет всего 0,25 К.

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

$$Ut \frac{1}{4} \pi d^2 > \delta \pi r^2, \quad (14)$$

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 расчёте с конкретными параметрами получилось значение 1,061 м/с. Это означает, что расход воздушно-эмульсионной смеси СОТС позволяет полностью заместить слой на поверхности детали и тепловой режим детали обеспечивается.

Благодаря полученным расчётным значениям в результате построения математической модели теплообмена, был спроектирован внутренний канал с отверстиями для подвода воздушно-эмульсионной смеси и проведена оценка его эффективности охлаждения с помощью модуля SolidWorks. Симуляция позволила уточнить направление распределения потоков СОТС внутри инструмента.

Далее было проведено исследование вариантов расположения блоков керамического ворса рисунок 6.

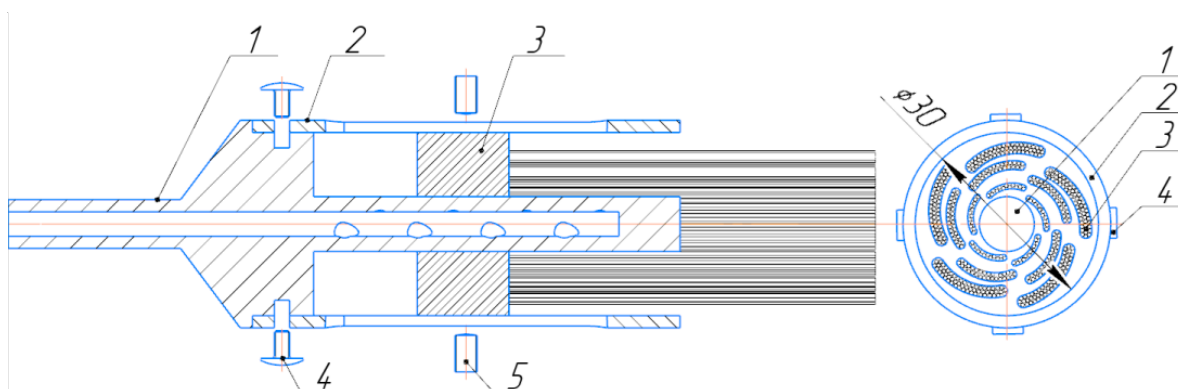
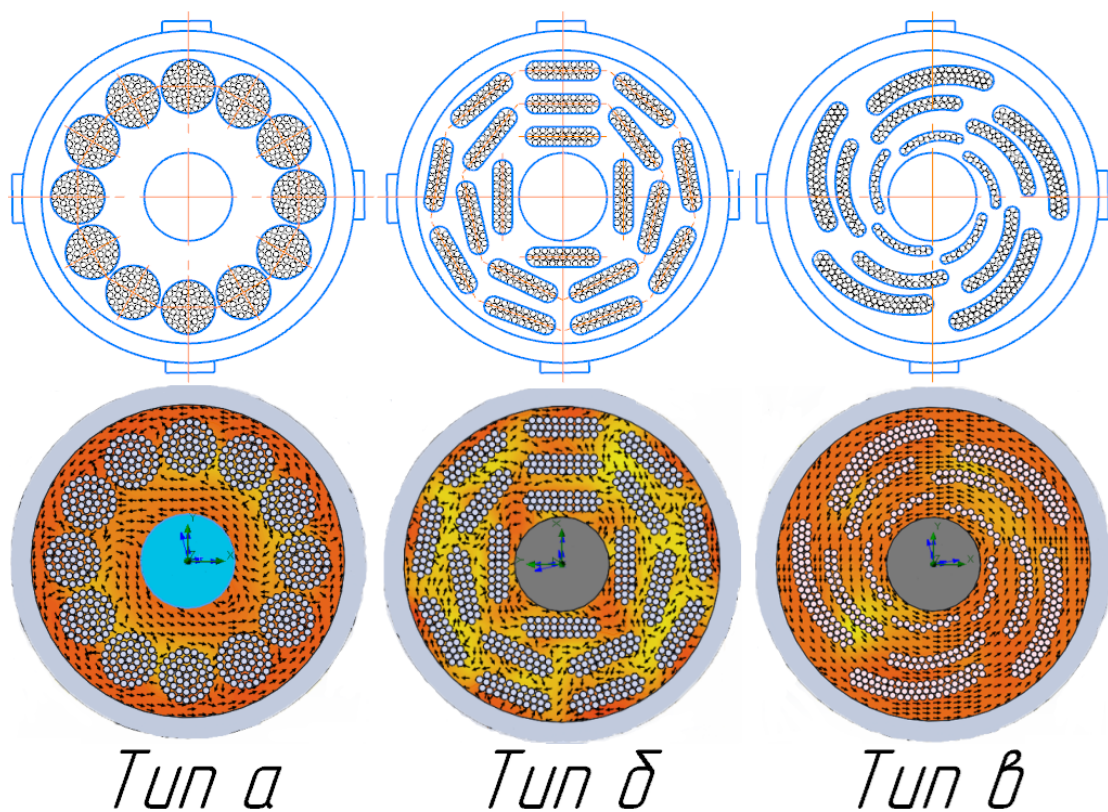


Рисунок 6 – Варианты расположения блоков керамического ворса и конструкция разработанного инструмента: стержень с несквозным каналом 1, соединённым с помощью винтов 4 с цилиндрический корпусом 2; внутри металлического основания 3, в пазы которого максимально плотно запрессован керамический ворс; винты 5 используются для фиксации к стержню металлического основания.

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.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния состава воздушно-эмульсионной смеси на изменение геометрических размеров обрабатываемой детали, влиянию подачи инструмента и скорости обработки на шероховатость получаемой поверхности, влиянию площади поперечного сечения керамического ворса на шероховатость обработанной поверхности, влиянию величины износа гибкого керамического ворса от глубины обработки.

Построенные графики полученных зависимостей после экспериментов показаны на рисунках 7, 8, 9, 10.

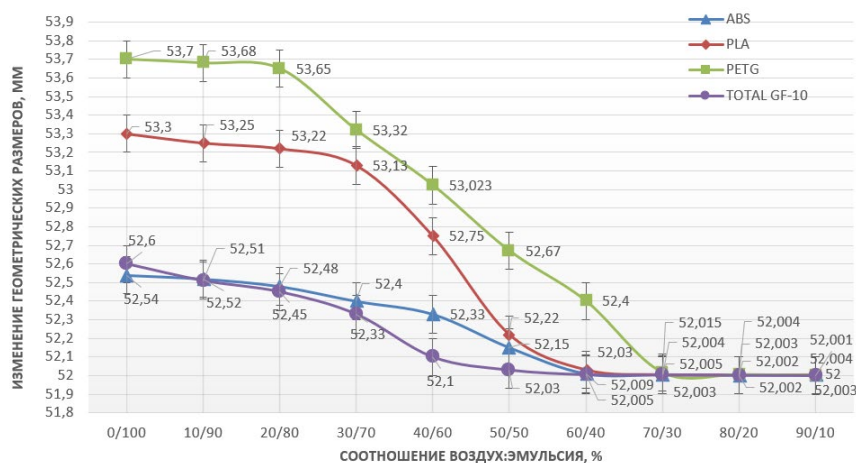


Рисунок 7 - Влияние соотношения ВОЗДУХ:ЭМУЛЬСИЯ на изменение характерного геометрического размера детали

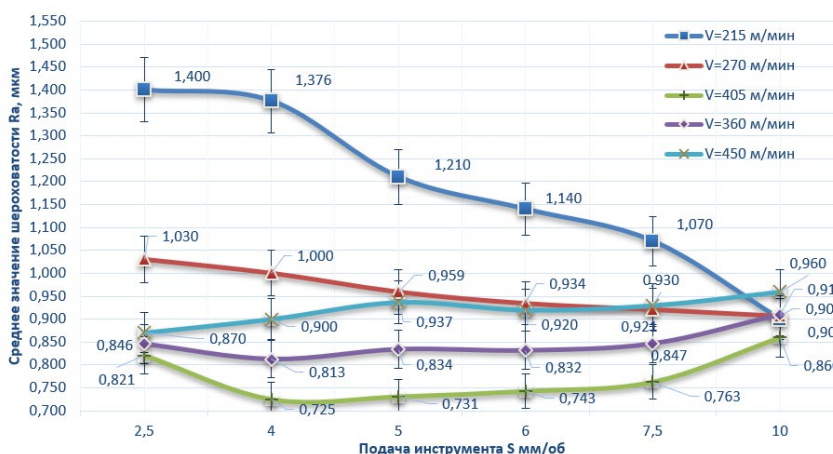


Рисунок 8 – Влияние подачи инструмента на шероховатость обработанной поверхности

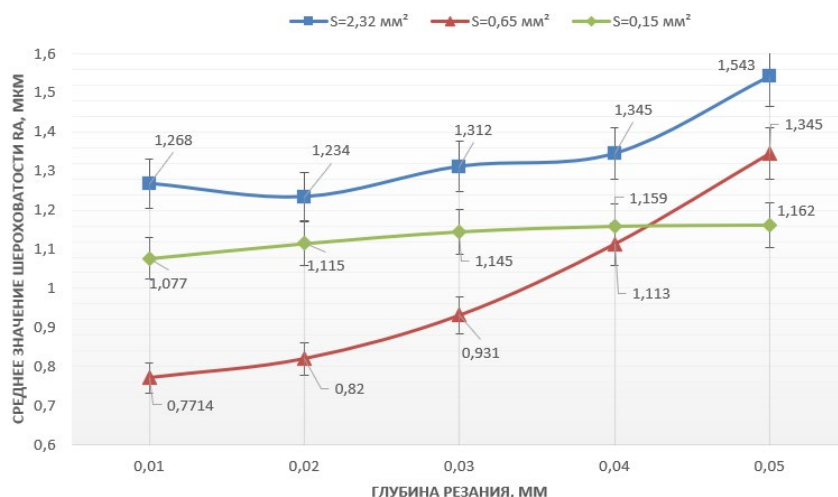


Рисунок 9 – Влияние площади поперечного сечения единичного керамического волокна на шероховатость обработанной поверхности

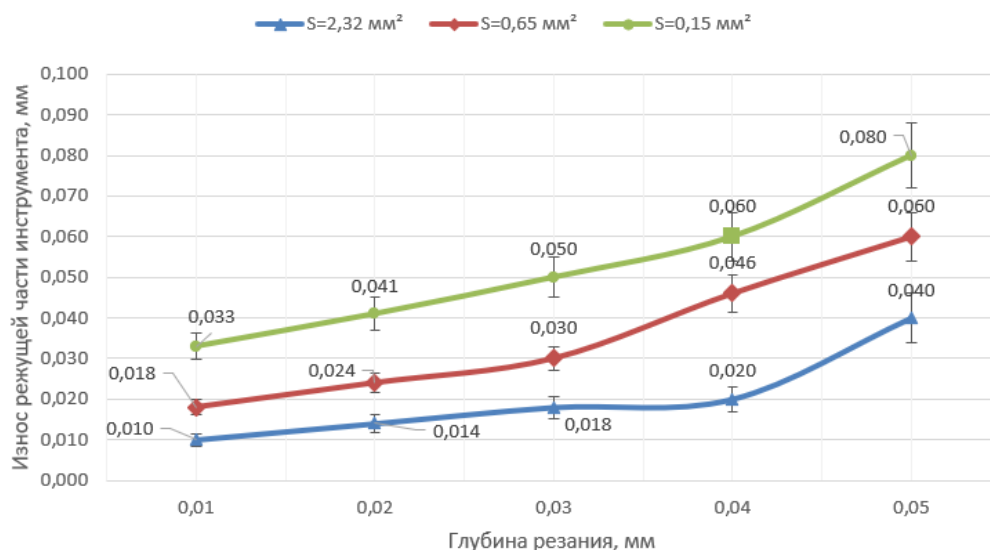


Рисунок 10 – Зависимость глубины резания от износа инструмента

В пятой главе сформированы технологические рекомендации по режимам обработки в зависимости от требуемой шероховатости, по обеспечению стабильной обработки без потери производительности, по выбору оптимального состава воздушно-эмульсионной смеси в зависимости от обрабатываемого материала.

При использовании керамического ворса с площадью сечения $S = 2,32 \text{ мм}^2$ на поверхности могут возникнуть царапины, и достичь значения шероховатости ниже $Ra = <1 \text{ мкм}$ не представляется возможным. При обработке ворсом, имеющим площадь $S = 0,65 \text{ мм}^2$ поверхность исследуемой детали улучшается, с такими параметрами можно обрабатывать возможна обработка без царапин и задиrow. Опыт с сечением $S = 0,15 \text{ мм}^2$ показал, что керамический ворс с такими параметрами не способен обрабатывать сложные

и большие заусенцы, рекомендуется применять только в случае доработки конкретных мест на детали.

Сформированные технологические рекомендации по обработке деталей из ПКМ отражены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1 – Рекомендуемые режимы обработки в зависимости от требуемой шероховатости (при вылете ворса 12÷14мм, натяг 2÷3 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	

Таблица 2 – Технологические рекомендации по времени обработки до рекомендуемой коррекции вылета волокна, T, мин, обеспечивающие стабильную работу инструмента без потери производительности (вылет ворса 12÷14мм, натяг 2÷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

Таблица 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

Технологический процесс абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов инструментом с гибким керамическим ворсом с охлаждением аэрозолем воздушно-эмульсионной смеси успешно прошёл испытания на производственном оборудовании АО «НИИ ТП». Технология абразивной обработки деталей из ПКМ с использованием гибкого абразивного инструмента и распылённых СОТС успешно внедрена на предприятии АО «АЛЬБАТРОС», с расчётом ожидаемого экономического эффекта.

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 деструкции 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК России

1. **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.

2. **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.

3. **Шевчук Е.О.** Улучшение качества поверхностей деталей из полимерно-композитных материалов с использованием СОТС / Е.О. Шевчук, М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев, И.А. Александров // Металлообработка. – 2022. – № 1(127). – С. 11–16.

4. **Шевчук Е.О.** Выбор способа охлаждения для абразивной обработки деталей из полимерно-композитных материалов / Е.О. Шевчук, Д.Г. Евсеев, М.Ю. Куликов, М.Н. Дерябин // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 11. – С. 4–9.

5. **Шевчук Е.О.** Финишная абразивная обработка деталей из полимерно-композитных материалов / Е.О. Шевчук, М.Ю. Куликов, А.Ю. Попов, А.А. Крапостин // Станкоинструмент. – 2023. – № 2(31). – С. 82–87.

6. **Шевчук Е.О.** Математическая модель теплообмена при абразивной обработке деталей из полимерно-композитных материалов / Е.О. Шевчук, М.Ю. Куликов, А.В. Флоров, А.А. Крапостин // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 13–20.

Публикации в других изданиях

7. **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. 365–374.

8. **Шевчук Е.О.** Исследование влияния способов подачи СОТС в зону резания при обработке деталей из полимерно-композитных материалов / Е.О. Шевчук // Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2022): сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022. – С. 324–329.

9. **Шевчук Е.О.** Исследование эффективного способа снижения расхода воздушно-водяной смазочно-охлаждающей смеси при механической обработке деталей из полимерно-композитных материалов / Е.О. Шевчук // Трибология и проблемы МЧС России : материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 90-летию образования гражданской обороны. – Иваново, 2022. – С. 125–129.

Объекты интеллектуальной собственности

10. Патент № 217181 Российская федерация МПК А46В 3/00 2006.01, А46В 11/00 2006.01, В08В 1/00 2006.01, RU 217181 U1 Абразивная щётка с гибкими волокнами и внутренней подачей смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) Заявка: 2022118740, 08.07.2022. Опубликовано: 22.03.2023 Бюл. № 9 / Евсеев Д.Г., Куликов М.Ю., Шевчук Е.О, Попов А.Ю. / Заявитель Российский университет транспорта (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ(МИИТ).

Подписано в печать: 15.02.2024 г. Заказ № 19816
Тираж – 110 экз. Бумага офсетная. Формат 60x90/16.
Типография «11-й ФОРМАТ» ИНН 77726330900 115230,
Москва, Варшавское ш., 36
+7 977 518-13-77,
+7 499 788-78-56
www.avtoreferat.ru riso@mail.ru