

На правах рукописи



Гордиенко Ярослав Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОГО
ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕРЫВИСТЫХ КРУГОВ НА ВУЛКАНИТОВОЙ
СВЯЗКЕ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск
2025

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель: **Гришин Роман Георгиевич,**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Технология машиностроения, станки и инструменты»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет», г. Самара

Официальные оппоненты: **Волков Дмитрий Иванович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Инновационное машиностроение» ФГБОУ ВО
«Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск

Носенко Владимир Андреевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Технология и оборудование машиностроительных
производств» Волжского политехнического института
(филиала) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет», г. Волжский

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», г. Пермь

Защита диссертации состоится «25» декабря 2025г. в 15:00 часов минут на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432700, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, главный учебный корпус, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета - <https://ulstu.ru/science/dis-council/99-2-001-02>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.2.001.02
доктор технических наук



А. Н. Унянин

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Титан и сплавы на его основе являются одними из наиболее востребованных конструкционных материалов, используемых во всех отраслях машиностроения. Наличие высокой удельной прочности, термической и химической стойкости, а также пластичности и ряда других свойств придает титановым сплавам высокие эксплуатационные качества, определяющие их широкое распространение в промышленности. Вместе с тем, титановые сплавы, в отличие от большинства распространённых конструкционных сталей, характеризуются значительно более низкой обрабатываемостью, что особенно выражено при шлифовании. Пониженная шлифуемость титановых сплавов приводит к образованию структурных дефектов на обработанной поверхности, в частности, шлифовочных прижогов. Данные дефекты вызывают необратимое ухудшение физико-механических свойств поверхностного слоя вследствие высокотемпературных структурно-фазовых превращений.

Несмотря на широкое применение титановых сплавов в качестве конструкционных материалов, вопросы повышения эффективности их шлифования остаются недостаточно изученными. Особые свойства этих сплавов требуют нетрадиционных технологических подходов, среди которых наиболее перспективным считается метод прерывистого шлифования. Хотя использование прерывистых кругов позволяет значительно снизить термическое воздействие на обрабатываемую заготовку, оно одновременно вызывает появление дополнительных вибраций в технологической системе, что приводит к увеличению волнистости и шероховатости обработанной поверхности. Противоречие между термическими и динамическими характеристиками процесса шлифования создает серьезную проблему при обработке титановых сплавов. Ключевой задачей становится поиск баланса между снижением теплового воздействия и минимизацией вибраций для обеспечения требуемого качества поверхности. Актуальность исследований обусловлена потребностью в новых методах прерывистого шлифования, снижающих вибрации и термические нагрузки при обработке труднообрабатываемых материалов. Решение этих задач позволит обеспечить требуемое качество поверхности и повысить экономическую эффективность процесса шлифования. Исследования представляют практический интерес для предприятий, работающих с высокопрочными материалами, где традиционные методы шлифования недостаточно эффективны.

Степень разработанности проблемы.

Вопросы и проблемы обработки шлифованием заготовок из титановых сплавов находят свое отражение в работах Л. В. Худобина, А.Н. Резникова, Б.А. Кравченко, Л.Н. Филимонова Е. Н. Маслова, В.Н. Бакуль, Г.В. Бокучава, Д.Б. Ваксер, Г.И. Грановского, Г.М. Ипполитова, Ю.К. Новоселова, С.А. Попова, В.А. Сипайлова, П.И. Ящерицын, Г. И. Саютина, Н. М. Пульцина, С.М. Братана, Ф. В. Новикова, С. Г. Глазунова, Н. И. Богомолова, В. В. Крымова, В. А. Кривоухова, Д. И. Волкова, Г.Б. Лурье, В. Н. Вerezуб, В.А. Носенко, Ю.Н. Иванова, А.А. Васильева, Е.В. Чумаковой, Н.В. Носова и др. Исследователями

рассматриваются основные технологические аспекты и особенности обработки титановых сплавов, анализируются результаты исследований их обрабатываемости, причины возникновения шлифовочных прижогов с точки зрения физики, химии и механики процесса микрорезания.

Технологические особенности и актуальные проблемы применения прерывистых шлифовальных кругов рассматриваются в работах А. В. Якимова, Н.И. Веткасова, Д. В. Старшева, Д. В. Дианова, В. А. Смирнова, А. В. Морозова, Д.С. Реченко, В.А. Прилуцкого, А.Н. Филина и др. Исследователями проанализированы основные преимущества и недостатки процесса прерывистого шлифования, разработаны методики проектирования прерывистых шлифовальных кругов (ПШК) и определены перспективные направления для совершенствования как конструкции кругов, так и самой технологии. Большинство предлагаемых авторами решений в области совершенствования процесса шлифования титановых сплавов с использованием ПШК ограничены узким диапазоном параметров технологической системы и, как правило, имеют сложную техническую реализацию. Известные методики проектирования параметров технологической системы обладают ограниченной областью применимости в части решения технологических задач, не обеспечивают нахождения наилучшего из возможных решений или игнорируют особенности обрабатываемого материала. Решение указанных проблем требует проектирования технологических систем, учитывающих специфику титановых сплавов и рационально использующих ключевые преимущества вулканитовой связки: её повышенную упругость для снижения вибраций и демпфирующие свойства для диссипации ударных нагрузок, что напрямую способствует снижению теплонапряженности процесса.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса плоского шлифования заготовок деталей из титановых сплавов за счет рационального проектирования и применения прерывистых кругов на вулканитовой связке.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана конструкция ПШК, методики и рекомендации по выбору его конструктивных параметров.
2. Определены физико-механические свойства абразивного сегмента на вулканитовой связке.
3. Проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния абразивных сегментов при эксплуатационных нагрузках, позволившее оценить концентрацию напряжений в опасном сечении сегмента.
4. Проведено численное моделирование влияния физико-механических свойств вулканитовой связки на виброперемещения оси ПШК с целью обоснования ее демпфирующих характеристик.
5. Разработана аналитическая модель и проведено численное моделирование теплового состояния зоны обработки при шлифовании ПШК.
6. Исследовано влияние режимов шлифования на параметр шероховатости поверхности, составляющую высоты волнистости и коэффициент шлифования.

7. Экспериментально показана более высокая эффективность разработанного ПШК в сравнении с кругами на бакелитовой и керамической связках.

8. Проведена оценка эффективности разработанного ПШК в условиях действующего производства.

Объектом исследования является процесс плоского шлифования заготовок деталей из титановых сплавов прерывистыми кругами на вулканитовой связке.

Предметом исследования выступают взаимосвязи между входными и выходными параметрами процесса плоского прерывистого шлифования заготовок деталей из титановых сплавов.

Методология и методы исследований.

Достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением комплекса теоретических и экспериментальных методов исследований. Моделирование напряженно-деформированного состояния абразивных сегментов и температурных полей в зоне резания выполнялось методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Виброперемещения технологической системы анализировались на основе одномассовой модели. Разработка конструкции ПШК и подготовка моделей для расчетов проводились в среде CAD-системы КОМПАС-3D.

Экспериментальные исследования выполнялись на универсальном плоскошлифовальном станке 3Д711ВФ11. Измерение параметров процесса осуществлялось современным метрологическим оборудованием: вибронагруженность оценивалась с использованием вибропреобразователей AP2019 и осциллографа АКИП-4122/1; температура в зоне шлифования контролировалась двухволновым пирометром Williamson DWF-24-34-C; параметры шероховатости и волнистости измерялись на автоматическом профилометре Mitutoyo Surftest SJ-410; визуальный контроль поверхности и выявление дефектов проводились с помощью цифрового микроскопа Discovery Artisan 64. Статистическая обработка экспериментальных данных, построение регрессионных моделей и проверка их адекватности выполнялись с использованием методов математической статистики и программного обеспечения Microsoft Excel.

Научная новизна работы.

1. Математические зависимости для определения предельной рабочей скорости разработанной конструкции ПШК на вулканитовой связке.

2. Имитационная модель и результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния абразивных сегментов в условиях эксплуатационных нагрузок.

3. Аналитическая модель для расчета средней контактной температуры в зоне резания и результаты численного моделирования теплового состояния зоны обработки при шлифовании ПШК.

4. Имитационная модель и результаты численного моделирования виброперемещений оси ПШК в зависимости от физико-механических характеристик вулканитовой связки.

5. Регрессионные математические модели, отражающие взаимосвязь между вибрационными процессами, конструктивными характеристиками ПШК и геометрическими параметрами обработанной поверхности.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Конструкция и технология изготовления сборного ПШК.
- Результаты исследования физико-механических свойств абразивного сегмента на вулканитовой связке.
- Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния абразивных сегментов для оценки концентраций напряжений в опасном сечении сегмента.
- Аналитическая модель определения средней контактной температуры в зоне шлифования и результаты численного моделирования теплового состояния зоны обработки при шлифовании ПШК.
- Результаты экспериментальных исследований по влиянию условий и режима шлифования ПШК на параметры шероховатости поверхности, составляющую высоты волнистости и коэффициент шлифования.
- Регрессионные математические модели, отражающие взаимосвязь между вибрационными процессами, конструктивными характеристиками ПШК и геометрическими параметрами обработанной поверхности.

Практическая значимость.

1. Конструкция сборного ПШК на вулканитовой связке.
2. Методика расчета конструктивных элементов ПШК с учетом технологических параметров процесса шлифования.
3. Рекомендации по проектированию параметров процесса шлифования заготовок деталей из титановых сплавов с использованием ПШК на вулканитовой связке.
4. Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях ОАО «Авиаагрегат» и АО «Агрегат», подтвердившие эффективность разработанных технологических решений. Годовой экономический эффект от внедрения непосредственно на ОАО «Авиаагрегат» составил 1 325 391 руб.
5. Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО СамГТУ.

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается достаточным изучением научно-литературных источников, корректной постановкой задач и применением проверенных методов расчетов и анализа данных. Справедливость выдвинутых гипотез, моделей и принятых допущений подтверждаются результатами экспериментов, которые не содержат взаимных противоречий, а также противоречий с результатами проведенных ранее исследований и известными научными теориями.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в производство ОАО «Авиаагрегат» при обработке деталей «Цапфа» №47601.4122.207.000 и «Цилиндр» №70.00.4101.070 – СБ. Внедрение позволило

повысить производительность обработки на 12 – 17% при полном устранении брака от шлифовочных прижогов. Результаты также прошли опытно-промышленную проверку на АО «Агрегат» при обработке детали «Заслонка», где достигнуто повышение производительности на 20%, снижение брака на 18 % и обеспечено стабильное качество поверхности ($Ra = 0,1 - 0,3$ мкм). По результатам испытаний получены соответствующие акты внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на всероссийских и международных научно-практических конференциях ICMSSTE 2021, «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара 2021 – 2025 г.), «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Новополоцк 2023 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 – в издании, индексируемом в базе Scopus и 5 – в изданиях, рекомендованных РИНЦ РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (166 источников) и 18 приложений. Объем диссертации – 214 страниц включая 82 рисунка и 11 таблиц в тексте.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено вопросам обоснования актуальности выбранной темы исследований, ее теоретической и практической значимости, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы рассматриваются теоретические аспекты процесса шлифования заготовок деталей из титановых сплавов. Выполнен анализ специфики и проблем, возникающих при обработке.

Установлено, что одним из наиболее перспективных решений в области совершенствования технологии шлифования титановых сплавов, направленных на снижение теплонапряженности зоны резания, является использование метода шлифования прерывистыми кругами, что обусловлено наличием у прочих решений ряда существенных недостатков. При этом применение ПШК для решения задачи снижения теплонапряженности зоны резания сопряжено с рядом не до конца решенных проблем, среди которых можно выделить: недостаточное развитие методической базы проектирования ПШК, повышенная склонность прерывистых кругов к возникновению вибраций, а также формирование развитой волнистости обработанной поверхности.

Рассмотрены технологические возможности применения кругов на вулканитовой связке с точки зрения совершенствования процесса плоского прерывистого шлифования заготовок из титановых сплавов. Проведен анализ технологического потенциала абразивного инструмента на вулканитовой связке при обработке титановых сплавов, сформулированы направления совершенствования процесса прерывистого плоского шлифования на основе поиска рациональных режимов резания и условий обработки. Анализ технологических характеристик кругов на вулканитовой связке показал, что их

повышенная упругость и партипластичность способствуют увеличению количества активных режущих зерен за счет упругого поджатия связки. Это, в свою очередь, снижает удельное давление на отдельное зерно, уменьшая силы трения скольжения между затупившимися зернами и обрабатываемой поверхностью. Кроме того, упругие свойства связки обеспечивают эффективное поглощение ударных энергий при врезании сегментов.

Вторая глава посвящена описанию конструкции и технологии изготовления сборного ПШК, определению критериев совершенствования процесса шлифования титановых сплавов и разработке рекомендаций по выбору отдельных конструктивных параметров круга с учетом их взаимного влияния на непрерывность контакта периферии круга с заготовкой, допустимую длину абразивных сегментов (определяемую геометрией круга и условиями охлаждения), а также на параметры качества обработанной поверхности, в частности, на высоту неровностей волнистого профиля, обусловленную прерывистым характером процесса шлифования. Таким образом, была определена первая задача: установить оптимальное количество сегментов и их длину, минимизирующее негативное влияние на волнистость при обеспечении эффективности процесса.

На основе геометрических закономерностей, описанных в работах Смирнова В.А., было получено выражение (1) для определения максимальной теоретически возможной высоты абразивных сегментов (АС) для будущей конструкции сборного ПШК:

$$\max(l_{\text{сегм}}) < \frac{2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{(360^\circ - (180^\circ - 2 \cdot \arccos(\frac{h_{\text{сегм}}}{2 \cdot R})) \cdot n_{\text{сегм}})}{2 \cdot n_{\text{сегм}}}\right)}{\sqrt{2 - 2 \cdot \cos\left(\frac{360^\circ}{n_{\text{сегм}}}\right)}}, \text{ м.} \quad (1)$$

Полученное выражение позволяет определить допустимую высоту АС $l_{\text{сегм}}$ в зависимости от радиуса круга R , высоты $h_{\text{сегм}}$ и их количества $n_{\text{сегм}}$. Это обеспечивает проектирование геометрии ПШК с гарантированным зазором между АС, необходимым для эффективного подвода СОЖ и отвода стружки, что является важным условием для предотвращения теплового повреждения обрабатываемых заготовок из титановых сплавов.

Установлено, что высота волнистости обработанной поверхности $u_{\text{пр}}$ существенно снижается при увеличении количества сегментов на круге $n_{\text{сегм}}$, скорости круга $V_{\text{кр}}$ и скорости продольной подачи $S_{\text{пр}}$, что подтверждается полученным выражением (2) на основе моделей, описанных в работах Э.Ф. Капанца и А.В. Якимова:

$$u_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{пр}}^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot R \cdot (360^\circ - \varphi_{\text{сегм}} \cdot n_{\text{сегм}})}{180^\circ \cdot n_{\text{сегм}}}\right)^2}{4 \cdot \left(\frac{V_{\text{кр}}}{\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot S_{\text{пр}} \cdot \pi}{V_{\text{кр}}} + 1\right)}, \text{ м.} \quad (2)$$

Как показано на рис. 1, увеличение $n_{\text{сегм}}$ круга радиусом $R = 0,2$ м до 16 шт. и более обеспечивает высоту волнистости, не превышающую критических значений во всем диапазоне режимов шлифования, что является приемлемым для большинства задач шлифовальной обработки.

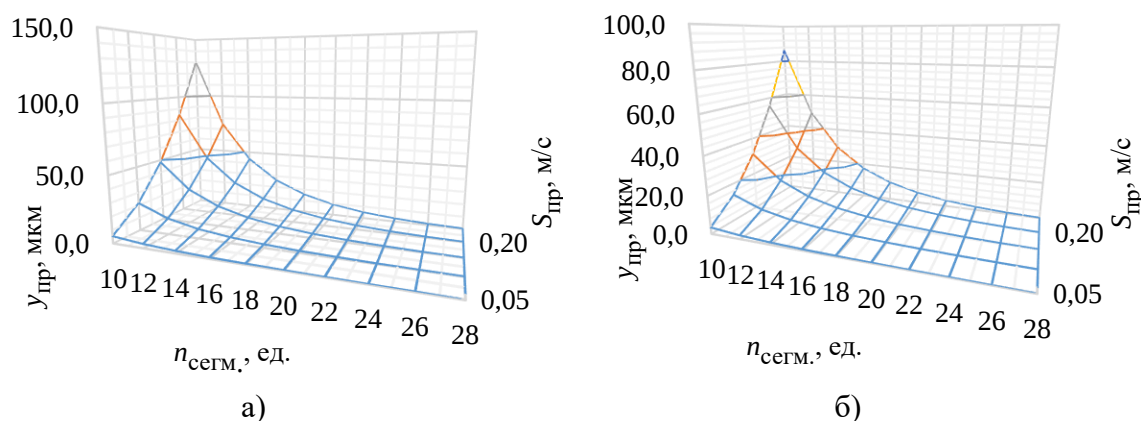


Рис. 1. Зависимость параметра $y_{пр}$ от рабочей скорости круга $V_{кр}$, скорости подачи $S_{пр}$ и количества сегментов $n_{сегм.}$: а) – $V_{кр} = 20$ м/с; б) – $V_{кр} = 80$ м/с

Таким образом, обеспечение требуемых параметров шероховатости и волнистости ПШК достигается за счет использования конфигурации с 16 АС. Меньшее количество сегментов приведет к значительному росту волнистости, а их увеличение – к приближению конфигурации круга к сплошной, что недопустимо из-за повышения температур в зоне шлифования. Следовательно, использование 16 АС в сочетании с рациональными режимами резания является оптимальным условием для гарантированного достижения требуемого качества обработки.

Исследования позволили разработать конструкцию и технологию изготовления сборного ПШК (рис. 2), представляющего собой металлический корпус 1 в виде диска с посадочным отверстием под оправку, по периферии которого выполнены прямоугольные сквозные пазы, в которых посредством неразъемного клеевого соединения установлены рабочие сегменты 2, выполненные из стандартных абразивных брусков.

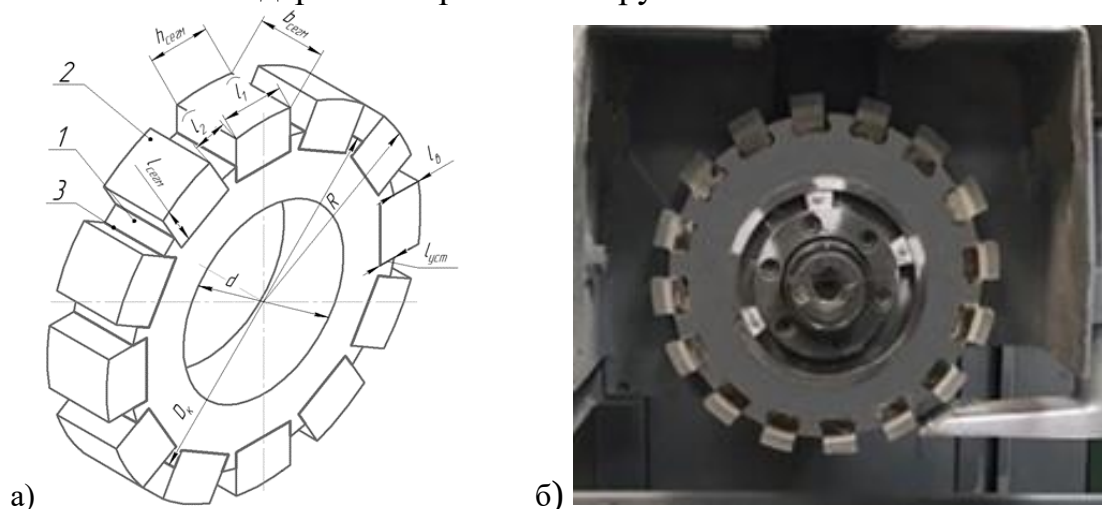


Рис. 2. Конструкция ПШК: а) – эскиз с обозначением геометрических параметров; б) – ПШК на вулканитовой связке; 1 – корпус; 2 – абразивный сегмент (АС); 3 – клеевое соединение; $l_{сегм}$ – полная высота АС; $l_в$ – высота выступа АС; $b_{сегм}$ – ширина АС; $h_{сегм}$ – длина АС; $l_{уст}$ – глубина (длина) паза под установку АС; R – радиус периферии круга; d – диаметр посадочного отверстия корпуса круга; $D_к$ – наружный диаметр корпуса круга; $b_к$ – ширина (контакта) корпуса круга; l_1 – длина дуги периферии АС; l_2 – длина дуги впадин

В третьей главе представлена методика оценки прочности ПШК, позволившая определить предельные режимы работы, в частности, максимальные скорости вращения, исключаящие разрушение круга. Выполнены экспериментальные исследования физико-механических характеристик АС марки 63С 10-Н СМ1-5 В. На основе полученных данных выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния АС. Проведен анализ вибрационного нагружения ПШК с использованием упрощенной одномассовой динамической модели. Экспериментально подтверждены демпфирующие свойства вулканитовой связки и оценено их влияние на виброперемещения ПШК.

Разработана и верифицирована аналитическая теплофизическая модель процесса прерывистого шлифования.

На основании методик Калинина Е.П., Старшева Д.В. и Смирнова А.В. с учетом геометрии сегментов ПШК и требований ГОСТ Р 52588-2011 были получены аналитические зависимости (3) и (4) для определения предельной рабочей скорости круга, необходимые для последующего моделирования напряженно-деформированного состояния АС:

– для шлифовальных кругов, работающих в открытой зоне:

$$V_{кр.р.пред} \leq 0,577 \cdot \sqrt{\frac{0,9 \cdot \sigma_{\pi}^p}{\alpha_{\sigma} \cdot \rho_{a.m} \cdot \left(\frac{h_{сегм}^2}{12} + \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \cdot \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \right)}}} \cdot R, \text{ м/с.} \quad (3)$$

– для шлифовальных кругов, работающих в закрытой зоне:

$$V_{кр.р.пред} \leq 0,756 \cdot \sqrt{\frac{0,9 \cdot \sigma_{\pi}^p}{\alpha_{\sigma} \cdot \rho_{a.m} \cdot \left(\frac{h_{сегм}^2}{12} + \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \cdot \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \right)}}} \cdot R, \text{ м/с.} \quad (4)$$

где α_{σ} – коэффициент концентрации напряжений; σ_{π}^p – предел прочности АС на разрыв, МПа; $\rho_{a.m}$ – плотность АС, кг/м³.

Для ПШК на вулканитовой связке расчетные значения предельной рабочей скорости составили 38 м/с для открытой зоны и 49 м/с для закрытой зоны, что подтверждает соответствие требованиям промышленной безопасности при эксплуатации инструмента.

Для моделирования напряжённо-деформированного состояния АС определены их физико-механические характеристики: предел прочности при растяжении, равный 11,7 МПа, при сжатии – 51,1 МПа (испытания на машине Instron 5989), модуль упругости – $0,73 \cdot 10^5$ МПа (метод крутильного маятника). На основе экспериментальных данных рассчитан коэффициент сопротивления материала (1,59 (Н·с)/м), использованный для верификации конечно-элементной модели.

Методом численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics исследовано напряженно-деформированное состояние АС. Установлено, что максимальные эквивалентные сжимающие напряжения (до 49,8 МПа) возникают в момент врезания сегмента в заготовку и локализуются вдоль его фронтальной кромки. При установившемся процессе контакта периферии сегмента с материалом заготовки напряжения не превышают 13,8 МПа. Деформации сегментов являются незначительными (максимум 8,29 мкм), что подтверждает достаточную прочность конструкции.

Для оценки надёжности круга при работе на высоких скоростях были проведены расчёты коэффициента концентрации напряжений α_σ . Этот коэффициент показывает в каких местах конструкции (например, в зонах крепления) напряжение многократно возрастает, что позволяет предсказать возможные разрушения. Данные расчётов представлены в табл. 3.

Установлено, что связь между шириной контакта сегмента с корпусом b_k и коэффициентом концентрации напряжений α_σ количественно описывается полиномиальным уравнением шестой степени с коэффициентом детерминации, равным $R^2 = 0,983$:

$$\alpha_\sigma = a \cdot b_k^6 + b \cdot b_k^5 + c \cdot b_k^4 + d \cdot b_k^3 + e \cdot b_k^2 + f \cdot b_k + g. \quad (5)$$

где a, b, c, d, e, f – коэффициенты регрессии; g – константа; $b_k = b_{\text{сегм}}$ – ширина площадки контакта фронтальной/тыльной поверхности сегмента с поверхностями установочного паза корпуса круга, мм.

Данная зависимость позволяет оценить влияние конструктивных параметров инструмента на распределение напряжений.

Коэффициенты и константы уравнения регрессии (5) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты определения коэффициентов и констант
полиномиального уравнения регрессии**

Коэффициент концентрации напряжений	Коэффициент/константа уравнения регрессии						
	a	b	c	d	e	f	g
$\alpha_{\sigma_{\text{экв}}}$	$-3,0 \cdot 10^{-11}$	10^{-8}	$-3,0 \cdot 10^{-6}$	0,0002	-0,011	0,2076	1,1222
α_{σ_r}	$-3,0 \cdot 10^{-11}$	10^{-8}	$-3,0 \cdot 10^{-6}$	0,0002	-0,011	0,2093	1,0983
Примечание: $\alpha_{\sigma_{\text{экв}}}$ – эквивалентное (объединяющее напряжения в одну величину) напряжение, МПа; α_{σ_r} – радиальное (вдоль радиуса вращения круга) напряжение.							

Адекватность полученных математических моделей подтверждена сравнением расчетных значений с экспериментальными (табл. 2): относительная погрешность не превышает 5 – 7 %.

Таблица 2

Результаты проверки адекватности математических моделей

$$\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}; \alpha_{\sigma_r} = f(b_k = b_{\text{сегм}})$$

$b_{\text{сегм}},$ мм	Экспериментальные значения		Расчетные значения		Относительная погрешность, %	
	$\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}$	α_{σ_r}	$\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}$	α_{σ_r}	$\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}$	α_{σ_r}
1	2	3	4	5	6	7
8	2,089	2,101	2,188	2,178	4,7	3,7
25	2,293	2,343	2,428	2,428	5,9	3,6
37	1,813	1,832	1,791	1,774	1,2	3,2
49	1,459	1,471	1,495	1,528	2,5	3,9
53	1,436	1,474	1,479	1,518	3,0	2,9
72	1,320	1,351	1,444	1,495	9,4	10,7
88	1,173	1,187	1,144	1,195	2,5	0,6
116	1,051	1,083	1,005	1,011	4,4	6,7
124	1,048	1,079	1,078	1,083	2,8	0,4
135	1,090	1,094	1,006	1,061	7,7	3,1

Полученная зависимость (5) демонстрирует, что коэффициент концентрации напряжений α_{σ} в зоне крепления сегмента достигает значения $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}} = 2,159$ и $\alpha_{\sigma_r} = 2,184$ (табл. 3).

Таблица 3

Результаты определения коэффициентов концентрации напряжений

$V_{\text{кр}},$ м/с	$\max(\sigma_{r.\text{НОМ}}),$ МПа	$\max(\sigma_r),$ МПа	$\max(\sigma_{\text{ЭКВ}}),$ МПа	$\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}} = \frac{\max(\sigma_{\text{ЭКВ}})}{\max(\sigma_{r.\text{НОМ}})}$	$\alpha_{\sigma_r} = \frac{\max(\sigma_r)}{\max(\sigma_{r.\text{НОМ}})}$
20	0,705	1,540	1,522	2,159	2,184
30	1,586	3,465	3,425	2,159	2,184
40	2,820	6,160	6,088	2,159	2,184
50	4,406	9,625	9,513	2,159	2,184
60	6,345	13,861	13,700	2,159	2,185
70	8,636	18,866	18,647	2,159	2,185
80	11,280	24,641	24,355	2,159	2,184
Примечание: $V_{\text{кр}}$ – рабочая скорость круга, м/с; $\sigma_{r.\text{НОМ}}$ – номинальное (усредненное, теоретическое) радиальное напряжение, МПа.					

Это означает, что в самых нагруженных точках крепления фактические напряжения превышают расчетные номинальные более чем в 2 раза. Такое

превышение создает зону повышенного риска усталостного разрушения. Для решения проблемы разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать геометрию крепления и снизить коэффициент концентрации напряжений. Применение модели обеспечивает повышение надежности ПШК, снижение риска разрушения при работе на предельных режимах и переход от эмпирического подбора к точному расчетному проектированию конструкции.

Прерывистая структура шлифовальных кругов вызывает циклические удары и интенсивные колебания при резании, что снижает качество обработки и стойкость инструмента. Вулканитовая связка потенциально способна демпфировать эти колебания благодаря своим упругим свойствам, однако данная гипотеза требовала экспериментального подтверждения и количественной оценки в сравнении с традиционно применяемыми керамической и бакелитовой связками.

Для исследования демпфирующих свойств использован метод крутильного маятника, позволивший определить коэффициент вязкого сопротивления h материала АС (1,59 (Н·с)/м). Полученные данные подтвердили принципиальную способность вулканитовой связки поглощать вибрации за счет диссипации механической энергии.

Виброперемещения оси ПШК проанализированы на основе упрощенной одномассовой эквивалентной модели, где учтены жесткость и демпфирующие свойства АС.

Численное моделирование показало, что вулканитовая связка обеспечивает значительное снижение вибраций по сравнению с "жесткими" связками (керамической и бакелитовой).

Количественно установлено, что демпфирующие свойства вулканитовой связки обеспечивают снижение амплитуды виброперемещений на 14 % в диапазоне значений вынуждающей силы $P_B = 100 - 700$ Н и скорости круга $V_{кр} = 20 - 80$ м/с. Чем выше нагрузка и частота вращения, тем заметнее эффект от применения вулканитовой связки (рис. 3).

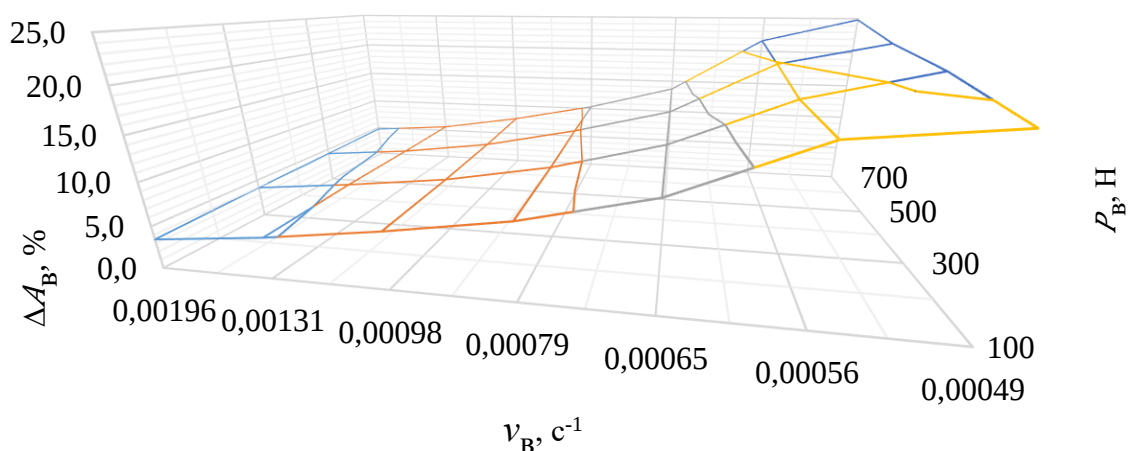


Рис. 3. Зависимость относительного снижения амплитуды виброперемещений ΔA_B от вынуждающей силы P_B и частоты вынуждающей силы ν_B

Таким образом, обосновано и количественно подтверждено, что применение АС на вулканитовой связке позволяет существенно повысить демпфирующую способность ПШК. Это должно привести к снижению вибраций и, как следствие, к повышению качества обработки и стойкости шлифовального круга.

Высокие температуры в зоне шлифования при обработке титановых сплавов часто приводят к термическим дефектам, таким как прижоги и структурные изменения материала, что требует точного прогнозирования и регулирования теплового режима в зоне шлифования. Существующие модели не в полной мере учитывают периодический характер нагрева и охлаждения, присущий ПШК. Для решения этой задачи на основе принципа суперпозиции тепловых полей с использованием зависимостей, описанных в работах А.Н. Резникова и Н.Н. Рыкалина, разработана теплофизическая модель, учитывающая особенности теплофизических свойств титановых сплавов. Анализ глубины распространения теплового фронта:

$$h_T = \sqrt{4 \cdot a_{м.з.} \cdot \tau}, \text{ м.} \quad (6)$$

и скорости его распространения:

$$v_T = \sqrt{\frac{a_{м.з.}}{\tau}}, \text{ м/с.} \quad (7)$$

где $a_{м.з.}$ – коэффициент температуропроводности материала заготовки, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – временная характеристика микроцикла, определяемая как:

$$\tau = \frac{\sqrt{D \cdot t}}{S_{пр}}, \text{ с.} \quad (8)$$

показал целесообразность использования модели распределенного быстродвижущегося источника тепла, нагревающего полубесконечное тело. Разработана комплексная теплофизическая модель, включающая зависимость для температуры нагрева от движущегося теплового источника:

$$T_{нагр}(x, \Delta\tau) = T_0 + \frac{q_{нагр}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{м.з.} \cdot x} \cdot e^{\left(-\frac{V_{т.и.} \cdot x}{a_{м.з.}}\right)} \cdot F(x, \Delta\tau), \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$F(x, \Delta\tau) = 1 + \frac{2 \cdot (\tau_1 + \tau_2)}{\pi \cdot \tau_1} \cdot \sum_{k=1}^n \left[\frac{(-1)^k}{k} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot \tau_{п}}{\tau_1}\right) \cdot e^{\left(-\frac{V_{т.и.} \cdot x}{a_{м.з.}}\right)} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\tau_1 + \tau_2} \cdot \Delta\tau - \frac{V_{т.и.} \cdot x}{2 \cdot a_{м.з.}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot k \cdot a_{м.з.} \cdot \omega}{V_{т.и.}^2}\right)^2}\right) + 0,5}\right) \right] \quad (9)$$

Зависимость для температуры охлаждения в зоне впадин:

$$T_{охл}(x) = \frac{2 \cdot q_{охл}}{\lambda_{м.з.}} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{a_{м.з.} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2]} \cdot \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{м.з.} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2]}}\right), \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (10)$$

где $F(x, \Delta\tau)$ – функция, учитывающая периодический характер теплового воздействия; $q_{нагр}$, $q_{охл}$ – удельные тепловые потоки от нагрева и охлаждения, $\text{Вт}/\text{м}^2$; k – порядковый номер теплового импульса; $\Delta\tau$ – период,

отсчитываемый по абсолютной временной шкале, с; τ_1, τ_2 – время действия теплового источника (контакта рабочего сегмента с заготовкой) и охлаждения (при прохождении впадины) соответственно, с; ω – циклическая частота импульсов, $2\pi/\text{с}$; $V_{\text{т.и.}} = S_{\text{пр}}$ – скорость движения теплового источника относительно поверхности заготовки, м/с; $\alpha_{\text{м.з.}}$ – коэффициент температуропроводности материала заготовки, $\text{м}^2/\text{с}$; $\lambda_{\text{м.з.}}$ – коэффициент теплопроводности материала заготовки, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; x – линейная координата в направлении движения круга, м; i – порядковый номер микроцикла «нагрев-охлаждение»; $\tau_{\text{п}}$ – период микроцикла, определяется как:

$$\tau_{\text{п}} = \tau_1 + \tau_2, \text{ с.} \quad (11)$$

Адекватность предложенной аналитической модели была проверена путем сопоставления результатов расчетов с данными, полученными методом численного моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics. Сравнение выполнялось для широкого диапазона режимных параметров: скорость вращения круга $V_{\text{кр}} = 20 - 80$ м/с, скорость продольной подачи $S_{\text{пр}} = 0,05 - 0,25$ м/с. Результаты верификации показали, что среднее значение погрешности составляет около 8 %, что является удовлетворительным для решения инженерно-технологических задач.

В результате проведенного исследования разработана усовершенствованная аналитическая теплофизическая модель процесса прерывистого шлифования титановых сплавов. Основное преимущество модели заключается в комплексном учете как периодического нагрева от АС, так и последующего охлаждения в зоне впадин шлифовального круга.

Четвертая глава посвящена экспериментальной оценке эффективности разработанного ПШК при шлифовании заготовок деталей из титановых сплавов. Экспериментальные исследования проводились для верификации разработанной теплофизической модели, сравнительной оценки ПШК по критериям температуры и вибронегруженности, а также для установления зависимостей между параметрами обработки (режимами шлифования, характеристиками круга) и выходными параметрами процесса – шероховатостью и волнистостью. По результатам исследований выполнена оценка технико-экономической эффективности и обоснована целесообразность внедрения разработанной технологии в действующее производство.

Для проведения испытаний были изготовлены три идентичных по конструкции ПШК, отличающиеся типом связки АС: вулканитовая, бакелитовая и керамическая. Технологические испытания проводились в идентичных условиях для обеспечения достоверности сравнительного анализа. Режимы шлифования: скорость продольной подачи $S_{\text{пр}} = 0,05 - 0,25$ м/с, рабочая скорость круга $V_{\text{кр}} = 20 - 49$ м/с, глубина шлифования $t = 0,05 - 0,1$ мм.

Оценка вибрационного состояния технологической системы показала (рис. 4), что применение ПШК на вулканитовой связке обеспечивает снижение уровня вибраций на 15 % относительно бакелитовой и 26 % относительно керамической связки, благодаря более высоким демпфирующим свойствам.

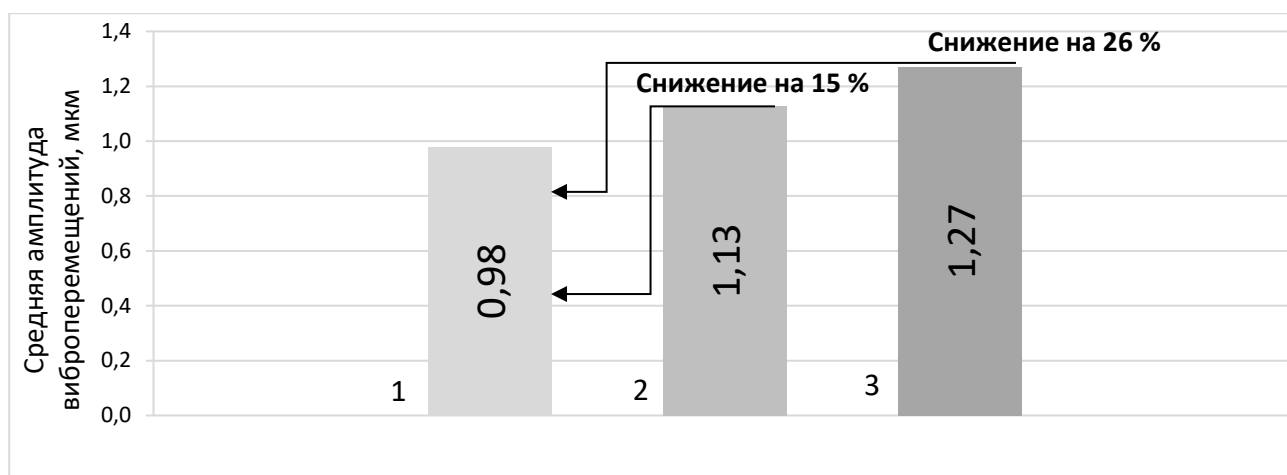


Рис. 4. Сопоставление результатов экспериментальной оценки средней амплитуды виброперемещений: 1 – вулканитовая связка; 2 – бакелитовая связка; 3 – керамическая связка

Проведен сравнительный анализ влияния типа связки шлифовального круга на шероховатость поверхности при обработке пяти марок титановых сплавов с различными физико-механическими свойствами (рис. 5).

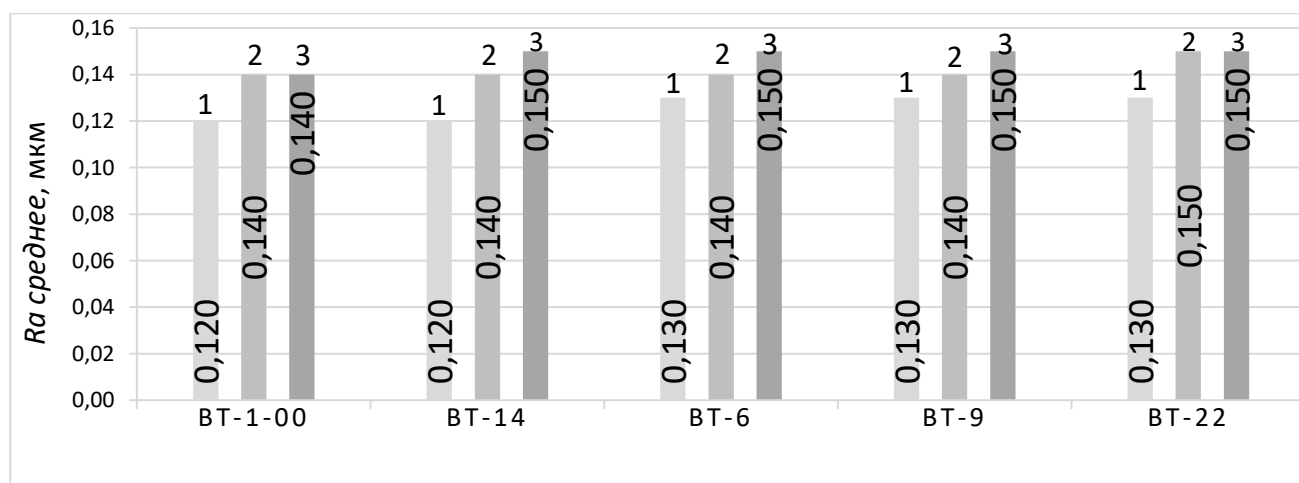


Рис. 5. Сопоставление результатов оценки средней шероховатости обработанной поверхности по маркам титановых сплавов: 1 – вулканитовая связка; 2 – бакелитовая связка; 3 – керамическая связка

Проведенные исследования подтвердили преимущество вулканитовой связки, обеспечивающей снижение шероховатости на 5 % относительно бакелитовой и на 15 % относительно керамической связки. Несмотря на незначительное расхождение абсолютных значений параметра шероховатости, вулканитовая связка стабильно демонстрирует более низкие показатели шероховатости. Полученные результаты подтверждают технологическую эффективность применения вулканитовой связки для шлифования титановых сплавов.

Применение ПШК на вулканитовой связкой позволило снизить среднюю контактную температуру до 300 – 400°C, что сохраняет режущую способность АС на вулканитовой связке.

Сравнительный анализ температурных режимов для различных связок представлен на рис. 6, где наглядно демонстрируется преимущество вулканитовой связки.

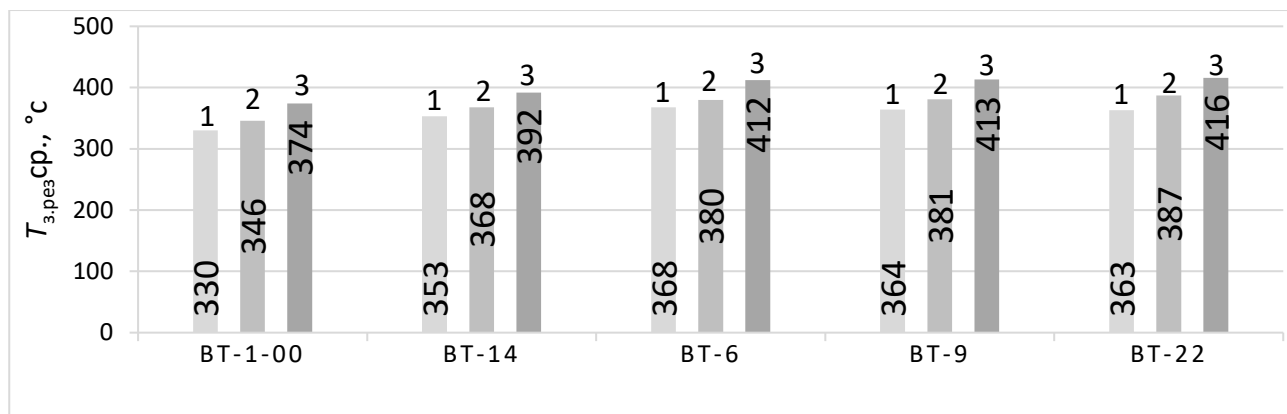


Рис.6. Сопоставление результатов оценки средней контактной температуры в зоне шлифования по маркам обрабатываемых титановых сплавов: 1 — вулканитовая связка; 2 — бакелитовая связка; 3 — керамическая связка

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование вулканитовой связки обеспечивает снижение температуры в зоне шлифования на 11 % в сравнении с ПШК на керамической связке.

Таким образом, обеспечение температурного диапазона 300 – 400°C при использовании вулканитовой связки позволяет улучшить качество обрабатываемой поверхности.

Анализ коэффициента шлифования показал зависимость эффективности процесса от технологических режимов. При скорости продольной подачи $S_{пр} = 0,05$ м/с, рабочей скорости круга $V_{кр} = 20$ м/с, глубине шлифования $t = 0,005$ мм коэффициент шлифования достигает значения 1,18; при $S_{пр} = 0,25$ м/с, $V_{кр} = 49$ м/с, $t = 0,105$ мм – снижается до 0,34. Поскольку коэффициент шлифования напрямую связан с производительностью и стойкостью инструмента, полученные данные подтверждают существенное влияние параметров обработки на эти показатели для различных марок титановых сплавов.

Для ПШК на вулканитовой связке получены регрессионные модели, позволяющие прогнозировать выходные технологические параметры процесса шлифования (среднеарифметическое отклонение профиля Ra , высота волнистости $u_{дин.}$, коэффициент шлифования K):

$$Ra = 0,1437427 - 0,008594 \cdot f_{сож} - 0,00066 \cdot V_{кр} + 0,0000217 \cdot \sigma_B, \text{ мкм;} \quad (12)$$

$$u_{дин.} = -9,4375 \cdot S_{пр} + 11,25 \cdot t + 0,001485 \cdot \sigma_B - 0,0561, \text{ мкм;} \quad (13)$$

$$K = 1,0649875 + 0,086250 \cdot f_{сож} - 3,4375 \cdot t - 0,0002305 \cdot \sigma_B. \quad (14)$$

где $f_{сож}$ – функция, учитывающая способ охлаждения; σ_B – предел выносливости обрабатываемого материала, МПа.

Полученные зависимости позволяют не только прогнозировать качество поверхности и эффективность шлифования, но и целенаправленно выбирать

рациональные режимы обработки для конкретных титановых сплавов в целях достижения требуемых технологических результатов.

Проведенные исследования подтвердили эффективность ПШК на вулканитовой связке для обработки титановых сплавов. Установлено снижение вибраций на 15 % в сравнении с бакелитовой и на 26 % – с керамической связкой. Параметр R_a шероховатости обработанной поверхности снизился на 15 % в сравнении с ПШК на керамической связке.

Проведена оценка технико-экономической эффективности внедрения технологии прерывистого шлифования титановых сплавов. Опытно-промышленные испытания, проведенные в производственных условиях ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара), подтвердили эффективность предлагаемого ПШК на вулканитовой связке при обработке деталей «Цилиндр № 70.00.4101.070 – СБ» и «Цапфа № 47601.4122.207.000». Годовой экономический эффект от внедрения на ОАО «Авиаагрегат» составил 1 325 391 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана конструкция прерывистого шлифовального круга с учетом результатов исследования зависимости высоты волнистости обработанной поверхности от количества и геометрических параметров АС. Выявленные конструктивные параметры ПШК обеспечили технологичность изготовления и ремонтпригодность инструмента, повышение качества обработанной поверхности и снижение расхода абразивного материала при обработке титановых сплавов.

2. Разработана методика и проведены механические испытания абразивных сегментов марки 63С 10-Н СМ1-5 В, в результате которых установлены прочностные характеристики материала: предел прочности при растяжении 11,7 МПа; при сжатии 51,1 МПа; модуль упругости $0,73 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент сопротивления материала 1,59 (Н·с)/м.

3. Разработана и верифицирована конечно-элементная модель для анализа напряженно-деформированного состояния АС, показавшая обеспечение коэффициента запаса прочности не менее 3,9 и максимальных деформаций 8,29 мкм. На основе результатов моделирования установлены зависимости коэффициента концентрации напряжений от геометрии зоны крепления АС, разработаны аналитические зависимости для определения предельной рабочей скорости ПШК и регрессионная модель для расчета коэффициента концентрации напряжений, использованные при проектировании ПШК на вулканитовой связке.

4. Установлено влияние материала связки абразивных сегментов на вибрационную нагрузку технологической системы. Экспериментально доказано, что применение абразивных сегментов на вулканитовой связке обеспечивает снижение вибрационной нагрузки на 14 % по сравнению с аналогами на бакелитовой и керамической связках.

5. Разработана аналитическая модель для определения контактных температур при прерывистом шлифовании, верифицированная численным моделированием и экспериментальными исследованиями. Модель позволяет

прогнозировать температурные режимы при шлифовании заготовок деталей из титановых сплавов ПШК на вулканитовой связке. Применение ПШК на вулканитовой связке обеспечивает снижение температуры в зоне шлифования на 11 % по сравнению с кругами на бакелитовой и керамической связках.

6. Установлена эффективность применения ПШК на вулканитовой связке при обработке заготовок из титановых сплавов: вибрации снижаются на 15 % в сравнении с ПШК на бакелитовой и на 26 % – с керамической связкой, параметр R_a шероховатости обработанной поверхности снижается на 15 % в сравнении с ПШК на керамической связке. Установлено, что увеличение волнистости поверхности на 22 % (до 10 мкм) не превышает допустимых значений для большинства технологических процессов.

7. На основе экспериментальных данных были получены регрессионные модели, позволяющие прогнозировать параметры шлифования, включая шероховатость, виброперемещения и температуру зоны шлифования, для шлифовальных кругов марки 63С 10-Н СМ1-5 В.

8. Разработаны методические рекомендации по проектированию и оптимизации технологического процесса плоского шлифования заготовок деталей из титановых сплавов, внедрение которых на ОАО «Авиаагрегат» обеспечило повышение производительности операций плоского шлифования на 12 – 17 % и полное исключение брака от шлифовочных прижогов. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии на ОАО «Авиаагрегат» составил 1 325 391 руб. Внедрение результатов диссертационной работы на предприятие АО «Агрегат» обеспечило повышение производительности на 20 %, сокращение брака на 18 % и достижение стабильного качества обработанной поверхности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Гордиенко, Я.М.** Обоснование применимости математической модели подвижного источника тепла при описании процесса прерывистого шлифования титановых сплавов / Я.М. Гордиенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 4(2). – С. 298–305. – DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-298-305.
2. **Гордиенко, Я.М.** Разработка силовой модели резания процесса прерывистого шлифования и исследования сложнапряженного состояния рабочих сегментов на вулканитовой связке / Я.М. Гордиенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 4(2). – С. 306–311. – DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-306-311.
3. **Гордиенко, Я.М.** Влияние типа связки абразивного круга на геометрические характеристики поверхности при прерывистом шлифовании заготовок из титановых сплавов / Я.М. Гордиенко, А.Н.

Унянин, Р.Г. Гришин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3(2). – С. 289-298. – DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-289-298

В прочих изданиях:

4. Nosov N.V. Macroscopic Model of an Abrasive Tool / N.V. Nosov, R.G. Grishin, R.V. Ladyagin, V.A. Rodionov, Y.M. Gordienko // MATEC Web of Conferences. – 2021. – Vol. 346. – Art. 01021. – DOI: 10.1051/matecconf/202134601021
5. **Гордиенко, Я.М.** Анализ модели теплонапряженности поверхности заготовки при прерывистом продольном шлифовании периферией круга / Я.М. Гордиенко, Р.Г. Гришин, И.М. Сальников // Высокие технологии в машиностроении: материалы XX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Самара, 2023 г.). – Самара: СамГТУ, 2023. – С. 110–115.
6. **Гордиенко, Я.М.** Исследование высоты волнистости при прерывистом шлифовании титанового сплава ВТ-12 путем изменения числа режущих сегментов и режимов резания / Я.М. Гордиенко // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Самара, 9 апреля 2025 г.). – Самара: СамГТУ, 2025. – С. 26–29.

Гордиенко Ярослав Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОГО
ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕРЫВИСТЫХ КРУГОВ НА ВУЛКАНИТОВОЙ
СВЯЗКЕ**

Автореферат

Формат 6084 1/16. Печать офсетная. □

Подписано в печать «_____» _____ 2025 г.

Тираж 100 экз.

Заказ № типография ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)