

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО СамГТУ)

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук , доцент
Гришин Роман Георгиевич

Самара – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. Особенности шлифования титановых сплавов и применение прерывистых шлифовальных кругов | 8 |
| 1.1. Специфика и проблематика шлифования заготовок из титановых сплавов..... | 8 |
| 1.2. Специфика прерывистого шлифования | 11 |
| 1.3. Анализ подходов к проектированию параметров процесса плоского прерывистого шлифования титановых сплавов..... | 18 |
| 1.4. Технологические возможности прерывистых шлифовальных кругов на вулканитовой связке | 26 |
| 1.5. Выбор критериев повышения эффективности процесса прерывистого шлифования | 31 |
| 1.6. Выводы по главе 1 | 35 |
| ГЛАВА 2. Разработка и моделирование прерывистых шлифовальных кругов на вулканитовой связке для обработки титановых сплавов | 37 |
| 2.1. Разработка конструкции и технологии изготовления прерывистого шлифовального круга с абразивными сегментами на основе вулканитовой связки..... | 37 |
| 2.2. Исследование влияния количества абразивных сегментов на геометрические характеристики шлифовального круга и обрабатываемой поверхности | 39 |
| 2.3. Выводы по главе 2..... | 52 |
| ГЛАВА 3. Моделирование процесса прерывистого шлифования | 53 |
| 3.1. Моделирование напряженно-деформированного состояния абразивных сегментов..... | 53 |
| 3.2. Исследование влияния механических свойств материала абразивных сегментов круга на динамические характеристики технологической системы | 83 |
| 3.3. Теплофизическая модель процесса прерывистого шлифования..... | 91 |
| 3.4. Моделирование нагрева заготовки при шлифовании..... | 99 |
| 3.5. Выводы по главе 3 | 109 |
| ГЛАВА 4. Экспериментальная оценка эффективности применения и работоспособности прерывистых шлифовальных кругов на вулканитовой связке | 111 |

| | |
|---|------------|
| 4.1. Методика экспериментальных исследований | 111 |
| 4.1.1. Изготовление прерывистого шлифовального круга на вулканитовой связке. Подготовка к экспериментальным исследованиям | 111 |
| 4.1.2. Методика экспериментальной оценки качества обработанной поверхности..... | 114 |
| 4.1.3. Методика экспериментальной оценки вибронагруженности технологической системы | 116 |
| 4.1.4. Методика экспериментальной оценки температуры в зоне резания и выявления шлифовочных прижогов | 118 |
| 4.1.5. Методика экспериментальной оценки коэффициента шлифования..... | 123 |
| 4.1.6. Выбор числа параллельных опытов и статистическая обработка результатов..... | 124 |
| 4.2. Результаты экспериментальных исследований..... | 125 |
| 4.2.1. Результаты оценки влияния конструктивной конфигурации шлифовальных кругов на вибронагруженность технологической системы..... | 125 |
| 4.2.2. Результаты исследования влияния параметров технологической системы на качественные характеристики поверхностного слоя | 129 |
| 4.2.3. Результаты исследования влияния параметров технологической системы на пиковую температуру в зоне резания..... | 136 |
| 4.2.4. Результаты исследования влияния параметров технологической системы на коэффициент шлифования прерывистых кругов на вулканитовой связке | 143 |
| 4.3. Разработка регрессионных моделей..... | 144 |
| 4.4. Рекомендации по проектированию параметров технологической системы плоского прерывистого шлифования титановых сплавов с использованием кругов на вулканитовой связке..... | 146 |
| 4.5. Техничко-экономическая эффективность | 151 |
| 4.6. Выводы по главе 4..... | 157 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 160 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 162 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 165 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 182 |

ВВЕДЕНИЕ

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, шлифовальных прижогов. Данные дефекты вызывают необратимое ухудшение физико-механических свойств поверхностного слоя вследствие высокотемпературных структурно-фазовых превращений.

Несмотря на столь высокую востребованность титановых сплавов как конструкционных материалов, проблемы повышения эффективности их шлифовальной обработки до сих пор в полной мере не решены. Сложность решения проблемы обработки титановых сплавов определяет необходимость применения нестандартных технологических решений, среди которых одним из наиболее востребованных выступает метод прерывистого шлифования. Особую актуальность приобретает проблема недостаточной разработанности методик инженерного проектирования технологических процессов, направленных на достижение наибольшей эффективности процесса шлифования с учетом широкого спектра параметров технологической системы. Шлифование прерывистыми кругами, при всей его эффективности в снижении термического воздействия на заготовку, приводит к увеличению вибраций, что негативно отражается на качестве обработанной поверхности в виде повышенной волнистости и шероховатости.

В конечном итоге, все это оказывает негативное влияние на технико-экономические показатели процесса шлифования в целом, выраженное в увеличении трудоемкости операций, связанном с необходимостью дополнительной чистовой обработки, а также повышенному износу оборудования, инструмента и технологической оснастки. Повышение эффективности процесса прерывистого шлифования в таком случае может быть достигнуто путем определения оптимальных параметров технологической системы (ТС) с учетом взаимосвязанных факторов при системном проектировании, а также использования особых физико-механических характеристик абразивных сегментов на вулканитовой связке для повышения динамической устойчивости технологической системы.

Степень разработанности проблемы.

Вопросы и проблематика шлифования 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 заготовок из титановых сплавов,

анализируются результаты исследований обрабатываемости титановых сплавов, причин и факторов возникновения шлифовальных прижогов с точки зрения физики, химии и механики процесса микрорезания.

Технико-технологические аспекты и 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 прерывистого шлифования заготовок из титановых сплавов с использованием прерывистых кругов 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 игнорирующие особенности обрабатываемого материала. Данные проблемы требуют разработки новых решений для проектирования системы прерывистого шлифования, которые должны учитывать технологические параметры процесса, принимать во внимание особенности титановых сплавов, эффективно использовать возможности вулканитовой связки.

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. Теоретическое 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: вибронгруженность оценивалась с использованием вибропреобразователей AP2019 и осциллографа АКПП-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 кинематическими параметрами процесса, конструктивными характеристиками ПШК, вибрационными процессами 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 кинематическими параметрами процесса, конструктивными характеристиками ПШК, вибрационными процессами 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, корректными постановкой задач, использованием математического аппарата, методов и средств исследований. 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 международных научно-технических конференциях ICMSSTE 2021, «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара 2021-2025 г.), «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Новополюк 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.

ГЛАВА 1. Особенности шлифования титановых сплавов и применения прерывистых шлифовальных кругов

1.1. Специфика и проблематика шлифования заготовок из титановых сплавов

Благоприятное сочетание физико-механических свойства титана делает его одним из самых востребованных конструкционных металлов, повсеместно находящим свое применение в промышленности. С химической точки зрения, титан относится к группе переходных металлов, характеризующихся недостроенными внутренними и внешними электронными оболочками. Температура плавления титана составляет 1938 К, что позволяет относить его к классу тугоплавких металлов. Среди особо значимых физико-механических свойств титана можно выделить: его высокую удельную прочность (по отношению к плотности) и химическую стойкость, низкий модуль нормальной упругости и низкую теплопроводность. К тому же, недостаток электронов на внутренней и внешней оболочках атома титана, способствует приданию ему высокой химической активности и способности к образованию прочных межатомных связей. Совокупность последних двух качеств, низкой теплопроводности и высокой химической активности, во многом лежат в основе всего разнообразия проблем, возникающих при шлифовании заготовок из титанов и его сплавов [17, 18, 43, 44, 49, 55, 91, 98].

В машиностроении чаще всего титан находит свое применение в виде сплавов, содержащих порядка 80÷95% титана. Легирование титана различными элементами позволяет достичь значительного повышения эксплуатационных качеств металлов на его основе: механической прочности, жаропрочности и жаростойкости, твердости и т.д. Широкое разнообразие свойств титановых сплавов определяет многообразие подходов к их классификации. Например, по фазовому составу, титановые сплавы подразделяются на: однофазные альфа-сплавы, псевдо-альфа-сплавы (содержащие до 2 % бета-стабилизаторов), двухфазные альфа- и бета-сплавы; по физико-механическим свойствам на: сплавы с повышенной пластичностью, средней, высокой прочностью, а также жаропрочные сплавы [2, 18, 43, 44, 64, 91, 106, 114].

В общем и специальном машиностроении наиболее широкое распространение имеют сплавы, относящиеся к последним трем классификационным группам. Для получения сплавов на основе титана, используется ограниченная номенклатура легирующих элементов, представленных, в основном, такими элементами как: хром, марганец, алюминий, углерод,

молибден, ванадий, ниобий, цирконий, олово, железо; в меньших объемах: медь, кремний и др. [2, 17, 43, 44, 49, 64, 91, 106].

Титан и сплавы на его основе являются одними из наиболее труднообрабатываемых металлов, что определяет выделение их в отдельную подгруппу жаропрочных сплавов (*S*) согласно международной классификации обрабатываемости материалов по *DIN/ISO 513*. Титан и титановые сплавы, вместе с широким распространением в машиностроении, обладают очень низкой обрабатываемостью шлифованием (и резанием в целом) в сравнении с конструкционными железоуглеродистыми сплавами. Так, например, по результатам исследований, приведенных [39], установлено, что удельная работа при шлифовании титановых сплавов значительно превышает, удельную работу, затрачиваемую при шлифовании конструкционных сталей при тех же технологических условиях. При этом, шлифование титановых сплавов сопряжено с возникновением высоких давлений в зоне контакта абразивного зерна с металлом, достигающих порядка 20÷35 ГПа. Результаты определения мощности, затрачиваемой на процесс резания при шлифовании различных металлов, представленные в работах [1, 14, 54, 102], показывают, что силы резания при шлифовании титановых сплавов в 1,5 и более раз превышают силы резания, возникающие при шлифовании жаропрочных и нержавеющей сталей.

Как было отмечено ранее, существенным фактором, усложняющим процесс обработки титана и сплавов на его основе, является их низкая теплопроводность, так, например, теплопроводность большинства углеродистых сплавов на основе железа в 4 и более раза превышает теплопроводность титана, а алюминия – в 14 и более раз. При больших значениях контактных давлений и удельной работы сил резания, низкая теплопроводность титана создает благоприятные условия для развития в зоне резания критически высоких температур, что подтверждается большим количеством проведенных ранее исследований и накопленным опытом промышленной обработки титана и сплавов на его основе. В то же время, пары «титан-абразив» имеют и гораздо более высокие значения коэффициента трения, что в несколько раз больше значений коэффициента трения по никелю и железу. Однако, по мере увеличения окружной скорости резания, имеет место тенденция к нивелированию указанной разницы [8, 9, 43, 49, 54, 55, 98, 102, 114].

Исследования термических условий шлифования титановых сплавов кругами на основе карбида кремния [102] позволяют установить, что температура в зоне резания может достигать 1270–1830 °К. Несколько меньшие значения температур в зоне резания были получены по итогам исследований, представленных в работе [55]. По итогам исследования термического режима обдирочного шлифования заготовок из титановых сплавов марок ВТЗ-1, ВТ8, ВТ5 и

ВТ15 было установлено, что максимальные температуры в зоне резания при установившемся режиме резания достигают 820 °С, 950 °С, 970 °С и 1020 °С.

Как следует из диаграммы фазовых состояний титана, представленной на рисунке 1 [43], уже при 820 °С даже при кратковременном воздействии, титан может претерпевать необратимые фазовые превращения, сопровождающиеся изменением его физико-механических свойств, т.е. происходит возникновение так называемых шлифовочных прижогов. Кроме того, как показывает ряд проведенных ранее исследований [1, 14, 16, 18, 34, 70, 106], часто шлифовочные прижоги сопровождаются возникновением и развитием в обработанном поверхностном слое металла трещин (глубиной свыше 0,01 мм) и микротрещин (глубиной до 0,01 мм), обусловленных воздействием как контактного давления и термических напряжений, так и неоднородностью пластических свойств различных зон поверхностного слоя.

В работе [90] в качестве одной из основных причин возникновения прижоговых трещин предлагается рассматривать влияние химических примесей на кинетику протекания фазовых переходов. Так, согласно приведенным в работе выводам, механически и термически активированный титан приобретает способность к интенсивному поглощению из атмосферного воздуха кислорода и азота. Данные газы обладают стабилизирующим действием в отношении α -фазы, вследствие чего фазовые переходы в поверхностном слое происходят неравномерно, за счет чего происходит его локальное охрупчивание и закономерное увеличение склонности к трещинообразованию.

Еще одной особенностью титана и сплавов на его основе выступает относительно высокая химическая активность, возрастающая по мере увеличения температуры. Проведенные ранее исследования, показывают, что увеличение температуры титана всего на 10–20 К может способствовать значительному росту интенсивности протекания химических реакций с его участием. Это, в свою очередь, определяет потенциал к ухудшению обрабатываемости титана и его сплавов при увеличении температур в зоне резания. Так, в работах [5, 8, 9, 10, 89, 90, 94, 98, 141], показано, что при взаимодействии с компонентами атмосферного воздуха и смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ), материала АС в активированном механически поверхностном слое титана могут образовываться высокотвердые нитриды, карбиды и прочие соединения, кратно повышающие его микротвердость, как следствие – сопротивляемость микрорезанию.

В ту же очередь, неблагоприятные термобарические условия в зоне резания способствуют ослаблению межатомных связей в поверхностном слое металла, что приводит к интенсификации процессов диффузии и адгезии в системе «абразив-металл» вследствие высокого химического сродства титана с используемыми в промышленности абразивными материалами [8, 54, 55, 76, 89, 102, 150]. Образованная вследствие пластического сдвига ювенильная поверхность титана обладает повышенной каталитической активностью, что, в

совокупности с указанными выше факторами и процессами, приводит к активному налипанию частиц металла на поверхность абразива круга, закономерно приводя к росту сил трения и повышенному износу инструмента, образованию различного рода вырывов и надиров на обработанной поверхности. В работе [133], показано, что в процессе шлифования титановых сплавов уже при температуре от 770 К имеет место образование так называемого «текущего» микрослоя металла, обладающего повышенной пластичностью и способностью к адгезионному воздействию с материалом абразива.

Имеет место и обратный процесс наряду с химическим взаимодействием с компонентами окружающей среды, имеются сведения о возможности диффузии некоторых химических элементов из состава абразива в поверхностный слой титановых сплавов при шлифовании. По итогам проведенного В. А. Островским [84] общего спектрального анализа шлифованного поверхностного слоя титанового сплава, обработанного кругами на основе карбида кремния, было установлено присутствие в нем следов кремния. Проникновение подобных компонентов в состав поверхностного слоя может приводить к образованию межкристаллических концентраторов напряжений и последующему развитию микротрещин при воздействии термических напряжений или давления со стороны абразивного зерна.

Известно, что при высоких температурах титан приобретает способность к растворению практически всех материалов на керамической основе, что позволяет выдвигать предположение о негативном влиянии температурного режима зоны резания на стойкость абразива. Таким образом, доминирование износа инструмента, обусловленного засаливанием абразива, радикально отличает процесс шлифования титана от шлифования большинства конструкционных сталей, где преобладающим является износ шлифовального инструмента вследствие механического истирания и разрушения [5].

Проблемы, связанные с высокими температурами и интенсивным износом инструмента при шлифовании титановых сплавов, требуют применения специализированных технологических решений. Одним из наиболее перспективных и востребованных направлений в данной области является применение ПШК, эффективность которых базируется на снижении теплонагруженности в зоне шлифования. Вместе с тем, применение технологии прерывистого шлифования обладает рядом особенностей и проблем, рассмотренных в следующем разделе.

1.2. Специфика прерывистого шлифования

На текущий момент накоплена достаточно исчерпывающая научно-теоретическая база в области применения и оптимизации конструкции кругов для прерывистого шлифования. Теоретический фундамент теплофизики и механики процесса прерывистого шлифования

составляют результаты научной работы А. В. Якимова [132, 134, 135, 136, 137, 138], помимо которого, исследованиями вопросов прерывистого шлифования занимались такие исследователи как: Гусев В. Г., Макаров В. Ф., Дианов А. А., Старшев Д. В., Степанов Ю. С., Худобин Л. В., Реченко Д. С., *Zhang J. Q.*, *Tawakoli, T.* и др.

По итогам обширных исследований метода прерывистого шлифования, проведенных А. В. Якимовым [137, 138], были сделаны выводы о том, что потенциал снижения температуры в зоне резания при шлифовании с использованием прерывистых шлифовальных кругов может достигать 30–50 %. Однако, стойкость прерывистых шлифовальных кругов на 10–20 % ниже по сравнению со сплошными.

На рисунке 1.1 представлены результаты экспериментальной оценки влияния конфигурации шлифовального круга на величину микротвердости и глубины распространения термических дефектов микроструктуры металла при плоском шлифовании заготовки из стали марки 12Х2Н4А кругами марки 25А 40СМ2К1. Анализ приведенного графика позволяет установить, что при одинаковых режимах резания, использование прерывистых кругов с 2 и 4 пазами, в сравнении со сплошными кругами, не дает значительного преимущества в виде снижения глубины и микротвердости дефектного слоя, в то время как использование круга с 25 пазами позволяет достичь практически полного нивелирования негативных эффектов от термического воздействия на поверхностный слой металла при шлифовании [137].

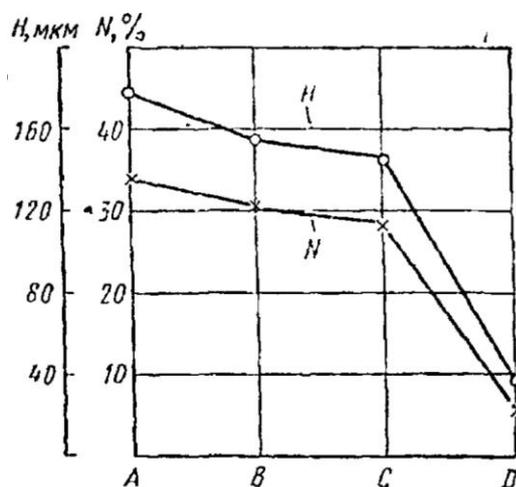


Рис. 1.1. Зависимость относительного снижения микротвердости (N) и глубины распространения дефектного слоя (H) при плоском шлифовании заготовок из стали 12Х2Н4А кругами марки 25А40СМ2К1 (при глубине резания $t = 0,03$ мм, рабочей скорости круга $v_{кр} = 28$ м/с, продольной подаче $S_{пр} = 12$ м/мин) от способа обработки [137]: А – шлифование сплошным кругом, В – шлифование прерывистым кругом с 2 пазами, С – шлифование прерывистым кругом с 4 пазами, Д – шлифование прерывистым кругом с 25 пазами

Как показывают результаты ряда других исследований [70, 104, 113, 140, 157, 158], за счет прерывистого характера контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью заготовки, охлаждение зоны резания в момент прерывания контакта способствует снижению её теплонапряженности. При этом возможно увеличение глубины резания или подачи до 100% без ущерба микроструктуре поверхностного слоя металла.

По результатам исследований, проведенных В. Г. Гусевым [33] было установлено, что использование ПШК позволяет реализовывать центробежный характер подвода СОЖ в зону резания. За счет специфики работы и конструкции прерывистого инструмента, подаваемая в зону резания СОЖ более эффективно распределяется как вдоль поверхности инструмента, так и вдоль поверхности зоны резания (рис. 1.2) с образованием гидродинамических клиньев. Так, за счет прерывания процесса резания, подаваемая в зону резания СОЖ в большем объеме достигает зоны резания, в то же время, за счет специфичной конструкции, охлаждение прерывистого шлифовального круга СОЖ происходит по гораздо более развитой поверхности теплообмена. Сочетание указанных факторов, может приводить к снижению мгновенной температуры зоны резания до 2–3 раз.

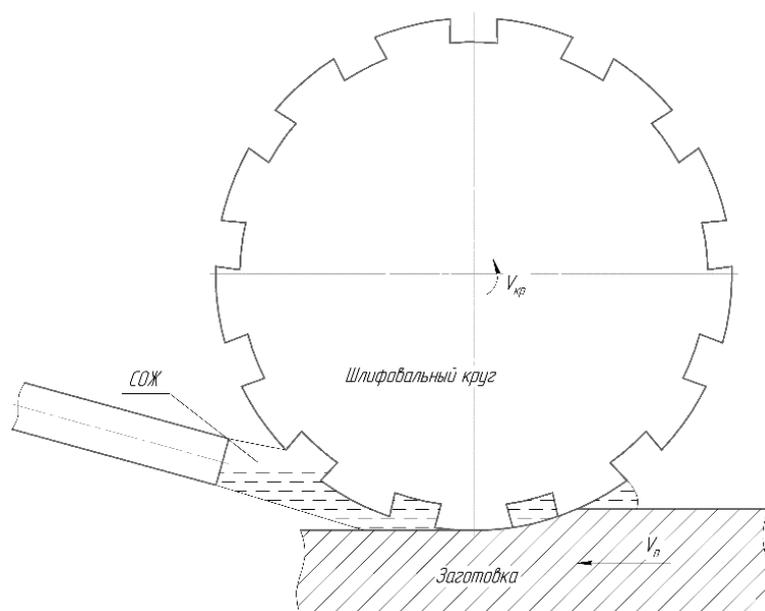


Рис. 1.2. Схема распределения СОЖ при прерывистом шлифовании

Свой вклад в эффективность охлаждения рабочей части инструмента вносит и аэродинамический фактор. Так, при работе сплошного шлифовального круга его охлаждение потоком воздуха происходит в режиме обтекания. В случае прерывистого шлифования теплообмен абразивных элементов круга с окружающим воздухом происходит в режиме встречного потока, при котором имеет место формирование развитой турбулентности воздушного потока. Интенсивное завихрение воздуха в пристеночной зоне круга способствует

эффективному перемешиванию горячих и холодных слоев воздуха, что создает в ней более высокий перепад температур, как следствие – увеличивает скорость теплопередачи [70, 94, 109, 110, 132, 152].

При обработке заготовок из титановых сплавов, применение прерывистого шлифования не только не приводит к снижению производительности процесса, но и может способствовать её значительному увеличению. В работе Д. В. Старшева [111] результаты систематизации опыта промышленного применения дискретных шлифовальных кругов на опытном заводе Института сверхтвердых материалов и Полтавском заводе искусственных алмазов и алмазного инструмента Минстанкопрома позволили сделать вывод о том, что при шлифовании режущих инструментов и технологической оснастки из твердых сплавов, использование ПШК с алмазным абразивом способствовало снижению количества брака шлифовальной обработки до 1,5 раз, а также сокращению удельного расхода абразива до 50 % (в пересчете на единицу объема произведенной продукции).

Эффективность применения шлифовальных кругов с дискретной рабочей поверхностью при шлифовании титана и титановых сплавов была подтверждена по результатам исследований, проводимых А. В. Репко [94], Д. В. Старшевым [111, 112], А. А. Диановым [36], А. В. Якимовым [137], А. В. Морозовым [70], В. Г. Гусевым [31, 33] и др. [104, 113, 130, 131]. Исследователи установили, что внедрение метода прерывистого шлифования в технологию обработки титановых сплавов привело к значительному сокращению брака в шлифовальном производстве, связанного с термическими микроструктурными дефектами (прижогами). Помимо прочего, рядом авторов выделяются следующие положительные эффекты от применения прерывистого шлифования при обработке титана и титановых сплавов:

- использование ПШК, в сравнении со сплошными и высокопористыми кругами, способствует повышению производительности процесса шлифования;
- за счет более эффективного захвата и удержания СОЖ сегментами прерывистого круга вблизи зоны резания, снижение коэффициента трения между металлом заготовки и абразивным зерном может достигать 1,5–2 раза;
- за счет возникновения эффекта гидроудара, при выдавливании СОЖ из зоны резания рабочей поверхностью круга, происходит снижение интенсивности засаливания круга.

Среди проблем, связанных с использованием прерывистых шлифовальных кругов при обработке титановых сплавов, исследователями отмечаются: интенсивное туманообразование СОЖ вследствие активизации гидро- и аэродинамических процессов из-за особенностей работы прерывистого круга, сложность изготовления кругов, повышенный износ оснастки для правки кругов вследствие ударного воздействия сегментов круга, а также повышенная вибрация в ТС.

Проблема возникновения вибраций в ТС при использовании прерывистых шлифовальных кругов во многом обусловлена кинематикой процесса резания, в рамках которого происходит попеременное ударное внедрение режущих сегментов в тело заготовки, сопровождающееся резким изменением силового баланса системы. В результате исследований динамики ТС при дискретном шлифовании, проведенных Степановым Ю. С. и соавторами [113], была получена экспериментальная зависимость, характеризующая влияние конфигурации прерывистого круга на амплитуду виброперемещений его оси, вид которой представлен на рисунке 1.3.

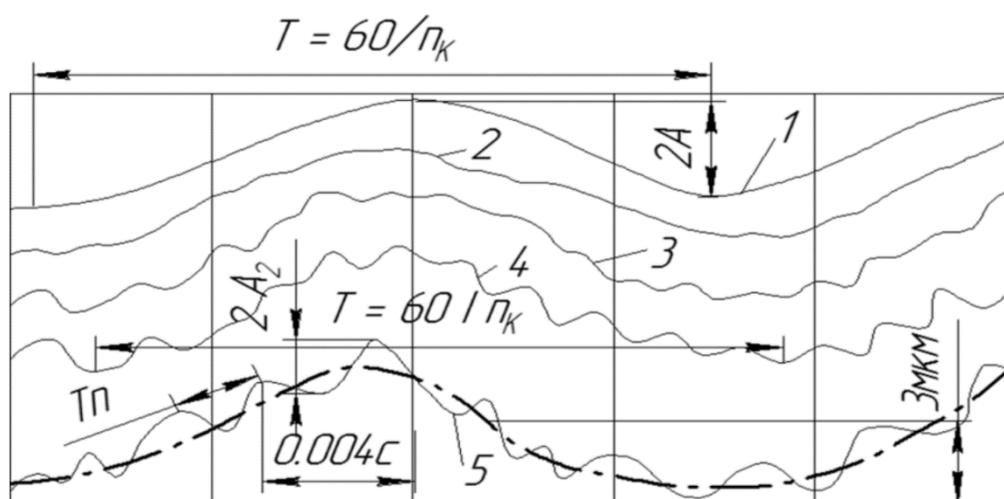


Рис. 1.3. Схема зависимости амплитуды виброперемещений оси прерывистого круга от количества АС [113]: 1 – 20 сегментов, 2 – 16 сегментов, 3 – 11 сегментов, 4 – 8 сегментов, 5 – 6 сегментов, T , T_n – периоды виброперемещений оси круга, обусловленных вращением и прерыванием процесса шлифования соответственно, A – амплитуда виброперемещений, обусловленных вращением круга, A_2 – амплитуда виброперемещений, обусловленных прерыванием процесса шлифования, n_k – частота колебаний круга в минуту

Из приведенного графика можно увидеть, что основной вклад в формирование траектории виброперемещения оси ПШК вносит основная гармоника с периодом T и синусоидальным законом колебаний, природа возникновения которых связана с непосредственным вращением круга с некоторым эксцентриситетом. По мере снижения количества АС, в картине изменения координат виброперемещений оси круга наблюдается возникновение колебаний с более высокой частотой, характеризующихся периодом T_n и связанных с периодическим прерыванием процесса шлифования. Причем, чем меньше количество АС, участвующих в процессе резания, тем амплитуда таких колебаний больше. Также, необходимо отметить полное отсутствие указанных колебаний при использовании 20

АС, что потенциально может объясняться обеспечением непрерывности контакта периферии круга с поверхностью заготовки и связанным с ним «успокоением» ТС.

Справедливо стоит заметить, что для процесса шлифования, в целом характерным является полигармоническая картина вибраций в ТС, что отмечается в работах [33, 37, 47, 84, 92, 94, 104, 109, 113, 124, 148]. Однако, дисбаланс конструкции прерывистого круга, вместе со скачкообразным периодическим изменением баланса сил резания при дискретном шлифовании, дополнительно оказывают негативное влияние на геометрические характеристики качества поверхностного слоя.

Наиболее всеобъемлющий подход к изучению вопросов формирования геометрии поверхностного слоя при плоском шлифовании ПШК прерывистыми шлифовальными кругами находит свое отражение в работе В. А. Смирнова [104]. Проведенные автором исследования показали, что по мере уменьшения количества сегментов прерывистого круга, наблюдается снижение частоты виброколебаний оси инструмента, в то же время, имеет место увеличение шага и высоты волнистости поверхностного слоя. Еще одной характерной особенностью прерывистого шлифования автор выделяет возникновение периодической неоднородности шероховатости поверхности, связанной с положением участка относительно профиля волнистости: увеличивающейся высотой микронеровностей по мере приближения к «впадине» волны и уменьшающейся по мере приближения к её «выступу» (рис. 1.4).

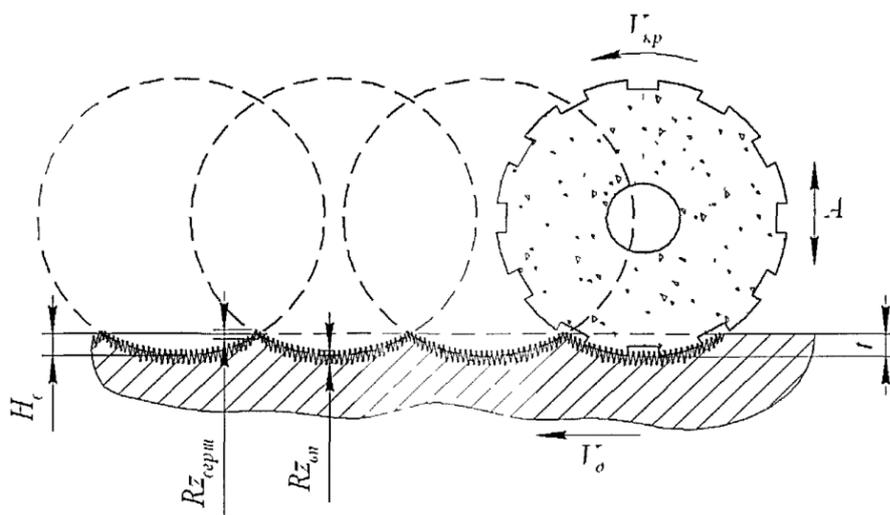


Рис. 1.4. Схема образования волнистости и неоднородной шероховатости поверхности при шлифовании прерывистыми шлифовальными кругами [104]: A – амплитуда радиальных колебаний, H_B – высота волнистости, $Rz_{\text{верш}}$, $Rz_{\text{вп}}$ – параметр шероховатости в районе вершин и впадин волн

В работе [37] отмечается, что по мере увеличения степени износа прерывистого круга, наблюдается выраженный интенсивный рост амплитуды автоколебаний в частотном диапазоне от 300 до 800 Гц, которые вносят основной вклад в возникновение волнистости обрабатываемой поверхности. К тому же, увеличение амплитуды колебаний круга способствует увеличению разброса толщины срезаемого слоя, как следствие – сдвигу верхней границы изменения величины составляющих сил резания, что значительно увеличивает риск возникновения прижогов и прочих дефектов обработанной поверхности. Отчасти, решению указанной проблемы способствует реализация многопроходного шлифования.

Стабилизации амплитудно-частотных характеристик ТС способствует также увеличение количества АС прерывистого круга. Как отмечается в выводах авторов исследования [159], уже при 20 абразивных сегментах достигается приближение амплитудно-частотной характеристики ТС с ПШК прерывистым шлифовальным кругом к характеристикам системы со сплошным кругом. С другой стороны, «успокоению» ТС технологической системы может способствовать увеличение частоты вращения круга, однако, это закономерным образом приведет к сокращению времени охлаждения зоны резания и нивелированию положительных эффектов от применения данного способа шлифования.

А. В. Якимовым по итогам исследования амплитудно-частотных характеристик работающего ПШК, были получены экспериментальные зависимости максимальной амплитуды виброперемещений от числа АС круга. В сделанных автором выводах отмечается, что при использовании ПШК, в сравнении со сплошными, в частотном спектре колебаний круга происходит выделение гармоник, частота которой соответствует частоте врезания АС в тело заготовки, которая, закономерным образом, зависит от их количества и частоты вращения круга. Однако, в некоторых диапазонах чисел АС круга, наблюдается выраженный рост амплитуды виброперемещений круга, вызванный проявлением параметрического резонанса, что хорошо видно на графиках, приведенных на рисунке 1.5. Причем, чем больше глубина резания, тем более выражено проявляется рост амплитуды виброперемещений круга [137].

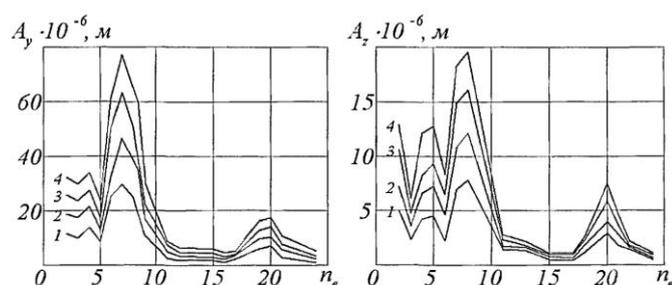


Рис. 1.5. Графики зависимости амплитуды виброперемещений корпуса A_y прерывистого шлифовального круга от количества абразивных выступов (сегментов) n_b , при глубинах резания [137]: 1 – $t = 0,02$ мм, 2 – $t = 0,03$ мм, 3 – $t = 0,04$ мм, 4 – $t = 0,05$ мм

Дисбаланс сил резания при шлифовании прерывистыми кругами, помимо интенсификации износа абразивной части, может способствовать увеличению склонности абразива к засаливанию, сокращению срока службы подшипниковых узлов шпинделя станка, а также негативно сказаться на точности позиционирования стола. В связи с чем нивелирование повышенных вибраций, обусловленных спецификой работы ПШК, является одним из наиболее актуальных направлений повышения эффективности процесса шлифования.

Следует также отметить важность проблемы, связанной с относительно низкой механической прочностью прерывистых шлифовальных кругов. В работе Ласточкина Д. А. [60] по результатам исследований механической прочности кругов различной конструкции было установлено, что в среднем, для цельных прерывистых шлифовальных кругов условный запас прочности составляет 2,2, в то время как для сплошных шлифовальных кругов он находится на уровне 2,7 ед. Это, в свою очередь, накладывает некоторые ограничения на диапазон увеличения режимов резания для ПШК, по сравнению со сплошными, выполненными из аналогичного материала.

1.3. Анализ подходов к проектированию параметров процесса плоского прерывистого шлифования титановых сплавов

В отличие от традиционных конструкций сплошных шлифовальных кругов разработка конструкции шлифовального круга для эффективной реализации метода прерывистого шлифования сопряжена с необходимостью решения целого комплекса инженерных задач, среди которых:

- определение числа, протяженности периферии сегментов прерывистого круга и расстояния между ними;
- выбор способа и конфигурации дискретизации рабочей поверхности круга;
- выбор материального исполнения рабочей части круга.

Существенной проблемой, осложняющей решение представленных выше задач, выступает сравнительно малый объем накопленного опыта в области проектирования и применения ПШК, а также отсутствие унифицированной методики проектирования, способствующей достижению всех целей проектирования, вытекающих из проблематики шлифовальной обработки титановых сплавов.

Высокие локальные температуры в зоне резания являются ключевой проблемой обработки титановых сплавов, что определяет важность учета тепловой составляющей процесса прерывистого шлифования при проектировании параметров технологической системы. Исследование тепловых характеристик процесса шлифования находит свое отражение в

работах таких исследователей как: В. А. Сипайлова, А. В. Якимова, Е. П. Калинина, А. Н. Резникова и др. В работе А. Н. Резникова [92], на основании положений теории вероятности, были разработаны зависимости для определения локальной и средней температуры в зоне резания при шлифовании. Е. П. Калинин [45], сформулировал зависимости для определения составляющих сил резания для различных видов шлифовальной обработки.

А. В. Якимовым [136, 137] для нужд проектирования прерывистых шлифовальных кругов был предложен алгоритм, базирующийся на определении числа режущих сегментов круга исходя из требуемой степени снижения теплонапряженности зоны резания, блок-схема реализации которого представлена на рисунке 1.6.

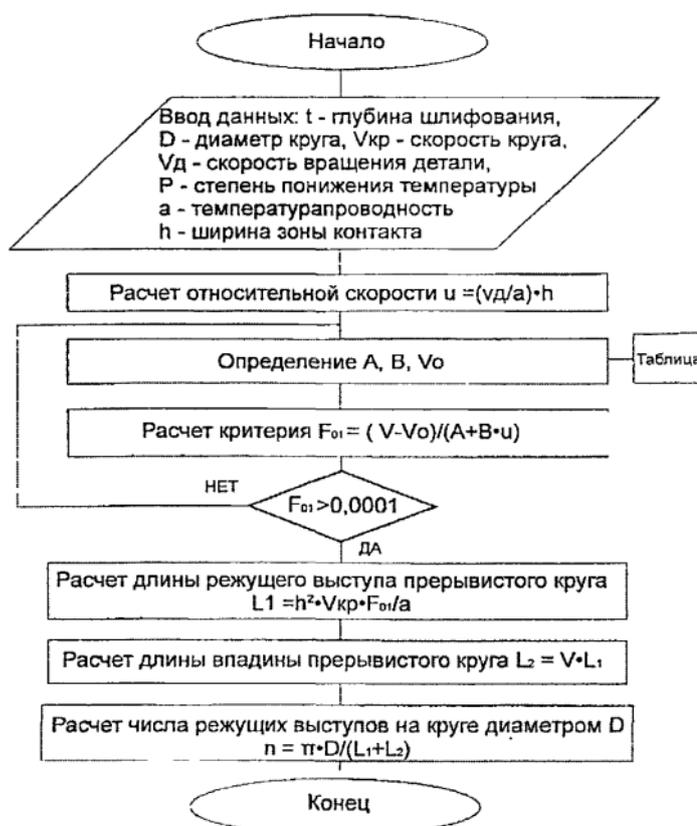


Рис. 1.6. Блок-схема алгоритма проектирования параметров прерывистого шлифовального круга по методике А. В. Якимова [136]

Согласно данному алгоритму на первом этапе проектирования, на основании исходных данных выполняется определение безразмерного параметра относительной скорости в соответствии со следующим выражением [137]:

$$U = \frac{S_{\text{пр}}}{a_{\text{м.з.}}} \cdot h, \quad (1.1)$$

где $S_{\text{пр}}$ – скорость продольной подачи, м/с;

h – ширина зоны контакта, м;

$a_{м.з.}$ – коэффициент температуропроводности материала заготовки, м²/с.

В зависимости от полученного значения относительной скорости U производится определение вспомогательных параметров A , B и V_0 , зависящих от требуемой степени понижения температуры, в соответствии со справочными значениями, приведенными в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Справочные значения для определения вспомогательных параметров A , B и V_0 [137]

| Степень относительного снижения теплонпряженности P , % | Численное значение параметра в интервале значений параметра относительной скорости | | | | | | | | |
|--|---|------|-------|------------------|------|-------|-------------------|------|-------|
| | $1 \leq U < 15$ | | | $15 \leq U < 90$ | | | $90 \leq U < 150$ | | |
| | A | B | V_0 | A | B | V_0 | A | B | V_0 |
| 10 | 1,0 | 0,1 | 0,1 | 1,0 | 0,1 | 0,13 | 1,0 | 0,1 | 0,18 |
| 20 | 1,0 | 0,32 | 0,25 | 1,0 | 0,32 | 0,27 | 1,0 | 0,32 | 0,28 |
| 30 | 4,0 | 0,75 | 0,44 | 4,0 | 0,75 | 0,48 | 4,0 | 0,75 | 0,52 |
| 40 | 5,0 | 1,7 | 0,68 | 5,0 | 1,7 | 0,71 | 5,0 | 1,7 | 0,74 |

Затем, на основании определенных значений вспомогательных параметров, производится расчет значения критерия F_{01} , в соответствии со следующим выражением [137]:

$$F_{01} = \frac{V_d - V_0}{A + B \cdot U}, \quad (1.2)$$

где V_d – скорость вращения (поступательного движения) детали, м/с.

В случае, если значение критерия F_{01} не превышает 0,0001, то, выбранные исходные параметры обработки не согласуются, в связи с чем следует выполнить переназначение исходных параметров и повторение расчетов до достижения выполнения условия $F_{01} > 0,0001$. После, когда выполнение приведенного условия достигнуто, производится расчет основных геометрических параметров шлифовального круга в соответствии со следующими выражениями [137]:

$$L_1 = \frac{h^2 \cdot V_{кр} \cdot F_{01}}{a}, \text{ м}; \quad (1.3)$$

$$L_2 = S_{пр} \cdot L_1, \text{ м}; \quad (1.4)$$

$$n_{сегм} = \frac{\pi \cdot D_{кр}}{L_1 + L_2}, \text{ м}; \quad (1.5)$$

где L_1 – длина дуги периферии АС, м;

L_2 – длина дуги паза, м;

$n_{\text{сегм}}$ – число АС, шт;

$V_{\text{кр}}$ – рабочая скорость круга, м/с;

$D_{\text{кр}}$ – диаметр периферии шлифовального круга, мм.

В основе указанной методики определения параметров шлифовального круга лежат аналитические выражения для решения двумерного уравнения теплопроводности для случая нестационарного теплового потока от движущегося прерывистого источника тепла [103, 138]. Полученное авторами аналитическое выражение для определения температуры в зоне резания при прерывистом шлифовании массивной заготовки имеет вид:

$$T_K = \frac{2}{\sqrt{C_{\text{м.з.}} \cdot \rho_{\text{м.з.}} \cdot \lambda_{\text{м.з.}}}} \cdot \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^K q_{\text{нагр}} \cdot \sqrt{[\tau - (i-1) \cdot (\tau_1 + \tau_2)]} \cdot \\ \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^K t_i}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{м.з.}}} \cdot \sqrt{\tau - (i-1) \cdot (\tau_1 + \tau_2)}} \right) - \\ - \sum_{i=1}^K q_i \cdot \sqrt{a_{\text{м.з.}}} \cdot [\tau - i \cdot \tau_1 - (i-1) \cdot \tau_2] \cdot \\ \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^K t_i}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{м.з.}}} \cdot \sqrt{\tau - i \cdot \tau_1 - (i-1) \cdot \tau_2}} \right) \end{array} \right], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.6)$$

где $C_{\text{м.з.}}$ – теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К);

$\rho_{\text{м.з.}}$ – плотность материала заготовки, кг/м³;

K – количество микроциклов нагрев/охлаждение при прерывистом шлифовании, шт.;

$\lambda_{\text{м.з.}}$ – коэффициент теплопроводности материала заготовки, Вт/(м·К);

$a_{\text{м.з.}} = \frac{\lambda_{\text{м.з.}}}{C_{\text{м.з.}} \cdot \rho_{\text{м.з.}}}$ – коэффициент температуропроводности материала заготовки, м²/с;

t_i – фактическая толщина слоя, удаляемого АС, м;

$q_{\text{нагр}}$ – удельный тепловой поток от источника нагрева, Вт/м²;

i – порядковый номер микроцикла;

τ, τ_1, τ_2 – временные характеристики микроцикла резания и охлаждения, определяемые как [103]:

$$\tau = \frac{\sqrt{D \cdot t}}{S_{\text{пр}}}, \text{ с}; \quad (1.7)$$

$$\tau_1 = \frac{L_1}{V_{\text{кр}}}, \text{ с}; \quad (1.8)$$

$$\tau_2 = \frac{L_2}{V_{\text{кр}}}, \text{ с}. \quad (1.9)$$

Удельная мощность теплового источника может быть определена с допущением о полном преобразовании механической мощности резания в тепло как [103]:

$$q_{\text{нагр}} = \psi \cdot \frac{N_{\text{рез}}}{F_{\text{к}}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1.10)$$

где $N_{\text{рез}}$ – механическая мощность резания, Вт;

F_k – площадь контакта АС и заготовки, м²;

ψ – коэффициент ввода тепла, характеризующий долю тепла, уходящего в заготовку, значение которого также может быть найдено из выражения [45. 103]:

$$\psi = \frac{1}{1 + 4,6 \cdot t \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{\text{пр}}}{a_{\text{м.з.}} \cdot \frac{(\sqrt{D} \cdot t)}{2}}}}. \quad (1.11)$$

Механическая мощность резания единичным АС может быть найдена из известного отношения работы сил резания ко времени, за которое была совершена эта работа:

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z \cdot l_1}{\tau_1}, \text{ Вт}. \quad (1.12)$$

В работе Н. В. Лищенко и В. П. Ларшина [61], сформулирована зависимость для определения средней температуры нагрева слоя на глубине x от зоны резания:

$$T_k(x) = \frac{2 \cdot q_{\text{нагр}}}{\lambda_{\text{м.з.}}} \cdot \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^K \sqrt{a_{\text{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_1]} \cdot \\ \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_1]}} \right) - \\ - \sum_{i=1}^K \sqrt{a_{\text{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2]} \cdot \\ \cdot \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2]}} \right) \end{array} \right], \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.13)$$

Недостатком существующих математических моделей выступает допущение о равнозначности положительного и отрицательного (мнимого) тепловых источников (рис. 1.7) или отсутствии последнего. В действительности при прерывании процесса резания, в зависимости от технологических условий работы круга (с СОЖ или без), полосовая зона нагрева будет подвергаться охлаждению под действием СОЖ или воздуха, захватываемых впадинами круга. При этом следует ожидать что численные значения удельной интенсивности отвода тепла будут иметь ненулевые значения, т.е. принятые указанными авторами допущения что $q_{\text{охл.}i} = q_{\text{нагр.}i}$ или $q_{\text{охл.}i} = 0$ нельзя считать обоснованно справедливыми.

Однако шлифовальная обработка в первую очередь служит для придания поверхностному слою обрабатываемого материала требуемого набора макро- и микрогеометрических характеристик, в частности – шероховатости и волнистости. Причем, если шероховатость определяется в основном зернистостью круга, то проблема возникновения развитой волнистости, связанная с особенностями работы прерывистых кругов, в описанной методике не учитывается, что может приводить к закономерному ухудшению качества обработки. К тому же, нераскрытыми остаются вопросы выбора базовой тепловой модели, определяющей закономерности формирования температурных полей, так как по сути,

рассматриваемый источник тепла для описания теплового состояния поверхностного слоя заготовки является нестационарным.

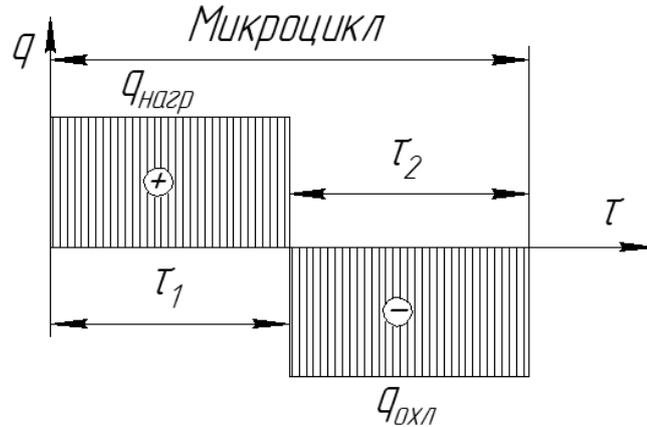


Рис. 1.7. Схема изменения теплonaпряженности зоны резания при прерывистом шлифовании периферией круга

Известен подход к решению задачи определения геометрических характеристик шлифовальных кругов с учетом механики формирования геометрии обработанной поверхности [37], в основе которого лежит построение воспроизводящих полей с последующей оценкой высоты образующихся неровностей посредством численных методов расчета. В общем виде, математическая модель, лежащая в основе предлагаемого автором алгоритма, имеет вид:

$$y'_д(x, t) = y'_н(x, t) + H(x, z) - \Delta y'_{д.т}(x, z) - \Delta y'_{д.уп}(x, z), \quad (1.14)$$

где $y'_н(x, t)$ – условная граница воспроизводящего поля;

$H(x, z)$ – высота заготовки;

$\Delta y'_{д.т}(x, z)$ – тепловые деформации заготовки;

$\Delta y'_{д.уп}(x, z)$ – упругие деформации заготовки.

Расчет ординат условной границы воспроизводящего поля (границы поверхностного слоя детали) производится в соответствии с выражением [37]:

$$y'_н(x, t) = y'_0(x, t) + \int_{t_0}^t V_{0y} d\tau + \Delta y'_{т}(x, t) + \Delta y'_{уп}(x, t) + \sum_i A_{0yi} \cdot \cos(t \cdot \omega_{0yi} + \varphi_{0yi}) - R(\gamma, x, t), \quad (1.15)$$

где $y'_0(x, t)$ – координаты центра инструмента в момент времени t_0 ;

V_{0y} – скорость движения инструмента по координате y ;

$\Delta y'_{уп}(x, t)$, $\Delta y'_{т}(x, t)$ – смещение условной наружной поверхности инструмента вследствие упругих и температурных деформаций технологической системы;

A_{0yi} – амплитуда i -ой гармоники вибрационных смещений инструмента;

ω_{0yi} – частота i -ой гармоники вибрационных смещений инструмента;

φ_{0yi} – фаза i -ой гармоники вибрационных смещений инструмента;

$R(\gamma, x, t)$ – радиус шлифовального круга.

Разработанный автором алгоритм решения оптимизационной задачи может быть изображен в виде блок-схемы, представленной на рисунке 1.8. Принципиальная схема графического решения задачи построения условной границы воспроизводящего поля с использованием численных методов расчета приведена на рисунке 1.9. Более подробно, используемые в алгоритме математические и физические зависимости описаны в работе [37].

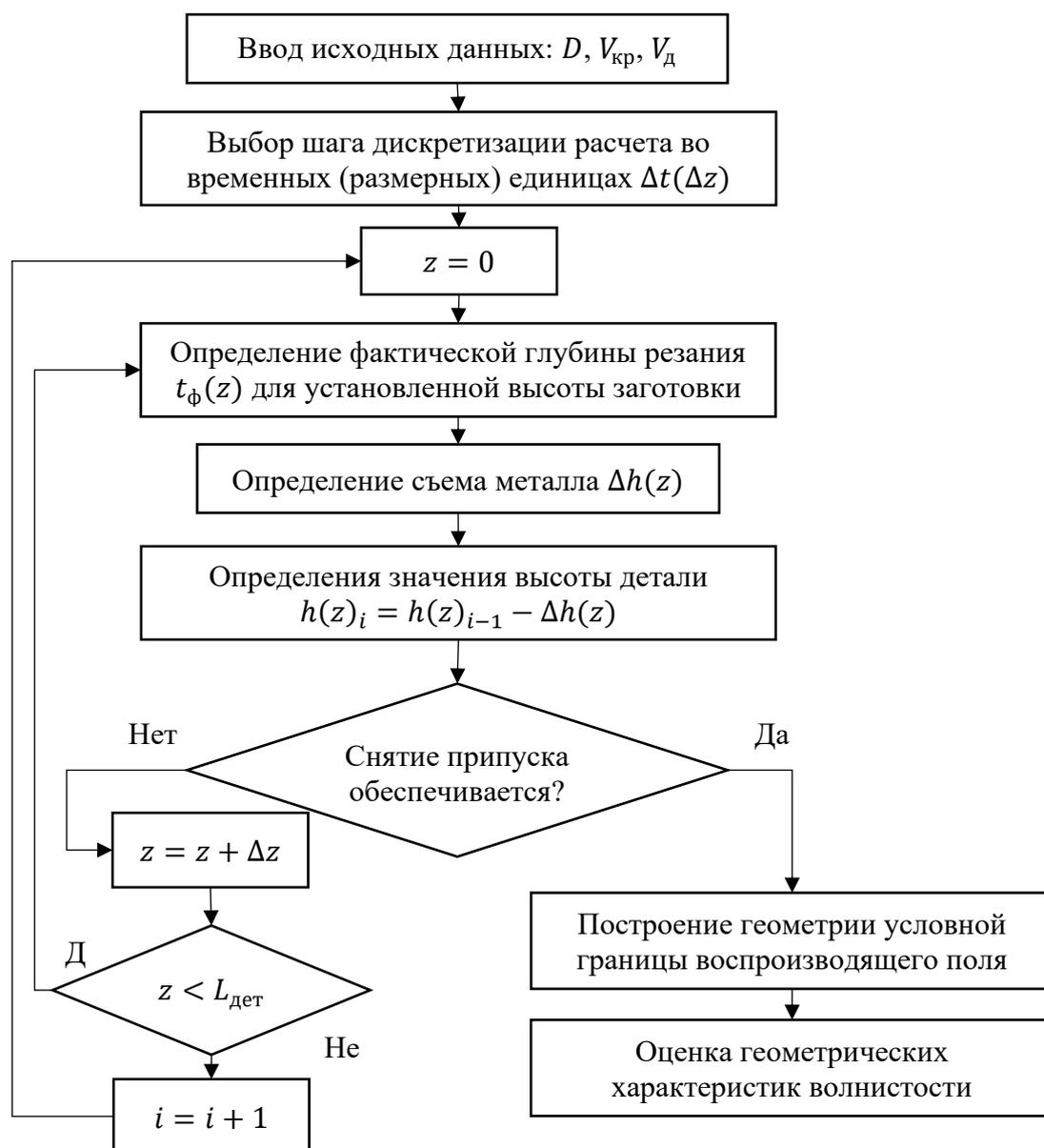


Рис. 1.8. Алгоритм аналитической оценки волнистости обрабатываемой поверхности при плоском шлифовании периферией круга

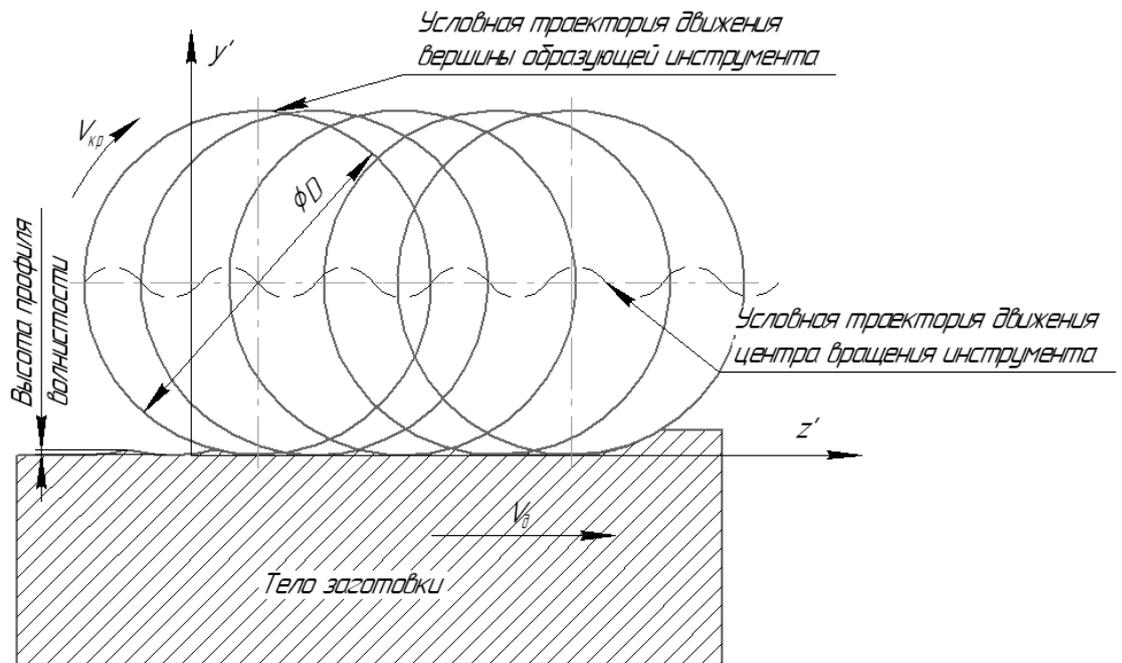


Рис. 1.9. Принципиальная схема графического решения задачи построения условной границы воспроизводящего поля

Еще одной важной проблемой применения метода прерывистого шлифования является возникновение в технологической системе (ТС) повышенной вибрационной нагрузки, негативно сказывающейся на качестве обработки и интенсивности износа элементов технологической оснастки и оборудования. Для исключения возможности возникновения ударного или параметрического резонанса, А. В. Якимовым была сформулирована зависимость для определения длины дуги профиля периферии режущих сегментов, обеспечивающей работу круга в диапазоне устойчивости [137]:

$$L_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \omega_{кр}}{(3 \div 4,6) \cdot \nu_{imax}}, \text{ м}, \quad (1.16)$$

где $\omega_{кр}$ – угловая скорость вращения шлифовального круга, рад/с;

ν_{imax} – максимальная частота спектра собственных изгибных колебаний технологической системы в плоскости, пересекающей ось шпинделя и перпендикулярной плоскости обрабатываемой поверхности, рад/с;

R – радиус круга, м.

В работе В. А. Смирнова [104] отмечается, что для исключения параметрического резонанса, параметры ТС прерывистого шлифования должны удовлетворять следующему условию:

$$1,3 \cdot \nu_i \leq \frac{n_{сегм} \cdot V_{кр}}{R} \leq 0,7 \cdot \nu_i, \text{ Гц}, \quad (1.17)$$

где ν_i – собственная частота i -ой гармоники технологической системы, Гц.

В обоих подходах решение проблемы возникновения параметрического резонанса в ТС сводится в подбору некоторого сочетания числа АС или протяженности рабочей поверхности круга и скорости его вращения, попадающих в диапазон, обеспечивающий динамическую устойчивость технологической системы с учетом её индивидуальных динамических характеристик. Существенная проблема такого подхода к проектированию процесса прерывистого шлифования заключается в том, что для реального технологического оборудования картина частот собственных колебаний изменяется в широком диапазоне значений в зависимости от: конструктивной компоновки оборудования, свойств используемых конструктивных материалов, частоты вращения круга и т.д.

Это, в свою очередь, делает практически невозможным полное исключение параметрического резонанса без необходимости индивидуального проектирования инструмента с проведением большого объема опытно-промышленных испытаний и проектировочных расчетов. К тому же при некоторых значениях собственных частот колебания технологических систем, описанные ранее принципы проектирования, предложенные в работе А. В. Якимова, могут вступать в противоречие: например, при удовлетворении условию снижения теплонапряженности зоны резания, параметры шлифовального круга и процесса обработки могут не удовлетворять условию обеспечения устойчивости системы к возникновению параметрического резонанса или же способствовать формированию чрезмерно развитой волнистости поверхности. В таком случае, подбор параметров обработки, удовлетворяющих обоим условиям, может приобретать достаточно высокую трудоемкость.

Также известно, что наряду с конструктивными характеристиками шлифовального инструмента и видом абразива не менее значимый вклад в результаты шлифования вносит материал связки шлифовального круга. Особый интерес в этом ключе представляет применение вулканитовой связки, обладающей рядом физико-механических свойств, определяющих высокую перспективность её применения при прерывистом шлифовании титановых сплавов. Более подробно технологические возможности применения ПШК на вулканитовой связке при обработке титановых сплавов рассмотрены в следующем разделе.

1.4. Технологические возможности прерывистых шлифовальных кругов на вулканитовой связке

Процессы обработки металлов резанием неизбежно сопровождаются возникновением колебаний, вследствие действия широкого спектра факторов, начиная от точности изготовления и сборки деталей технологического оборудования, инструментов и оснастки, заканчивая принятыми режимами обработки. Как было отмечено ранее, в целом, для процесса шлифования

характерным является полигармоническая картина колебательных процессов, возникающих в системе ТС. Правильный подбор шлифовального инструмента, режимов резания, настройка и исправность технологического оборудования и оснастки, своевременная правка инструмента и использование СОЖ в большинстве случаев позволяют удерживать амплитуды колебательных процессов в диапазонах, обеспечивающих достижение приемлемого качества обработанной поверхности, стойкости шлифовального инструмента и опор шпиндельных узлов.

Использование метода прерывистого шлифования, как было показано ранее, приводит к нарушению характерной для сплошного шлифования картины амплитудно-частотных характеристик технологической системы. Оно привносит в колебательный процесс гармоники, частота которых определяется произведением частоты вращения ПШК на количество его АС, при определенном сочетании которых может возникать параметрический резонанс, приводящий к еще большему усугублению колебательных процессов. Все это в совокупности приводит к ухудшению условий и качества обработки, в конечном итоге – нивелированию полезных эффектов от применения метода прерывистого шлифования.

Снижению вибрационной нагрузки в ТС, как было отмечено ранее, может способствовать увеличение числа АС. Однако, при этом может иметь место снижение эффективности отвода тепла из зоны резания, а также проявление ряда иных негативных факторов, характерных для метода прерывистого шлифования. Таким образом, практический интерес представляет поиск способа снижения амплитуд колебательных процессов в ТС, в меньшей степени зависящего от количества АС, который, ко всему прочему, не должен приводить к усложнению конструкции шлифовального инструмента и создавать необходимость внесения конструктивных изменений в используемое технологическое оборудование.

Большинство известных решений в области управления динамикой колебательных процессов ТС сводится к использованию консервативных решений, направленных на общее улучшение условий процесса шлифования. Однако при прерывистом шлифовании источником «вредных» колебаний, выступают особенности работы шлифовального инструмента, в связи с чем следует ожидать что консервативные решения в области уменьшения амплитуды колебательных процессов не будут иметь достаточно выраженной эффективности.

Применение вулканитовой связки особенно перспективно для титановых сплавов в условиях прерывистого шлифования, поскольку её упругость позволяет снизить ударные нагрузки и демпфировать вибрации, возникающие при контакте АС с обрабатываемой поверхностью. Это способствует уменьшению склонности к прижогам и трещинообразованию, а также снижению засаливания круга. Несмотря на низкую теплостойкость вулканитовой связки, её использование в сочетании с СОЖ позволяет избежать перегрева и реализовать

режим самозатачивания, что положительно сказывается на стойкости инструмента и качестве поверхности.

Анализ работ [40, 71, 75, 77, 80, 123, 124, 126, 135, 151] позволяет судить о перспективности реализации принципов упругого шлифования в ключе стабилизации динамики ТС, улучшения условий и качества прерывистого шлифования титановых сплавов. Реализация упругого шлифования предусматривает внедрение в технологическую систему некоторого элемента, обладающего выраженными упругодемпфирующими свойствами. Такой упругодемпфирующий элемент (УДЭ) служит для восприятия и частичного поглощения кинетической энергии вибраций.

Вывод о потенциальном положительном влиянии включения УДЭ в состав ТС следует из известных положений теории колебательных процессов, согласно которой амплитуда вынужденных колебаний механической системы, возникающих под действием некоторой вынуждающей силы P_B , при наличии линейного вязкого сопротивления зависит от соотношения частоты её воздействия и собственной частоты системы и значения коэффициента затухания [7, 30]:

$$A_{\text{рез}} = \frac{\frac{P_B}{m}}{\sqrt{(v_0^2 - v_B^2)^2 + 4 \cdot \beta^2 \cdot v_B^2}}, \text{ М}, \quad (1.18)$$

где v_0 – собственная частота колебаний системы, Гц;

v_B – частота вынуждающей силы, Гц;

P_B – вынуждающая сила, Н;

β – коэффициент затухания;

m – приведенная масса системы, кг.

Частота вынуждающей силы для случая прерывистого шлифования будет соответствовать частоте взаимодействия (частоте контактов) АС круга с поверхностью заготовки, которая может быть найдена как:

$$v_B = \frac{n_{\text{сегм}} \cdot V_{\text{кр}}}{\pi \cdot 2 \cdot R}, \text{ Гц}. \quad (1.19)$$

В таком случае, выражение для определения максимальной амплитуды однонаправленных вынужденных колебаний примет вид:

$$A_{\text{рез}}^{\text{max}} = \frac{P_B}{\sqrt{\left(v_0^2 - \left(\frac{n_{\text{сегм}} \cdot V_{\text{кр}}}{\pi \cdot 2 \cdot R}\right)^2\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{b}{2 \cdot m}\right)^2 \cdot \left(\frac{n_{\text{сегм}} \cdot V_{\text{кр}}}{\pi \cdot 2 \cdot R}\right)^2}}, \text{ М}. \quad (1.20)$$

Для прерывистого шлифования амплитуда колебаний круга в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, связана с волнистостью обработанной поверхности через

параметр $y_{\text{дин.}}$, определяющий приращение высоты волнистости от воздействия динамических факторов [47, 137]:

$$y_{\text{в}} = y_{\text{пр.}} + y_{\text{дин.}}, \text{ м}; \quad (1.21)$$

$$y_{\text{дин.}} = \sum A_{\text{в}i} \cdot [\cos(v_i \cdot t) - 1] + R - \frac{R \cdot [S_{\text{пр}} + \sum b_i \cdot v_i \cdot \sin(v_i \cdot \tau + \varphi_i)]}{\sqrt{[\sum A_{\text{в}i} \cdot v_i \cdot \sin(v_i \cdot \tau)]^2 + [S_{\text{пр}} + \sum b_i \cdot v_i \cdot \sin(v_i \cdot \tau + \varphi_i)]^2}}, \text{ м}, \quad (1.22)$$

где $y_{\text{в}}$ – высота волнистости, м;

τ – период работы круга, отсчитываемый по временной оси, с;

v_i – частота i -ой гармоники, Гц;

$A_{\text{в}i}$, $A_{\text{г}i}$ – амплитуды вертикальных и горизонтальных колебаний технологической системы относительно заготовки для i -ой гармоники, м;

v_i – частота колебаний i -ой гармоники, Гц;

φ_i – угол сдвига фаз i -ой гармоники, °;

$y_{\text{пр.}}$ – составляющая высоты волнистости, обусловленная прерыванием процесса резания, значение которой находится как [47, 137]:

$$y_{\text{пр.}} = \frac{S_{\text{пр}}^2 \cdot l_2^2}{8 \cdot v^2 \cdot R \cdot \left(\frac{S_{\text{пр}}}{v} + R\right)}, \text{ м}, \quad (1.23)$$

где v – частота вращения круга, Гц.

При рассмотрении механики процесса плоского шлифования наиболее значимое влияние на динамику ТС и качество обработки (что наглядно демонстрируется результатами проведенных ранее исследований) будут оказывать колебания, направленные перпендикулярно оси вращения круга и вызывающие поперечный изгиб оси шпинделя. В таком случае, основную часть вынуждающего усилия будет формировать радиальная составляющая силы резания P_y , а собственная частота колебательной системы будет определяться собственными изгибными частотами шпинделя шлифовального станка. Тогда за счет внедрения УДЭ в состав технологической системы между обрабатываемой заготовкой и механической системой шлифовального станка может быть достигнуто снижение величины вынуждающего усилия за счет эффекта демпфирования, являющегося следствием диссипации механической энергии. Это уменьшает вынуждающее усилие, особенно радиальную составляющую силы резания, за счет поглощения и ослабления колебаний системы.

Из выражения (1.18), следует, что даже при совпадении значений частот воздействия вынуждающей силы (равной частоте контактов АС с заготовкой) при увеличении коэффициента демпфирования будет обеспечиваться уменьшение амплитуды колебаний.

Следовательно, можно ожидать, что внедрение УДЭ даже со сравнительно небольшим демпфированием позволяет достичь снижения негативного влияния со стороны потенциального резонанса в ТС, а также снижения изгибных усилий на шпиндель.

Существуют различные вариации реализации принципа упругого шлифования, предусматривающие использование УДЭ в составе: узлов сопряжения шлифовального круга и шпинделя станка, узлов сопряжения абразивной части и корпуса круга; применение комбинированных компоновок шлифовальных кругов, включающих жесткую и эластичную часть, а также рабочей части с упруго-закрепленным абразивом [40, 71, 73, 80, 88, 94, 104, 124, 130, 137, 142, 160].

Решению проблем, связанных с интенсивным засаливанием шлифовального круга и повышенной вибрацией в ТС при прерывистом шлифовании, может послужить изготовление рабочей части круга с использованием вулканитовой связки, обладающей повышенными упругими свойствами. Вулканитовые связки относятся к классу органических связок, основным компонентом которых является синтетический каучук, вулканизируемый серой. В отличие от иных связок, используемых при изготовлении абразивов, вулканитовые связки отличаются эластичностью и достаточно высокой прочностью и плотностью, что в отличие от иных эластичных связок, определяет возможность их применения как на операциях полировки, так и при шлифовании. К тому же, широкая распространенность вулканитовых связок и их совместимость с различными абразивами определяет доступность и достаточно широкое разнообразие форм поставок абразивных инструментов на их основе [72, 96, 115, 118, 123].

Еще одним преимуществом, определяющим выбор вулканитовой связки, является относительно малая прочность круга, обеспечивающая его работу преимущественно в режиме самозатачивания. Работа шлифовального круга в режиме самозатачивания способствует стабилизации средних значений составляющих силы резания в пределах узкого диапазона, в то время как в режиме затупления или засаливания круга, происходит рост средних значений сил резания по мере увеличения продолжительности работы круга [47, 50, 96, 115, 123, 156].

Достаточно большое количество проведенных ранее исследований особенностей процесса шлифования упругими абразивными материалами [40, 71, 78, 79, 80, 94, 145, 151, 155] показывает, что использование связок, обладающих упругими свойствами, способствует значительному увеличению доли режущих абразивных зерен, т.е. тех зерен на поверхности шлифовального круга, которые непосредственно участвуют в процессе съема материала. Так, для мягких шлифовальных связок, в резании может участвовать до 80 % абразивных зерен, расположенных на периферии круга, в то время как для керамических неупругих связок, их доля обычно составляет менее 20 %. Указанное явление объясняется тем, что под воздействием сил резания происходит некоторое вдавливание или поворот наиболее выступающих

абразивных зерен и соответствующее включение в контакт с заготовкой менее выступающих зерен за счет изменения положения условной линии контакта периферии круга и обрабатываемой поверхности.

При использовании вулканитовой связки наличие у нее упругих свойств способствует некоторому углублению в неё абразивных зерен под действием сил резания, вследствие чего происходит уменьшение глубины и частичная компенсация сил микрорезания, что благоприятно сказывается на тепловом балансе зоны резания. Данный факт также позволяет рассматривать рабочий элемент ПШК, выполненный на вулканитовой связке, как УДЭ с достаточно большим потенциалом поглощения кинетической энергии удара при его внедрении в поверхность заготовки [12, 50, 58, 65, 73, 78, 79, 125].

Ключевым недостатком вулканитовой связки, наряду с низкой прочностью, является её низкая температурная стойкость, обусловленная склонностью основного компонента – каучука к размягчению при 150–280 °С. Однако решение проблемы низкой теплостойкости вулканитовой связки лежит в одном векторе с общим решением проблем шлифовальной обработки титановых сплавов, связанных с возникновением повышенных температур в зоне резания. К тому же, крайне малая теплопроводность вулканитовой связки, составляющая менее 2 Вт/(м·К) и благоприятные условия всестороннего охлаждения АС круга, ожидаемо будут препятствовать их интенсивному нагреву до критических температур в процессе работы круга. Стоит также заметить наличие у одного из основных компонентов такой связки-серы, способности к снижению величины силы трения, что также может вносить вклад в потенциал снижения теплонапряженности в зоне контакта шлифовального круга и обрабатываемой поверхности [6, 71, 89, 94, 96, 115].

Обобщение вышесказанного позволяет сформулировать следующую рабочую гипотезу исследования, состоящую в том, что использование прерывистых шлифовальных кругов на основе вулканитовой связки позволяет повысить эффективность процесса шлифования титановых сплавов за счет достижения следующих эффектов: снижения вибрационной нагрузки в ТС за счет частичного поглощения кинетической энергии удара АС круга, обеспечения работы круга преимущественно в режиме самозатачивания, что обусловлено физико-механическими свойствами связки.

1.5. Выбор критериев повышения эффективности процесса прерывистого шлифования

С учетом известных положений теории шлифования, а также изученных ранее аспектов прерывистого шлифования, достижению поставленной цели повышения эффективности

процесса прерывистого шлифования заготовок из титановых сплавов может способствовать решению таких основных задач как: достижение требуемых (приемлемых) значений шероховатости поверхности, снижение температуры в зоне резания $T_{з,рез}$ до температур, при которых не происходит возникновение шлифовочных прижогов, минимизация составляющей волнистости обработанной поверхности $u_{пр}$, обусловленной прерыванием процесса резания и вибрационной нагрузкой ТС.

Повышение эффективности прерывистого шлифования может быть достигнуто путем поиска некоторой оптимальной совокупности значений критериев, соответствующих его задачам, с учетом ограничений, накладываемых со стороны входящих в состав определяющих их функций параметров. При этом могут возникать противоречия, следствием которых может стать недостижение того или иного целевого (желаемого) значения одного из критериев в угоду другому. Устранение возникающих противоречий может быть достигнуто посредством ранжирования задач, как следствие – соответствующих им критериев выполнения по степени их значимости с учетом проблематики и особенностей реализации процесса прерывистого шлифования титановых сплавов. Для наглядности, результаты ранжирования индивидуальных задач по степени значимости изобразим в виде иерархической пирамиды, вид которой приведен на рисунке 1.10.



Рис. 1.10. Иерархическая пирамида задач повышения эффективности процесса прерывистого шлифования титановых сплавов

Иерархизация задач позволяет исключить противоречия между конкурирующими ограничениями, накладываемыми на области определения переменных целевых функций. Формально, условия решения задачи повышения эффективности процесса прерывистого

шлифования титановых сплавов могут быть записаны в виде системы целевых функций управления выходными параметрами процесса:

$$\left\{ \begin{array}{l} Ra(Rz) = f(x_{1j} \dots x_{nj}) \rightarrow \{min; \leq [Ra(Rz)]\}; \\ T_{з.рез} = f(x_{1j} \dots x_{nj}) \rightarrow \{min; < T_{ф.пер}\}; \\ y_{пр} = f(x_{1j} \dots x_{nj}) \rightarrow min; \\ A_{рез} = f(x_{1j} \dots x_{nj}) \rightarrow min; \\ N_{дет} = f(x_{1j} \dots x_{nj}) \rightarrow max; \end{array} \right. \quad (1.24)$$

где $Ra(Rz)$ – шероховатость обработанной поверхности, мкм;

$T_{з.рез}$ – температура в зоне резания, °С;

$T_{ф.пер}$ – температура начала фазового перехода (возникновения прижога), °С;

$N_{дет}$ – удельная наработка шлифовального круга, выраженная в объеме обработки заготовок деталей за время эксплуатации инструмента до достижения предельного износа, шт.;

$x_{1j} \dots x_{nj}$ – переменные, определяющие численное значение целевой функции.

При отсутствии перманентных ограничений, решение целевых функций сводится к перебору чрезмерно большого объема переменных, определяющих значения целевых функций, что не рационально. Отчасти, нивелированию указанной проблемы может способствовать подразделение входных параметров технологической системы на группы управляемости, с целью исключения параметров, обладающих наименьшим потенциалом регулирования. Так, совокупность входных параметров технологической системы, применительно к процессу плоского прерывистого шлифования с использованием разработанной конструкции шлифовального круга, может быть условно подразделена на следующие группы управляемости:

— Неуправляемые: физико-механические свойства объектов технологической системы (металла заготовки, элементов вспомогательного инструмента, оснастки и т.д.). Это параметры, управление которых на этапе проектирования и реализации технологической системы ограничено требованиями конструкторской документации, имеющимся составом технологического вооружения производства и т.д.

— Ограниченно управляемые: конструктивные характеристики круга (материал, число АС, их размеры, габариты круга, свойства охлаждающей среды и т.д.). Параметры, отнесенные к данной группе, могут сравнительно легко поддаваться управлению (без необходимости реализации капитальных вложений, трудоемких работ и т.д.) преимущественно – на этапе проектирования технологической системы (например, для конструктивных характеристик круга), в меньшей степени – в процессе её функционирования (например, для параметров охлаждающей среды).

— Управляемые: элементы режима шлифования (рабочая скорость круга, поперечная, продольная подача, глубина резания и т.д.), тип охлаждающей среды. В данную группу

отнесены параметры, легко поддающиеся управлению и регулированию, хоть и в ограниченных диапазонах, как на этапе проектирования, так и на этапе функционирования технологической системы.

Тогда, исключая неуправляемые переменные, решение задачи повышения эффективности процесса прерывистого шлифования титановых сплавов может быть проиллюстрировано в виде структурной схемы, приведенной на рисунке 1.11.

Таким образом, путем варьирования значений входных параметров технологической системы с учетом физических и технологических ограничений, может быть реализован комплексный подход к повышению эффективности процесса прерывистого шлифования заготовок из титановых сплавов, обеспечивающий: достижение приемлемого качества обработки, отсутствие шлифовочных прижогов, снижение вибрационной нагрузки на технологическую систему, а также повышение наработки инструмента. В свою очередь, это требует получения данных, качественно характеризующих взаимное влияние входных и выходных параметров технологической системы, что будет более подробно рассмотрено в последующих разделах исследования.

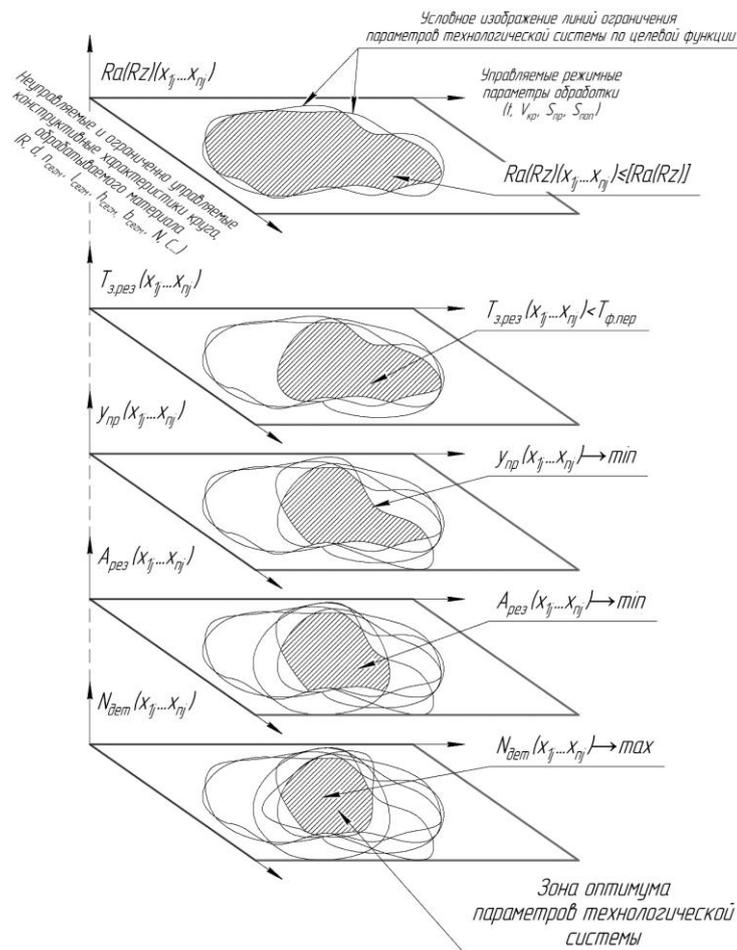


Рис. 1.11. Структурная схема решения задачи повышения эффективности процесса шлифования титановых сплавов

1.6. Выводы по главе 1

По итогам проведенного анализа научно-технической литературы в области специфики и проблематики шлифования заготовок из титановых сплавов, а также применения ПШК, могут быть сделаны следующие ключевые выводы:

1. Титан и его сплавы являются одними из наиболее востребованных конструкционных материалов в различных направлениях машиностроительной отрасли. Их отличают высокие химическая стойкость, удельная прочность, жаро- и термостойкость. Вместе с тем, специфические теплофизические и физико-механические свойства титановых сплавов определяют их плохую обрабатываемость резанием и отнесение к группам труднообрабатываемых материалов.

2. Проблематика обработки титана и его сплавов, связанная с их свойствами, актуализируется на финишных, как следствие – наиболее ответственных операциях шлифования, где их труднообрабатываемость приводит к возникновению массового брака, главной причиной которого являются прижоги. В отличие от прочих видов обработки металлов резанием, шлифование происходит в условиях высоких скоростей, что создает высокую энергонапряженность в зоне резания, а низкая теплопроводность титановых сплавов – потенциал для формирования высоких температур. Под действием высоких температур происходит увеличение химической активности титана, интенсификация диффузионных, адгезионных процессов на границе контакта «металл-абразив», инициация химических реакций и развития фазовых переходов в поверхностном слое металла. Все это способствует еще большему усугублению условий обработки, увеличению износа шлифовального круга, возникновению шаржирования, прижогов обработанной поверхности, как следствие – браку изготавливаемой продукции.

3. Использование прерывистого шлифования является одним из наиболее перспективных методов снижения теплонапряженности в зоне резания, характерной при обработке титановых сплавов. Однако, прерывистый характер процесса резания, создает ряд проблем, приводящих к ухудшению динамики технологической системы и качества обработки. Прерывистое шлифование, как показывают многочисленные исследования, в связи с периодическим контактом АС с поверхностью заготовки, приводит к выраженному росту вибрационной нагрузки на технологическую систему, а кинематика процесса способствует возникновению развитой волнистости поверхности, что ухудшает геометрические характеристики обработанной поверхности детали. К тому же, отсутствие комплексного подхода к выбору конструктивных характеристик ПШК, базирующегося на учете их взаимосвязей с режимными параметрами обработки и физическими свойствами

обрабатываемого материала, создает предпосылки к выбору неоптимальных конфигураций инструмента для решения поставленных технологических задач.

4. На текущем этапе развития, подходы к проектированию параметров ТС процесса плоского прерывистого шлифования базируются на учете малого количества выходных параметров, что может способствовать тому, что решение определенной технологической задачи в рамках одного подхода, может приводить к неудовлетворительному решению других не менее важных задач, например: увеличение протяженности паза круга, способствующее снижению теплонагруженности зоны резания, может приводить к увеличению волнистости обработанной поверхности вплоть до неприемлемых значений. К тому же, математические модели, лежащие в основе методики выбора параметров ПШК, требуют уточнения применительно к обработке титановых сплавов, ввиду наличия у последних специфических теплофизических свойств, существенно отличающихся от свойств широкой номенклатуры металлов, используемых в машиностроительной практике.

5. С учетом особенностей кинематики процесса прерывистого шлифования теоретически обоснована перспективность применения прерывистых шлифовальных кругов с АС на основе вулканитовой связки для улучшения динамических характеристик технологической системы.

6. Сформулирована иерархическая система критериев повышения эффективности процесса прерывистого шлифования титановых сплавов, базирующаяся на принципах рационального проектирования, включающая критерии, характеризующие качество обработанной поверхности, динамику технологической системы и наработку шлифовального круга.

Высокая подверженность титановых сплавов к возникновению шлифовочных прижогов, а также наличие нерешенных проблем в области проектирования и применения ПШК определяют актуальность научной проблемы разработки комплексных методологических решений, учитывающих взаимосвязь между входными и выходными параметрами процесса шлифования, включая свойства материала АС, температуру в зоне резания, качественные характеристики обработанной поверхности, динамику технологической системы и наработку шлифовального инструмента. Исходя из приведенной актуальности, можно сформулировать цель исследовательской работы, заключающуюся в повышении эффективности процесса плоского шлифования заготовок из титановых сплавов за счет применения ПШК на вулканитовой связке и рационального выбора параметров ТС.

ГЛАВА 2. Разработка и моделирование прерывистых шлифовальных кругов на вулканитовой связке для обработки титановых сплавов

2.1. Разработка конструкции и технологии изготовления прерывистого шлифовального круга с абразивными сегментами на основе вулканитовой связки

Для реализации процесса прерывистого шлифования с использованием кругов на вулканитовой связке была разработана конструкция и технология изготовления сборного шлифовального круга, схема которого приведена на рисунке 2.1. Предлагаемая конструкция инструмента для прерывистого шлифования представляет собой металлический корпус 1, имеющий конфигурацию диска, в центре которого выполнено посадочное отверстие под оправку станка, а по периферии выполнены прямоугольные сквозные пазы, служащие для установки и закрепления в них АС 2. Изготовление АС круга предусматривается из серийно выпускаемых абразивных брусков на основе вулканитовой связки прямоугольного сечения. Крепление брусков в корпусе инструмента реализуется посредством неразъемного клеевого соединения, выполненного при помощи клеевых составов на эпоксидной, полиуретановой и др. основах, обладающих достаточной адгезионной и структурной прочностью (превышающей предел прочности материала АС на разрыв), а также стойкостью к воздействию влаги, химической стойкостью к компонентам СОЖ и т.д.

Технический результат от реализации предложенных решений состоит в упрощении конструктивного исполнения ПШК, повышении технологичности производства и восстановлении эксплуатационных свойств, а также в сокращении его материалоемкости по абразивному материалу. Первое достигается за счет минимизации номенклатуры конструктивных элементов круга и упрощения их геометрической конфигурации. Увеличение технологичности процессов производства и восстановления эксплуатационных свойств круга, а также снижение материалоемкости по связанному абразиву достигается за счет изготовления сегментов из унифицированных абразивных брусков, что сводит процесс формирования рабочей части инструмента к последовательному выполнению трех основных операций: раскрою исходных брусков на заготовки сегментов требуемой длины, установке и закреплению заготовок сегментов в корпусе инструмента и профилированию рабочей части круга. Используемое для нужд закрепления брусков неразборное клеевое соединение обеспечивает надежное закрепление и базирование АС в корпусе круга без люфтов и деформаций. К тому же, оно достаточно просто поддается деструкции и восстановлению в случае необходимости.

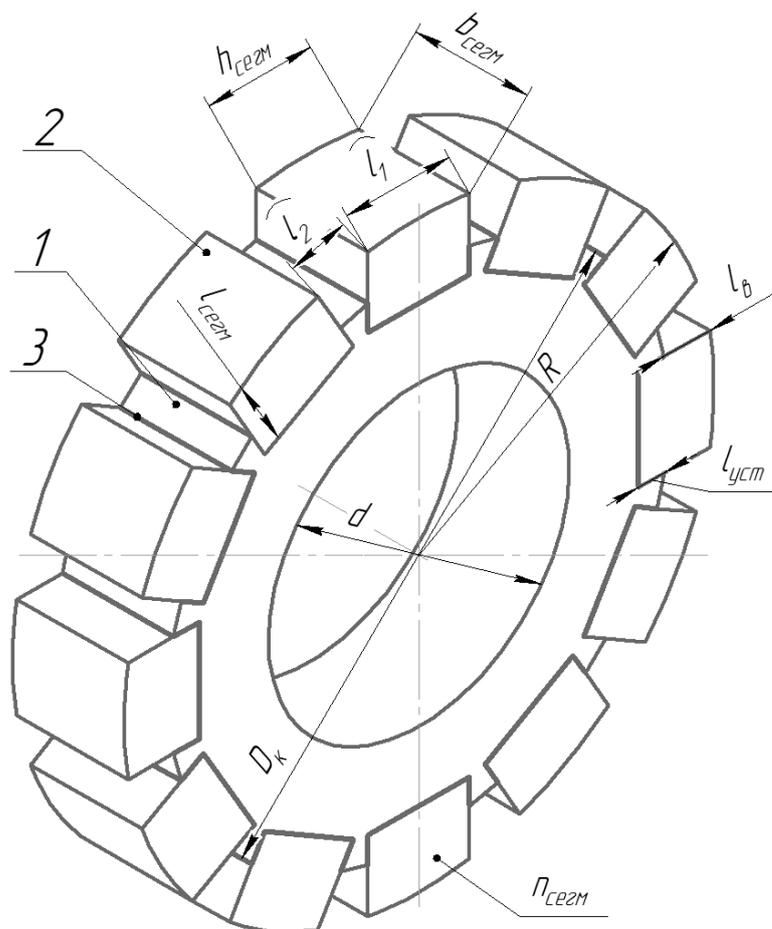


Рис. 2.1. Эскиз сборного прерывистого шлифовального круга: 1 – корпус, 2 – АС, 3 – клеевое соединение, $l_{\text{сегм}}$ – полная высота АС, $b_{\text{сегм}}$ – ширина АС, $h_{\text{сегм}}$ – длина АС, $l_{\text{в}}$ – высота выступа АС, $l_{\text{уст}}$ – глубина паза под установку АС, $n_{\text{сегм}}$ – число АС, R – радиус периферии круга, d – диаметр посадочного отверстия корпуса круга, $D_{\text{к}}$ – наружный диаметр корпуса круга, $b_{\text{к}}$ – ширина (контакта) корпуса круга, \hat{l}_1 – длина дуги периферии АС, \hat{l}_2 – длина дуги впадин

Технология изготовления и восстановления эксплуатационных свойств разработанной конструкции круга состоит в следующем. Сначала абразивные бруски заданного сечения товарной формы подвергаются раскрою на равные заготовки определенной длины с использованием ручных или механизированных режущих приспособлений (ножей, ножовок, ленточнопильных, круглоотрезных станков, торцевых, циркулярных пил и т.д.). После нарезки необходимого количества заготовок, приклеиваемая часть их поверхности, а также посадочные пазы в корпусе инструмента подвергаются обезжириванию. Производится приготовление клеевого состава в соответствии с заводской инструкцией, нанесение его на склеиваемые поверхности и, при наличии соответствующих указаний в инструкции, выдержка в течение требуемого периода времени. Затем, производится установка заготовок брусков в соответствующие пазы инструмента, их фиксация и выдержка до набора клеевым соединением достаточной прочности в соответствии с заводскими инструкциями на клеевой состав. После

полного набора клеевым соединением прочности, корпус инструмента с приклеенными заготовками АС устанавливается на оправку шлифовального станка и закрепляется. Затем, производится профилирование рабочей части круга с использованием приспособлений для правки шлифовальных кругов (съёмных или входящих в конструкцию станка).

По мере износа АС, их правка в процессе эксплуатации осуществляется по аналогии с обычными шлифовальными кругами. После достижения предельного диаметра износа рабочей части круг снимается со станка, после чего, остатки АС удаляются из полости пазов механическим путем, таким образом, чтобы полностью исключить повреждение корпуса (возможно неполное удаление материала АС механическим путем). Затем, осуществляется удаление остатков клеевого состава с поверхностей корпуса круга с использованием соответствующих растворителей. В случае, когда растворитель обеспечивает беспрепятственный демонтаж остатков АС целиком, их механическое удаление можно не производить.

Использование в предложенной конструкции ПШК АС, выполненных из стандартных абразивных брусков, позволяет повысить технологичность его изготовления, а также обеспечить простоту восстановления его эксплуатационных свойств. Однако, для обеспечения повышения эффективности процесса прерывистого шлифования титановых сплавов, уточнение конфигурации круга должно выполняться с учетом совместного влияния его конструктивно-геометрических характеристик и входных параметров технологической системы на значения принятых критериев повышения эффективности шлифования, изучение которого будет рассмотрено в следующих разделах.

2.2. Исследование влияния количества абразивных сегментов на геометрические характеристики шлифовального круга и обрабатываемой поверхности

Для определения диапазона значений конструктивных характеристик шлифовального круга в рамках решения задачи повышения эффективности прерывистого шлифования титановых сплавов, вначале необходимо определить возможные ограничения, накладываемые на них со стороны конкурирующих целевых функций, требований нормативной документации или геометрии. С точки зрения стандартизации и рационализации производства шлифовальных кругов при определении таких конструктивных характеристик круга как R , $b_{\text{сегм}}$ и d целесообразно опираться на требования, предписываемые положениями ГОСТ Р 52781-2007 [27]. Также, использование для изготовления АС стандартных абразивных брусков предполагает необходимость учета ограничений на размеры сечения и длину брусков, предписываемых положениями ГОСТ 33534-2015 [25]. Принимая, что при изготовлении АС

сечение абразивных брусков не корректируется (для упрощения технологии изготовления и восстановления), их размеры должны удовлетворять следующим условиям:

$$b_{\text{сегм}} = b, \text{ мм}; \quad (2.1)$$

$$h_{\text{сегм}} = h, \text{ мм}; \quad (2.2)$$

$$l_{\text{сегм}} \leq l, \text{ мм}, \quad (2.3)$$

где b , h , l – ширина, длина и высота абразивных брусков, используемых в качестве заготовок для изготовления АС, мм.

Так как на размер $b_{\text{сегм}}$ накладываются конкурирующие ограничения со стороны положений ГОСТ Р 52781-2007, то также должно выполняться следующее условие:

$$b_{\text{сегм}} = b = b_{\text{ст}}, \text{ мм}. \quad (2.4)$$

где $b_{\text{ст}}$ – стандартная ширина шлифовального круга из ряда значений, устанавливаемых ГОСТ Р 52781-2007, мм.

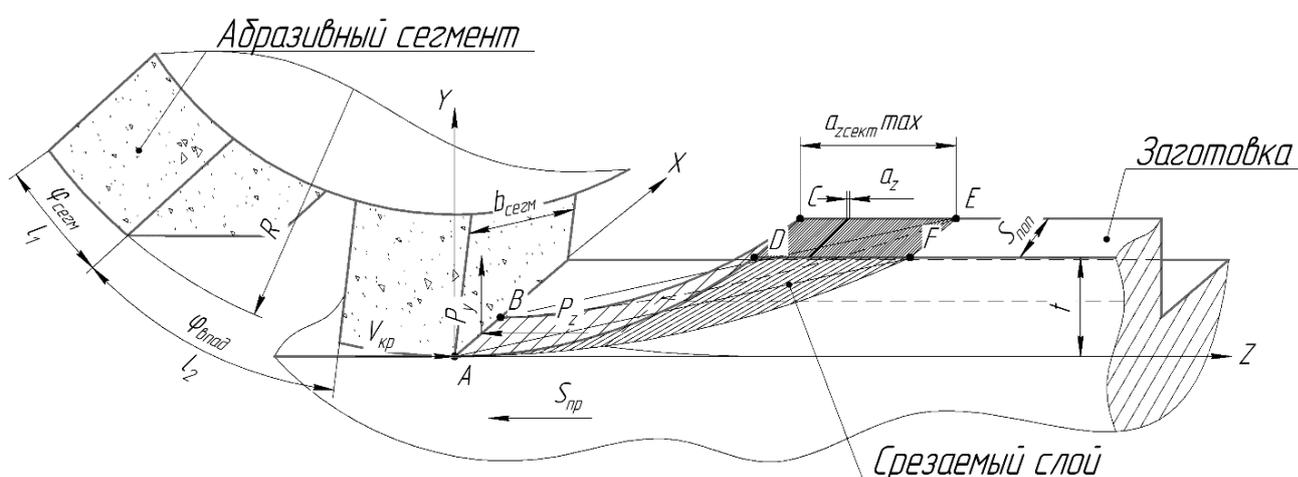
При определении геометрических параметров круга, таких как высота выступа АС l_b и размеры впадин между сегментами, в работе принимаются следующие допущения: выбор высоты сегмента $l_{\text{сегм}}$ ограничивается размерами стандартного абразивного бруска-заготовки согласно (2.1) – (2.3), что обусловлено требованием технологичности изготовления. Размеры впадин определяются исключительно из условия обеспечения непрерывности контакта (2.5) и геометрических соотношений (2.9) – (2.11), поскольку в известных рекомендациях [66, 72, 99, 114, 136, 155] отсутствуют прямые указания по их оптимизации для прерывистых кругов на вулканитовой связке. Принятый подход позволяет унифицировать конструкцию и сосредоточить управление процессом на варьировании количества сегментов $n_{\text{сегм}}$.

Исходя из необходимости обеспечения надежного закрепления АС в корпусе круга, на минимальное значение параметра $l_{\text{уст}}$ накладываются определенные ограничения, можно принять что $l_{\text{уст}} = \text{const}$, следовательно, данный параметр можно рассматривать как неуправляемый.

Таким образом, нахождение значений переменных, характеризующих конструктивные параметры рассматриваемой конструкции ПШК на вулканитовой связке сводится к нахождению значений таких параметров как $l_{\text{сегм}}$ и $n_{\text{сегм}}$ (за исключением параметра D_k , являющегося производным от параметров R , $l_{\text{сегм}}$ и $l_{\text{уст}}$); при этом, должны учитываться ограничения, накладываемые со стороны конкурирующих областей решения функций критериев повышения эффективности. Так, например, приведенные ранее результаты экспериментальных исследований показывают, что уменьшение количества АС $n_{\text{сегм}} \rightarrow \min$, при прочих равных условиях, способствует снижению температуры в зоне резания $T_{\text{з,рез}} \rightarrow \min$, однако, при этом происходит увеличение амплитуды вынужденных колебаний в ТС $A_{\text{рез}}$ и

ухудшение качества обработанной поверхности, что противоречит решению задачи повышения эффективности шлифования.

Для описания методики поиска оптимума значений $l_{\text{сегм}}$ и $n_{\text{сегм}}$ рассмотрим принципиальную схему прерывистого шлифования, реализуемую с использованием предложенной конструктивной конфигурации шлифовального круга, вид которой приведен на рисунке 2.2. При рассмотрении кинематики процесса прерывистого шлифования возможной представляется реализация одной из двух схем контакта рабочей поверхности круга с заготовкой: с прерывистым и непрерывным контактом. При непрерывном контакте врезание каждого последующего АС происходит до момента выхода из контакта с заготовкой предыдущего сегмента, при прерывистом – врезание кромки последующего сегмента происходит после выхода из контакта с заготовкой предыдущего сегмента.



геометрически из свойств прямоугольного треугольника, описываемого точками AFK . Тогда, из схемы, представленной на рисунке 2.2, имеем:

$$tg\alpha \approx \frac{t}{(S_{пр}+V_{кр}) \cdot \frac{l_1}{V_{кр}}}; \quad (2.6)$$

$$\max(tg\alpha_1) = \frac{\max(y_B)}{\min\left(\frac{AI}{2}\right)}, \quad (2.7)$$

где l_1 – длина дуги AC круга, м;

t – глубина резания, мм;

$\max(y_B)$ – максимальная высота волнистости, м;

$\min\left(\frac{AI}{2}\right)$ – минимальная длина прилежащего катета, м.

Значение длины прилежащего катета можно определить как половину от произведения времени прохождения впадины на скорость продольной подачи заготовки:

$$\frac{AI}{2} = \frac{\frac{l_2}{(V_{кр}+S_{пр})} \cdot S_{пр}}{2} = \frac{l_2 \cdot S_{пр}}{(V_{кр}+S_{пр}) \cdot 2}, \text{ М}, \quad (2.8)$$

Длины дуг периферии единичных сегмента и впадины могут быть найдены как:

$$l_1 = \frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \varphi_{\text{сегм}}, \text{ М}; \quad (2.9)$$

$$l_2 = \frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \frac{(360^\circ - \varphi_{\text{сегм}} \cdot n_{\text{сегм}})}{n_{\text{сегм}}}, \text{ М}, \quad (2.10)$$

где $\varphi_{\text{сегм}}$ – угол дуги сектора AC , значение которого может быть определено из свойств равнобедренного треугольника:

$$\varphi_{\text{сегм}} = 180^\circ - 2 \cdot \arccos\left(\frac{h_{\text{сегм}}}{2 \cdot R}\right), \text{ }^\circ. \quad (2.11)$$

Частоту вращения круга можно выразить через радиус и окружную скорость:

$$\nu = \frac{V_{кр}}{\pi \cdot 2 \cdot R}, \text{ Гц}. \quad (2.12)$$

Принимая допущение о том, что при удовлетворительной динамической настройке шлифовального станка вынужденные колебания частотного спектра технологической системы, не связанные с прерыванием процесса резания, не оказывают значимого влияния на макрогеометрические характеристики обработанной поверхности, перечень динамических параметров, определяющих максимальную высоту волнистости, может быть ограничен лишь одним дополнительным параметром – максимальной амплитудой радиального отклонения $A_{р.откл}$, обусловленного некруглостью и эксцентриситетом установки шлифовального круга. В таком случае, высота волнистости может быть найдена из следующего уравнения:

$$y_B = y_{пр.} + A_{р.откл}, \text{ М}. \quad (2.13)$$

Возникающее отклонение $u_{пр.}$ (составляющая волнистости, обусловленная прерывистостью процесса резания [36, 111, 136]) относится именно к волнистости, поскольку имеет периодическую природу с шагом, значительно превышающим высоту, что соответствует ГОСТ 2789-73. Его механизм образования связан с макропроцессом недореза припуска при прерывистом контакте, а не с микропроцессами резания, формирующими шероховатость. Выявленная зависимость $u_{пр.}$ от количества сегментов подтверждает системный характер отклонения. Параметр $[W]$ в условии (2.21) прямо указывает на контроль волнистости как целевого критерия качества.

Решая совместно уравнения (2.6), (2.7), (2.8) и (2.9), получим:

$$\max(tg\alpha_1) = \frac{S_{пр}^2 \cdot l_2^2 \cdot V_{кр} + S_{пр}^3 \cdot l_2^2 + A \cdot (V_{кр} + S_{пр})}{l_2 \cdot S_{пр} \cdot 4 \cdot v \cdot R \cdot (S_{пр} + v \cdot R)}. \quad (2.14)$$

Отсюда:

$$\frac{S_{пр}^2 \cdot l_2^2 \cdot V_{кр} + S_{пр}^3 \cdot l_2^2 + A \cdot (V_{кр} + S_{пр})}{l_2 \cdot S_{пр} \cdot 4 \cdot v \cdot R \cdot (S_{пр} + v \cdot R)} \leq \frac{t}{(S_{пр} + V_{кр}) \cdot \frac{l_1}{V_{кр}}}. \quad (2.15)$$

При малых значениях t , прерывание контакта следует ожидать при выполнении следующего условия:

$$l_2 > l_{ср.}, \quad (2.16)$$

где $l_{ср.}$ – длина дуги профиля среза, формируемого единичным сегментом, значение которой может быть найдено как [111]:

$$l_{ср.} = \frac{\pi \cdot R_{\phi}}{180^{\circ}} \cdot \arccos\left(\frac{R_{\phi} - t}{R_{\phi}}\right), \text{ м}, \quad (2.17)$$

где R_{ϕ} – фактический радиус линии, описываемой образующей профиля среза, м.

При плоском шлифовании как правило используется встречная схема относительного движения круга и заготовки, для которой фактический радиус линии образующей профиля среза единичного сегмента, может быть найден из следующей зависимости [111]:

$$R_{\phi} = R + \frac{S_{пр} \cdot l_{к} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot t - t^2} + \frac{S_{пр} \cdot l_{к}}{V_{кр}}\right)}{2 \cdot t \cdot V_{кр}}, \text{ м}, \quad (2.18)$$

где $l_{к}$ – длина дуги контакта шлифовального круга с заготовкой без учета продольной подачи, определяемая как [111]:

$$l_{к} = \frac{\pi \cdot R}{180^{\circ}} \cdot \arccos\left(\frac{R - t}{R}\right), \text{ м}. \quad (2.19)$$

Решая совместно уравнения (2.15) - (2.18) относительно $n_{сегм.}$, можно вывести условие обеспечения непрерывности контакта рабочей поверхности круга с заготовкой:

$$\begin{aligned}
& n_{\text{сегм}} > 360^\circ / (\varphi_{\text{сегм}} + \\
& R \cdot S_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \arccos \left(\frac{R-t}{R} \right) \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot t - t^2} + S_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \arccos \left(\frac{R-t}{R} \right) \right)}{+ \frac{V_{\text{кр}}}{2 \cdot t \cdot V_{\text{кр}}}} \right) \\
& + [R^2 + \frac{\phantom{R \cdot S_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \arccos \left(\frac{R-t}{R} \right) \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot t - t^2} + S_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \arccos \left(\frac{R-t}{R} \right) \right)}{+ \frac{V_{\text{кр}}}{2 \cdot t \cdot V_{\text{кр}}}} \right)}{2 \cdot t \cdot V_{\text{кр}}}] \cdot \\
& \cdot \arccos \left(1 - \frac{t}{R + \frac{S_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \arccos \left(\frac{R-t}{R} \right) \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot t - t^2} + S_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \arccos \left(\frac{R-t}{R} \right) \right)}{+ \frac{V_{\text{кр}}}{2 \cdot t \cdot V_{\text{кр}}}} \right)}{2 \cdot t \cdot V_{\text{кр}}}} \right). \tag{2.20}
\end{aligned}$$

Тогда, задаваясь значениями режимных параметров обработки t , $V_{\text{кр}}$, $S_{\text{пр}}$, геометрическими и конструктивными характеристиками шлифовального круга R и $\varphi_{\text{сегм}}(R, h_{\text{сегм}})$, может быть найдено граничное значение $n_{\text{сегм}}$, отвечающее условию обеспечения непрерывности контакта рабочей поверхности круга с заготовкой. Справедливо будет отметить, что в широком диапазоне режимов обработки при малых глубинах шлифования (что характерно для маятникового шлифования), фактическая длина контакта периферии сегментов с заготовкой обычно не превышает 2–3 мм, в связи с чем обеспечение непрерывности контакта без ухудшения условий охлаждения достигается только при сочетании геометрических характеристик круга и режимов обработки.

Характерной особенностью процесса прерывистого шлифования является формирование на обработанной поверхности волн, связанных с недорезом припуска во время прерывания процесса резания. Это также накладывает свои ограничения на параметры обработки, которые могут быть записаны в виде следующего условия:

$$[W] \geq y_{\text{в}} = y_{\text{пр}} + A_{\text{р.откл}}, \text{ мм}, \tag{2.21}$$

где $[W]$ – допустимая высота волнистости обработанной поверхности, определяемая требованиями конструкторской документации, мм.

В данном условии параметр $A_{\text{р.откл}}$ можно рассматривать как некоторую случайную величину, варьируемую в некотором ограниченном диапазоне значений. В связи с этим для определения граничных условий решения задачи повышения эффективности шлифования по критерию $y_{\text{пр}} \rightarrow \min$; практический интерес представляет оценка влияния $y_{\text{в}} = f(n_{\text{сегм}}, S_{\text{пр}}, V_{\text{кр}})$, при исключении динамических факторов, т.е. при $A_{\text{р.откл}} = 0$. Выражение для нахождения

численных значений целевой функции $y_B = y_{пр.} = f(n_{сегм}, S_{пр}, V_{кр})$ может быть получено совместным решением уравнений (1.23), (2.11) и (2.13):

$$y_{пр.} = \frac{S_{пр}^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot R \cdot (360^\circ - \varphi_{сегм} \cdot n_{сегм})}{180^\circ} \cdot \frac{n_{сегм}}{n_{сегм}} \right)^2}{4 \cdot \left(\frac{V_{кр}}{\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot S_{пр} \cdot \pi}{V_{кр}} + 1 \right)}, \text{ М.} \quad (2.22)$$

В таком случае, требуемое число АС, может быть найдено при совместном решении уравнений (2.21) и (2.22) относительно $n_{сегм}$:

$$n_{сегм} \geq \frac{360^\circ}{\sqrt{\frac{([W] - A_{р.откл}) \cdot 4 \cdot \left(\frac{V_{кр}}{\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot S_{пр} \cdot \pi}{V_{кр}} + 1 \right)}{S_{пр}^2} \cdot 180^\circ} + \left(180^\circ - 2 \cdot \arccos\left(\frac{h}{2 \cdot R}\right) \right) \cdot \pi \cdot R}}, \text{ шт.} \quad (2.23)$$

Следовательно удовлетворению условия $y_B = f(x_{1j} \dots x_{nj}) \rightarrow \min$ при постоянстве значений прочих параметров технологической системы будет соответствовать $n_{сегм} \rightarrow \max$.

При постоянных значениях размеров поперечного сечения АС увеличение числа сегментов при $R = \text{const}$ будет приводить к уменьшению геометрически возможной полной длины АС $\max(l_{сегм})$, значение которой должно удовлетворять следующему условию, определяемому из свойств равнобедренного треугольника:

$$\max(l_{сегм}) < \frac{2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{(360^\circ - \varphi_{сегм} \cdot n_{сегм})}{2} \cdot \frac{n_{сегм}}{n_{сегм}}\right)}{\sqrt{2 - 2 \cdot \cos\left(\frac{360^\circ}{n_{сегм}}\right)}}, \text{ М.} \quad (2.24)$$

Решая совместно уравнения (2.11) и (2.24) можем определить условия для нахождения максимальной геометрически возможной длины сегмента в зависимости от размеров круга и абразивного бруска-заготовки:

$$\max(l_{сегм}) < \frac{2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{(360^\circ - (180^\circ - 2 \cdot \arccos\left(\frac{h}{2 \cdot R}\right)) \cdot n_{сегм})}{2 \cdot n_{сегм}}\right)}{\sqrt{2 - 2 \cdot \cos\left(\frac{360^\circ}{n_{сегм}}\right)}}, \text{ М.} \quad (2.25)$$

Очевидно, что вылет АС l_B , определяемый разностью $l_{сегм} - l_{уст}$, выступает плечом момента изгиба сегмента от тангенциальной составляющей силы резания P_Z . Следовательно, еще одним условием, накладывающим ограничение на величину l_B ($l_{сегм}$), может выступать величина внутренних эквивалентных напряжений, возникающих при работе сегмента в условиях сложного изгиба. Для определения допустимости того или иного значения l_B ($l_{сегм}$) с точки зрения обеспечения требуемого запаса прочности могут быть использованы два подхода: определение предельно допустимой величины аналитическим путем, с выводом соответствующего алгебраического выражения из положений теории прочности или

проверочным расчетом сложнонагруженного состояния АС с использованием численных методов.

Исчерпывающее описание математического аппарата для вывода аналитических зависимостей для определения предельно допустимой величины l_b ($l_{сегм}$) при различных схемах нагружения приведено в работах [15, 68, 104, 120]. В рамках же текущего исследования рассмотрим применение подхода, основанного на выполнении проверочных расчетов численным методом, более подробное описание реализации которого будет приведено в главе 3.

Вместе с тем l_b является параметром, определяющим толщину рабочей части круга, как следствие – его потенциал наработки. Для получения формальной зависимости удельной наработки инструмента от параметров технологической системы, выразим наработку шлифовального инструмента через отношение объема снятого металла, соответствующего целому числу обработанных деталей, к разности между объемом материала АС круга в исходном состоянии и в состоянии, соответствующем предельному износу одного круга:

$$\frac{N_{дет}}{1} = \sum_{i=1}^{N_{дет}} t \cdot F_m // (W_{а.исх} - W_{а.пред.изн}), \text{ шт.}, \quad (2.26)$$

где F_m – площадь срезанного слоя металла в плане, мм²;

$W_{а.исх}$, $W_{а.пред.изн}$ – объем абразива рабочей части круга в исходном состоянии и в состоянии достижения предельного износа, мм³.

Справедливо стоит отметить, что объемы $W_{а.исх}$ и $W_{а.пред.изн}$ не являются одинаковыми, так как характеризуют разные состояния инструмента в его жизненном цикле. $W_{а.исх}$ – это первоначальный объем абразивной части круга. $W_{а.пред.изн}$ – это остаточный объем абразива, который невозможно использовать для эффективной обработки при достижении кругом предельного состояния. Данное состояние регламентировано требованиями безопасности (например, по минимально допустимому радиусу), при котором дальнейшая эксплуатация инструмента запрещена. Таким образом, разность $(W_{а.исх} - W_{а.пред.изн})$ представляет собой полезный объем абразивного материала, который непосредственно расходуется на сьем припуска за один межправочный цикл работы круга. Данный подход позволяет установить прямую корреляцию между расходом инструмента и результативностью процесса, что необходимо для объективной оценки удельной наработки и экономической эффективности технологии.

Для рассматриваемой конструкции шлифовального круга, разность $W_{а.исх} - W_{а.пред.изн}$, может быть определена из разности между объемом кольца, образуемого исходным радиусом и радиусом предельного износа круга и суммы объемов кольцевых секторов, образуемых

исходным радиусом и радиусом предельного износа круга, а также линиями сектора впадин круга между смежными АС. В таком случае, справедливым является следующее выражение:

$$W_{\text{а.исх}} - W_{\text{а.пред.изн}} = \pi \cdot (R^2 - R_{\text{пред.изн}}^2) - n_{\text{сегм}} \cdot \frac{\pi \cdot (360^\circ - \varphi_{\text{сегм}} \cdot n_{\text{сегм}})}{n_{\text{сегм}} \cdot 360^\circ} \cdot (R^2 - R_{\text{пред.изн}}^2) \cdot b_{\text{сегм}}, \text{ мм}^3, \quad (2.27)$$

где $R_{\text{пред.изн}}$ – радиус профиля предельного износа круга, мм.

После преобразования выражения (2.26) получим:

$$\frac{N_{\text{дет}}}{1} = \sum_{i=1}^{N_{\text{дет}}} t \cdot F_{\text{м}} // ((R^2 - R_{\text{пред.изн}}^2) \cdot (\pi - n_{\text{сегм}} \cdot \frac{\pi \cdot (360^\circ - (180^\circ - 2 \cdot \arccos(\frac{h_{\text{сегм}}}{2 \cdot R})) \cdot n_{\text{сегм}})}{n_{\text{сегм}} \cdot 360^\circ} \cdot b_{\text{сегм}})), \text{ шт.} \quad (2.28)$$

Значение $R_{\text{пред.изн}}$ определяется требованиями безопасности, предписываемыми положениями ГОСТ Р 52588-2011 [26], согласно которым для случая закрепления абразивной части круга на переходном фланце, в качестве которого выступает корпус шлифовального круга, значение $R_{\text{пред.изн}}$ определяется как:

$$R_{\text{пред.изн}} = \frac{d_2 + 20}{2} \text{ мм}, \quad (2.29)$$

где $d_2 = D_{\text{к}}$ – наибольший наружный диаметр переходного фланца (корпуса) шлифовального круга, значение которого может быть найдено как:

$$D_{\text{к}} = (R - (l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}})) \cdot 2, \text{ мм}. \quad (2.30)$$

Отсюда, получаем:

$$R_{\text{пред.изн}} = (R - (l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}})) + 10, \text{ мм}. \quad (2.31)$$

Таким образом, при равных значениях прочих параметров технологической системы условие $N_{\text{дет}} \rightarrow \text{max}$, будет выполняться при $R_{\text{пред.изн}} \rightarrow \text{min}$, что при $l_{\text{уст}} = \text{const}$ и $R = \text{const}$ достигается при $l_{\text{сегм}} \rightarrow \text{max}$. При этом, необходимо принять допущение о том, что увеличение $l_{\text{сегм}}$ при прочих равных условиях оказывает пренебрежительно малое влияние на интенсивность износа круга, связанную с увеличением изгибающего момента, действующего на АС.

Рассмотрим подбор конструктивных параметров круга с точки зрения оптимального проектирования во взаимосвязи с режимными параметрами обработки и макрогеометрическими характеристиками обработанной поверхности на примере произвольной конфигурации сборного ПШК с радиусом периферии $R = 0,1$ м. Найдем угол дуги сектора рабочего сегмента:

$$\varphi_{\text{сегм}} = 180^\circ - 2 \cdot \arccos\left(\frac{0,02}{2 \cdot 0,1}\right) = 11,5^\circ.$$

В соответствии с рекомендациями, приведенными в [2, 66, 72, 89, 99, 121], а также ограничениями, устанавливаемыми [26], зададимся следующими диапазонами значений режимных параметров обработки: $V_{\text{кр}} = 20 - 80$ м/с, $S_{\text{пр}} = 0,05 - 0,25$ м/с. Тогда, в соответствии с выражением (2.20), произведем определение расчетного числа АС, при котором будет соблюдаться условие сохранения непрерывности контакта рабочей поверхности круга с поверхностью заготовки. Результат построения графика зависимости $n_{\text{сегм}} = f(t, V_{\text{кр}}, S_{\text{пр}}, R, \varphi_{\text{сегм}})$ для заданных условий работы шлифовального круга представлен на рисунке 2.3.

Следовательно, для рассматриваемого диапазона параметров обработки, условие непрерывности контакта рабочей поверхности круга с заготовкой выполняется при условии что $n_{\text{сегм}} > 27$ шт. Далее, ориентируясь на результаты проведенных ранее исследований [137, 159] (рис. 1.5), зададимся некоторым произвольным диапазоном значений числа АС $n_{\text{сегм}} = 10 - 32$ шт., охватывающим области как прерывистого, так и непрерывного контакта рабочей поверхности круга с заготовкой, для которого выполним построение графиков зависимости $\max(l_{\text{сегм}}) = f(n_{\text{сегм}})$ в соответствии с выражением (2.25) при $R = 0,1$ м и $\varphi_{\text{сегм}} = 11,5^\circ$, вид которого представлен на рисунке 2.4. Для наглядности, на графике также отобразим характер влияния рассматриваемых геометрических параметров на значения отдельных целевых функций критериев повышения эффективности процесса прерывистого шлифования титановых сплавов (при равных значениях прочих параметров).

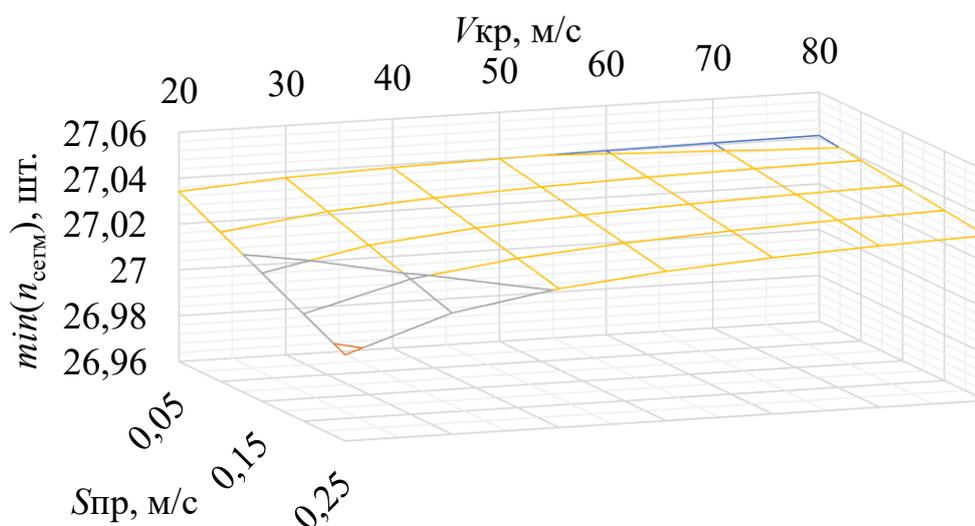


Рис. 2.3. График зависимости $\min(n_{\text{сегм}}) = f(t, V_{\text{кр}}, S_{\text{пр}}, R, \varphi_{\text{сегм}})$ по условию непрерывности контакта рабочей поверхности периферии круга с поверхностью заготовки

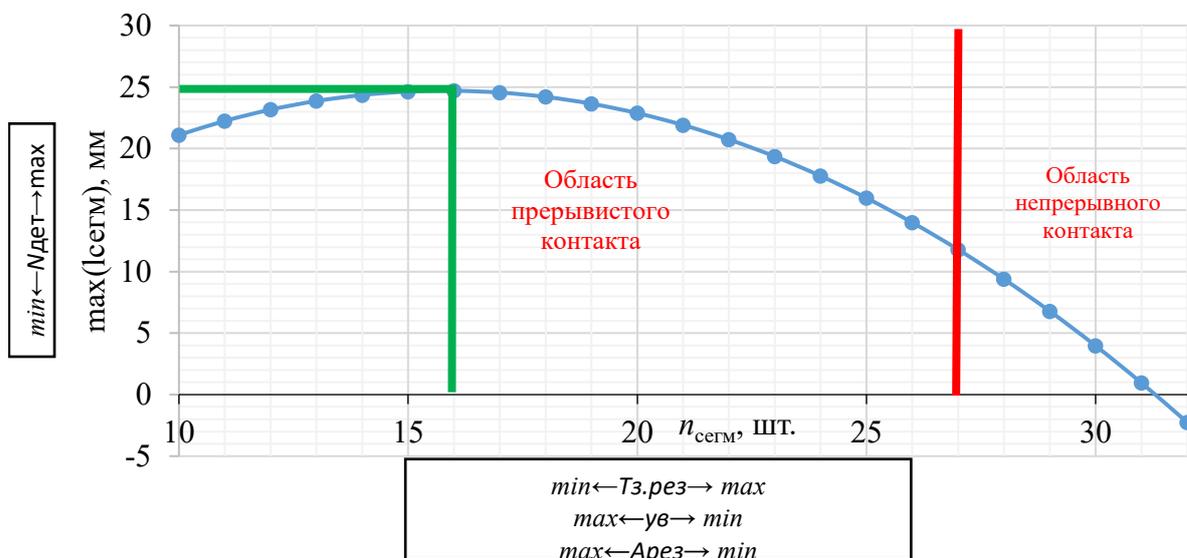
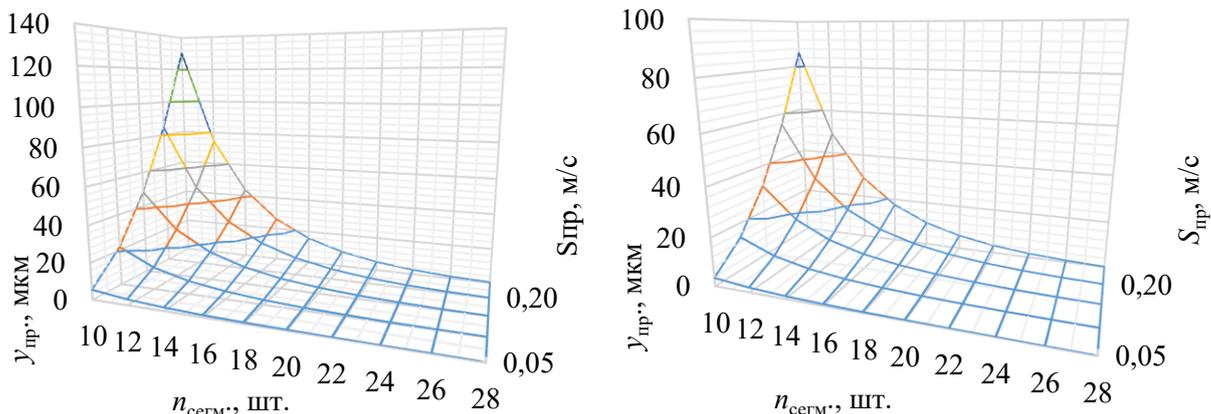


Рис. 2.4. График зависимости $\max(l_{\text{сегм}}) = f(n_{\text{сегм}})$ при $R = 0,1$ м, $b_{\text{сегм}} \times h_{\text{сегм}} = 30 \times 20$ мм

Анализ графика, представленного на рисунке 2.4 позволяет установить, что при значениях числа АС, превышающих $n_{\text{сегм}} = 16$, дальнейшее увеличение их числа приводит к снижению возможной длины сегмента вплоть до отрицательных значений, что говорит о невозможности изготовления сегмента при данных параметрах. При этом ожидаемо возникают взаимоисключающие условия: с одной стороны, уменьшение количества АС способствует уменьшению температуры в зоне резания (что следует из результатов проведенных ранее исследований) и увеличению значений зависимой функции наработки круга, с другой стороны, это может способствовать ухудшению динамики технологической системы и, как следует из выражения (2.22) – увеличению составляющей высоты волнистости, обусловленной прерывистостью процесса резания.

С учетом того, что при прочих равных условиях $n_{\text{сегм}} \rightarrow \min$ всегда будет способствовать выполнению условия $T_{\text{з.рез}} \rightarrow \min$, а $l_{\text{сегм}} \rightarrow \max - N_{\text{дет}} \rightarrow \max$, уточнение значений параметров $l_{\text{сегм}}$ и $n_{\text{сегм}}$ следует выполнять с учетом их влияния на значения оставшихся зависимых целевых параметров $y_{\text{в}}$ и $A_{\text{рез}}$. В рамках текущего раздела рассмотрим более подробно теоретическую взаимосвязь между параметрами $n_{\text{сегм}}$ и $y_{\text{в}}(y_{\text{пр.}})$, для этого, для диапазона значений $n_{\text{сегм}} = 10 - 28$ шт. (шаг варьирования – 2 шт.) в соответствии с выражением (2.22), выполним построение графиков функций $y_{\text{пр.}} = f(n_{\text{сегм}}, S_{\text{пр}})$, $y_{\text{пр.}} = f(n_{\text{сегм}}, V_{\text{кр}})$ и $y_{\text{пр.}} = f(S_{\text{пр}}, V_{\text{кр}})$ при $A = 0$, $V_{\text{кр}} = 20 - 80$ м/с, $S_{\text{пр}} = 0,05 - 0,25$ м/с, результаты которого представлены на рисунке 2.5.



а б
Рис. 2.5. 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

Из представленных графиков следует, что для рассматриваемых диапазонов варьирования параметров обработки по мере уменьшения значений числа режущих элементов, окружных скоростей резания и подач до субминимальных значений, наблюдается радикальный рост составляющей высоты волнистости, обусловленной прерыванием процесса резания. В то же время, по мере увеличения количества АС, скорости продольной подачи и окружной скорости круга, можно увидеть выполаживание линий графиков функций, свидетельствующее об относительном уменьшении влияния изменения значений указанных переменных на снижение составляющей волнистости $y_{пр}$.

С целью визуализации степени влияния увеличения количества АС на величину составляющей волнистости, обусловленной прерыванием процесса резания, введем показатель относительной высоты волнистости η , определяемый отношением текущего значения высоты волнистости к максимальному в пределах заданной выборки значений переменных:

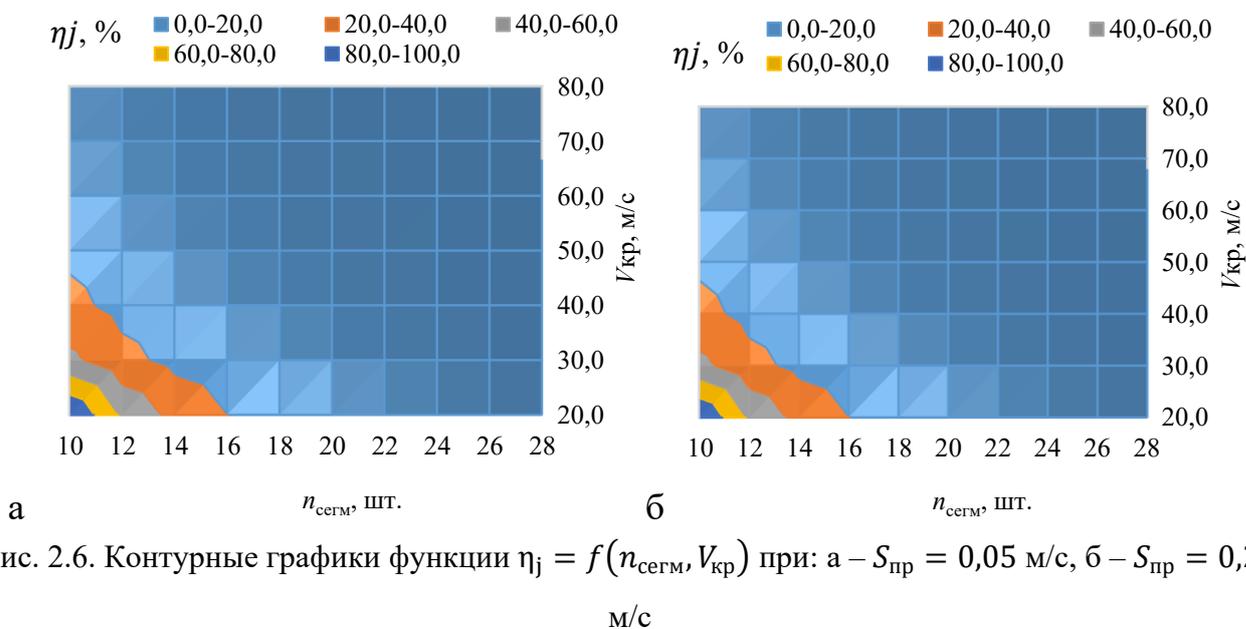
$$\eta = \frac{y_{приjk}}{\max\{y_{приjk}\}} \cdot 100\%, \quad (2.32)$$

где $y_{приjk}$ – текущее значение высоты волнистости для i -го значения $n_{сегм}$, j -го значения $S_{пр}$ и k -го значения $V_{кр}$, мкм;

$\max\{y_{приjk}\}$ – максимальное значение высоты волнистости для всего диапазона сочетаний режимов, мкм.

Ввиду того, что в состав переменных функции составляющей высоты волнистости, обусловленной прерыванием процесса резания, входят как ограниченно управляемые ($n_{сегм}$), так и управляемые параметры ($S_{пр}, V_{кр}$), то использование предложенного параметра позволит уточнить, в каких зонах параметров технологической системы регулирование $y_{пр}$ рационально

производить изменением конструктивных характеристик круга, а в каких – изменением режимных параметров. Далее, на основании определенных ранее значений составляющей высоты волнистости, обусловленной прерыванием процесса резания, выполним построение контурных графиков функции $\eta_j = f(n_{\text{сегм}}, V_{\text{кр}})$ для двух крайних значений рассматриваемого диапазона скоростей подачи $S_{\text{пр}} = 0,05$ и $0,25$ м/с, вид которых представлен на рисунке 2.6.



Из рассмотрения приведенных графиков следует, что для рассматриваемых условий обработки наблюдается достаточно четкое дифференцирование значений числа АС по зонам влияния на составляющую высоты волнистости, обусловленную прерыванием процесса резания. С практической точки зрения, выбор значения $n_{\text{сегм}}$ по параметру η_j , при неопределенности $[W]$, может быть выполнен с опорой на известное соотношение 80/20, заложенное в законе Парето, т.е. 80 % снижения относительно максимального значения составляющей высоты волнистости, обусловленной прерыванием процесса резания, может достигаться увеличением числа АС, в то время как для остальных 20 % (т.е. в зоне малого влияния $n_{\text{сегм}}$ на $u_{\text{пр}}$), снижение может быть достигнуто посредством регулирования режимных параметров обработки. Указанный подход позволяет достичь максимизации диапазона регулирования режимных параметров обработки, что позволит избежать возникновения некоторых конфликтов между целевыми функциями.

В рассматриваемом же случае при значениях $n_{\text{сегм}} \geq 16$ шт., относительная высота волнистости во всем рассматриваемом диапазоне значений $S_{\text{пр}}$ и $V_{\text{кр}}$ составляет $\eta \leq 20\%$, следовательно, предложенный выше принцип выполняется, а целевое значение $[h_{\text{в}}]$ может быть достигнуто подбором режимных параметров. Причем, во всех случаях окончательное

уточнение значения $n_{\text{сегм}}$. должно производиться с учетом выполнения вышестоящего по иерархии задач условия $T_{\text{з.рез}} < T_{\text{ф.пер}}$ и достижения требуемого качества обработанной поверхности по параметрам $[h_{\text{в}}]$ и шероховатости.

Нельзя не отметить и необходимость выполнения условия достижения целевой функции $A_{\text{рез}} = f(x_{1j} \dots x_{nj}) \rightarrow \min$, противоречие по отношению к которой возникает при $n_{\text{сегм}} \rightarrow \min$. Однако, согласно сформулированной ранее гипотезе, обеспечение выполнения указанного условия сводится к «успокоению» динамики системы за счет использования АС на основе вулканитовой связке. В связи с этим, при установлении состоятельности выдвинутой гипотезы, условиями указанной целевой функции при выборе конструктивных характеристик круга можно пренебречь для предупреждения избыточного усложнения алгоритма проектирования. К тому же, число АС $n_{\text{сегм}}$ оказывает опосредованное влияние на величину параметра $A_{\text{рез}}$ через частоту контактов (ударов) АС с поверхностью заготовки, которая также может регулироваться посредством изменения окружной скорости вращения $V_{\text{кр}}$, что свидетельствует о наличии резерва для достижения указанной целевой функции и в области управляемых режимных параметров.

2.3. Выводы по главе 2

1. Разработана конструкция и технология изготовления прерывистого шлифовального круга с АС на основе вулканитовой связки для плоского шлифования, отличающегося высокими технологичностью изготовления и степенью унификации.

2. Сформулированы условия обеспечения непрерывности контакта периферии АС с поверхностью заготовки с учетом влияния конструктивных характеристик круга и режимных параметров обработки.

3. Сформулированы аналитические зависимости для определения высоты и количества АС с учетом влияния конструктивных характеристик круга и режимных параметров обработки.

4. Установлено, что в широком диапазоне варьирования значений скоростей подач и рабочих скоростей круга, достигается относительное снижение составляющей высоты волнистости, обусловленной прерыванием процесса резания, от 80 % и более от максимальных значений для рассматриваемых условий обработки при количестве АС 16 шт. и более.

ГЛАВА 3. Моделирование процесса прерывистого шлифования

3.1. Моделирование напряженно-деформированного состояния абразивных сегментов

В целом, механика процесса резания на уровне единичного абразивного зерна при прерывистом шлифовании не отличается от сплошного шлифования, в связи с чем для нахождения численных значений составляющих сил шлифования, могут быть использованы зависимости, полученные Е. П. Калининым, имеющие следующий вид [46]:

— для тангенциальной составляющей силы резания:

$$P_Z = P'_Z \cdot n_{з.р.п.} \cdot F_k, \text{ Н}; \quad (3.1)$$

— для нормальной (радиальной) составляющей силы резания:

$$P_y = P'_y \cdot n_{з.р.п.} \cdot F_k, \text{ Н}, \quad (3.2)$$

где P'_Z, P'_y – составляющие силы резания на отдельных зернах, Н;

$n_{з.р.п.}$ – удельное количество режущих зерен, приходящихся на единицу площади контакта рабочей поверхности периферии круга с заготовкой, $1/\text{мм}^2$;

F_k – площадь зоны контакта периферии круга с заготовкой, значение которой может быть найдено как [46]:

$$F_k = l_k \cdot S_{\text{ПОП}}, \text{ мм}^2, \quad (3.3)$$

где $S_{\text{ПОП}}$ – поперечная подача, мм/дв. ход.

l_k – длина дуги контакта сегмента с заготовкой, мм.

Удельное количество режущих зерен, приведенное к единице площади контакта периферии круга с заготовкой, может быть найдено как [46]:

$$n_{з.р.п.} = n_{з.л.} \cdot \alpha_{\text{отн.}}, \text{ } 1/\text{мм}^2, \quad (3.4)$$

где $\alpha_{\text{отн.}}$ – относительное количество зерен, участвующих в процессе резания, д. ед.;

$n_{з.л.}$ – математически ожидаемое удельное количество зерен, приведенное к единице площади контакта периферии круга с заготовкой, определяемое из зависимости [46]:

$$n_{з.л.} = 1,15 \cdot 10^2 \cdot (31 - C)^{0,5} \cdot N^{-2} \cdot K_3^{0,5}, \text{ } 1/\text{мм}^2. \quad (3.5)$$

где C – номер структуры АС по ГОСТ 3647-80;

N – номер зернистости по ГОСТ 3647-80, 10^{-2} мм;

K_3 – коэффициент затупления, %.

Относительное количество зерен, участвующих в процессе резания, находится как [46]:

$$\alpha_{\text{отн.}} = \frac{2,77 \cdot (31 - C)^{0,33}}{N}, \text{ Д. ед.} \quad (3.6)$$

Составляющие силы резания на отдельных зернах для случая плоского шлифования могут быть найдены как [46]:

— для тангенциальной составляющей силы резания:

$$P'_Z = \frac{a_Z \cdot d_{\text{И}} \cdot \tau_s \cdot \cos \gamma}{\sin \Theta \cdot |\sin(\Theta + \gamma)| \cdot [|\text{ctg}(\Theta + \gamma)| - \mu_{\text{тр}}]} + \rho \cdot (1 - \cos \Theta) \cdot d_{\text{И}} \cdot \sigma_T + \frac{\pi \cdot d_{\text{И}}}{4} \cdot \sigma_T \cdot \mu_{\text{тр}} + \frac{a_Z \cdot d_{\text{И}} \cdot \mu_{\text{трps}}}{\sin \Theta \cdot |\sin^2(\Theta + \gamma)| \cdot [|\text{ctg}(\Theta + \gamma)| - \mu_{\text{трps}}] \cdot [|\text{ctg}(\Theta + \gamma)| - \mu_{\text{тр}}]}, \text{ Н;} \quad (3.7)$$

— для нормальной (радиальной) составляющей силы резания:

$$P'_y = \frac{a_Z \cdot d_{\text{И}} \cdot \tau_s \cdot \sin \gamma}{\sin \Theta \cdot |\sin(\Theta + \gamma)| \cdot [\text{ctg}(\Theta + \gamma) - \mu_{\text{тр}}]} + \rho \cdot (1 - \cos \Theta) \cdot d_{\text{И}} \cdot \sigma_T \cdot \text{ctg} \frac{\Theta}{2} + \frac{\pi \cdot d_{\text{И}}}{4} \cdot \sigma_T + \frac{a_Z \cdot d_{\text{И}} \cdot \tau_s \cdot \mu_{\text{трps}} \cdot \cos(\Theta + \gamma) \cdot [\text{tg}(\Theta + \gamma)] \cdot \sin \gamma}{\sin \Theta \cdot \sin^2(\Theta + \gamma) \cdot [\text{ctg}(\Theta + \gamma) - \mu_{\text{трps}}] \cdot [\text{ctg}(\Theta + \gamma) - \mu_{\text{тр}}]}, \text{ Н,} \quad (3.8)$$

где $d_{\text{И}}$ – диаметр площадок износа вершин единичных абразивных зерен, участвующих в резании, мм;

$\mu_{\text{тр}}$, $\mu_{\text{трps}}$ – коэффициенты трения в паре «металл-абразив» по внутренней и внешней сторонам абразивного зерна;

$\Theta = 20^\circ$ – угол сдвига стружки при микрорезании;

$\gamma = -50^\circ$ – передний угол абразивного зерна;

$\tau_s = 1,7 \cdot \sigma_B$ – касательные напряжения сдвига обрабатываемого материала, МПа;

σ_B – предел прочности обрабатываемого материала, МПа;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

$\rho = 0,03$ мм – радиус скругления на площадке износа;

a_Z – толщина слоя срезаемого металла, приведенная к единичному абразивному зерну, мм.

Диаметр площадок износа единичных абразивных зерен, участвующих в процессе резания, может быть найден как [46]:

$$d_{\text{И}} = 10^{-2} \cdot (31 - C)^{-0,25} \cdot N \cdot K_3^{0,25}, \text{ мм,} \quad (3.9)$$

Толщина слоя, срезаемого единичным абразивным зерном может быть найдена как [111]:

$$a_Z = R_\phi - \sqrt{R_\phi^2 - 2 \cdot \frac{S_{\text{пр}} \cdot l_p}{V_{\text{кр}}} \cdot \sqrt{2 \cdot R_\phi \cdot t - t^2} + \left(\frac{S_{\text{пр}} \cdot l_p}{V_{\text{кр}}}\right)^2}, \text{ м,} \quad (3.10)$$

где l_p – среднее расстояние между режущими зернами, определяемое с учетом прерывания процесса резания [111]:

$$l_p = \frac{1,59 \cdot 10^{-5} \cdot Na^2}{(31-c)^{\frac{2}{3}} \cdot h_u} + l_2, \text{ м}, \quad (3.11)$$

где Na – размер ячейки нижнего сита по ГОСТ 9206-80, мкм;

h_u – радиальный износ рабочей поверхности круга, определяемый как [46]:

$$h_u = \frac{70 \cdot d_n^2}{N}, \text{ м}. \quad (3.12)$$

Как показывают исследования, проведенные Д. В. Старшевым [111] и А. В. Смирновым [104], для прерывистого шлифования характерным является изменение значения тангенциальной составляющей силы резания в соответствии с закономерностью, график которой представлен на рисунке 3.1.

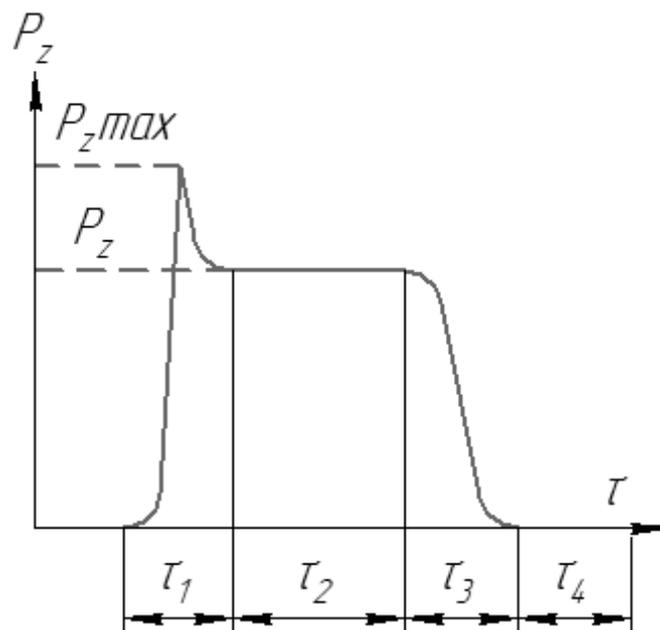


Рис. 3.1. Характерный график функции $P_z(\tau)$, где: τ_1 – время врезания АС, τ_2 – время работы АС, τ_3 – время выхода АС из контакта с заготовкой, τ_4 – время прохождения впадины; $P_z \max$ – пиковое значение тангенциальной составляющей силы резания, P_z – тангенциальная составляющая силы резания

Для определения пикового значения тангенциальной составляющей силы резания, возникающей в момент внедрения АС в материал заготовки Д. В. Старшевым [111] предложено использование коэффициента динамичности, выражение для определения численного значения которого имеет вид:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{V_{кр}^2}{g \cdot \delta_{ст}}}, \quad (3.13)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$\delta_{ст}$ – абсолютная деформация стружки при статическом приложении силы, определяемая как [111]:

$$\delta_{ст} = \frac{P_{Zcy} \cdot l_{cp}}{E \cdot a_z \cdot d_{II}}, \text{ мм}, \quad (3.14)$$

где E – модуль упругости обрабатываемого материала, кг/мм²;

l_{cp} – длина дуги профиля среза, формируемого единичным АС, мм;

P_{Zcy} – сила преодоления упругой деформации металла [111]:

$$P_{Zcy} = \frac{2 \cdot \tau \cdot a_z \cdot d_{II}}{\sin\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180}\right)}, \text{ кг}, \quad (3.15)$$

где τ – предел прочности обрабатываемого материала на срез [111]:

$$\tau = \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}}, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.16)$$

где σ_B – предел выносливости обрабатываемого материала, кг/мм².

Пиковое значение тангенциальной силы резания в момент внедрения в материал заготовки может быть найдено как:

$$P_{Zmax} = k_d \cdot P_Z, \text{ Н}. \quad (3.17)$$

Необходимо справедливо отметить, что при использовании описанных моделей для определения составляющих силы резания будут иметь место погрешности, обусловленные влиянием факторов, сложно поддающихся аналитическому выражению, таких как: налипание металла на поверхность режущих зерен, локальное изменение физико-механических свойств металла под действием высоких температур и давлений и т.д. В случае изменения прочностных характеристик металла по мере увеличения температуры в зоне резания, достаточно эффективным решением является увеличение количества итераций при решении задач моделирования процесса резания.

В соответствии с требованиями нормативной документации [26] шлифовальный круг должен удовлетворять условию обеспечения определенного запаса прочности при воздействии центробежных сил. Однако, особенности динамики прерывистого шлифования, потенциально могут создавать условия (удар при взаимодействии сегментов с заготовкой, возникновение изгибающего момента) для нарушения механической целостности АС, что определяет актуальность проведения имитационного моделирования их работы для реализуемых на практике схем нагружения.

Для определения прочности материалов в настоящее время существует множество критериев прочности [83, 120], однако, с точностью, приемлемой для решения большинства инженерных задач, для описания сложноподвижного состояния хрупких материалов наиболее широкое распространение в практике получил критерий прочности Мора, согласно

которому, величина эквивалентных напряжений, возникающих в произвольной точке твердого тела, может быть определена в соответствии со следующей зависимостью:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1 - k \cdot \sigma_3, \text{ МПа}, \quad (3.18)$$

где σ_1, σ_3 – максимум и минимум главных напряжений, МПа;

$k = \frac{\sigma_{\text{п}}^{\text{р}}}{\sigma_{\text{п}}^{\text{с}}}$ – коэффициент неравнопрочности;

$\sigma_{\text{п}}^{\text{р}}, \sigma_{\text{п}}^{\text{с}}$ – предел прочности материала на разрыв и сжатие, МПа.

Основным параметром, ограничивающим скоростной режим работы шлифовального круга, выступает прочность материала АС круга к воздействию растягивающих напряжений, возникающих при его вращении. При свободном вращении круга помимо радиальных напряжений σ_r , связанных с действием центробежных сил, возникают значительные окружные напряжения σ_o , обусловленные воздействием кориолисовских сил, значения которых для сплошных кругов могут быть определены по известным выражениям [120]:

$$\sigma_r = 10^{-11} \cdot \frac{\rho_{\text{а.м}} \cdot \omega_{\text{кр}}^2 \cdot (3 + \mu)}{8 \cdot g} \cdot \left(R^2 + d_{\text{в}}^2 - \frac{d_{\text{в}}^2 \cdot R^2}{R_i^2} - R_i^2 \right), \text{ МПа}; \quad (3.19)$$

$$\sigma_o = 10^{-11} \cdot \frac{\rho_{\text{а.м}} \cdot \omega_{\text{кр}}^2 \cdot (3 + \mu)}{8 \cdot g} \cdot \left(R^2 + d_{\text{в}}^2 - \frac{d_{\text{в}}^2 \cdot R^2}{R_i^2} - \frac{1 + 3 \cdot \mu}{\mu + 3} \cdot R_i^2 \right), \text{ МПа}, \quad (3.20)$$

где $\rho_{\text{а.м}}$ – плотность материала АС, кг/м³.

$d_{\text{в}}$ – внутренний (посадочный) диаметр рабочей части круга, мм;

R_i – текущий радиус, мм;

μ – коэффициент Пуассона.

Однако, выбранный способ дискретизации поверхности шлифовального круга и его конструктивное исполнение делают указанные зависимости малоприменимыми для нужд определения предельных скоростей вращения. Прежде всего, сплошные шлифовальные круги рассматриваются как распределенные массы, в то время как для предлагаемого способа дискретизации в достаточно широком диапазоне вариации конструктивных характеристик (при больших радиусах и малой высоте АС) параметр $\varphi_{\text{сегм}}$ имеет относительно малое значение. В связи с этим, с учетом выбранного способа крепления АС, целесообразным представляется использование модели центробежной силы, приведенной к центру масс незакрепленной части АС с определением критических напряжений в опасном сечении.

Для рассматриваемой конструкции АС опасным является сечение *EFGH* (рис. 3.2). В данном опасном сечении будут возникать номинальные радиальные растягивающие напряжения от центробежной силы $P_{\text{ц.б}}(m_{\text{сегм.н.ч}})$, действующей на массу незакрепленной части АС $m_{\text{сегм.н.ч}}$:

$$\sigma_{r.ном}(V_{кр}) = \frac{P_{ц.б}(m_{сегм.н.ч})}{F_{EFGH}} = \frac{m_{сегм.н.ч} \cdot \left(\frac{V_{кр}}{R}\right)^2 \cdot R_{ц.т.н.ч}}{b_{сегм} \cdot h_{сегм}}, \text{ Па}, \quad (3.21)$$

где $R_{ц.т.н.ч}$ – радиус точки центра тяжести массы незакрепленной части АС, м;
 F_{EFGH} – площадь поперечного сечения сегмента, м².

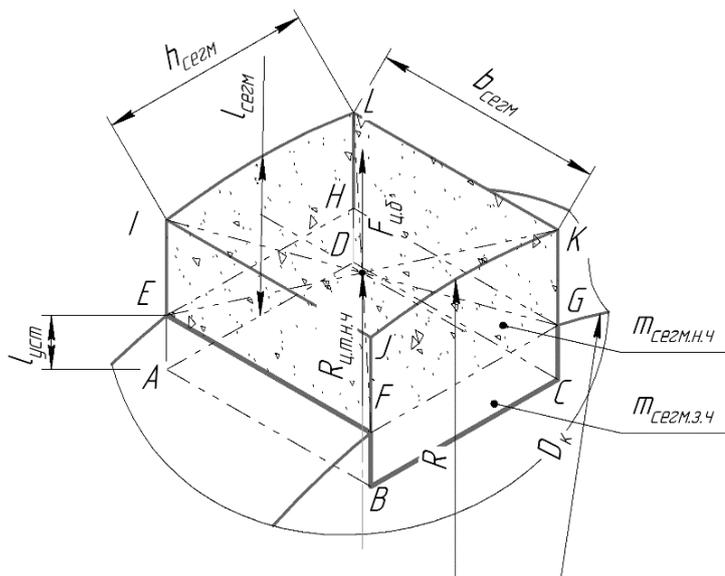


Рис. 3.2. Схема АС, нагруженного центробежной силой

В действительности, вдоль площади клеевого контакта АС с установочным пазом корпуса круга будет формироваться зона с жесткой заделкой, вдоль которой связанный абразив приобретает гораздо большую жесткость в сравнении с незакрепленной массой. Это приводит к тому, что по границам этой заделки в опасном сечении, т.е. по линиям EF и GH будут возникать линии концентрации напряжений. Тогда максимальная величина напряжений, возникающих в опасном сечении сегмента, будет определяться с учетом поправки в виде коэффициента концентрации напряжений:

$$\max(\sigma_r(V_{кр})) = \sigma_{r.ном}(P_{ц.б}) \cdot \alpha_\sigma, \text{ Па}, \quad (3.22)$$

где α_σ – коэффициент концентрации напряжений.

Величина центробежной силы, приведенной к центру масс твердого тела, определяется по известной зависимости:

$$P_{ц.б} = m \cdot \omega^2 \cdot R_{ц.т.}, \text{ Н}, \quad (3.23)$$

где $\omega = \omega_{кр} = \frac{V_{кр}}{R}$ – угловая скорость круга, рад/с;

$R_{ц.т.}$ – радиус центра тяжести массы объема АС, ограниченного опасным сечением, м;

m – масса объема незакрепленной части АС, ограниченной опасным сечением, кг.

Масса незакрепленной части сегмента сложной формы может быть найдена из произведения суммы объемов простых составляющих фигур на среднюю плотность материала АС. В рассматриваемом случае, объем незакрепленной части АС складывается из объема сегмента цилиндра $IJKL$ радиусом R и углом сегмента $\varphi_{\text{сегм}}$ и прямого параллелепипеда $EFGHIJKL$:

$$W_{IJKL} = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi_{\text{сегм}}}{180^\circ} - \sin \varphi_{\text{сегм}} \right) \cdot b_{\text{сегм}}, \text{ М}^3; \quad (3.24)$$

$$W_{EFGHIJKL} = \left(l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}} - \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} \right) \right) \cdot h_{\text{сегм}} \cdot b_{\text{сегм}}, \text{ М}^3; \quad (3.25)$$

$$m_{\text{сегм.н.ч}} = \rho_{\text{а.м}} \cdot b_{\text{сегм}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi_{\text{сегм}}}{180^\circ} - \sin \varphi_{\text{сегм}} \right) + \left(l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}} - \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} \right) \right) \cdot h_{\text{сегм}} \right), \text{ кг}. \quad (3.26)$$

Так как в обоих случаях фигуры, составляющие объем АС являются симметричными в двух плоскостях: пересекающей ось вращения круга и перпендикулярной ей, то положение центра тяжести сегмента можно найти алгебраически. Для этого необходимо определить площади профиля составных фигур и радиальные координаты центра тяжести с использованием известных зависимостей:

$$F_{IJKL} = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi_{\text{сегм}}}{180^\circ} - \sin \varphi_{\text{сегм}} \right), \text{ М}^2; \quad (3.27)$$

$$F_{EFGHIJKL} = \left(l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}} - \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} \right) \right) \cdot h_{\text{сегм}}, \text{ М}^2; \quad (3.28)$$

$$R_{\text{ц.т}(IJKL)} = \frac{h_{\text{сегм}}^3}{12 \cdot F_{IJKL}} = \frac{h_{\text{сегм}}^3}{6 \cdot R^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi_{\text{сегм}}}{180^\circ} - \sin \varphi_{\text{сегм}} \right)}, \text{ М}; \quad (3.29)$$

$$R_{\text{ц.т}(EFGHIJKL)} = \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} - \frac{\left(l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}} - \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} \right) \right)}{2}, \text{ М}; \quad (3.30)$$

$$R_{\text{ц.т}(сегм.н.ч)} = \frac{F_{IJKL} \cdot R_{\text{ц.т}(IJKL)} + F_{EFGHIJKL} \cdot R_{\text{ц.т}(EFGHIJKL)}}{F_{IJKL} + F_{EFGHIJKL}} = \frac{h_{\text{сегм}} \cdot \left(\frac{h_{\text{сегм}}^2}{12} + \left(l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} \right) \cdot \left(\sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} - \frac{\left(l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} \right)}{2} \right) \right)}{\frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varphi_{\text{сегм}}}{180^\circ} - \sin \varphi_{\text{сегм}} \right) + \left(l_{\text{сегм}} - l_{\text{уст}} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{\text{сегм}}^2}{4}} \right) \cdot h_{\text{сегм}}}, \text{ М}. \quad (3.31)$$

Тогда, центробежная сила, действующая на незакрепленную часть АС будет определяться следующей зависимостью:

$$P_{ц.б} = \rho_{а.м} \cdot b_{сегм} \cdot \left(\frac{V_{кр}}{R}\right)^2 \cdot \left(h_{сегм} \cdot \left(\frac{h_{сегм}^2}{12} + \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \cdot \left(\sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} - \frac{\left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right)}{2} \right) \right), \text{ Н.} \quad (3.32)$$

Отсюда, имеем:

$$\sigma_r(V_{кр}) = \rho_{а.м} \cdot \left(\frac{V_{кр}}{R}\right)^2 \cdot \left(\frac{h_{сегм}^2}{12} + \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \cdot \left(\sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} - \frac{\left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right)}{2} \right) \right), \text{ Па;} \quad (3.33)$$

Предельная скорость испытаний шлифовального круга связана с предельной рабочей скоростью через коэффициент запаса прочности [26], определяемый в соответствии со следующей зависимостью:

$$S_{з.п} \geq \left(\frac{V_{кр.исп}}{V_{кр.р.пред}}\right)^2, \quad (3.34)$$

где $V_{кр.р.пред}$ – предельная рабочая окружная скорость вращения круга, м/с;

$V_{кр.исп}$ – наибольшая испытательная окружная скорость круга, при которой обеспечивается его целостность при воздействии центробежных сил, м/с.

Принимая что при предельной скорости испытаний не должно происходить разрыва круга, для её определения в первом приближении (по первой теории прочности) можно принять необходимость обеспечения некоторого запаса прочности по растягивающим напряжениям. Так, при 10% запасе условие сохранения прочности круга при испытаниях может быть записано как $0,9 \cdot \sigma_{п}^p \geq \max(\sigma_r)$. В таком случае, решая совместно уравнения (3.22, 3.33 и 3.34) относительно предельной рабочей скорости вращения круга, можно определить границу области регулирования её значений:

$$V_{кр.р.пред} \leq \frac{V_{кр.исп}}{\sqrt{S_{з.п}}} = \frac{\sqrt{0,9 \cdot \sigma_{п}^p \cdot R \cdot \left(\alpha \cdot \rho_{а.м} \cdot \left(\frac{h_{сегм}^2}{12} + \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \cdot \left(\sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} - \frac{\left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right)}{2} \right) \right)}}{\sqrt{S_{з.п}}}, \text{ м/с.} \quad (3.35)$$

Для шлифовальных кругов, эксплуатируемых на шлифовальном оборудовании с открытой и закрытой рабочими зонами, положениями ГОСТ Р 52588-2011 устанавливаются значения $S_{з,п}$ равные 3 и 1,75 [26]. В таком случае, получаем:

— для шлифовальных кругов, работающих в открытой зоне:

$$V_{кр.р.пред} \leq 0,577 \cdot \sqrt{\frac{0,9 \cdot \sigma_{п}^p}{\alpha_{\sigma} \cdot \rho_{а.м} \cdot \left(\frac{h_{сегм}^2}{12} + \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \cdot \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \right)} \cdot R, \text{ м/с.} \quad (3.36)$$

— для шлифовальных кругов, работающих в закрытой зоне:

$$V_{кр.р.пред} \leq 0,756 \cdot \sqrt{\frac{0,9 \cdot \sigma_{п}^p}{\alpha_{\sigma} \cdot \rho_{а.м} \cdot \left(\frac{h_{сегм}^2}{12} + \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \cdot \left(l_{сегм} - l_{уст} - R + \sqrt{R^2 - \frac{h_{сегм}^2}{4}} \right) \right)} \cdot R, \text{ м/с.} \quad (3.37)$$

Для решения поставленных задач моделирования с получением результатов, характеризующихся высокой степенью достоверности, была выполнена эмпирическая оценка физико-механических свойств образцов материала АС марки 63С 10-Н СМ1-5 В. Данная маркировка, хотя и соответствует утратившему силу ГОСТ 2424-83, остается общепринятой в производственной практике (63С – карбид кремния зеленый; 10 – зернистость мелкая; Н – низкое содержание фракции абразивного зерна, равное 40–45 %; СМ1 – среднемягкий, 5 – плотность структуры нормальная; В – вулканитовая связка жесткая на основе каучука). Испытания проводились согласно методикам приведенными в ГОСТ 1497-84 [21] и ГОСТ 25.503-97 [22] с использованием испытательной машины Instron 5988 (рис. 3.3). Проведение испытаний образцов материала АС на растяжение выполнялось на плоских образцах без головок № 6 типа II по ГОСТ 1497-84 с начальной длиной $l_0 = 2,82 \cdot F_0 = 70$ мм (допускаемой для образцов из хрупких материалов) с полной длиной:

$$L = l_0 + 2 \cdot h_1 = 70 + 2 \cdot 80 = 230 \text{ мм,} \quad (3.38)$$

где $h_1 = 80$ мм – длина захватываемого участка образца по ГОСТ 1497-84 [21].



Рис. 3.3. Испытательная машина Instron 5988

Испытание образцов материала АС на растяжение включало в себя определение предела прочности материала на разрыв $\sigma_{\text{п}}^{\text{р}} = \sigma_{\text{в}}$ и модуля упругости материала E . Испытание образцов на сжатие включало в себя определение предела прочности материала на сжатие $\sigma_{\text{п}}^{\text{с}}$ и выполнялось с использованием призматических образцов типа III ГОСТ 25.503-97 [22] толщиной $a_0 = 20$ мм с начальной рабочей высотой $h_0 = 80$ мм. Скорость нагружения при проведении испытаний составляла $3 \text{ Н}/(\text{мм}^2 \cdot \text{с})$. Эскизы испытываемых образцов материала АС на растяжение и сжатие приведены на рисунке 3.4.

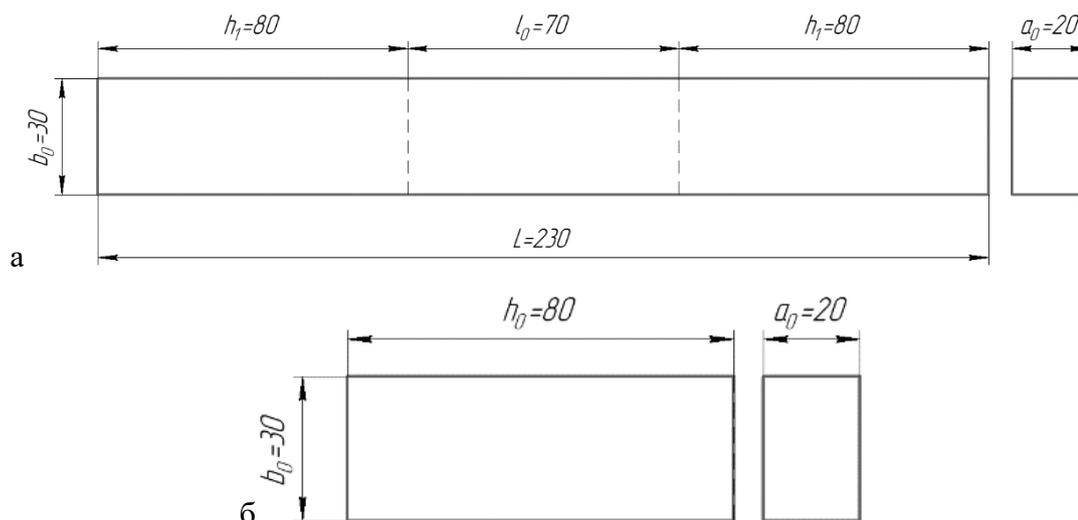


Рис. 3.4. Эскизы образцов материала АС для проведения испытаний (предельные отклонения размеров по ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 25.503-97): а – на разрыв, б – на сжатие

Изготовление образцов выполнялось с использованием ленточного шлифовального станка, контроль размеров образцов выполнялся при помощи штангенциркуля типа ШЦ-1-250 0,05 ГОСТ 166-89. Испытания материала АС на растяжение и сжатие включали в себя серию из 6 параллельных опытов по итогам которых были получены значения физико-механических свойств материала АС, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты оценки физико-механических свойств материала АС

| Параметр | Значение по итогам эксперимента №, МПа | | | | | | Ср. знач., МПа |
|--------------------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| $\sigma_{\text{п}}^{\text{p}}$ | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,6 | 11,7 | 11,7 | 11,7 |
| $\sigma_{\text{п}}^{\text{с}}$ | 51,1 | 51,2 | 51,1 | 51,1 | 51,2 | 51,1 | 51,1 |
| E | $0,73 \cdot 10^5$ | $0,73 \cdot 10^5$ | $0,73 \cdot 10^5$ | $0,73 \cdot 10^5$ | $0,73 \cdot 10^5$ | $0,73 \cdot 10^5$ | $0,73 \cdot 10^5$ |

На следующем этапе исследования физико-механических свойств материала АС было выполнено измерение его действительной плотности с использованием гравиметрического метода, в основе которого лежит оценка плотности веществ по отношению массы образцов к их объему:

$$\rho = \frac{m}{W}, \text{ г/см}^3, \quad (3.39)$$

где m – действительная масса образца, г;

W – действительный объем образца, см^3 .

Оценка средней плотности материала АС производилась по результатам измерения плотности 6 призматических образцов размерами $40 \times 30 \times 20$ мм. Измерение массы образцов выполнялось с использованием лабораторных весов типа ВК-150.1, имеющих предел измерения в 150 г, класс точности 2. Дискретность измерений составляла 0,005 г. Результаты оценки средней плотности материала АС приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты определения плотности материала АС

| Значение по итогам эксперимента №, г/см ³ | | | | | | Среднее значение, г/см ³ |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 3,520 | 3,525 | 3,525 | 3,525 | 3,525 | 3,530 | 3,525 |

Моделирование напряженного состояния АС производилось с использованием программного продукта *COMSOL Multiphysics*, обладающего широким спектром математических инструментов и технологических возможностей для решения научно-инженерных мультифизических задач. Решение задачи анализа напряженно-деформированного состояния АС производилось конечно-элементным методом в трех вариантах нагружения:

— свободное вращение круга (нагружение центробежными и кориолисовыми силами);

— нагружение силами резания в момент врезания кромки АС в материал заготовки с приложением сил к 100 % и 25 % ширины АС (рис. 3.5, а);

— нагружение силами резания при контакте по всей дуге периферии АС с материалом заготовки с приложением сил к 100% и 25% ширины АС (рис. 3.5, б).

Моделирование работы АС для всех вариантов нагружения выполнялось при объемной осесимметричной постановке задачи с использованием имитационной твердотельной электронной модели АС (рис. 3.6, а) с размерами $l_{\text{сегм}} \times b_{\text{сегм}} \times h_{\text{сегм}} = 22,5 \times 30 \times 20$ мм. Влияние корпуса круга учитывалось через граничные условия (жесткой фиксацией по площади клевого соединения сегмента и корпуса). Физико-механические свойства материала АС задавались в соответствии с результатами механических испытаний. Построение конечно-элементной модели сегмента (рис. 3.6, б) производилось при помощи тетраэдральной сетки с максимальным шагом в 1,05 мм. Граничные условия закрепления АС задавались в виде фиксированного контакта «Fixed Constraint» (рис. 3.7), прикладываемого к участкам фронтальной и тыльной граней сегмента по площади, ограничиваемой длиной, равной глубине установочного паза $l_{\text{уст}} = 5$ мм.

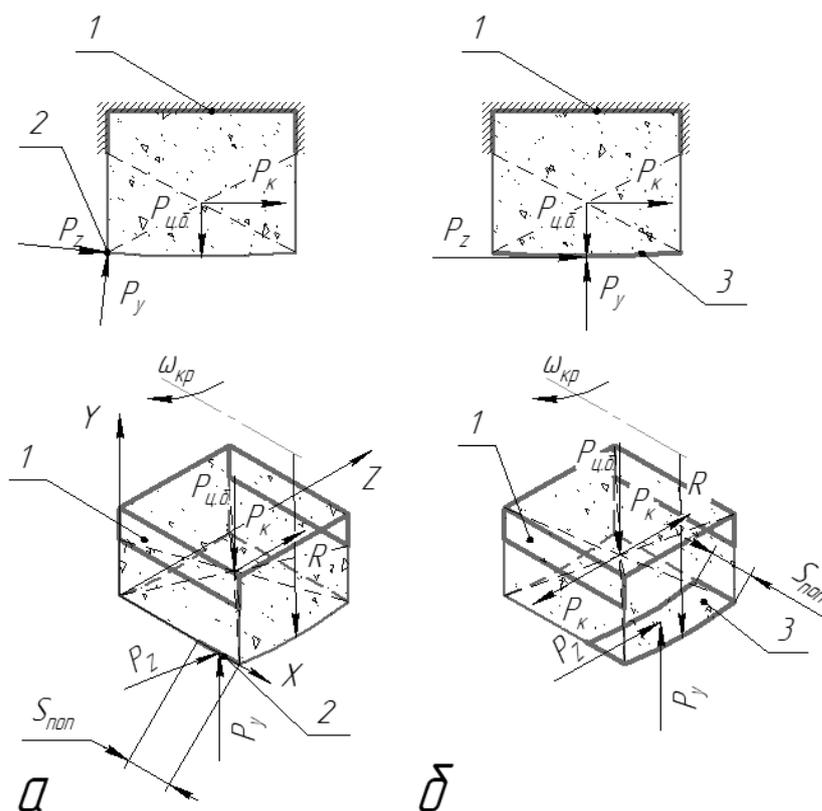


Рис. 3.5. Схема приложения нагрузок и закреплений к модели АС: а – при имитации момента «врезания» сегмента, б – при имитации полного контакта периферии сегмента с материалом заготовки; P_K – сила кориолиса; $P_{\text{ц.б.}}$ – центробежная сила; P_Z – тангенциальная составляющие силы резания; P_Y – нормальная (радиальная) составляющие силы резания

Для первого и последующих вариантов нагружения приложение сил инерции, возникающих при свободном вращении круга, выполнялось при помощи инструмента «*Rotating Frame*» с заданием необходимой угловой скорости $\omega_{кр}$. Моделирование работы сегментов при свободном вращении круга производилось для значений угловых скоростей $\omega_{кр} = 200 - 800$ рад/с, что соответствует $V_{кр} = 20 - 80$ м/с (при $R = 0,1$ м).

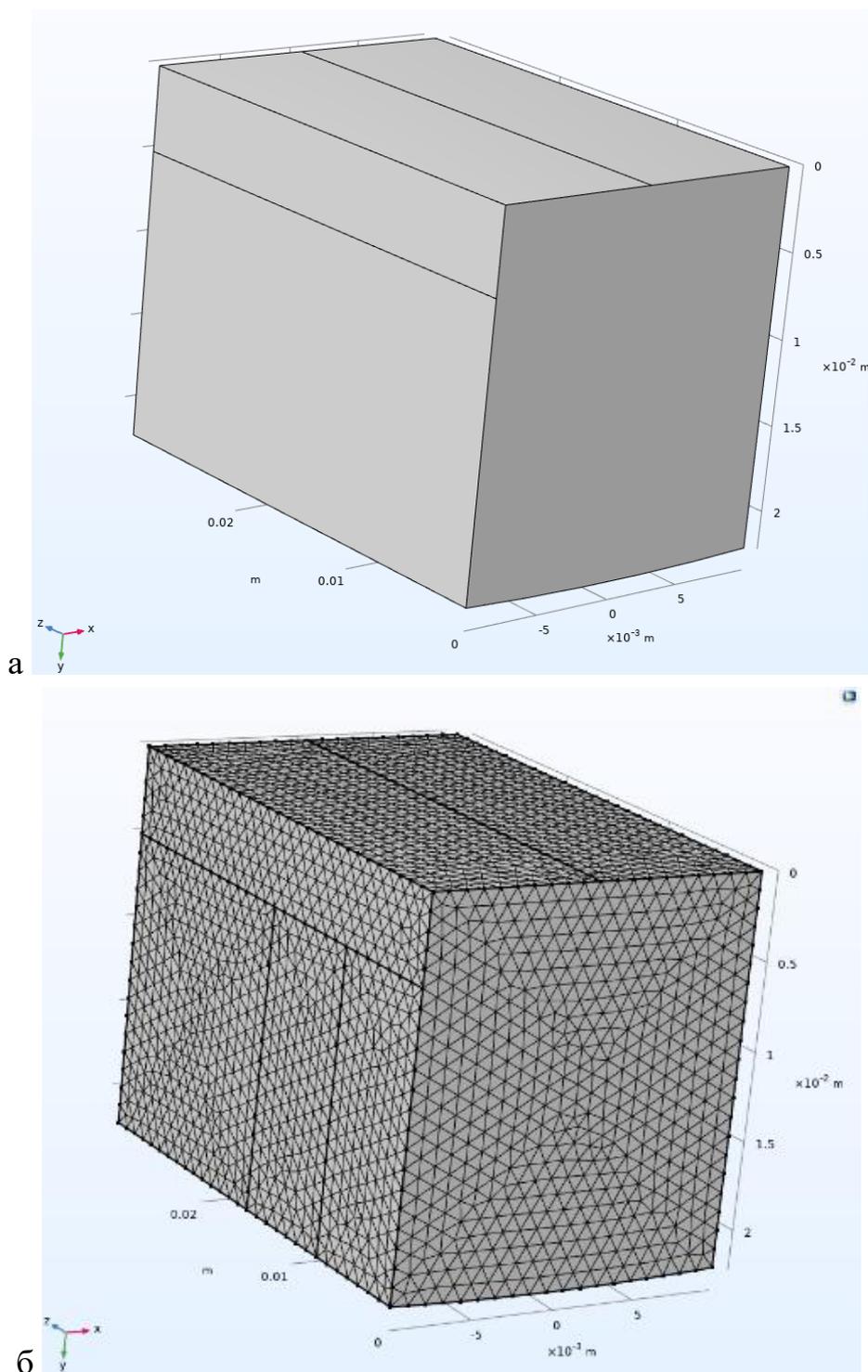


Рис. 3.6. Результат построения имитационной электронной модели АС в программной среде *COMSOL Multiphysics*: а – твердотельной, б – конечно-элементной

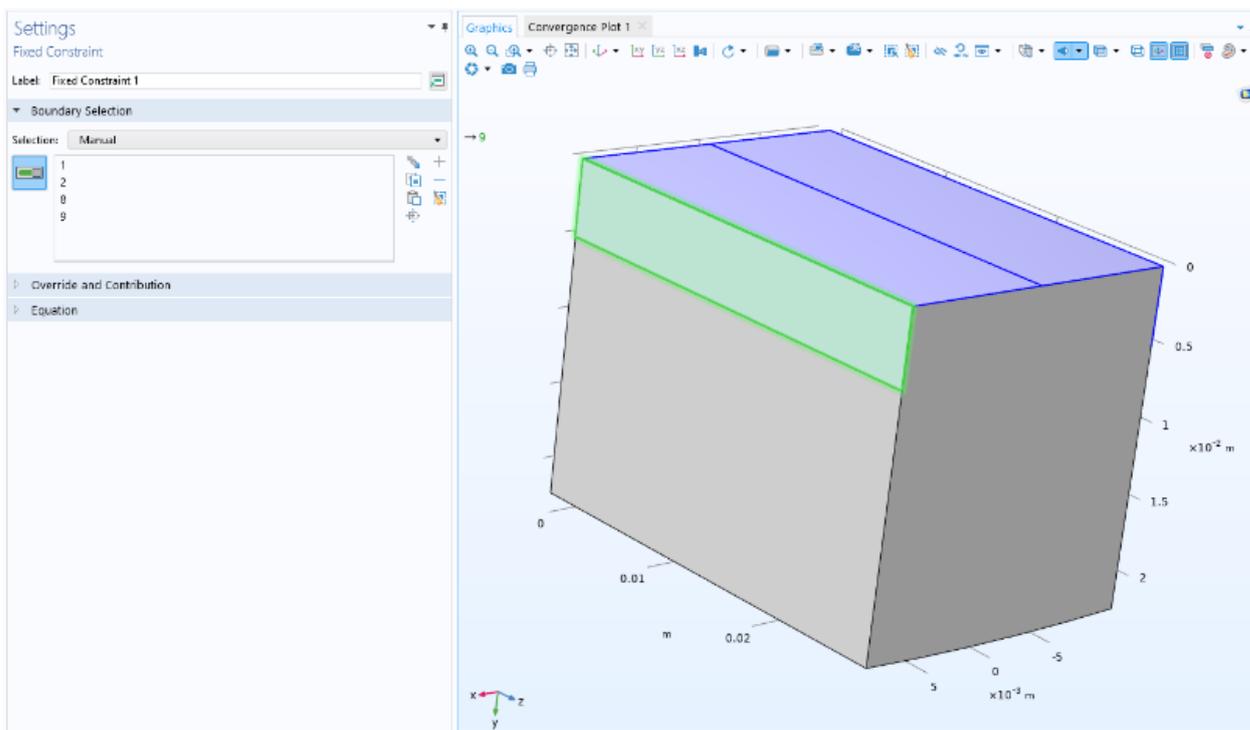


Рис. 3.7. Задание граничных условий закрепления модели АС

С целью экономии вычислительного ресурса решение задачи для рассматриваемых вариантов нагружения выполнялось при помощи стационарного линейного решателя «*Stationary*» с выводом результатов решения в виде объемных эпюр. На рисунке 3.8 представлены результаты построения объемных эпюр распределения эквивалентных напряжений (по Мору) для двух граничных значений диапазона варьирования значений угловой скорости.

При рассмотрении приведенных эпюр можно увидеть наличие выраженной зоны концентрации напряжений вдоль границы клеевого соединения, проходящей по фронтальной и тыльной поверхностям АС, что говорит о необходимости использования коэффициента концентрации напряжений при аналитическом определении границ предельной скорости работы круга. При рассмотрении характера ориентации векторов главных напряжений (рис. 3.9), за исключением зон, близких к фронтальной и тыльной контактными площадкам сегмента, можно увидеть выраженную радиальную ориентацию максимума нормальных напряжений, что говорит о доминировании радиальных растягивающих напряжений (отображаемых в виде стрелок с прямым конусом). Пиковые значения окружных и радиальных напряжений составили $\sigma_r = 1,54$ МПа и $\sigma_o = 0,2$ МПа для $\omega_{кр} = 200$ рад/с и $\sigma_r = 24,6$ МПа и $\sigma_o = 3,22$ МПа для $\omega_{кр} = 800$ рад/с.

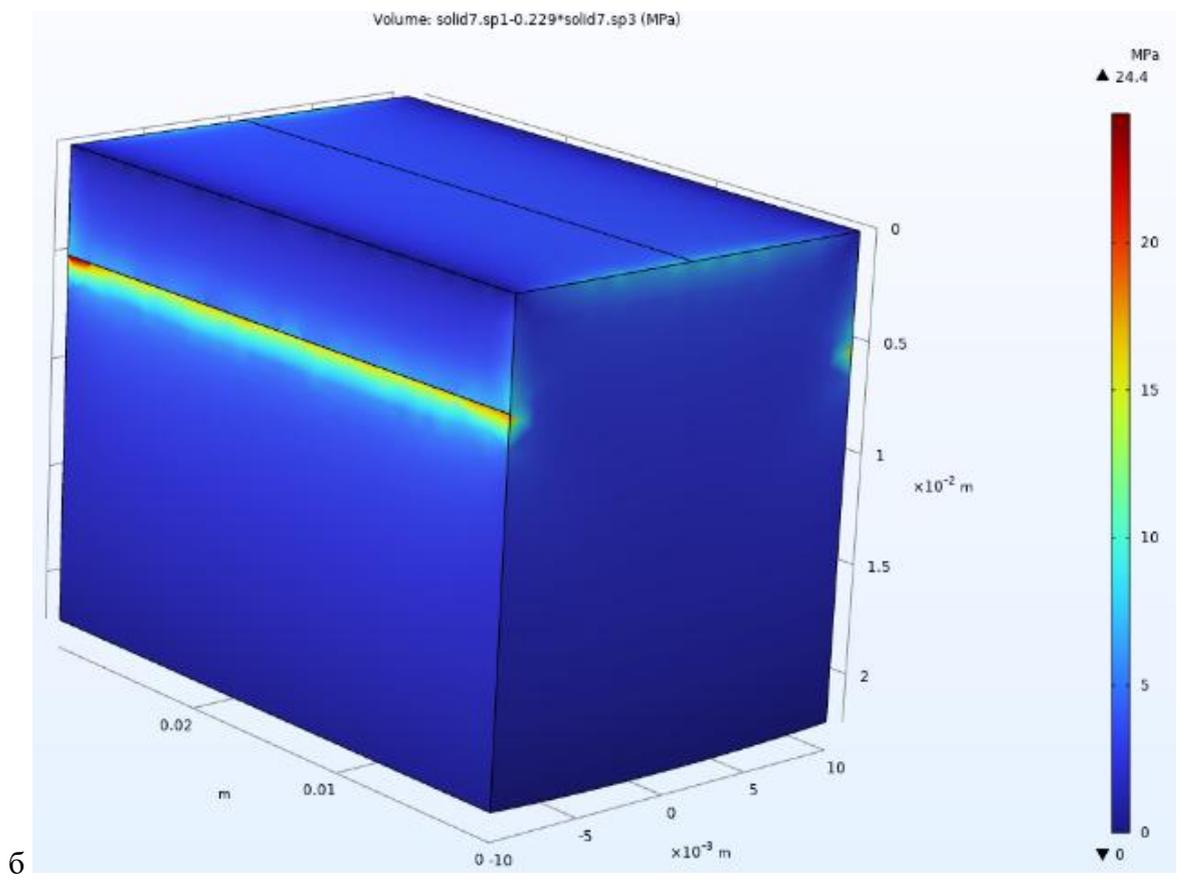
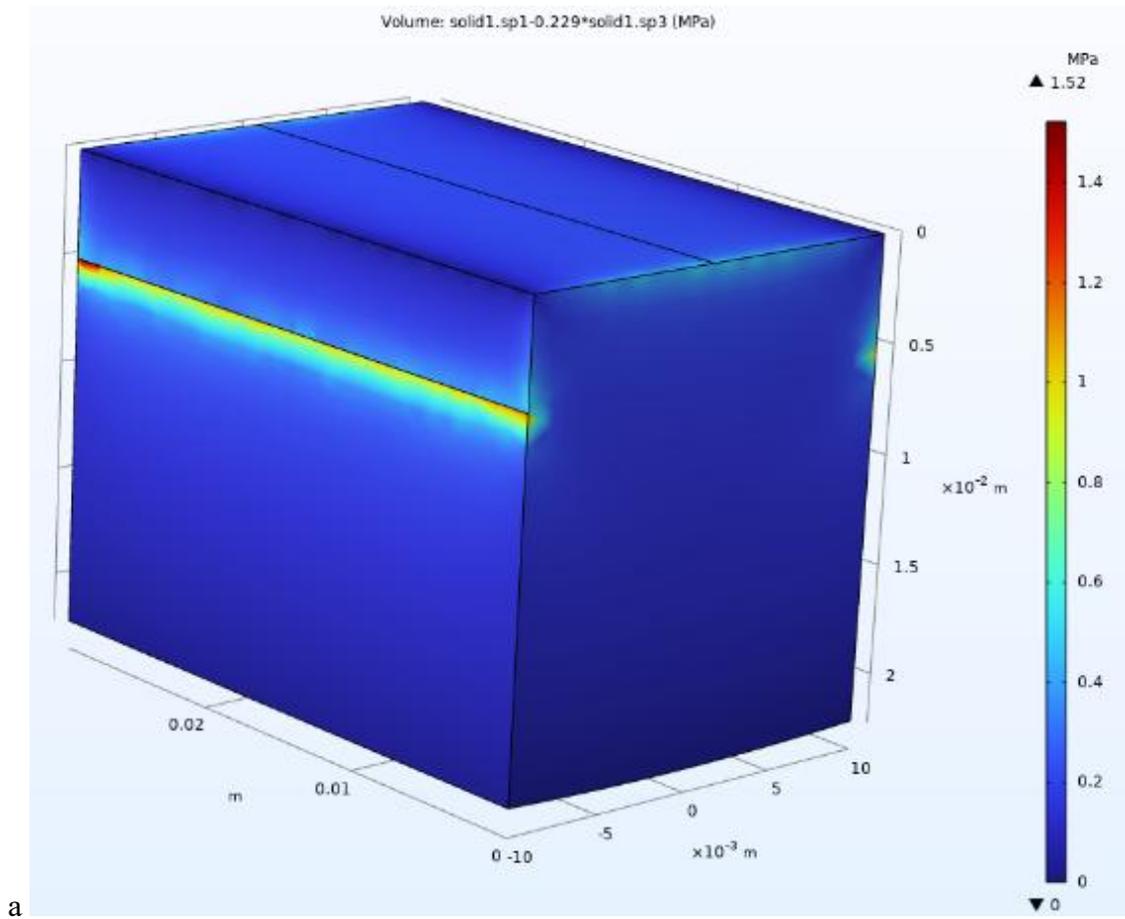


Рис. 3.8. Эпюры эквивалентных напряжений по Мору:
 а – для $\omega_{кр} = 200$ рад/с, б – $\omega_{кр} = 800$ рад/с

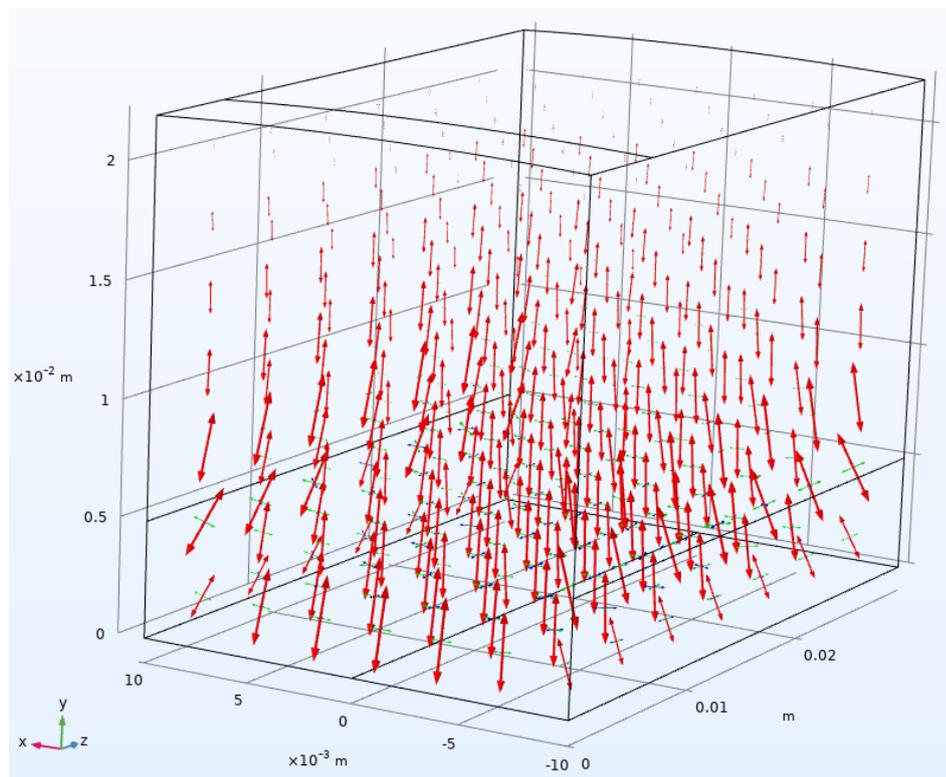


Рис. 3.9. Эпюра распределения и ориентации векторов главных напряжений для $\omega_{кр} = 800$ рад/с

При сопоставлении теоретических значений номинальных радиальных напряжений $\max(\sigma_{r,ном})$, а также значений $\max(\sigma_r)$ и $\max(\sigma_{эКВ})$ в рассматриваемом диапазоне скоростей (табл. 3.3), можно увидеть наличие линейной пропорциональной зависимости, коэффициентом которой и выступает коэффициент концентрации напряжений.

Таблица 3.3 - Результаты определения коэффициентов концентрации напряжений

| $V_{кр}, \text{ м/с}$ | $\max(\sigma_{r,ном}), \text{ МПа}$ | $\max(\sigma_r), \text{ МПа}$ | $\max(\sigma_{эКВ}), \text{ МПа}$ | $\alpha_{\sigma_{эКВ}} = \frac{\max(\sigma_{эКВ})}{\max(\sigma_{r,ном})}$ | $\alpha_{\sigma_r} = \frac{\max(\sigma_r)}{\max(\sigma_{r,ном})}$ |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 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 |

Ввиду того что использование теории прочности для определения критических эквивалентных напряжений имеет определенные погрешности, а также с учетом достаточно малой разницы между расчетными значениями $\max(\sigma_r)$ и $\max(\sigma_{эКВ})$, составляющей менее

1,2%, то для аналитического определения предельной рабочей скорости вращения круга, с точки зрения обеспечения безопасности работы, целесообразно использовать большее значение коэффициента концентрации напряжений, составляющее $\alpha_{\sigma_r} = 2,184$.

Как известно, значение коэффициента концентрации напряжений зависит от параметров геометрической конфигурации концентратора, в связи с чем была выполнена серия расчетов для условий свободного вращения с целью исследования влияния геометрических факторов на величину концентратора напряжений. В качестве варьируемых параметров рассматривались линейные размеры фронтальной и тыльной площадок контакта b_k и $l_{уст}$. Варьирование параметра $b_k = b_{сегм}$ выполнялось в диапазоне значений 5; 10 ... 150 мм (где 150 мм – наибольшая длина стандартных абразивных брусков по ГОСТ 33534-2015) с интервалом варьирования в 10 мм, а также параметра $l_{уст}$ – в диапазоне значений 5 ... 35 мм с интервалом варьирования в 5 мм. Нагрузка для всех рассматриваемых вариантов конфигурации контактных площадок соответствовала угловой скорости вращения в $\omega_{кр} = 800$ рад/с. По итогам выполненного моделирования были получены графики зависимости $\alpha_{\sigma_{эКВ}} = f(b_k = b_{сегм}); f(l_{уст})$ и $\alpha_{\sigma_r} = f(b_k = b_{сегм}); f(l_{уст})$, вид которых приведен на рисунке 3.10.

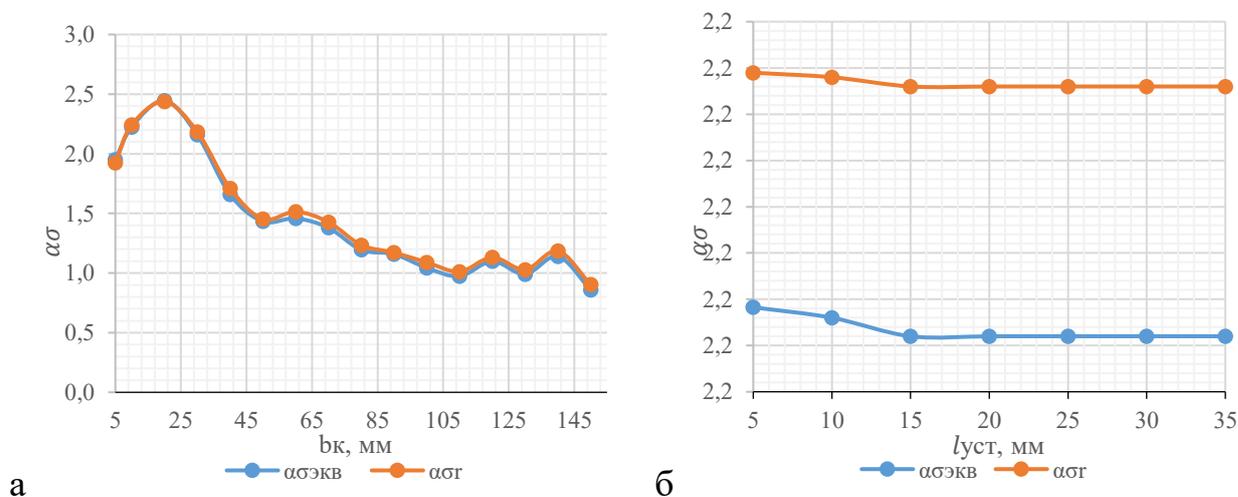


Рис. 3.10. Графики зависимости коэффициента концентрации напряжений:

$$а - \alpha_{\sigma_{эКВ}}; \alpha_{\sigma_r} = f(b_k = b_{сегм}), б - \alpha_{\sigma_{эКВ}}; \alpha_{\sigma_r} = f(l_{уст})$$

Как видно из представленных графиков, величина коэффициента концентрации напряжений находится в достаточно выраженной зависимости от протяженности линии контакта $b_k = b_{сегм}$. В отношении параметра $l_{уст}$ зависимость не выражена, а относительное изменение значений $\alpha_{\sigma_{эКВ}}$ и α_{σ_r} в пределах всего рассматриваемого диапазона варьирования значений $l_{уст}$ не превышает 0,05 %, что говорит о его пренебрежительном малом влиянии.

В аналитическом виде, зависимость $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}; \alpha_{\sigma_{\text{Г}}} = f(b_{\text{к}} = b_{\text{сегм}})$ достаточно хорошо описывается полиномиальным уравнением регрессии шестой степени (определено графическим методом) при значении коэффициента детерминации $R^2 = 0,983$:

$$\alpha_{\sigma} = a \cdot b_{\text{к}}^6 + b \cdot b_{\text{к}}^5 + c \cdot b_{\text{к}}^4 + d \cdot b_{\text{к}}^3 + e \cdot b_{\text{к}}^2 + f \cdot b_{\text{к}} + g, \quad (3.40)$$

где a, b, c, d, e, f – коэффициенты регрессии;

g – константа.

Результаты определения коэффициентов и констант уравнений регрессии для $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}; \alpha_{\sigma_{\text{Г}}} = f(b_{\text{к}} = b_{\text{сегм}})$ с использованием математического аппарата *Microsoft Excel* сводим в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 - 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 |
| $\alpha_{\sigma_{\text{Г}}}$ | $-3,0 \cdot 10^{-11}$ | 10^{-8} | $-3,0 \cdot 10^{-6}$ | 0,0002 | -0,011 | 0,2093 | 1,0983 |

Ввиду того, что экспериментальные значения коэффициентов концентрации напряжений определены по результатам численного моделирования, значения дисперсии выходной величины имеют нулевое значение. В данном случае общепринятые критерии оценки адекватности математической модели не применимы, в связи с чем, проверка адекватности математической модели производилась по результатам сравнения фактических (по результатам моделирования) и прогнозируемых (расчетных) величин целевых параметров для набора случайных значений входной величины с вычислением относительной погрешности прогноза. Результаты проверки адекватности разработанных регрессионных моделей $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}; \alpha_{\sigma_{\text{Г}}} = f(b_{\text{к}} = b_{\text{сегм}})$ сводим в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 - Результаты проверки адекватности математических моделей $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}; \alpha_{\sigma_{\text{Г}}} = f(b_{\text{к}} = b_{\text{сегм}})$

| $b_{\text{сегм}},$ мм | Экспериментальные значения | | Расчетные значения | | Относительная погрешность, % | |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}$ | $\alpha_{\sigma_{\text{Г}}}$ | $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}$ | $\alpha_{\sigma_{\text{Г}}}$ | $\alpha_{\sigma_{\text{ЭКВ}}}$ | $\alpha_{\sigma_{\text{Г}}}$ |
| 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 |

Итоги проверки адекватности разработанной регрессионной модели методом произвольного задания значения входной величины показали, что относительная погрешность прогноза во всем диапазоне принятых значений входного параметра не превышает 10,7 %, что говорит о достаточной адекватности модели для решения инженерных задач. Компенсация указанной погрешности может быть достигнута дополнительным введением коэффициента запаса при выполнении проектировочных расчетов.

Следующий этап моделирования направлен на оценку влияния сил резания, соответствующих предельной рабочей скорости вращения круга, на напряженно-деформированное состояние АС. На основании определенного коэффициента концентрации напряжений $\alpha_{\sigma_r} = 2,184$ и эмпирических данных о физико-механических свойствах материала АС брусков, с использованием математического аппарата программного продукта *Microsoft Excel* для $R = 0,1$ м и $r_b = 0,083$ мм были определены ориентировочные значения предельной рабочей скорости вращения круга $V_{кр.р.пред}$, составляющие 38,0 и 49,8 м/с для кругов работающих в открытой и закрытой зонах.

Согласно [33], абразивные круги классов твердости СМ1-СМ2 работают преимущественно в режиме частичного самозатачивания, для которого значение коэффициента затупления определяется в диапазоне $K_3 = 1,5 - 3,0\%$. Для моделирования напряженно-деформированного состояния целесообразным представляется рассмотрение наименее благоприятных условий нагружения, которым соответствует большее значение коэффициента затупления, следовательно, принимаем к расчету $K_3 = 3\%$.

Моделирование напряженно-деформированного состояния АС в рассматриваемых вариантах постановки задачи выполнялось для условий обработки титанового сплава марки ВТ15 с $\sigma_b = 1500$ МПа, $E = 10400$ кг/мм², $\mu_{тр} = \mu_{трс} = 0,66$ [99], прерывистым шлифовальным кругом твердостью СМ1, номером структуры С = 5, зернистостью $N = 10$, $D_{кр} = 0,2$ м, оснащенным АС, выполненными из брусков сечением $b_{сегм} \times h_{сегм} = 30 \times 20$ мм, $n_{сегм} = 16$ шт., без СОЖ при: $V_{кр} = 49,8$ м/с, $S_{пр} = 0,25$ м/с, $t = 0,1$ мм. Поперечная подача принималась равной $S_{Поп} = 30; 7,5$ мм/дв. ход, что соответствует 100 % и 25 % от $b_{сегм}$.

Моделирование нагружения при контакте по всей длине дуги профиля периферии АС (рис. 3.5, б) выполнено для оценки напряженно-деформированного состояния в условиях, когда длина дуги контакта l_k , определяемая по зависимости (3.3), становится сравнимой с длиной $h_{\text{сегм}}$ АС. Наиболее характерна такая ситуация для глубинного шлифования, однако она также может возникать при многопроходной обработке с увеличенными значениями поперечной подачи $S_{\text{поп}}$, глубины шлифования t и при шлифовании криволинейных поверхностей сложного профиля, где геометрия зоны контакта существенно изменяется. Такой подход позволяет оценить предельные нагрузки на АС и проверить его прочностную надежность в широком диапазоне технологических условий, включая наихудшие сценарии нагружения.

Аналитическое определение значений составляющих сил резания для моделирования напряженно-деформированного состояния АС выполнено в соответствии с выражениями (3.1), (3.2) и (3.17), результаты расчета сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 - Результаты расчета сил резания

| Составляющая силы резания | $S_{\text{поп}}$, мм/дв. ход | |
|---------------------------|-------------------------------|--------|
| | 7,5 | 30 |
| P_z | 141,8 | 567,2 |
| $P_{z\text{max}}$ | 182,5 | 730,0 |
| P_y | 698,4 | 2793,5 |

Имитация нагружения АС силами резания в программной среде *COMSOL Multiphysics* выполнялась при помощи инструментов «*Boundary Load*» для приложения распределенной по площади нагрузки к кромке АС (имитация момента врезания бруска в материал заготовки) и номинальной нагрузки к грани периферии АС (имитация работы сегмента при контакте с поверхностью заготовки по всей линии профиля периферии). Для приближения условий моделирования работы АС к реальным нагружаемая грань его твердотельной модели была преобразована в галтель радиусом 0,5 мм (имитация износа кромки). Также для минимизации погрешностей аппроксимации конечно-элементной сетки вдоль нагружаемой кромки было выполнено уменьшение размера элементов сетки с использованием инструмента «*Refine*» (рис. 3.11).

Анализ полученных эпюр напряженно-деформированного состояния АС позволяет сделать следующие выводы. При рассмотрении эпюры эквивалентных напряжений для схемы, соответствующей условиям нагружения сегмента в момент врезания в материал заготовки, можно увидеть выраженную концентрацию напряжений вдоль фронтальной кромки сегмента с достижением максимума в 49,8 МПа и 46,7 МПа для вариантов нагружения с $S_{\text{поп}} = 7,5$ мм/дв. ход и $S_{\text{поп}} = 30$ мм/дв. ход, при этом в остальном объеме сегмента, величина эквивалентных

напряжений не превышает 8–9 МПа. Вдоль линии нагружения развиваются напряжения сжатия (отображаемые в виде стрелок с обратным конусом), вектор ориентации которых стремится к результирующему вектору силы резания в объеме сегмента, а по мере приближения к фронтальной грани сегмента – к радиальному направлению.

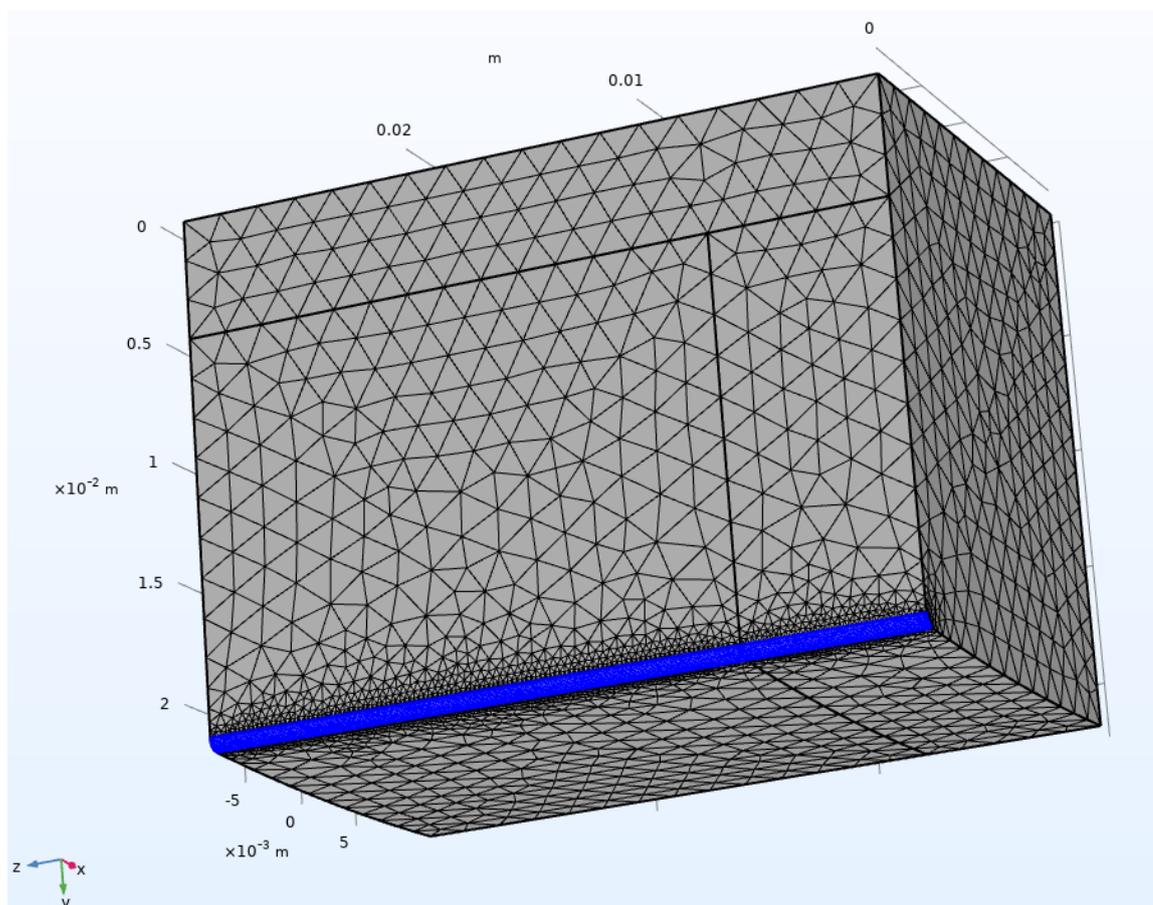


Рис. 3.11. Модификация геометрической конфигурации и конечно-элементной сетки нагружаемой кромки модели АС

При рассмотрении эпюры эквивалентных деформаций (рис. 3.14) также можно увидеть концентрацию пиковых значений статической эквивалентной деформации вдоль линии нагружения кромки сегмента с достижением максимума в 7,72 мкм и 8,29 мкм для вариантов нагружения с $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход и $S_{\text{ПОП}} = 30$ мм/дв. ход. В объеме сегмента эквивалентные деформации для обоих вариантов нагружения достаточно малы и в радиусе 5 мм от поверхности нагружаемой кромки их величина не превышает 3–4 мкм.

Аналогичным образом выполнено построение эпюр напряжений и деформаций для случая полного контакта периферии АС с материалом заготовки, результаты которого представлены на рисунках 3.15–3.19.

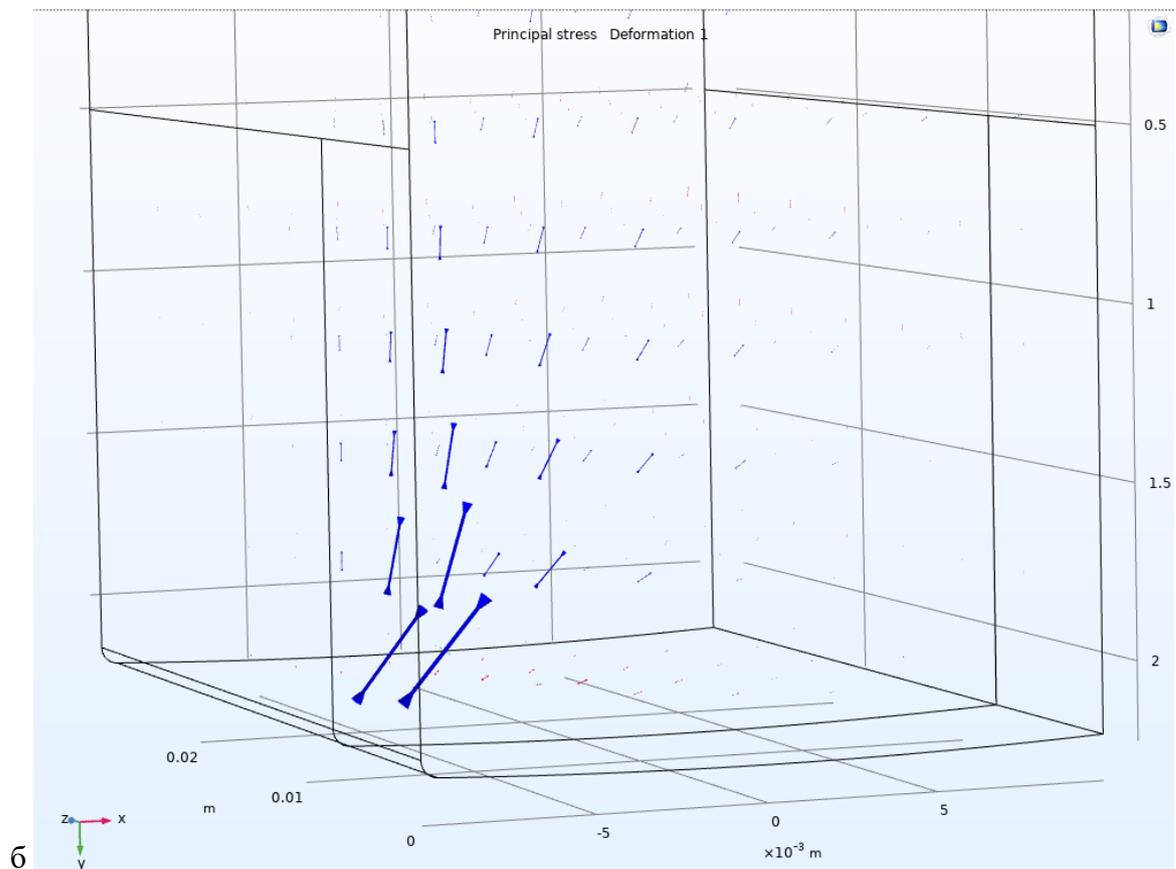
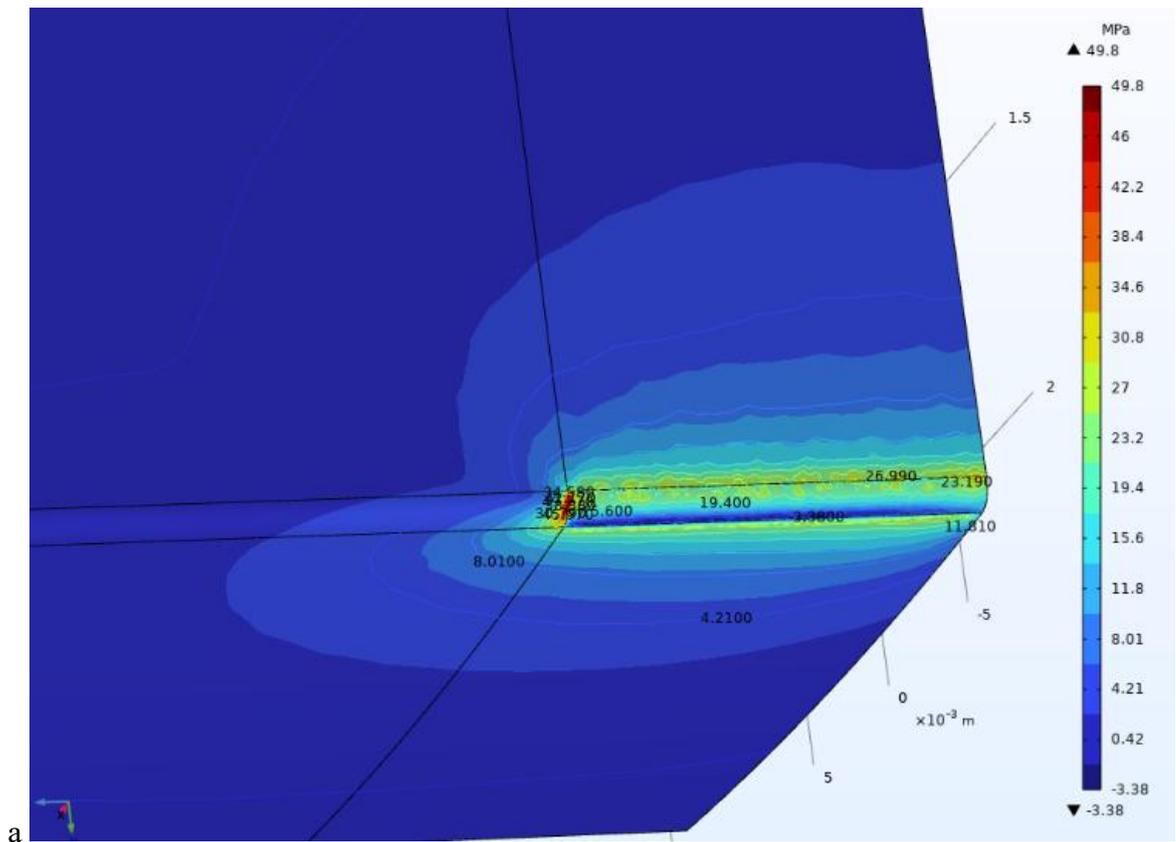


Рис. 3.12. Эпюры напряженного состояния сегмента в момент врезания в материал заготовки при $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход: а – эквивалентных напряжений, б – векторов ориентации главных напряжений

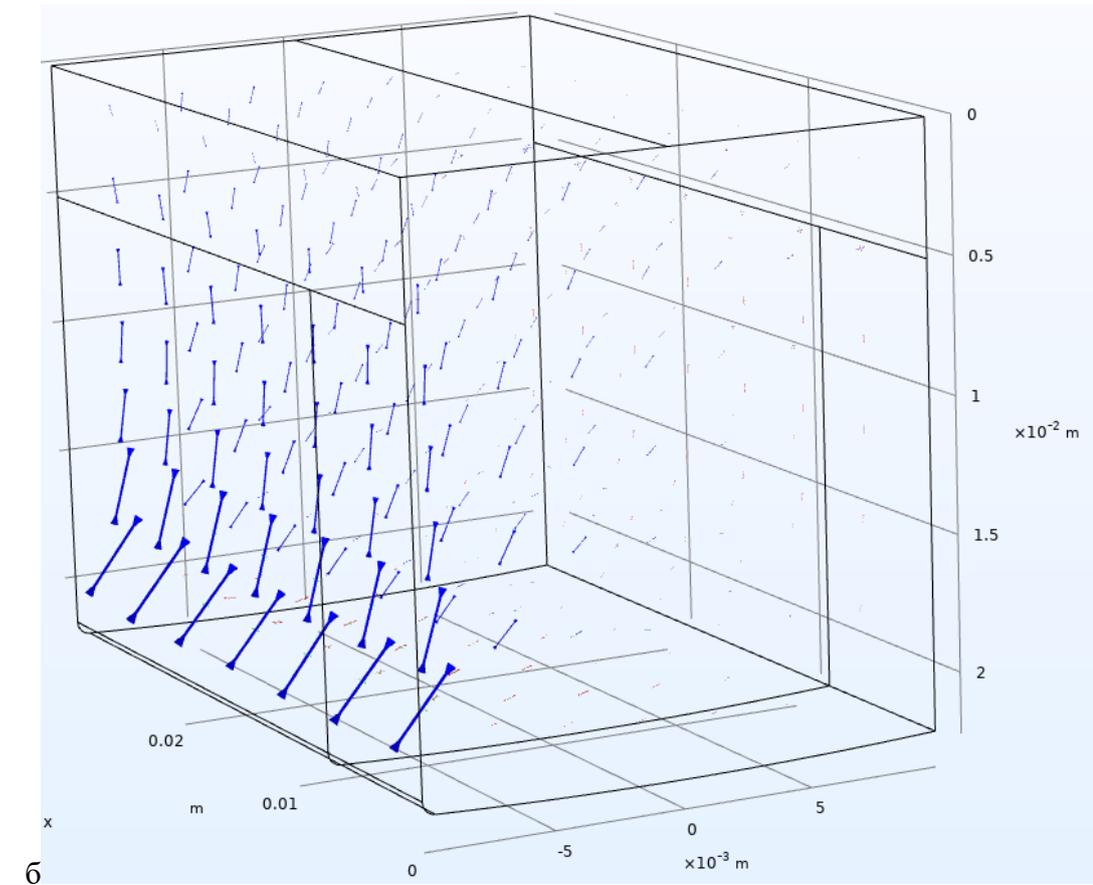
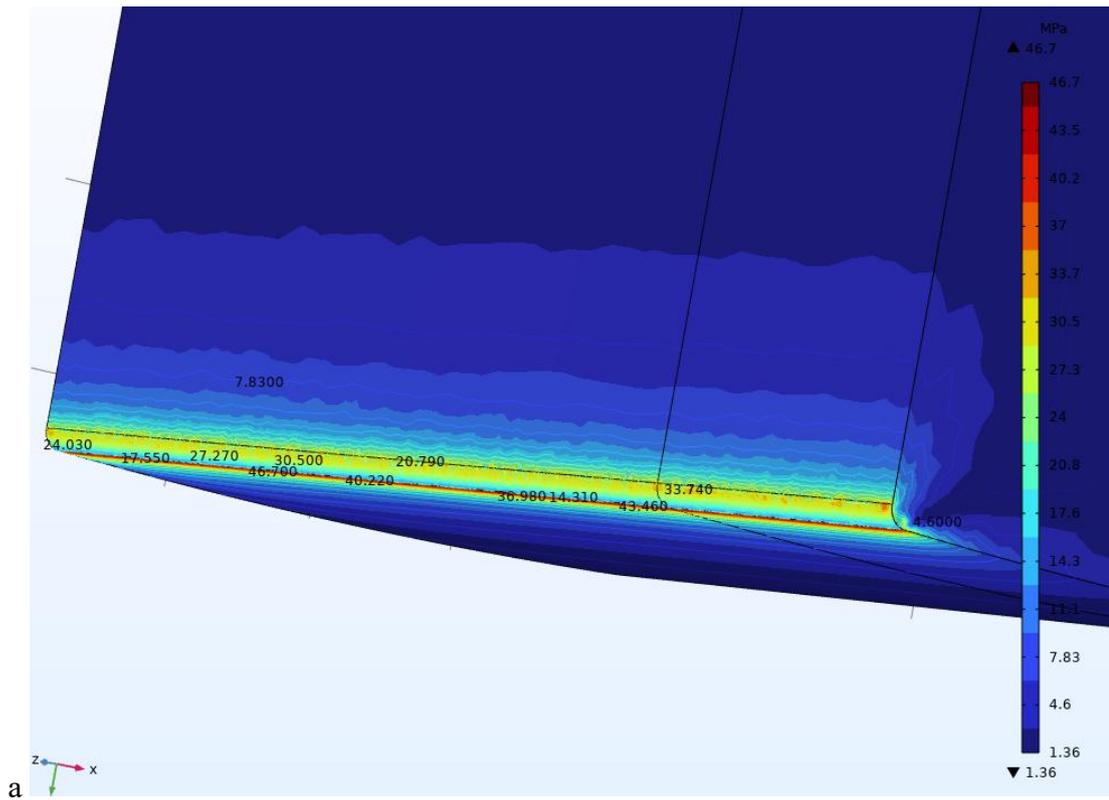
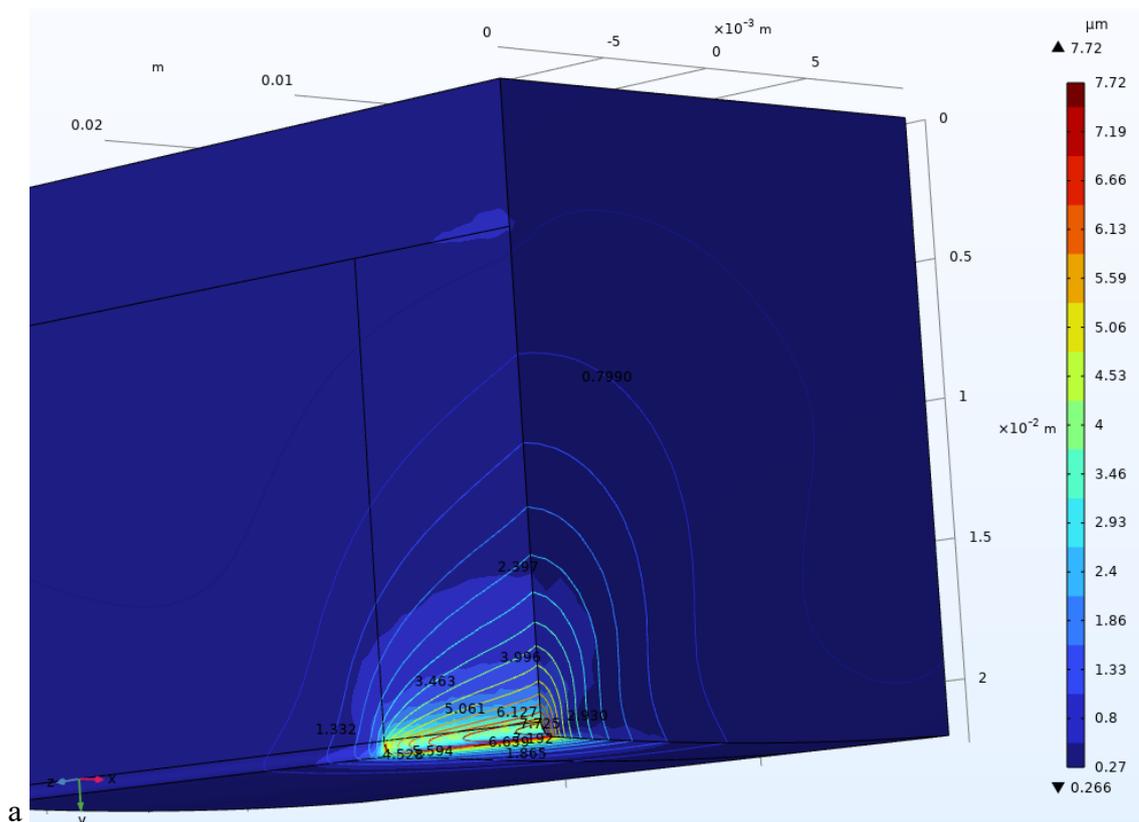
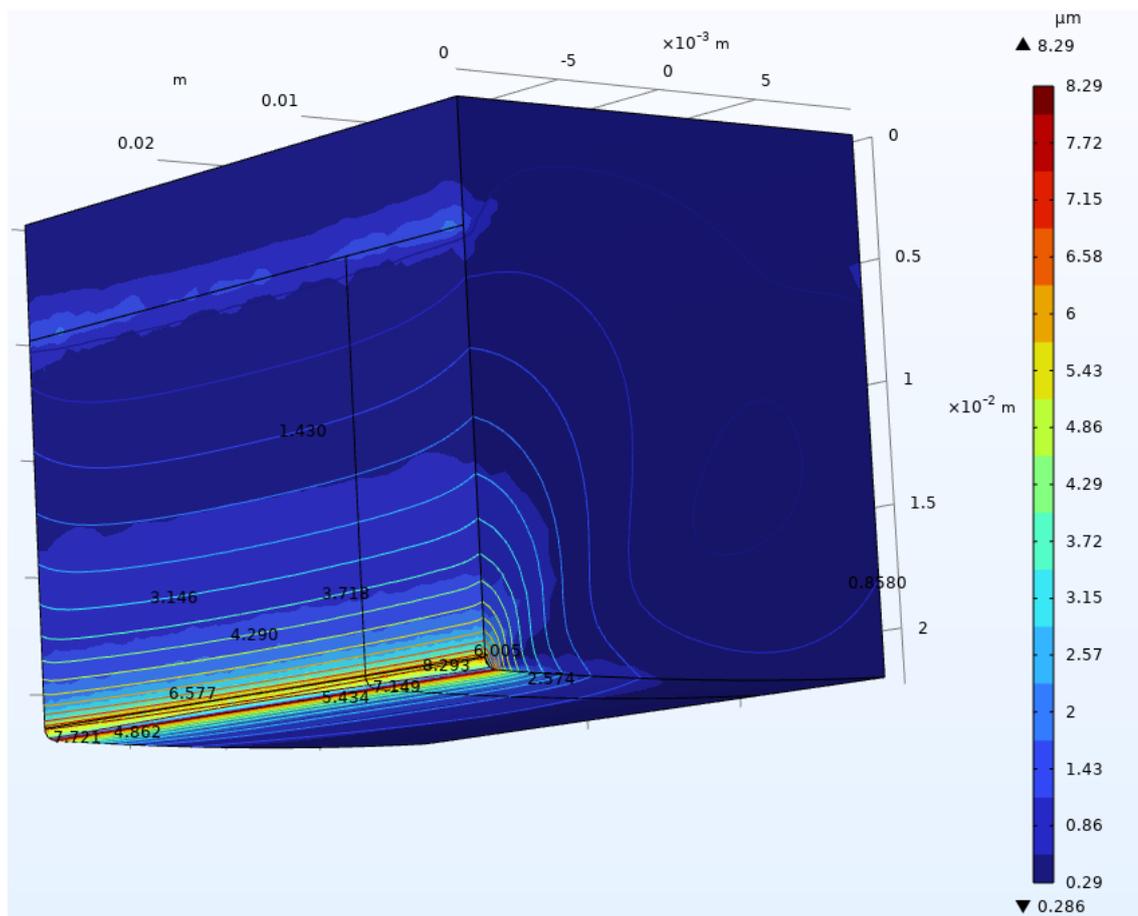


Рис. 3.13. Эпюры напряженного состояния сегмента в момент врезания в материал заготовки при $S_{\text{Поп}} = 30$ мм/дв. ход: а – эквивалентных напряжений, б – векторов ориентации главных напряжений

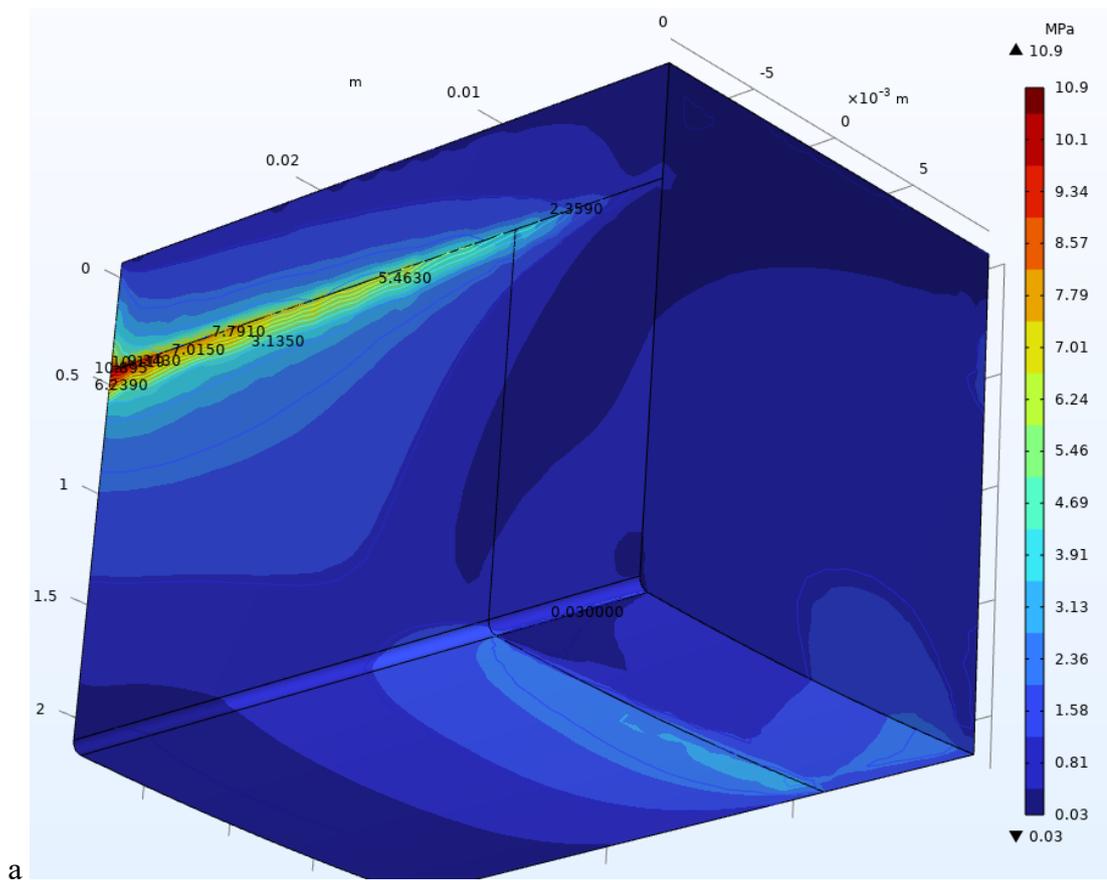


а

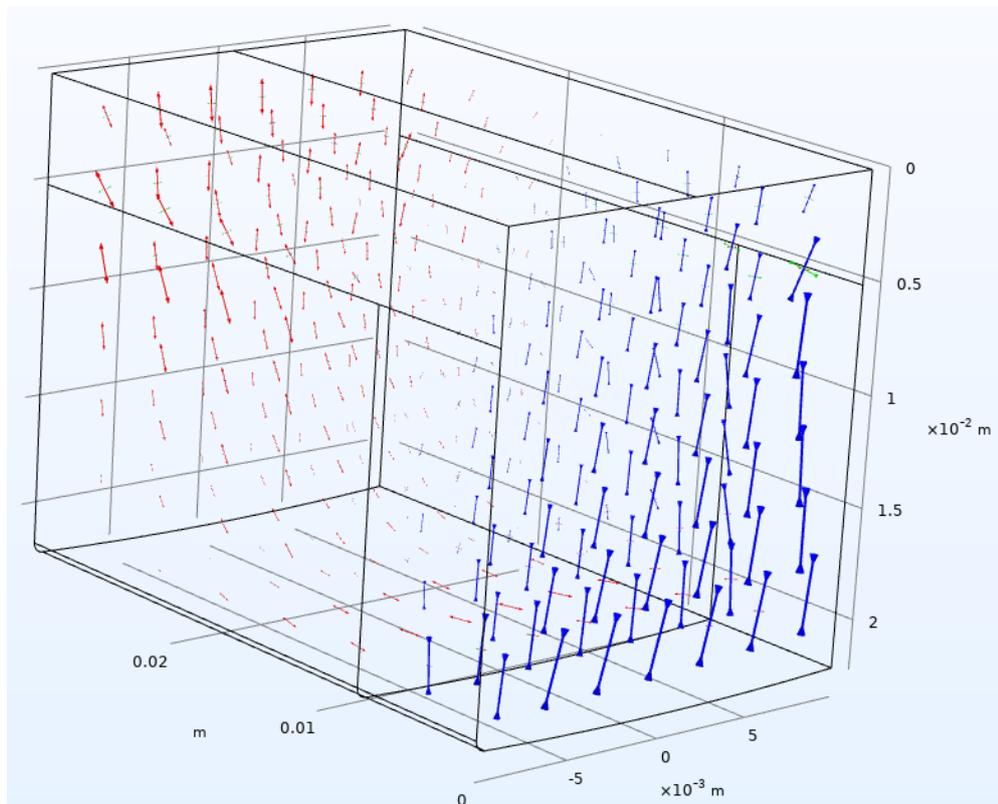


б

Рис. 3.14. Эпюры эквивалентных деформаций сегмента при врезании в материал заготовки:
 а – при $S_{\text{Поп}} = 7,5$ мм/дв. ход, б – при $S_{\text{Поп}} = 30$ мм/дв. ход

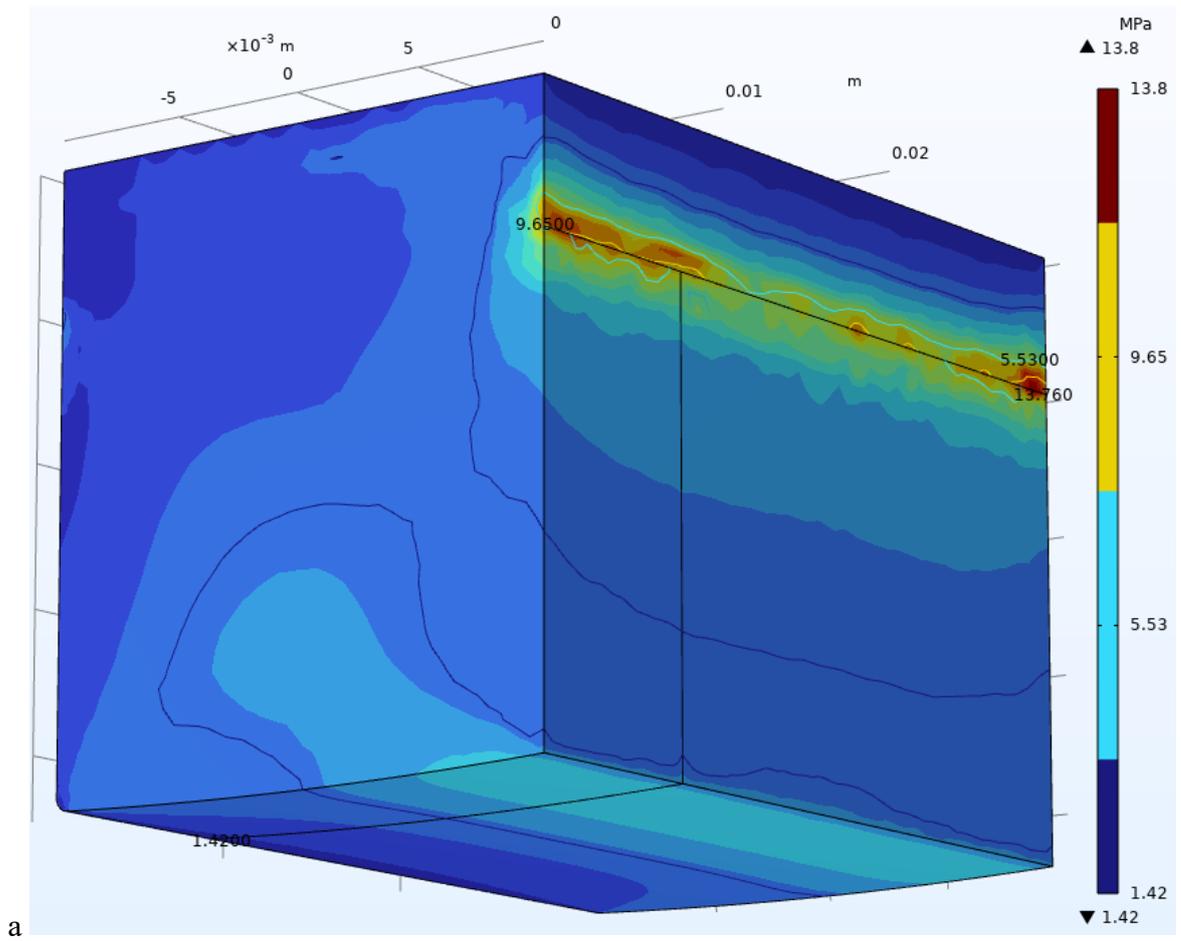


а

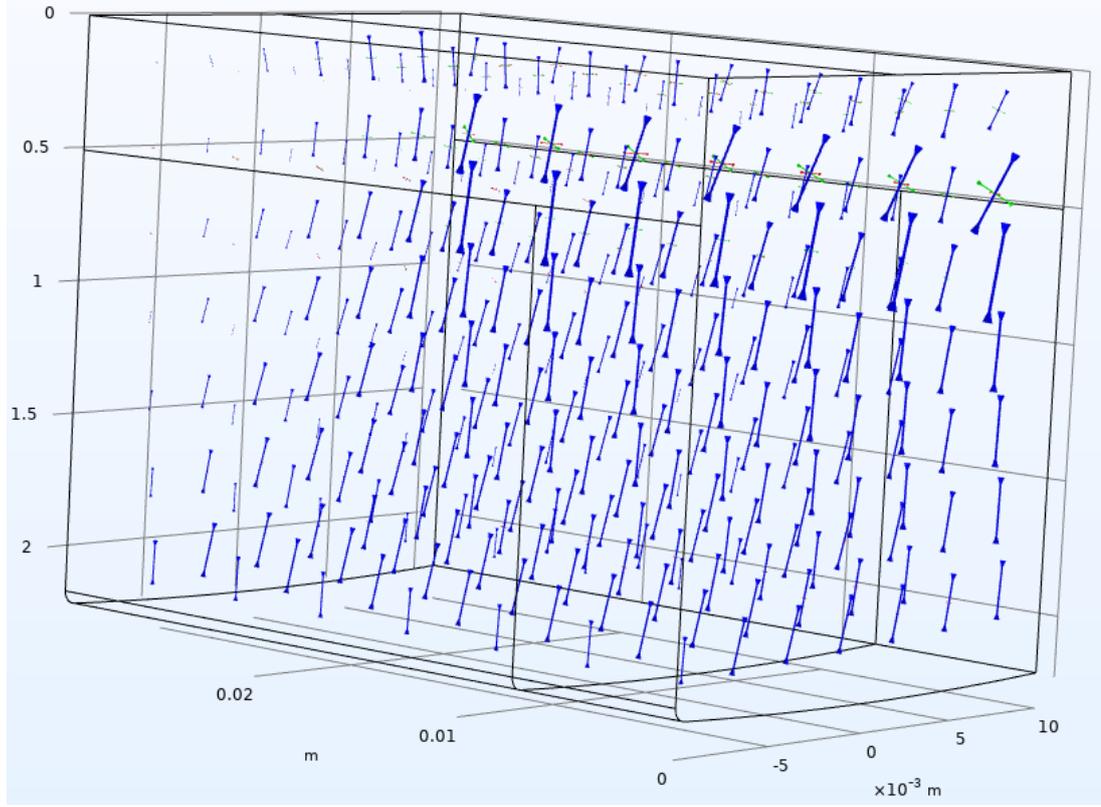


б

Рис. 3.15. Эпюры напряженного состояния сегмента для условий контакта с заготовкой по всей длине дуги профиля периферии при $S_{\text{Поп}} = 7,5$ мм/дв. ход: а – эквивалентных напряжений, б – векторов ориентации главных напряжений

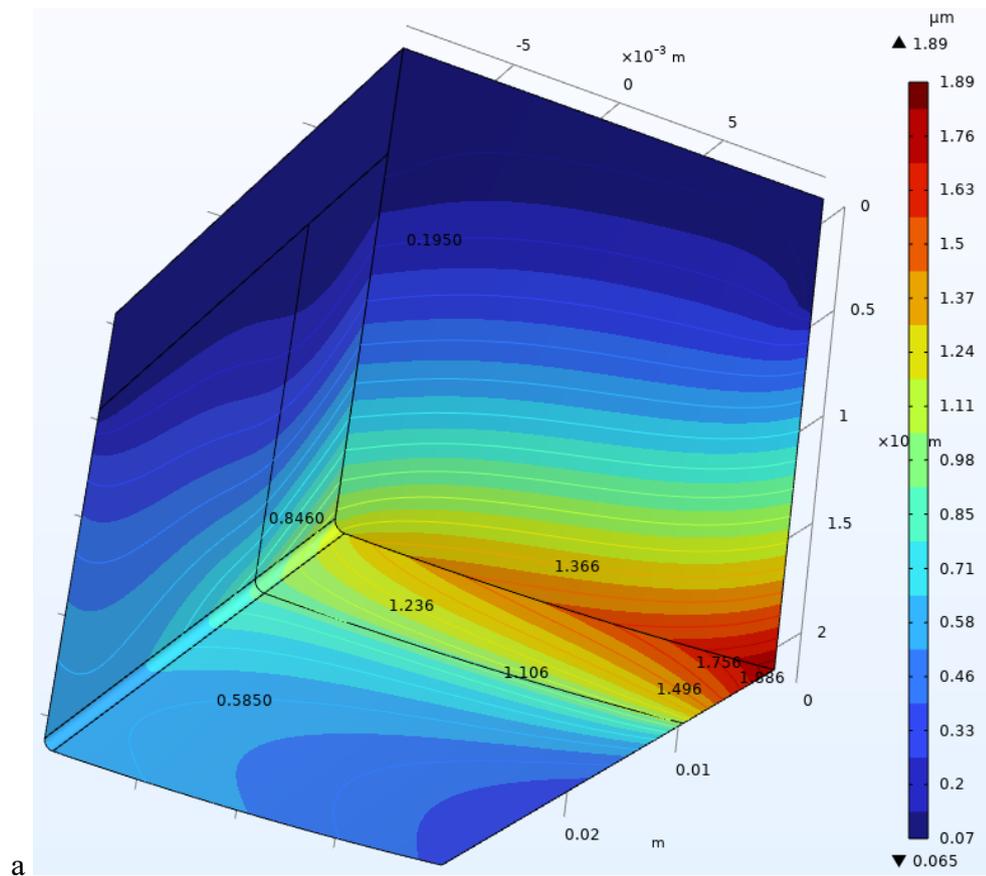


а

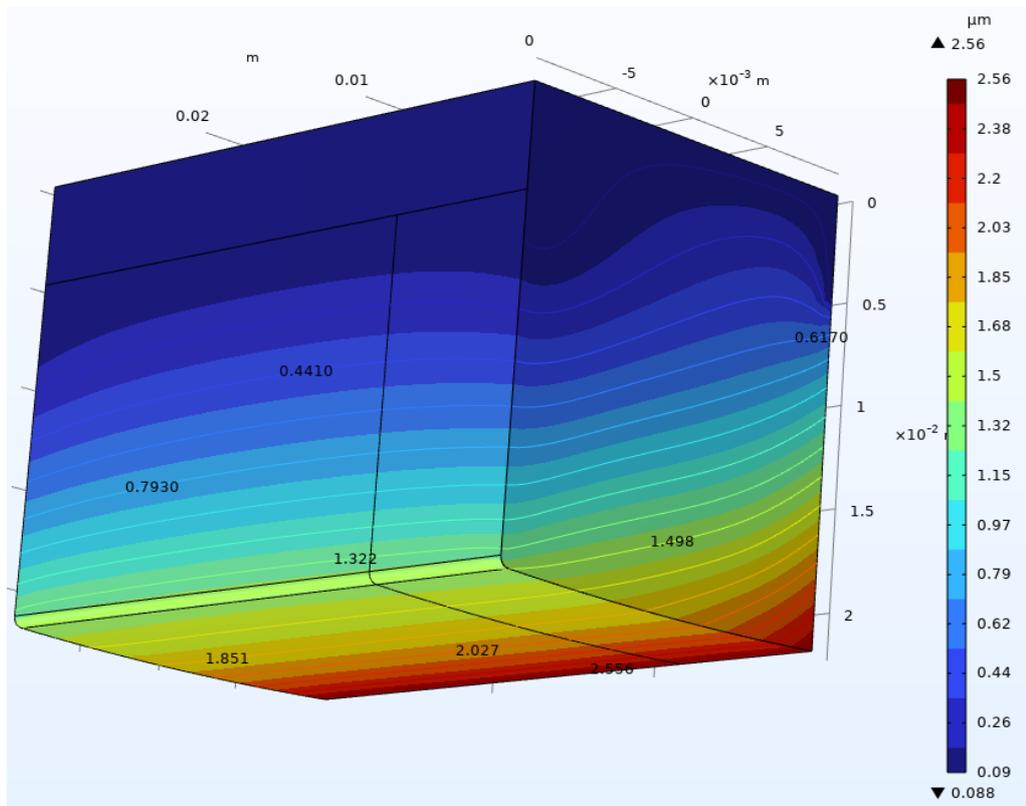


б

Рис. 3.16. Эпюры напряженного состояния для условий контакта с заготовкой по всей длине дуги профиля периферии при $S_{\text{Поп}} = 30$ мм/дв. ход: а – эквивалентных напряжений (тыльная сторона сегмента), б – векторов ориентации главных напряжений



а



б

Рис. 3.17. Эпюры эквивалентных деформаций сегмента для условий контакта с заготовкой по всей длине дуги профиля периферии при: а – $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход, б – $S_{\text{ПОП}} = 30$ мм/дв. ход

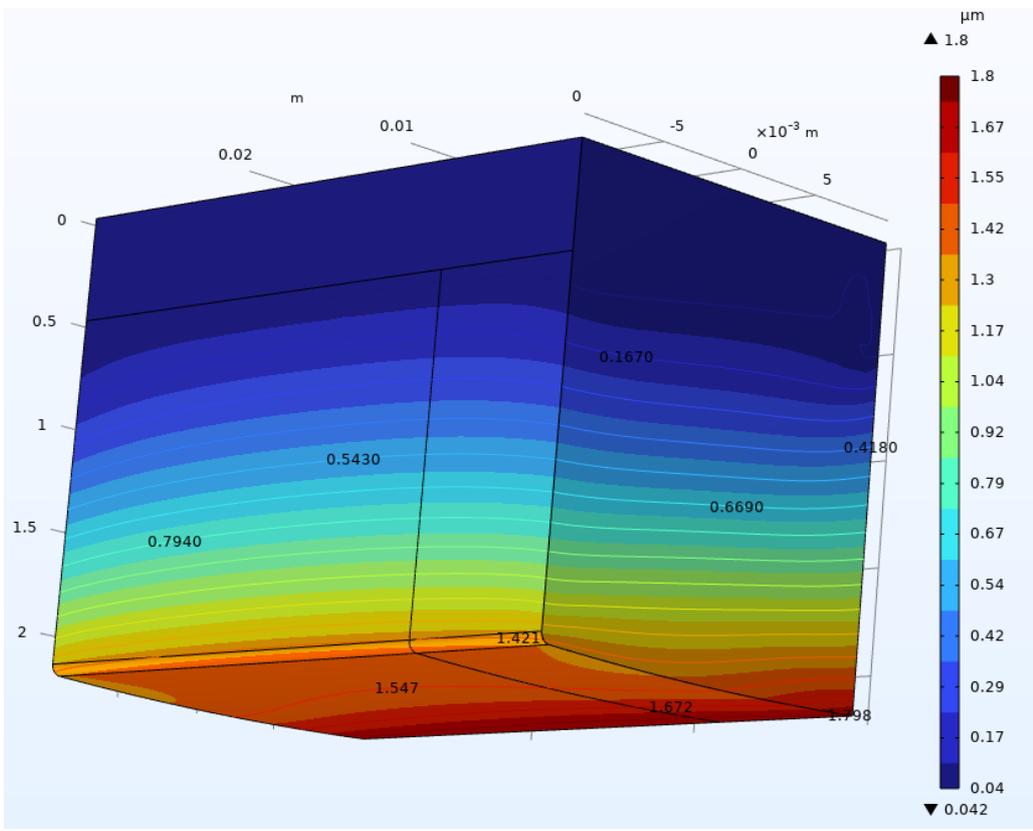
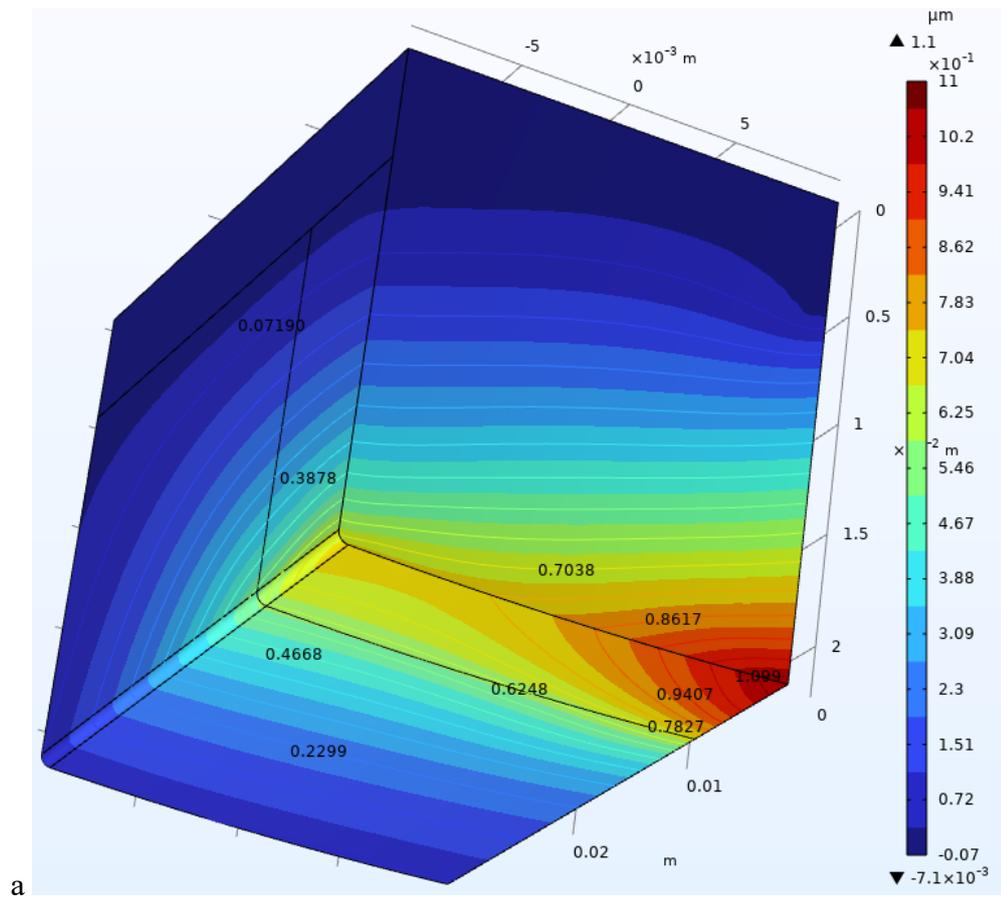


Рис. 3.18. Эпюры деформаций сегмента в тангенциальном направлении для условий контакта с заготовкой по всей длине дуги профиля периферии при: а – $S_{\text{поп}} = 7,5$ мм/дв. ход, б – $S_{\text{поп}} = 30$ мм/дв. ход

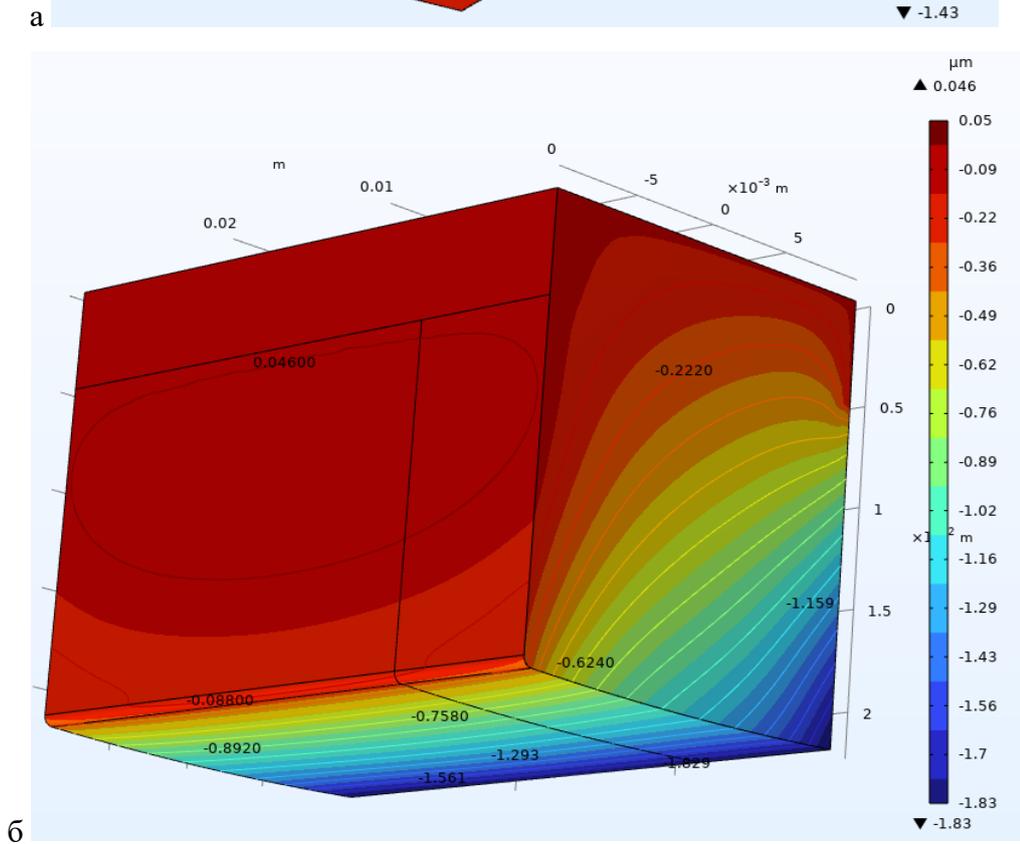
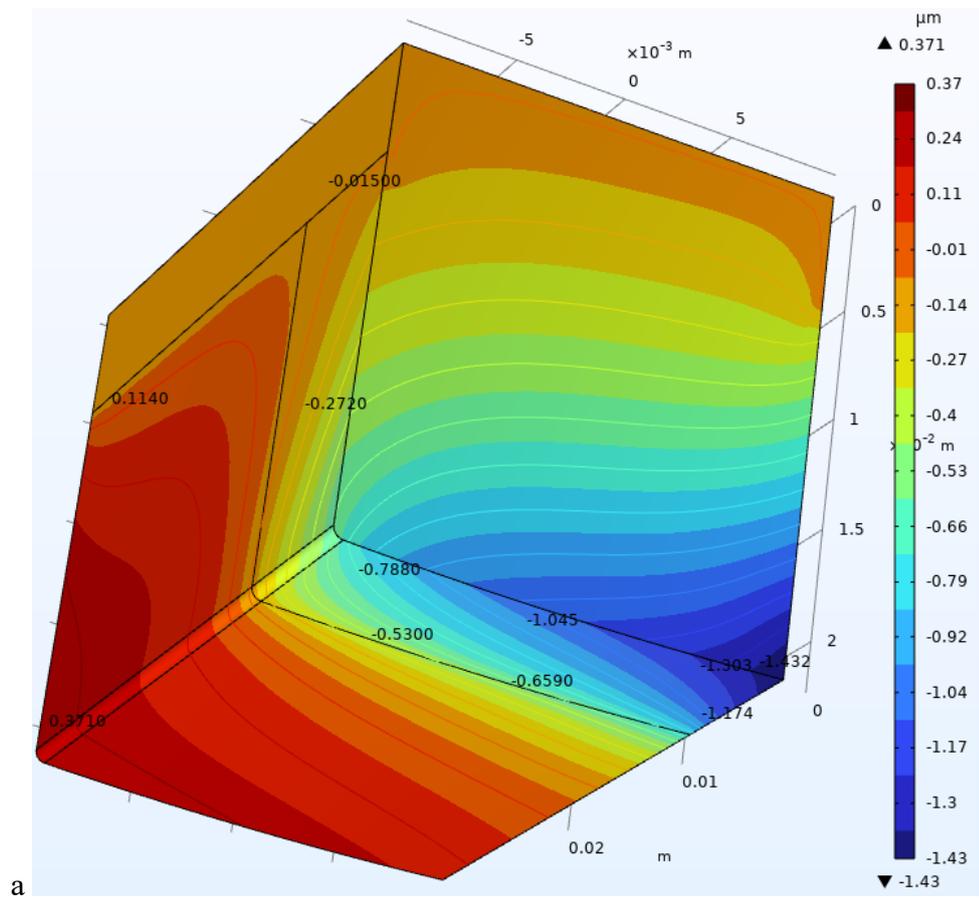


Рис. 3.19. Эпюры деформаций сегмента в радиальном направлении для условий контакта с заготовкой по всей длине дуги профиля периферии при: а – $S_{\text{поп}} = 7,5$ мм/дв. ход, б – $S_{\text{поп}} = 30$ мм/дв. ход

Рассмотрение эпюры напряженного состояния АС для указанной схемы нагружения позволяет увидеть смещение зоны концентрации пиковых значений эквивалентных напряжений к линии границы клеевого соединения, расположенной на фронтальной грани сегмента, с достижением максимума в 10,9 МПа и 13,8 МПа для вариантов нагружения с $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход и $S_{\text{ПОП}} = 30$ мм/дв. ход. Причем в первом случае пиковые напряжения возникают в опасном сечении под действием растягивающих напряжений, во втором – сжимающих. Аналогично предыдущей схеме нагружения в теле АС вдоль нагружаемой площади периферии наблюдается возникновение сжимающих напряжений, имеющих преимущественно радиальную ориентацию.

Деформированное состояние АС при контакте по всей длине дуги периферии с заготовкой для рассматриваемых вариантов нагружения характеризуется выраженной концентрацией деформаций вдоль фронтальной кромки АС, при этом пиковые значения эквивалентных деформаций имеют относительно малую величину по сравнению со схемой нагружения, соответствующей моменту врезания сегмента в материал заготовки, и составляют 1,89 мкм и 2,56 мкм для вариантов нагружения с $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход и $S_{\text{ПОП}} = 30$ мм/дв. ход. Для обоих вариантов нагружения как в тангенциальном, так и радиальном направлении характерно доминирование деформаций сжатия, пиковые значения которых составляют 1,1 мкм и 1,8 мкм в тангенциальном направлении и 0,37 мкм и 0,05 мкм – в радиальном для вариантов нагружения с $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход и $S_{\text{ПОП}} = 30$ мм/дв. ход.

По итогам прочностного анализа было установлено, что напряженное состояние АС для рассмотренных схем и вариантов нагружения, а также режимов резания, не является предельным и обеспечивает возможность их работы без объемного механического разрушения (пиковые растягивающие и сжимающие напряжения, возникающие в теле АС, не превышают пределов прочности материала АС на сжатие с более чем трехкратным запасом прочности). При этом имеет место возникновение концентрации напряжений, значительно превышающих предельные, вдоль фронтальной кромки сегмента, что свидетельствует о том, что при работе шлифовального круга следует ожидать её интенсивного разрушения с формированием профиля кромки, способствующего снижению напряжений до субкритических значений. Действие сил резания, соответствующих принятым технологическим режимам шлифования, при полном контакте периферии АС с материалом заготовки не вызывают значимых деформаций, что связано как с достаточно высокой жесткостью исследуемой геометрической конфигурации АС, так и с частичной компенсацией их радиальной составляющей центробежными силами.

Справедливо стоит отметить, что снижение жесткости АС наряду с увеличением плеча изгибающего момента при увеличении длины АС, потенциально могут способствовать усугублению их напряженно-деформированного состояния. В связи с этим, проведение

прочностных расчетов является неотъемлемой частью решения задачи выбора оптимальной конфигурации конструкции ПШК.

3.2. Исследование влияния механических свойств материала абразивных сегментов круга на динамические характеристики технологической системы

Сущность приведенного в настоящем разделе исследования состоит в оценке влияния физико-механических свойств материала АС на пиковое значение амплитуды виброперемещений оси шлифовального круга при моделировании поведения механической системы процесса плоского прерывистого шлифования в динамике (при установившемся режиме работы круга). Для этого был выполнен сравнительный анализ амплитудных характеристик технологической системы для двух вариантов материального исполнения ПШК: с использованием более «жестких» бакелитовой и керамической связок, а также вулканитовой связки.

В целях упрощения математической модели представим механическую систему плоскошлифовального станка с ПШК в виде упрощенной одномассовой системы (рис. 3.20), а также примем следующие допущения:

- работа шлифовального круга происходит при установившемся режиме работы станка с постоянными режимами резания;
- эквивалентная система имеет одну степень свободы, а в качестве колеблющейся массы выступает непосредственно шлифовальный круг;
- центр массы шлифовального круга совпадает с осью его вращения;
- влиянием гармоник второго и высших порядков можно пренебречь;
- абразивные сегменты выполнены из изотропного материала;
- термическими деформациями АС и заготовки можно пренебречь;
- жесткость контакта шлифовального круга и оправки станка постоянна по всей площади;
- шпиндель, передаточный механизм, заготовка, зажимное приспособление и прочие элементы ТС, а также контакты между ними, рассматриваются как абсолютно жесткие;
- в качестве периодически действующей силы, вызывающей вынужденные колебания круга, выступает только радиальная составляющая силы резания, значение которой также постоянно во времени (непостоянство припуска, неоднородность свойств материала заготовки, отклонение от круглости круга, радиальные биения и прочие факторы не учитываются).

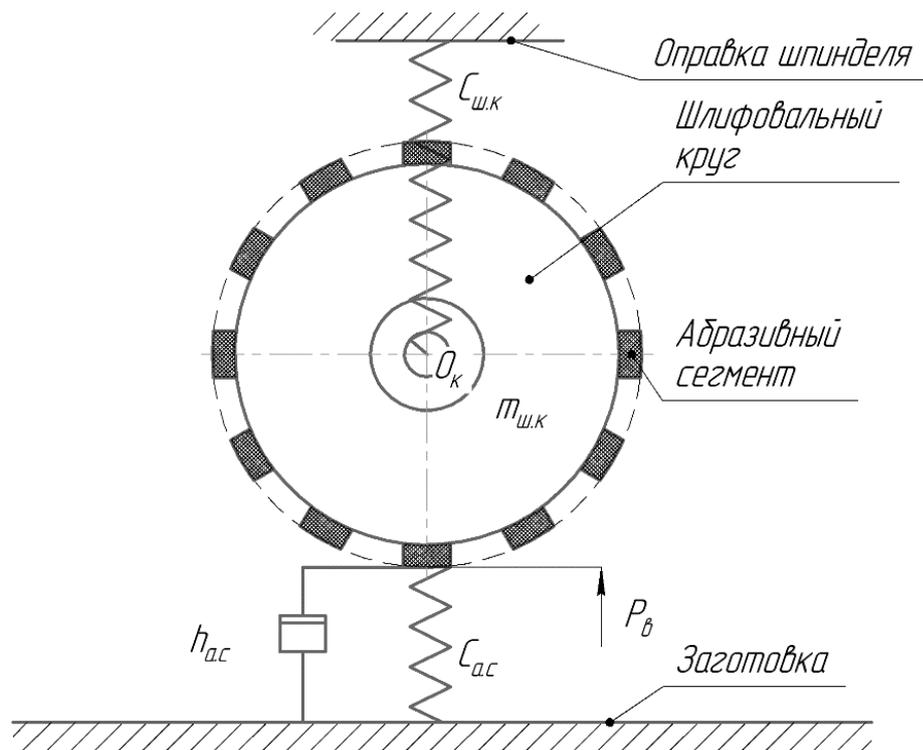


Рис. 3.20. Схема упрощенной одномассовой эквивалентной системы станка:

$m_{ш.к}$ – приведенная масса шлифовального круга, $P_в$ – вынуждающая сила, $h_{ас}$ – сопротивление АС, $c_{ас}$ – жесткость АС, $c_{ш.к}$ – приведенная радиальная жесткость контакта шлифовального круга и оправки станка

Ввиду того, что связанный абразив на вулканитовой связке потенциально может обладать свойствами демфера, т.е. его коэффициент сопротивления $h_{ас}$ значительно больше 0 (в сравнении с «жесткими» связками), то исследовательский интерес представляет эмпирическое определение значения данного коэффициента с целью его учета при последующем моделировании.

Пусть осью, вдоль которой центр шлифовального круга имеет возможность линейно перемещаться, выступает ось y . В таком случае дифференциальное уравнение, описывающее движение сосредоточенной массы круга в одномассовой системе с вынужденными колебаниями, будет иметь вид [30, 36, 56]:

$$m \cdot \ddot{y} + h_i \cdot \dot{y} + c_i \cdot y = P_в \cdot \sin(\nu_в \cdot \tau + \omega_{ф.нач}), \quad (3.41)$$

где y – линейная координата центра тяжести круга, м;

h_i – приведенный коэффициент сопротивления, (Н·с)/м;

c_i – приведенный коэффициент жесткости, Н/м;

$\omega_{ф.нач}$ – начальная фаза, рад.

$\nu_в$ – частота вынуждающей силы, Гц.

Коэффициент жесткости i -го элемента системы может быть найден как [30]:

$$c_i = \frac{F_i \cdot E_i}{l_i}, \text{ Н/м}, \quad (3.42)$$

где F_i – площадь поперечного сечения i -го элемента системы, м^2 ;

E_i – модуль упругости i -го элемента системы, Н/м^2 ;

l_i – длина i -го элемента системы в направлении действия вынуждающей силы, м.

Коэффициент сопротивления i -го элемента системы связан с коэффициентом затухания β_i через следующую зависимость [30]:

$$\beta_i = \frac{h_i}{2 \cdot m_i}, \text{ с}^{-1}. \quad (3.43)$$

Коэффициент затухания в данном случае является неизвестной величиной, определяемой эмпирически. Величина коэффициента затухания имеет обратную зависимость от времени релаксации колебаний τ_p , т.е. времени за которое амплитуда свободно затухающих колебаний сокращается в $e = 2,718$ раз [30]:

$$\tau_p = \frac{1}{\beta}, \text{ с}. \quad (3.44)$$

Эмпирическое определение коэффициента сопротивления материала АС выполнялось методом крутильного маятника, в соответствии с методикой, описанной в [6]. Для крутильного маятника время релаксации колебаний связано с моментом инерции системы и коэффициентом сопротивления материала стержня через следующую зависимость [30]:

$$\tau_p = \frac{2 \cdot I \cdot g}{h}, \text{ с}, \quad (3.45)$$

где I – полный момент инерции маятника, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Отсюда:

$$h = \frac{2 \cdot I \cdot g}{\tau_p}, \text{ (Н} \cdot \text{с)/м}. \quad (3.46)$$

Сущность экспериментальной оценки коэффициента сопротивления материала АС состоит в инструментальном измерении времени релаксации крутильного маятника при известных значениях его суммарного момента инерции. Для этого была изготовлена экспериментальная установка (рис. 3.21), включающая в себя стержень, выполненный из исследуемого материала АС, один конец которого жестко закреплен, а второй конец соединен с массивным сплошным стальным диском, выполняющим роль маховика.

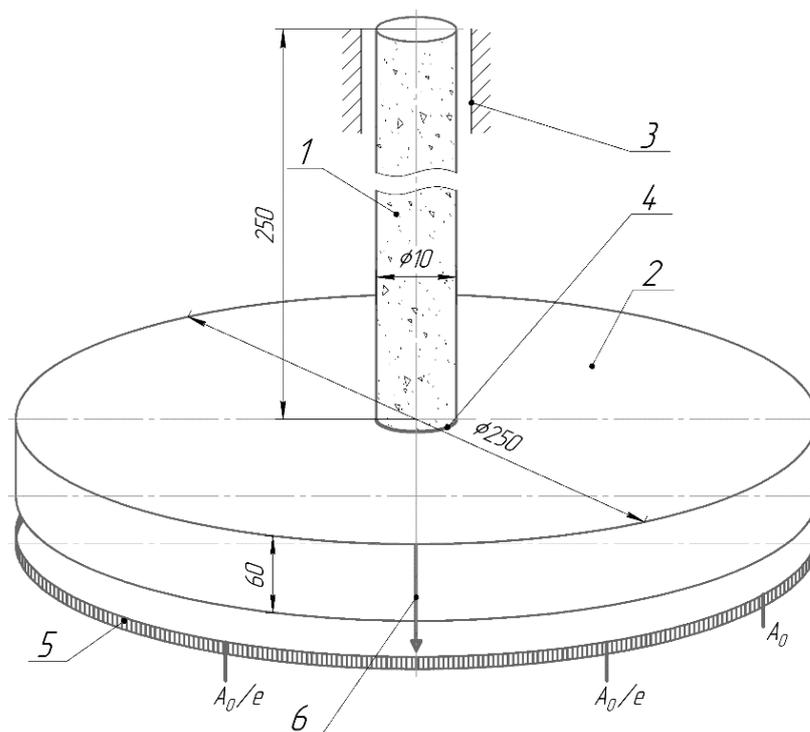


Рис. 3.21. Схема крутильного маятника для определения коэффициента сопротивления материала АС: 1 – стержень из исследуемого материала, 2 – стальной маховик, 3 – зажим, 4 – клеевое соединение, 5 – индикаторная угловая шкала, 6 – индикаторная стрелка, A_0 – отметка исходной амплитуды, $\frac{A_0}{e}$ – отметка амплитуды фиксации времени релаксации колебаний

При повороте маховика относительно оси вращения стержня на амплитуду A_0 в теле последнего будет возникать некоторый момент упругого сопротивления. Если отпустить маховик, данный момент будет создавать крутильные колебания в маховике с постоянно убывающей амплитудой. Когда маховик отпущен, начинается отсчет времени до момента, когда амплитуда маховика не достигнет отметки $\frac{A_0}{e}$, т.е. не уменьшится в e раз. Определение момента достижения необходимой амплитуды отклонения маховика, а также амплитуды достижения времени релаксации производится методом визирования с использованием индикаторной стрелки, закрепленной на маховике, совершающей поворот относительно неподвижной угловой шкалы, реализуемой посредством гравированной шкалы поворотного станочного стола, установленного concentrically с осью стержня.

Для проведения испытаний по определению коэффициента сопротивления материала АС, была изготовлена серия из четырех стержней методом обтачивания исходных абразивных брусков размером $30 \times 20 \times 250$ мм на токарно-винторезном станке с использованием алмазного карандаша. По итогам пробных испытаний трех стержней было установлено, что физико-механические свойства исследуемого материала АС позволяют выполнять поворот маховика на величину $\approx 3,5^\circ$ без разрушения (что подтверждалось результатами

микроскопического анализа). В связи с этим, для упрощения визирования момента достижения времени релаксации, в качестве исходной амплитуды поворота маховика была выбрана амплитуда, соответствующая $2,7^\circ$, в таком случае, амплитуда достижения времени релаксации составит $\frac{A_0}{2,718} \approx 1^\circ$.

Моменты инерции стержня и маховика определялись в соответствии с известной зависимостью:

$$I = \frac{m \cdot R^2}{2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (3.47)$$

Методом взвешивания было установлено, что массы стержня и маховика составляют 0,07 и 23,13 кг, в таком случае, их суммарный момент инерции равен.

$$I = \frac{0,07 \cdot 0,005^2}{2} + \frac{23,13 \cdot 0,125^2}{2} = 0,181 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Для точной фиксации временного момента достижения амплитуды времени релаксации колебаний использовалась видеосъемка с повышенной частотой в 60 кадров в секунду с использованием фотоаппарата *CANON EOS 5D MARK III*, режим съемки: автоматический и последующим четырехкратным программным замедлением видео с использованием интернет-сервиса редактирования видео *Clideo* [139]. Отсчет времени от момента начала колебаний до достижения амплитуды релаксации колебаний выполнялся по временной шкале видеоредактора с дискретностью 0,01 с. Результаты определения времени релаксации свободно затухающих колебаний крутильного маятника по итогам серии из 5 параллельных экспериментов сведены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 - Результаты определения времени релаксации τ_p колебаний крутильного маятника

| Значение по итогам эксперимента №, с | | | | | Среднее значение, с |
|--------------------------------------|------|------|------|------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 2,24 | 2,23 | 2,25 | 2,21 | 2,24 | 2,23 |

В таком случае, коэффициент сопротивления материала стержня составит:

$$h = \frac{2 \cdot 0,181 \cdot 9,81}{2,23} = 1,59 \text{ (Н} \cdot \text{с)/м}.$$

Ненулевое значение коэффициента демпфирования материала АС на вулканитовой связке может быть обусловлено наличием у него свойств партипластичности, что косвенно подтверждается характером его разрушения, описываемого в ряде исследований [12, 60, 71, 74, 86, 87, 126]. Достаточно высокие значения коэффициента демпфирования (выше единицы), могут быть связаны с проявлением у данного материала двух видов диссипации энергии: механической и диссипации континуального разрушения. Первый механизм диссипации связан

с рассеиванием энергии при упругой микродеформации связки и пор, заполняющих пространство между условно несжимаемыми абразивными зёрнами. Влияние же второго механизма состоит в релаксации напряжений вследствие микроразрушений в структуре материала, которые во многом и определяют его достаточно высокую интенсивность износа.

Моделирование поведения одномассовой динамической системы выполнялось в программной среде *COMSOL Multiphysics* с использованием специализированного инструмента «*Lumped Mechanical System*», служащего для имитации работы линейных динамических систем. Электронная имитационная модель одномассовой системы включает в себя 7 структурных элементов (рис. 3.22): 2 пружины с фиксированной жесткостью $c_{ш.к}$ и $c_{а.с}$ (элементы «*Spring 1*» и «*Spring 2*»), сосредоточенную массу $m_{ш.к}$ (элемент «*Mass 1*»), демпфер с коэффициентом сопротивления $h_{а.с}$ (элемент «*Damper 1*»), источник вынужденного воздействия с силой P_B (элемент «*Force Source 1*»), фиксированный и свободный узлы (элементы «*Fixed Node 1*» и «*Free Node 1*»).

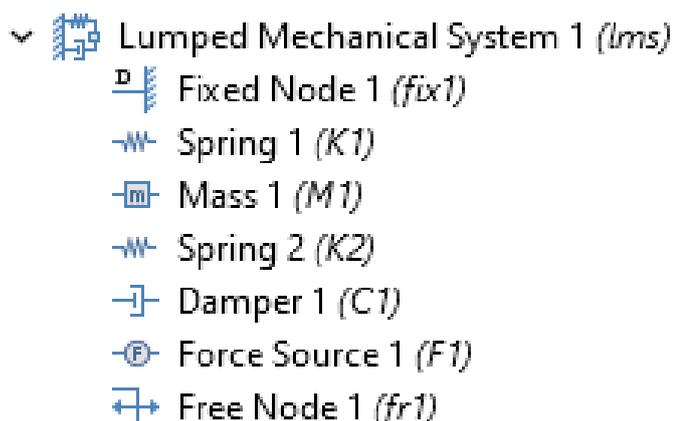


Рис. 3.22. Структура электронной модели упрощенной одномассовой системы станка

Для оценки влияния демпфирующих свойств материала на динамику механической системы были использованы три аналогичные динамические системы, имитирующие процесс прерывистого шлифования с использованием сегментов на основе вулканитовой, бакелитовой и керамической связок (для последних двух коэффициент сопротивления принимался равным 0). Вибрационная нагрузка системы задавалась в виде периодически действующей вынуждающей силы, варьируемой в диапазоне $P_B = 100 \dots 700$ Н с интервалом в 200 Н. Периодический характер действия вынужденной силы задавался через встроенный генератор сигналов с использованием сигнала прямоугольной формы (приложение А). Отношение временного периода приложения нагрузки к общему периоду цикла прохождения сегмента и впадины

принималось равным $\frac{\tau_1}{\tau} = 0,5$ д. ед. Периодичность цикла определялась в соответствии с выражением (1.19).

Было принято допущение о равенстве длин дуг сегмента и впадины ($l_1=l_2$). Это допущение позволило изолировать и исследовать влияние демпфирующих свойств материала связки на динамику системы. Данные свойства являются внутренними параметрами материала и не зависят от геометрии круга. Моделирование реального, переменного во времени контакта представляет собой отдельную сложную задачу. Эта задача выходит за рамки целей настоящего исследования.

Приведенная жесткость контакта шлифовального круга и шпинделя станка в текущем и последующих экспериментах задавалась постоянной, равной $c_{ш.к} = 200 \cdot 10^6$ Н/м; жесткость АС определялась исходя из условий применения абразивных брусков сечением 20×30 мм, длиной 20 мм, в соответствии с определенными ранее механическими свойствами материала АС на вулканитовой связке:

$$c_{a.c(в)} = \frac{0,02 \cdot 0,030 \cdot 73 \cdot 10^9}{0,02} = 2190 \cdot 10^6 \text{ Н/м.}$$

Коэффициент сопротивления материала принимался в соответствии с экспериментальными данными $h = 1,59$ (Н·с)/м, масса круга (сосредоточенная масса) составляла $m_{ш.к} = 2,5$ кг. Действие сил гравитации при выполнении расчета учитывалось. В соответствии с данными, приведенными в [107], для материала АС на бакелитовой и керамической связках с номером структуры $C = 5$ модуль упругости составляет $E_б = 138 \cdot 10^9$ Н/м² и $E_к = 692 \cdot 10^9$ Н/м², в таком случае, их жесткость составляет:

$$c_{a.c(б)} = \frac{0,02 \cdot 0,030 \cdot 138 \cdot 10^9}{0,02} = 4140 \cdot 10^6 \text{ Н/м;}$$

$$c_{a.c(к)} = \frac{0,02 \cdot 0,030 \cdot 692 \cdot 10^9}{0,02} = 20760 \cdot 10^6 \text{ Н/м.}$$

Решение задачи моделирования динамики системы выполнялось при помощи нестационарного решателя «*Time Dependent*», время моделирования – 1 с (подобрано опытным путем, с учетом наличия переходного периода), интервал временной итерации – 0,0001 с.

По итогам выполненной серии расчетов были получены графики абсолютных амплитуд виброперемещений центра массы круга (приложение Б) и относительного приращения амплитуд по отношению к амплитуде виброперемещений, генерируемых моделью круга на вулканитовой связке (приложение В). Обработка результатов включала в себя исключение всех неинформативных значений измеряемых параметров, соответствующих переходному периоду продолжительностью 0,5 с, и последующий выбор из оставшихся значений максимума, который и принимался в качестве целевого значения.

Анализ полученных графиков позволяет установить присутствие некоторой гетерогенности результатов расчета, что является следствием возникновения погрешностей аппроксимации, ввиду возникновения несовпадений между шагом решения и периодичностью нагружения. Несмотря на это, для всего диапазона условий нагружения наблюдается снижение пиковых амплитуд виброперемещений центра масс модели в случае учета коэффициента сопротивления, при этом коэффициент жесткости материалов влияния на амплитуду виброперемещений не оказывает.

Далее, для принятого диапазона значений вынужденного усилия, было выполнено определение относительного приращения пиковой амплитуды виброперемещений одномассовой системы для диапазона периодичности цикла нагрузки ν_B , соответствующего окружным скоростям вращения круга $V_{кр} = 20 - 80$ м/с. Результат определения относительного приращения пиковой амплитуды виброперемещений по итогам динамического моделирования одномассовой системы сводим в таблицу 3.8, для наглядности, зависимость численных значений амплитуды от периодичности цикла нагрузки и величины вынуждающего усилия изобразим в виде графика, представленного на рисунке 3.23.

Таблица 3.8 - Результаты определения относительного уменьшения пиковых амплитуд виброперемещений одномассовой упрощенной модели

| $V_{кр}$, м/с | ν_B , с | Относительное уменьшение пиковой амплитуды виброперемещений $\Delta A_B = \frac{A_B(A_{кр}) - A_B}{A_B} \cdot 100\%$, %, при $P_B = P_y$, Н | | | |
|----------------|-------------|---|-------|-------|-------|
| | | 100 | 300 | 500 | 700 |
| 20 | 0,00196 | 3,46 | 3,94 | 4,31 | 4,70 |
| 30 | 0,00131 | 4,77 | 5,20 | 5,39 | 5,68 |
| 40 | 0,00098 | 6,54 | 6,70 | 7,10 | 7,72 |
| 50 | 0,00079 | 8,64 | 9,04 | 9,78 | 10,31 |
| 60 | 0,00065 | 11,87 | 12,46 | 13,05 | 13,73 |
| 70 | 0,00056 | 17,64 | 18,02 | 19,85 | 21,61 |
| 80 | 0,00049 | 19,11 | 21,23 | 22,62 | 24,82 |

Анализ полученных данных позволяет установить, что в рассматриваемом диапазоне варьирования входных значений параметров воздействия достигается достаточно существенное снижение амплитуды виброперемещений при использовании вулканитовой связки, достигающее от 3,46 % до 24,82 % в зависимости от условий нагружений. Также на графике видно ярко выраженная прямая зависимость между относительным снижением амплитуды вынуждающего усилия и самой величиной этого усилия — чем больше усилие, тем более заметно снижение амплитуды виброперемещений. Менее явно прослеживается зависимость снижения амплитуды виброперемещений от уровня усилия, что говорит о наличии определенной корреляции, но с меньшей степенью выраженности. Таким образом, можно

сделать вывод о справедливости гипотезы положительного влияния со стороны демпфирующих свойств материала АС на основе вулканитовой связки на динамические характеристики технологической системы.

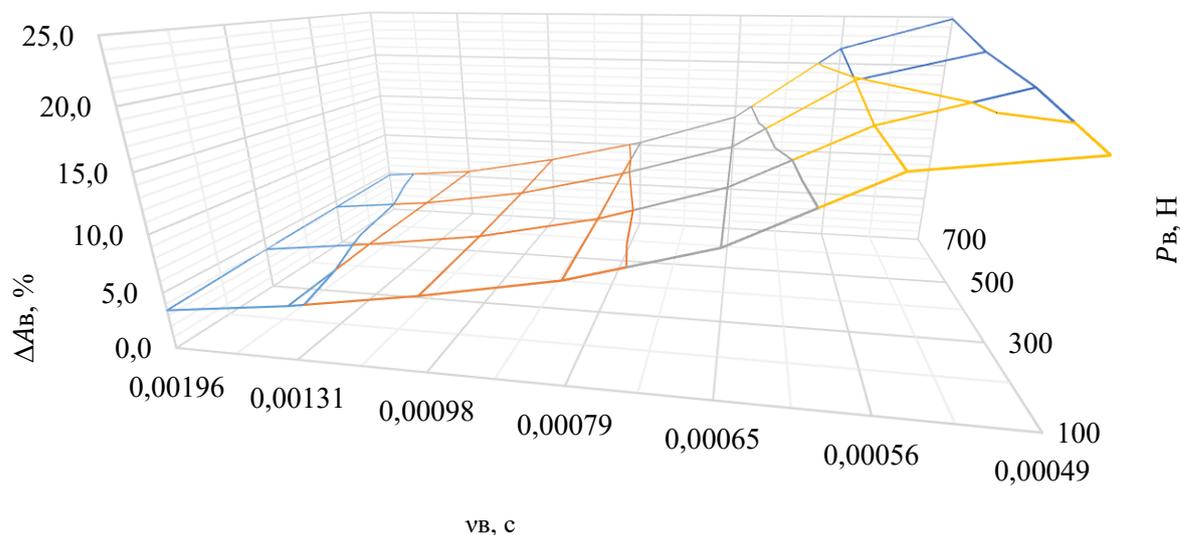


Рис. 3.23. Зависимость $\Delta A_{\text{в}} = f(\nu_{\text{в}}; P_{\text{в}})$ относительного снижения амплитуды вибромеремещений $\Delta A_{\text{в}}$ от вынуждающей силы $P_{\text{в}}$ и частоты вынуждающей силы $\nu_{\text{в}}$

3.3. Теплофизическая модель процесса прерывистого шлифования

Для поиска наиболее адекватного решения задачи описания теплофизики процесса плоского прерывистого шлифования титановых сплавов сначала необходимо определить вид и характер движения теплового источника, а также модель нагреваемого тела с учетом теплофизических особенностей данных материалов. Определяющими, для выбора адекватного математического аппарата, в соответствии с известными положениями теории термодинамики, выступают следующие параметры процесса [92, 94, 97, 128]:

- глубина распространения теплового фронта за время воздействия источника тепла:

$$h_T = \sqrt{4 \cdot a_{\text{м.з.}} \cdot \tau}, \text{ м;} \quad (3.48)$$

- скорость распространения теплового фронта во время воздействия источника тепла:

$$v_T = \sqrt{\frac{a_{\text{м.з.}}}{\tau}}, \text{ м/с.} \quad (3.49)$$

где $\tau = \tau_1 = \frac{l_1}{V_{\text{кр}}}$ – время воздействия источника тепла, с.

— максимальный размер зоны контакта (радиус пятна контакта) источника тепла с заготовкой в плане r_T .

В связи с тем, что для решения задачи обеспечения бесприжогового шлифования практический интерес представляют именно пиковые значения температур в зоне резания, а не характер их распространения в теле заготовки, то для упрощения расчетов зона контакта источника тепла – АС с заготовкой можно рассматривать в виде теплового источника с пятном контакта в плане, радиус которого описывается следующим уравнением:

$$r_T = \frac{\sqrt{l_k^2 + B^2}}{2}, \text{ м.} \quad (3.50)$$

Так, в случае, если $r_T \gg h_T$, к процессу нагрева применима модель распределенного источника тепла, для которого отводом тепла из зоны нагрева через материал заготовки можно пренебречь, в ином случае, когда $r_T \leq h_T$ процесс нагрева описывается моделью точечного источника, учитывающей отвод тепла из зоны нагрева посредством теплообмена в материале заготовки. Далее, необходимо определить характер движения теплового источника относительно нагреваемого тела, при $S_{пр} > v_T$ распространение тепла в заготовке происходит по модели быстродвижущегося источника, где тепло распространяется преимущественно вдоль двух векторов: нормали по отношению к поверхности контакта и вектора, коллинеарного относительно вектора продольной подачи заготовки [94, 97, 103].

При выполнении условия $S_{пр} \leq v_T$ для описания закономерностей распространения теплового поля в материале заготовки применима модель точечного движущегося источника, для которой учитывается распространение тепла по всем векторам декартовой системы координат. После определения конфигурации теплового источника, следует определить адекватную математическую модель нагреваемого тела. Если любой геометрический размер заготовки менее h_T , нагреваемое тело следует рассматривать в соответствии с моделью тонкой пластины, в ином случае может быть применена теплофизическая модель полубесконечного тела [94, 97, 103].

Задаваясь справочными значениями необходимых теплофизических свойств выборки титановых сплавов, выполним расчет численных значений параметров для выбора адекватных теплотехнических моделей теплового источника и нагреваемого тела. Исходные данные, а также результаты расчета значений коэффициента температуропроводности сводим в таблицу Г.1 приложения Г, а в таблицу Г.2 – результаты расчета времени воздействия теплового импульса τ для диапазона окружных скоростей $V_{кр} = 20 - 80$ м/с при $R = 0,1$ м, $\varphi_{серм} = 11,5^\circ$ и $l_1 = \frac{\pi \cdot 0,1}{180^\circ} \cdot 11,5^\circ = 0,02$ м. Затем, подставляя найденные значения, выполним расчет численных значений параметров h_T и v_T для рассматриваемых условий, результаты которого сводим в таблицы Г.3 и Г.4 приложения Г.

Выполненные расчеты показывают, что для широкой номенклатуры промышленных марок титановых сплавов и условий обработки максимальная глубина распространения теплового фронта составляет порядка 0,45 мм, что, для широкого диапазона поперечных подач и размеров АС, очевидно, будет удовлетворять условию $r_T > h_T$ и, для подавляющего большинства производственных задач, условию $\min\{l_{\text{заг}}; b_{\text{заг}}; h_{\text{заг}}\} > h_T$, где $l_{\text{заг}}, b_{\text{заг}}, h_{\text{заг}}$ – линейные размеры заготовки. В то же время, в рассматриваемом диапазоне скоростей подач, могут выполняться как условие $S_{\text{пр}} > v_T$ так и $S_{\text{пр}} \leq v_T$, что определяет целесообразность использования модели распределенного (с равномерной плотностью теплового потока по пятну контакта) быстродвижущегося источника тепла, нагревающего полубесконечное тело. При этом, в рамках принятой модели распределенного источника, плотность теплового потока по пятну контакта принимается равномерной, что является общепринятым допущением для данного класса теплофизических задач и согласуется с выбранным подходом [92, 97]. При этом, в отличие от модели равномерного стационарного источника, принятая модель учитывает периодический характер теплового воздействия, обусловленный прерывистой структурой шлифовального круга. Это исключает возможность использования равномерного закона распределения теплового потока и требует применения методов, учитывающих его импульсный и циклический характер.

Известно, что периодическая функция распределения тепловой мощности от источника удовлетворяет условиям Дирихле, в таком случае, изменение интенсивности действия теплового источника может быть выражено через функцию, разложенную в ряд Фурье. Тогда, согласно [92, 97], выражение для определения температуры нагрева зоны контакта АС и заготовки для условий нагрева полубесконечного тела периодическим движущимся источником тепла будет иметь вид:

$$T_{\text{нагр},k}(x, R, \Delta\tau) = T_0 + \frac{q_{\text{нагр}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{м.з.}} \cdot \vec{r}} \cdot e^{\left(\frac{V_{\text{т.и.}} \cdot (x + \vec{r} \cdot \sqrt{A_k + 0,5})}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}} \right)} \cdot \left[\begin{array}{l} a_k \cdot \cos \left(k \cdot \omega \cdot \Delta\tau - \frac{V_{\text{т.и.}} \cdot (x + \vec{r} \cdot \sqrt{A_k + 0,5})}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}} \right) + \\ + b_k \cdot \sin \left(k \cdot \omega \cdot \Delta\tau - \frac{V_{\text{т.и.}} \cdot (x + \vec{r} \cdot \sqrt{A_k + 0,5})}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}} \right) \end{array} \right], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.51)$$

где ω – циклическая частота импульсов, $2\pi/\text{с}$;

$V_{\text{т.и.}} = S_{\text{пр}}$ – скорость движения теплового источника относительно поверхности нагреваемого тела, м/с;

T_0 – исходная температура заготовки, $^\circ\text{C}$;

$\vec{r} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – радиус-вектор (вдоль оси движения заготовки);

x, y, z – линейные координаты расчетной точки, м;

a_k, b_k – коэффициенты Фурье;

k – порядковый номер импульса;

$\Delta\tau$ – период, отсчитываемый по временной шкале, с;

A_k – аргумент, определяемый как [94, 97]:

$$A_k = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot k \cdot a_{м.з.} \cdot \omega}{V_{т.и.}^2} \right)^2}. \quad (3.52)$$

Циклическая частота импульсов определяется в соответствии со следующей зависимостью [94, 97]:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{\tau_{п}}, 2\pi/c, \quad (3.53)$$

где $\tau_{п} = \tau_1 + \tau_2$ – период микроцикла, с.

По отношению к временной оси, график функции изменения интенсивности подвода тепла в зону резания от воздействия АС круга будет иметь вид несимметричной функции, для описания которой используется ряд Фурье из синусов, для которого значение коэффициента Фурье b_k может быть определено из следующего выражения [94, 97]:

$$b_k = (-1)^k \cdot \frac{2 \cdot q_{нагр}}{\pi \cdot k} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot \tau_{п}}{\tau_1}\right). \quad (3.54)$$

Значение коэффициента a_k при этом будет равно нулю.

Тогда, решая совместно уравнения (3.51), (3.52) и (3.54), можно вывести следующее выражение для определения температуры нагрева в центре зоны контакта:

$$T_{нагр}(x, R, \Delta\tau) = T_0 + \frac{q_{нагр}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{м.з.} \cdot \vec{r}} \cdot e^{\left(\frac{-V_{т.и.} \cdot (x + \vec{r})}{2 \cdot a_{м.з.}}\right)} \cdot F(R, \Delta\tau), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.55)$$

где $F(R, \Delta\tau)$ – функция, учитывающая периодичность действия источника тепла:

$$F(R, \Delta\tau) = 1 + \frac{2 \cdot (\tau_1 + \tau_2)}{\pi \cdot \tau_1} \cdot \sum_{k=1}^n \left[\frac{(-1)^k}{k} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot \tau_{п}}{\tau_1}\right) \cdot e^{\left(\frac{-V_{т.и.} \cdot \vec{r}}{2 \cdot a_{м.з.}}\right)} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\tau_1 + \tau_2} \cdot \Delta\tau - \frac{V_{т.и.} \cdot \vec{r}}{2 \cdot a_{м.з.}} \cdot \sqrt{A_k + 0,5}\right) \right]. \quad (3.56)$$

Так как для решения практической задачи предупреждения прижогов интерес представляет распределение температуры вдоль вектора движения заготовки, то можно принять $\vec{r} = x$. В таком случае, имеем:

$$T_{нагр}(x, \Delta\tau) = T_0 + \frac{q_{нагр}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{м.з.} \cdot x} \cdot e^{\left(\frac{-V_{т.и.} \cdot x}{a_{м.з.}}\right)} \cdot F(x, \Delta\tau), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3.57)$$

$$F(x, \Delta\tau) = 1 + \frac{2 \cdot (\tau_1 + \tau_2)}{\pi \cdot \tau_1}.$$

$$\cdot \sum_{k=1}^n \left[\frac{(-1)^k}{k} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot \tau_{II}}{\tau_1}\right) \cdot e^{\left(-\frac{V_{Т.И.} \cdot x}{a_{М.З.}}\right)} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\tau_1 + \tau_2} \cdot \Delta \tau - \frac{V_{Т.И.} \cdot x}{2 \cdot a_{М.З.}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot k \cdot a_{М.З.} \cdot \omega}{V_{Т.И.}^2}\right)^2}\right) + 0,5}\right) \right] \cdot (3.58)$$

Однако, для получения достоверных результатов о тепловом состоянии поверхностного слоя заготовки необходимо учесть охлаждение поверхности заготовки в период прохождения над поверхностью контакта впадины круга. Тогда, придерживаясь принципа суперпозиции при сложении температурных полей, охлаждение заготовки при прохождении впадины может быть описано через разность между температурой нагрева заготовки после первой половины микроцикла и температурой охлаждения заготовки за время действия второго микроцикла.

В отличие от нагрева, где теплообмен происходит через поверхность, ограниченную зоной контакта АС и материала заготовки, теплообмен в процессе охлаждения происходит практически вдоль всей поверхности контакта АС и заготовки. Следовательно, часть выражения (1.13), определяющую изменение температуры заготовки при охлаждении, условно можно считать справедливой. Тогда выражение для определения изменения температуры заготовки при охлаждении примет следующий вид:

$$T_{\text{охл}}(x) = \frac{2 \cdot q_{\text{охл}}}{\lambda_{\text{М.З.}}} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{a_{\text{М.З.}} \cdot [\tau - (i - 1) \cdot \tau_2]} \cdot \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{М.З.}} \cdot [\tau - (i - 1) \cdot \tau_2]}}\right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.59)$$

где $q_{\text{охл}}$ – удельный тепловой поток при охлаждении, Вт/м².

Следовательно, неизвестной переменной в данном выражении является величина удельного теплового потока охлаждения заготовки. Исходя из геометрической конфигурации профиля, образуемого заготовкой и шлифовальным кругом при прерывании резания и особенностей распределения охлаждающей среды (рис. 1.2) [33, 111, 113, 125,], для определения параметров охлаждения заготовки целесообразно рассмотреть частного случая конвективного теплообмена при вынужденном продольном движении охлаждающей среды вдоль неограниченной плоской стенки.

Рассмотрение вынужденного характера течения среды продиктовано тем, что геометрическая конфигурация круга (наличие дискретных АС), наряду с особенностями кинематики его работы, способствуют созданию локальных зон повышенного (перед сегментом) и пониженного (за сегментом) давлений, создающих потенциал для вынужденного течения среды. Для построения математической тепловой модели процесса прерывистого шлифования примем следующие допущения:

— при обтекании охлаждающей средой зоны резания охлаждаемая стенка рассматривается в плоской конфигурации, что является справедливым ввиду того, что

фактический радиус поверхности обтекания R_ϕ как правило на порядки превышает глубину резания t ;

- обтекание охлаждаемой поверхности происходит под нулевым углом атаки;
- соблюдается условие неразрывности потока $\frac{d\rho}{\rho dt} + div u = 0$;
- охлаждающая среда имеет постоянную начальную температуру и изотропна;
- охлаждение происходит по всей линии контакта АС с заготовкой;
- источник охлаждения является периодически действующим с постоянной интенсивностью (переходными процессами можно пренебречь);
- сжимаемостью воздуха и жидкостей можно пренебречь;
- скорость движения приграничного слоя жидкости из условия несжимаемости равна рабочей скорости круга;
- толщина слоя охлаждающей среды в сечении, перпендикулярном направлению его движения, постоянна;
- определяющим размером обтекаемой поверхности является длина дуги профиля среза, формируемого единичным сегментом l_{cp} ;
- лучистым теплообменом можно пренебречь.

Численное значение удельного теплового потока при охлаждении может быть найдена из закона Ньютона-Рихмана [59, 81]:

$$q_{охл.i} = \alpha_{охл.} \cdot (T_{стi} - T_{срi}), \text{ Вт/м}^2, \quad (3.60)$$

где $T_{стi} = \sum_{k=1}^n T_{нагр}$ – средняя текущая температура поверхности заготовки в зоне обработки, °С;

$T_{срi}$ – температура охлаждающей среды, °С.

$\alpha_{охл.}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Численное значение коэффициента теплоотдачи может быть найдено из критериального уравнения теплоотдачи, имеющего следующий вид [59, 81, 92]:

$$\alpha_{охл.} = \frac{Nu_{ср} \cdot \lambda_{ср}}{l_{опр.}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (3.61)$$

где $Nu_{ср}$ – критерий Нуссельта для охлаждающей среды;

$\lambda_{ср}$ – коэффициент теплопроводности охлаждающей среды, Вт/(м·К);

$l_{опр.} = l_{ср.}$ – определяющий размер условной пластины, м.

Известно, что при обтекании плоской поверхности в приграничном слое среды может происходить формирование нескольких гидродинамических слоев. Однако, также известно, что и пристеночном гидродинамическом слое, где скорость потока среды стремится к нулевому

значению, вне зависимости от критической длины сохраняется ламинарный режим течения жидкости. В таком случае, для нахождения усредненных значений коэффициента теплоотдачи, в первом приближении, могут быть использованы параметры ядра потока. Это позволяет исключить необходимость эмпирического определения критических значений критерия Рейнольдса $Re_{кр}$, что, в широком диапазоне изменения условий обработки и теплообмена не представляется возможным.

Следовательно, режим течения жидкости будет определяться значением критерия Рейнольдса, определяемого как [59]:

$$Re = \frac{V_{ср} \cdot \rho_{ср} \cdot l_{опр.}}{\mu_{ср}}, \quad (3.62)$$

где $\mu_{ср}$ – динамическая вязкость охлаждающей среды, Па·с;

$\rho_{ср}$ – плотность охлаждающей среды, кг/м³;

$V_{ср}$ – скорость течения охлаждающей среды, м/с.

В зависимости от полученного значения критерия Рейнольдса, можно условно считать режим течения [59]:

- ламинарным при $Re \leq 2300$;
- переходным $2300 < Re \leq 10^4$;
- турбулентным при $Re > 10^4$.

Для рассматриваемых условий, важным фактором, определяющим режим течения охлаждающей среды, будет также являться его неизотермический характер, способствующий развитию различного рода явлений, способствующих преждевременному переходу режима течения в турбулентный (турбулизация потока), таких как, например образование пузырьков воздуха при кипении СОЖ, образование высокоинтенсивных конвективных потоков при обдувании охлаждаемой поверхности воздухом и т.д. [76, 92, 101, 103, 105, 132, 138]. Необходимо также отметить тот факт, что обтекание охлаждаемой поверхности в реальности происходит в частично ограниченном пространстве при движении, что также является предпосылками для локальных завихрений среды и её турбулизации (вследствие вынужденного перемешивания слоев).

Ввиду того, что процессы и параметры перехода режимов течения для рассматриваемых условий обработки изучены недостаточно, для получения зависимостей, определяющих интенсивность охлаждения поверхности при прохождении впадин круга, с опорой на известные положения теории гидро- аэродинамики [59, 81, 97], примем допущение об исключительно турбулентном характере движения охлаждающей среды. В таком случае, численное значение критерия Нуссельта будет определяться из следующего выражения [92]:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{cp}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{cp,ст.}} \right)^{0,25} \quad (3.63)$$

где Pr_{cp} , $Pr_{cp,ст.}$ – значения критерия Прандтля при средней (расчетной) температуре и температуре стенки, определяемые как:

$$Pr_{Ti} = \frac{C_{cp,Ti} \cdot \mu_{cp,Ti}}{\lambda_{cp,Ti}}, \quad (3.64)$$

где $C_{cp,Ti}$ – теплоемкость среды при температуре Ti , Дж/(кг·К);

$\mu_{cp,Ti}$ – кинематическая вязкость среды при температуре Ti , м²/с;

$\lambda_{cp,Ti}$ – коэффициент теплопроводности среды при температуре Ti , Вт/(м·К).

Известно, что для воздуха, в широком диапазоне температур 0 ... 1000 °С справедливо равенство $Pr_{cp} \approx Pr_{cp,ст.} = 0,7$ [13, 81], тогда $Pr_{cp}^{0,43} = 0,857$, в таком случае выражение (3.69) для случая воздушного охлаждения может быть упрощено до вида:

$$Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8} \quad (3.65)$$

В случае использования СОЖ на водной основе процесс теплообмена будет происходить в условиях вынужденного движения кипящей жидкости, для которого применяется приведенный коэффициент теплоотдачи, учитывающий совместное влияние конвективного теплообмена и теплообмена в кипящем слое. В первом приближении, коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении охлаждающей жидкости может быть определен из условий [92]:

— при $\alpha_{охл.кип.} < 0,5 \cdot \alpha_{охл.конв.}$:

$$\alpha^*_{охл.} \approx \alpha_{охл.конв.}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad (3.66)$$

— при $0,5 \leq \alpha_{охл.кип.} \leq 2 \cdot \alpha_{охл.конв.}$:

$$\alpha^*_{охл.} = \frac{4 \cdot \alpha_{охл.конв.} + \alpha_{охл.кип.}}{5 \cdot \alpha_{охл.конв.} - \alpha_{охл.кип.}} \cdot \alpha_{охл.конв.}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad (3.67)$$

— при $2 \cdot \alpha_{охл.конв.} < \alpha_{охл.кип.}$:

$$\alpha^*_{охл.} \approx \alpha_{охл.кип.}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (3.68)$$

где $\alpha_{охл.конв.}$, $\alpha_{охл.кип.}$ – коэффициенты теплоотдачи для условий конвективного теплообмена и теплообмена при кипении Вт/(м²·К).

Более подробно, методика определения значений $\alpha_{охл.конв.}$ и $\alpha_{охл.кип.}$ описана в [92].

Справедливо стоит отметить, что все допущения принимаются исключительно в рамках построения некоторой универсальной модели и, в зависимости от конкретных условий обработки, могут корректироваться для получения более высокой точности расчетов. Сюда же стоит отнести возможность использования известных регрессионных моделей для определения текущих значений теплофизических свойств материалов (СОЖ, воздуха, материала заготовки

или абразива). В этом случае, повышению точности решения также может способствовать использование численных методов или многоитерационного подхода к определению теплофизических величин – для каждого полушага цикла нагрева и охлаждения, соответствующих моментам времени $\Delta\tau_k + \tau_1$ и $\Delta\tau_k + \tau_2$.

3.4. Моделирование нагрева заготовки при шлифовании

Проверка адекватности предложенной аналитической модели теплового воздействия на обрабатываемую заготовку осуществлялась в программной среде *COMSOL Multiphysics*. Численная имитация воспроизводила процесс нагрева заготовки при взаимодействии с движущимся поверхностным источником тепла.

Решение тепловой задачи выполнялось в двумерной постановке. Моделирование процессов теплопередачи в твердых телах реализуется посредством модуля «*Heat Transfer in Solids*». Имитация тепловых процессов, происходящих в процессе шлифования и заложенных в разработанную теоретическую модель, производилась с использованием твердотельной модели (рис. 3.24, а), выполненной в виде двумерного блока модели заготовки размерами 200×10 мм с толщиной 30 мм (задается начальными условиями). Построение конечно-элементной модели производилось с использованием треугольной сетки с размерами граней в 2 мм с адаптивным локальным уменьшением размеров сетки вдоль линии профиля поверхности нагрева (рис. 3.24, б) [2, 17, 18, 44, 49, 62, 85, 106].

Теплофизическая модель подвижного источника тепла включала в себя 5 структурных элементов (рис. 3.25), 4 из которых являются стандартными, задающими начальные условия и модели, учитываемые в расчете. В качестве начальных условий задавалась температура модели заготовки равная 293 К (20 °С). Граничные условия расчета задавались двумя структурными элементами: «*Boundary Heat Source*», задающим тепловой поток постоянной мощности, «*Heat Flux*», задающим поверхностное охлаждение с постоянным коэффициентом теплоотдачи. Потери тепла, связанные с лучистым теплообменом, при проведении расчетов не учитывались в соответствии с принятыми допущениями.

Значение теплового потока, поступающего от источника тепла, задавалось комбинированным способом через аналитическую зависимость функции положения от времени, определяющую изменение центра теплового источника относительно линии обрабатываемой поверхности профиля модели заготовки, а также через генератор периодического сигнала, определяющего периодический характер действия теплового потока. Задание функции периодического охлаждения задавалось аналогично. Пример задания

глобальных переменных и функций величин теплового потока от времени, а также параметров электронной модели теплового источника представлен в приложениях Д и Е.

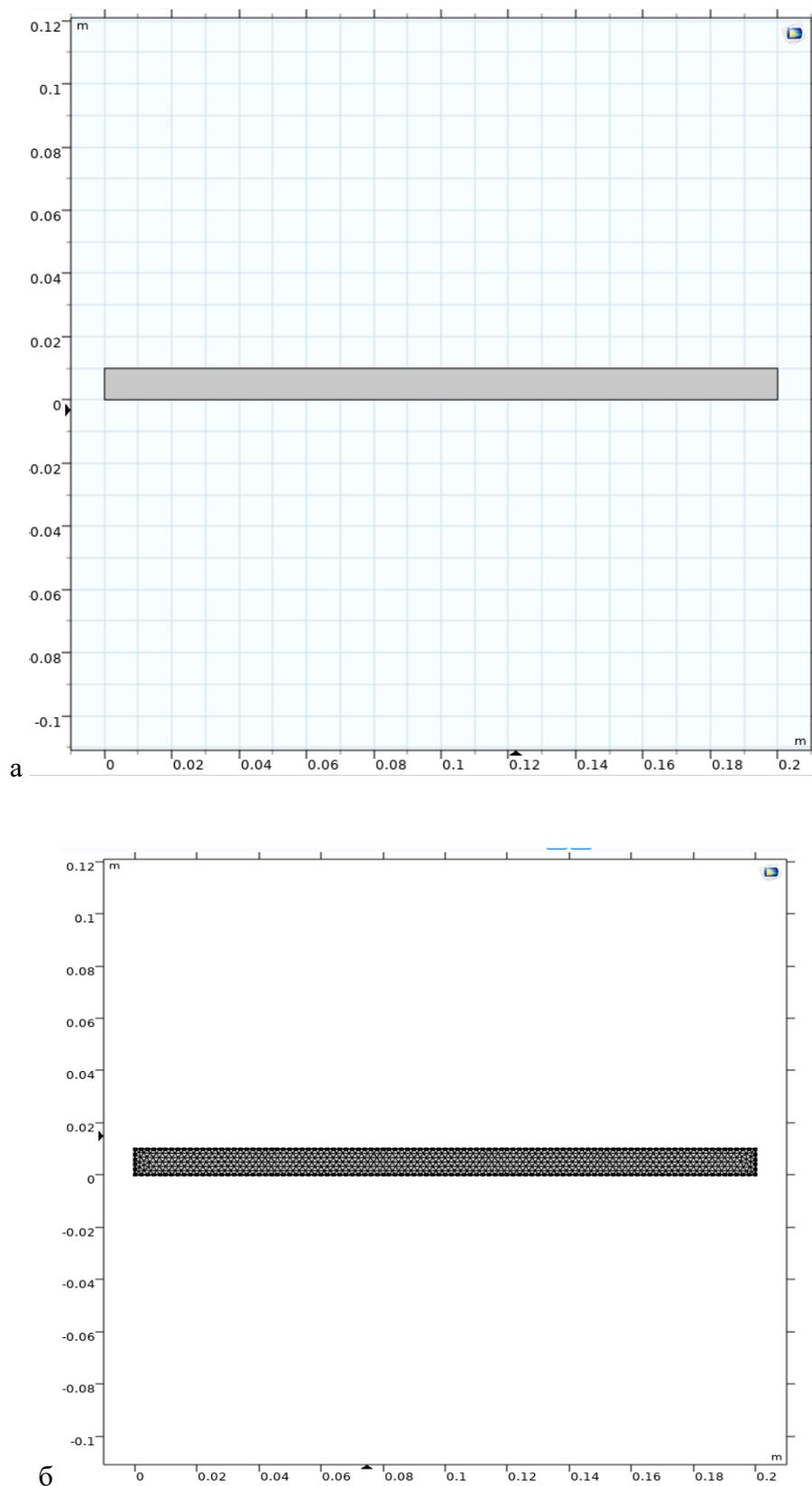


Рис. 3.24. Результат построения имитационной электронной модели заготовки:
а – твердотельной, б – конечно-элементной

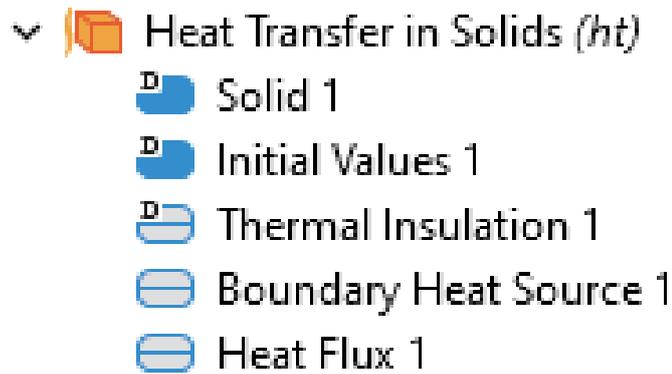


Рис. 3.25. Структура электронной тепловой модели процесса прерывистого шлифования

Приложение тепловой нагрузки (как от источника нагрева, так и охлаждения) осуществлялось через волновую функцию прямоугольного профиля с амплитудой изменения значения от 0 (отсутствует тепловой поток) до 1 (есть тепловой поток) с периодом $\tau_1 + \tau_2$ и относительной длиной теплового импульса $\frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}$ (приложение Ж) для полуцикла нагрева и $\frac{\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$ (приложение И) – для охлаждения. При этом, волновая функция для процесса охлаждения задавалась в противофазе относительно нагрева (фазовое смещение на π).

Решение выполнялось при помощи нестационарного решателя «Time Dependent» в режиме адаптивного перестроения исходной конечно-элементной сетки модели заготовки и вариацией глобальных параметров (рис. 3.26). Временной интервал выполнения вычислений задавался равным 0,0001 с, полное время расчета – 4 с.

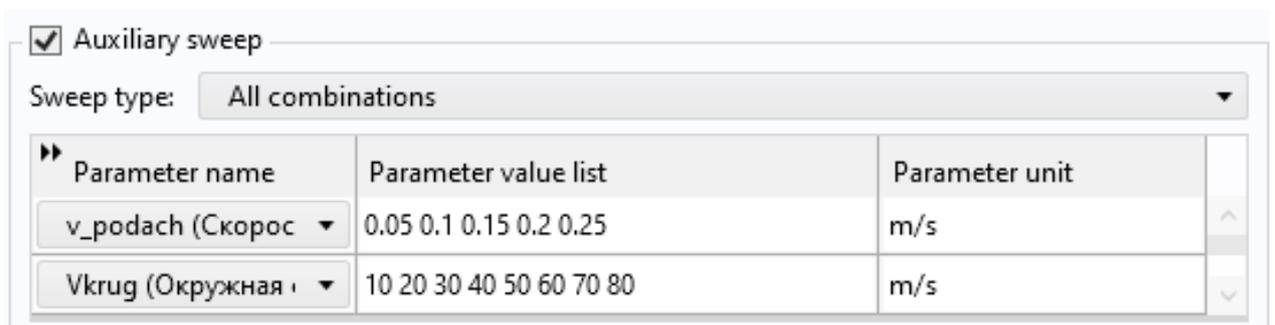


Рис. 3.26. Задание варьируемых параметров решателя

С целью проверки адекватности предложенной аналитической модели, была проведена серия параллельных расчетов с использованием аналитического метода, а также метода численного моделирования для следующих условий обработки: $C = 5$, $N = 10$, $D_{кр} = 0,2$ м, $K_з = 3\%$, $n_{сегм} = 16$ шт., $V_{кр} = 10 - 80$ м/с, $S_{пр} = 0,05 - 0,25$ м/с, $t = 0,05$ мм, $b_{сегм} \times h_{сегм} = 30 \times 20$ мм, $S_{ПОП} = 7,5$ мм/дв. ход, $\lambda_к = 1,6$ Вт/(м· К) [96], начальная температура заготовки и температура окружающей среды равны $t_{нач.м.з.} = t_{окр.} = 20$ °С, охлаждающая среда – воздух,

$\mu_{\text{тр}} = \mu_{\text{трс}} = 0,66$ [99]. Физические свойства титанового сплава, используемого в рамках этапа численного моделирования задавались в соответствии с значениями встроенной библиотеки программы. В качестве имитации обрабатываемого материала использовалась модель титанового сплава группы 6 по ASTM (аналог марки ВТ-6).

Для определения стационарных теплофизических характеристик материала заготовки для решения тепловой задачи аналитическим методом, принимаем два допущения:

— первым итерационным шагом расчета, при котором заготовка имеет теплофизические характеристики, соответствующие исходной температуре $t_{\text{нач.м.з.}} = 20$ °С можно пренебречь;

— каждый последующий контакт АС и заготовки происходит в зоне усредненной температуры нагрева (между пиковой и начальной), принятой $t_{\text{ср.м.з.}} = 500$ °С (принято в первом приближении по итогам обработки результатов численного моделирования с учетом имеющихся справочных данных).

С учетом принятых допущений, для аналитического расчета принимаем для сплава ВТ-6: $C_{\text{м.з.}}(500$ °С) = 795 Дж/(кг·К), $\lambda_{\text{м.з.}}(500$ °С) = 12 Вт/(м·К) и $\alpha_{\text{м.з.}}(500$ °С) = 0,0000037 м²/с.

Важным преимуществом кругов на вулканитовой связке, применительно к особенностям обработки титановых сплавов, выступает их относительно малая прочность удержания материала АС, следствием чего является работа круга преимущественно в режиме самозатачивания, которому соответствуют малые значения коэффициента затупления круга. В связи с этим практический интерес также представляла оценка влияния величины коэффициента затупления материала АС на тепловые характеристики процесса резания. Для этого было выполнено моделирование процесса прерывистого шлифования для условий, соответствующих работе материала АС в режиме затупления, т.е. при $K_3 = 6\%$.

По итогам выполненных расчетов были получены эпюры распределения температурных полей (рис. 3.27), по которым, с использованием функции «*timemax* ($t1$ [s], $t2$ [s], *expr*)», где *timemax* – функция определения максимума аргумента *expr* (T – температуры) в пределах отрезка времени от $t1$ до $t2$, производилось определение максимума температуры нагрева заготовки. Результаты определения численных значений пиковых температур нагрева заготовки сводим в таблицы приложения К. Для наглядности, зависимости значений пиковых температур в зоне резания от режимных параметров, типа обработки, полученные с использованием методов численного моделирования и аналитического расчета, а также результаты оценки относительной погрешности определения пиковых температур представим в виде графиков, изображенных на рисунках 3.28–3.32.

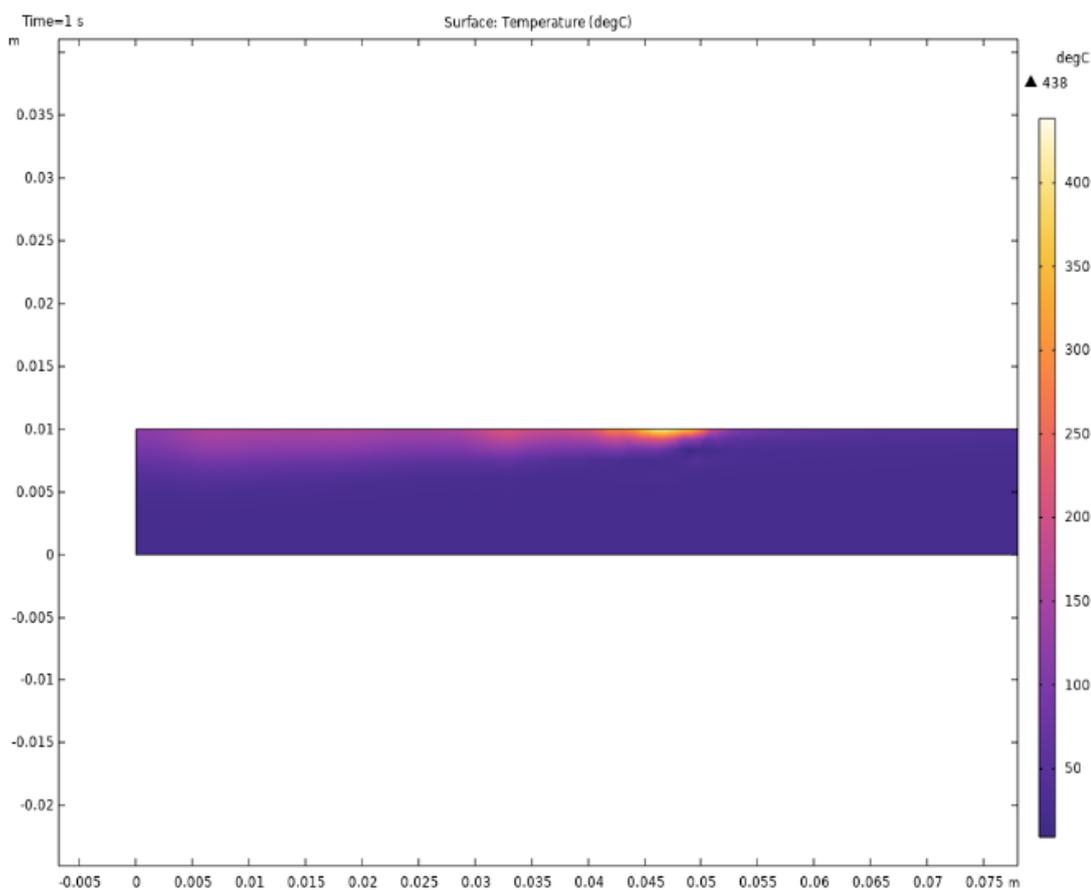


Рис. 3.27. Пример построения эпюры температурных полей в заготовке

Сопоставление результатов аналитического расчета и численного моделирования позволяет установить, что относительная погрешность расчетов в широком диапазоне варьирования параметров технологической системы является удовлетворительной. Для прерывистого шлифования, относительное отклонение результатов расчетов составляет не более 12,4 % и, в среднем составляет 8 %, что является приемлемым при решении широкого спектра технологических задач. Применительно к сплошному шлифованию предлагаемая модель в области малых скоростей продольных подач дает высокое отклонение, которое возрастает по мере увеличения рабочей скорости круга и достигает 25,9–28,6 % при скорости продольной подачи в 0,05 м/с и рабочих скоростях в 70–80 м/с. По мере увеличения скорости подачи наблюдается выраженное снижение отклонения результатов аналитических расчетов, до достижения относительного отклонения в 7,7 % при скорости продольной подачи в 0,25 м/с.

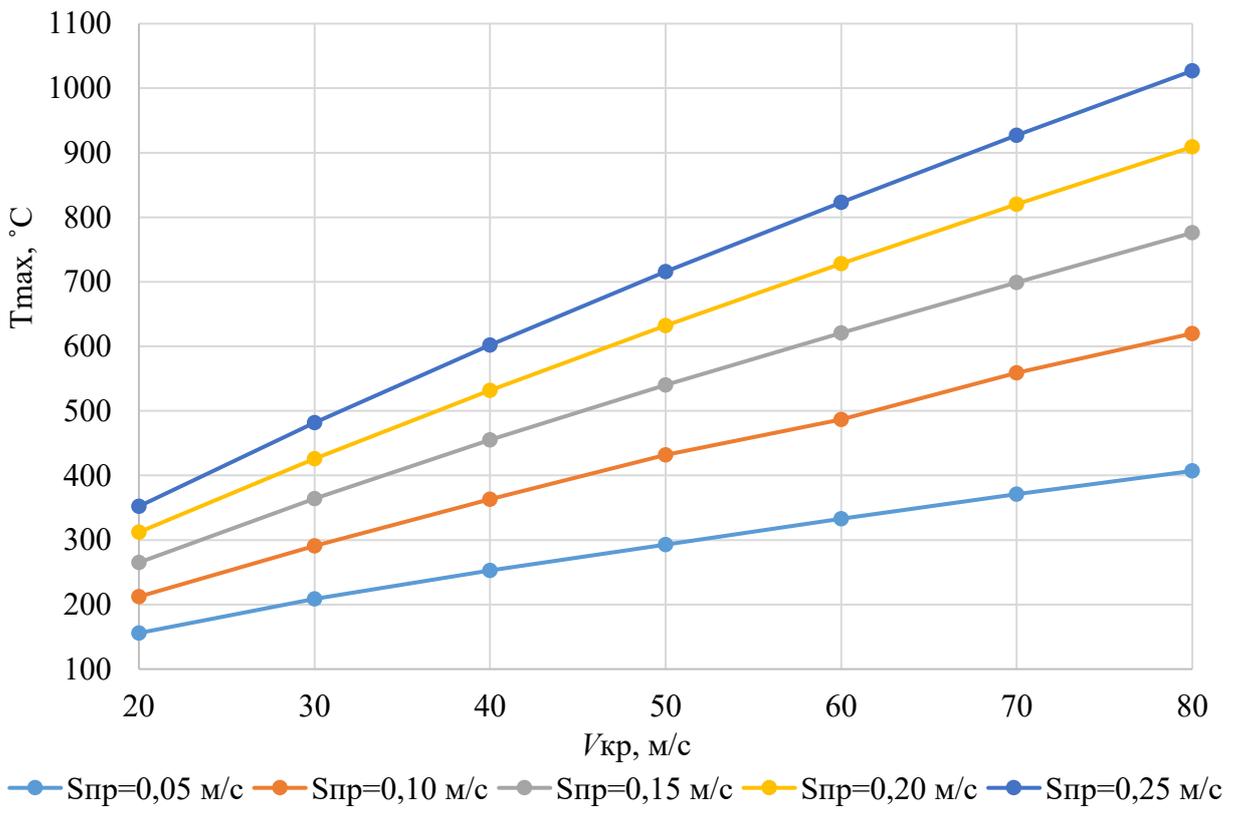
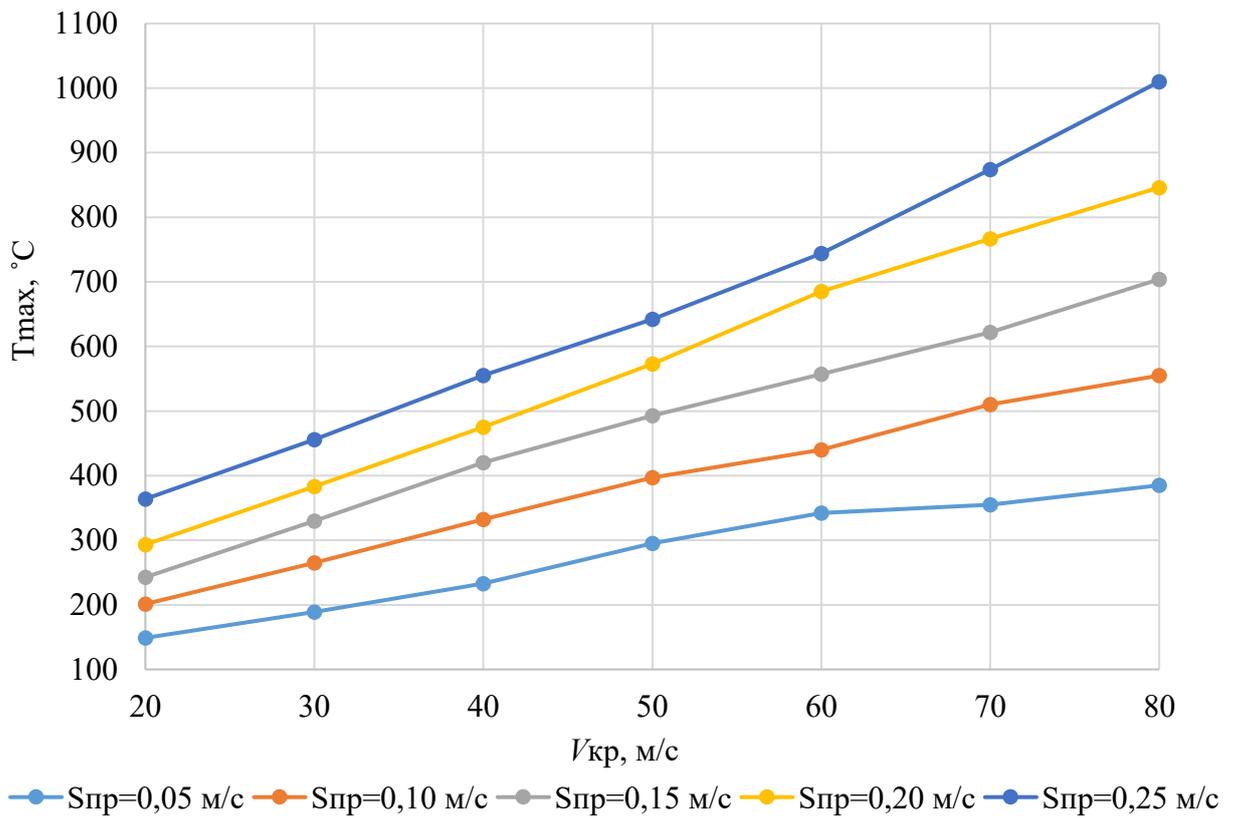


Рис. 3.28. Графики зависимости $max(T_{з,рез}) = f(S_{пр}, V_{кр})$ для прерывистого шлифования при $K_3 = 3\%$: а – по данным численного моделирования, б – по данным аналитической модели

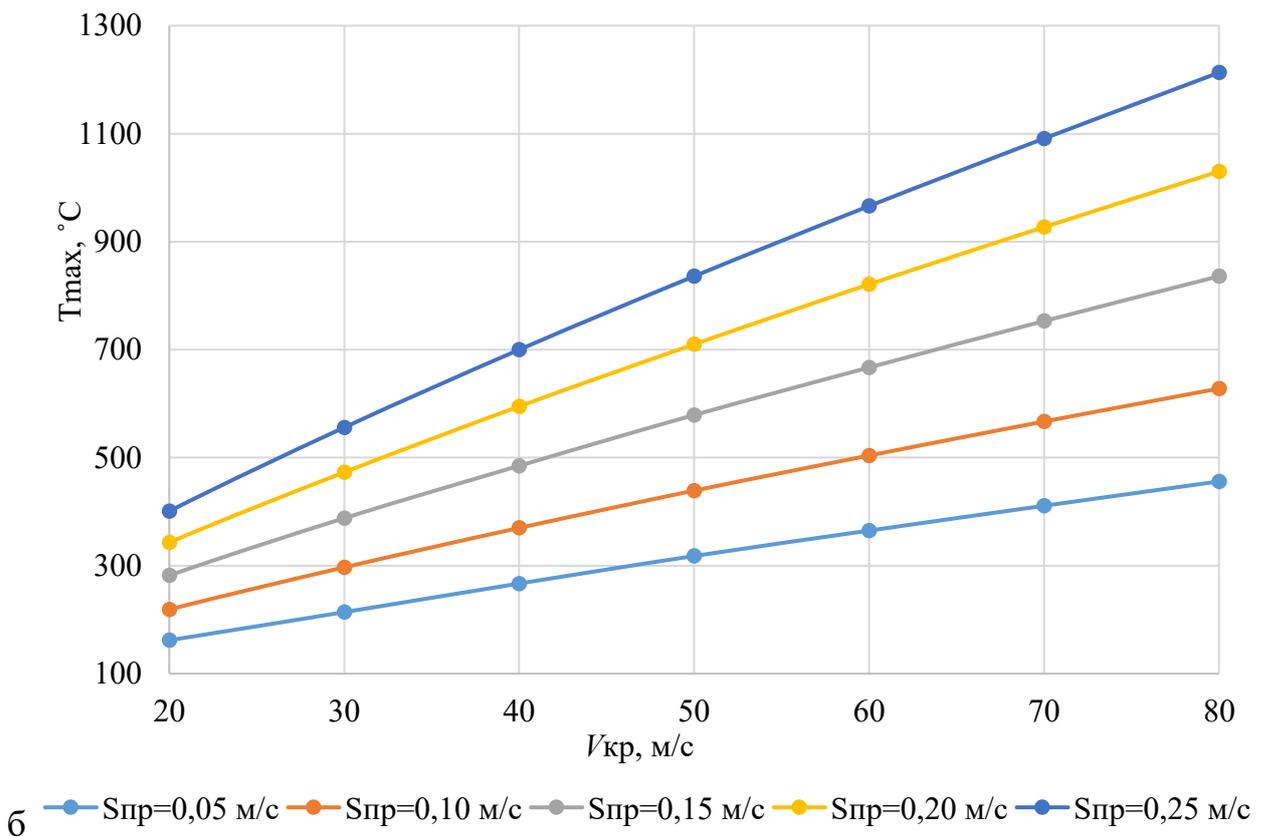
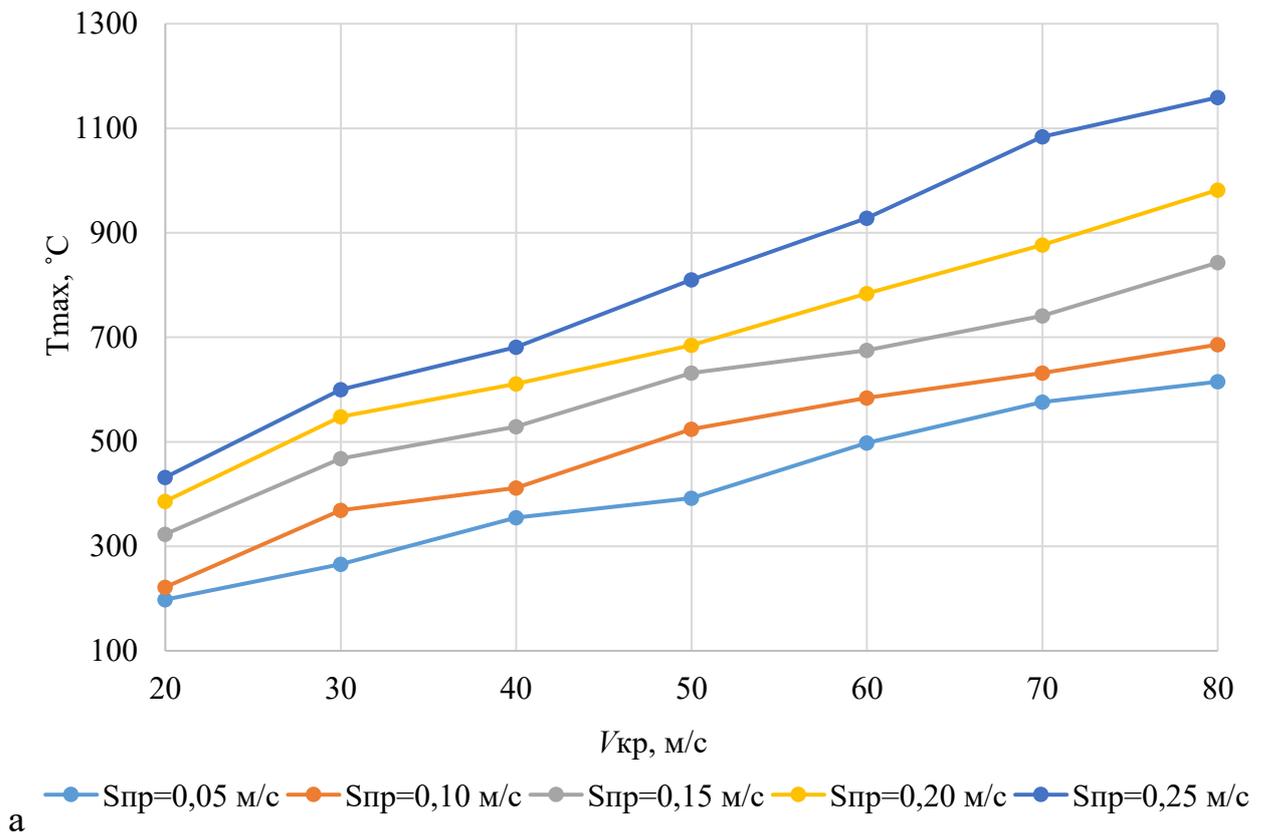
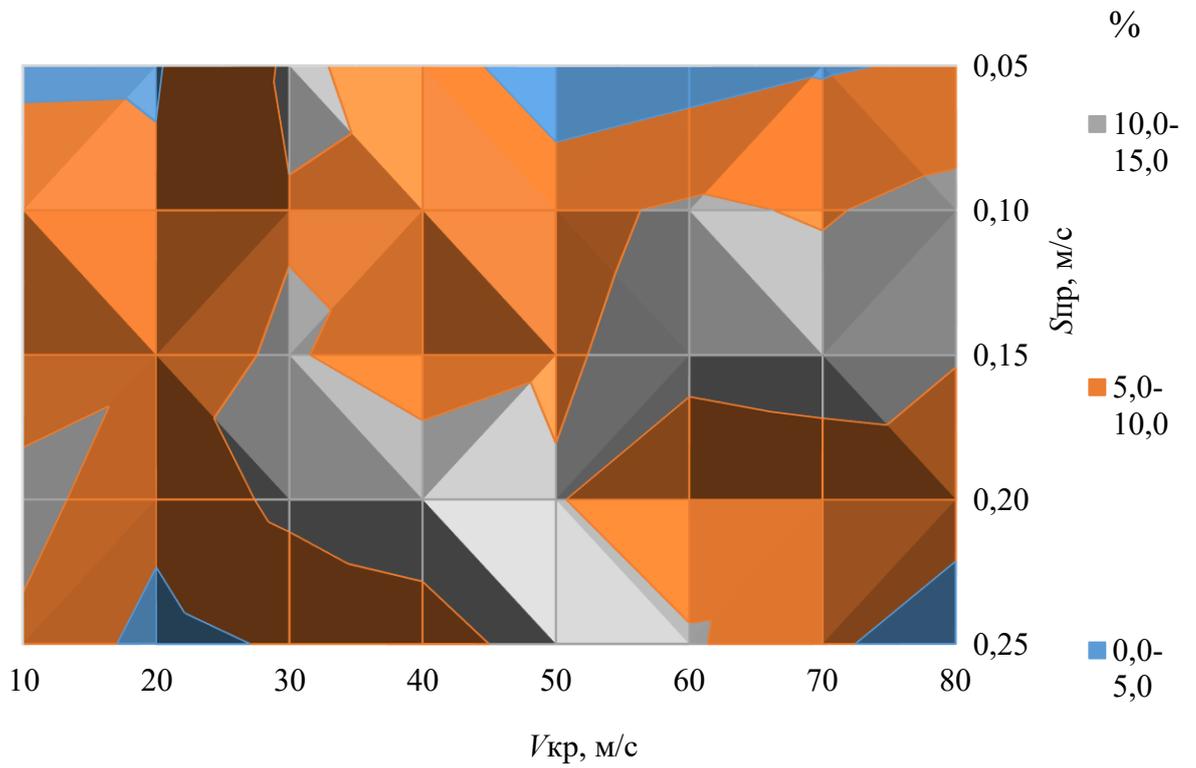
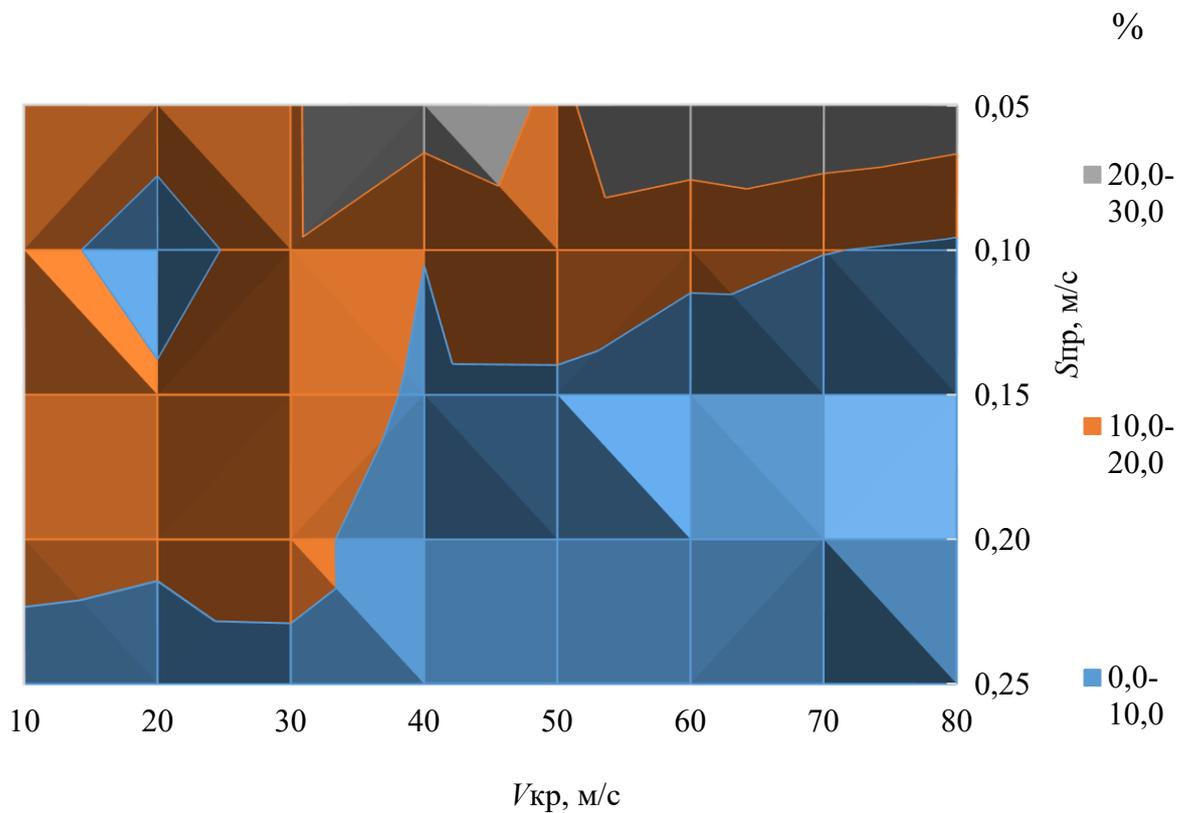


Рис. 3.29. Графики зависимости $\max(T_{з.рез}) = f(S_{пр}, V_{кр})$ для сплошного шлифования при $K_3 = 3\%$: а – по данным численного моделирования, б – по данным аналитической модели

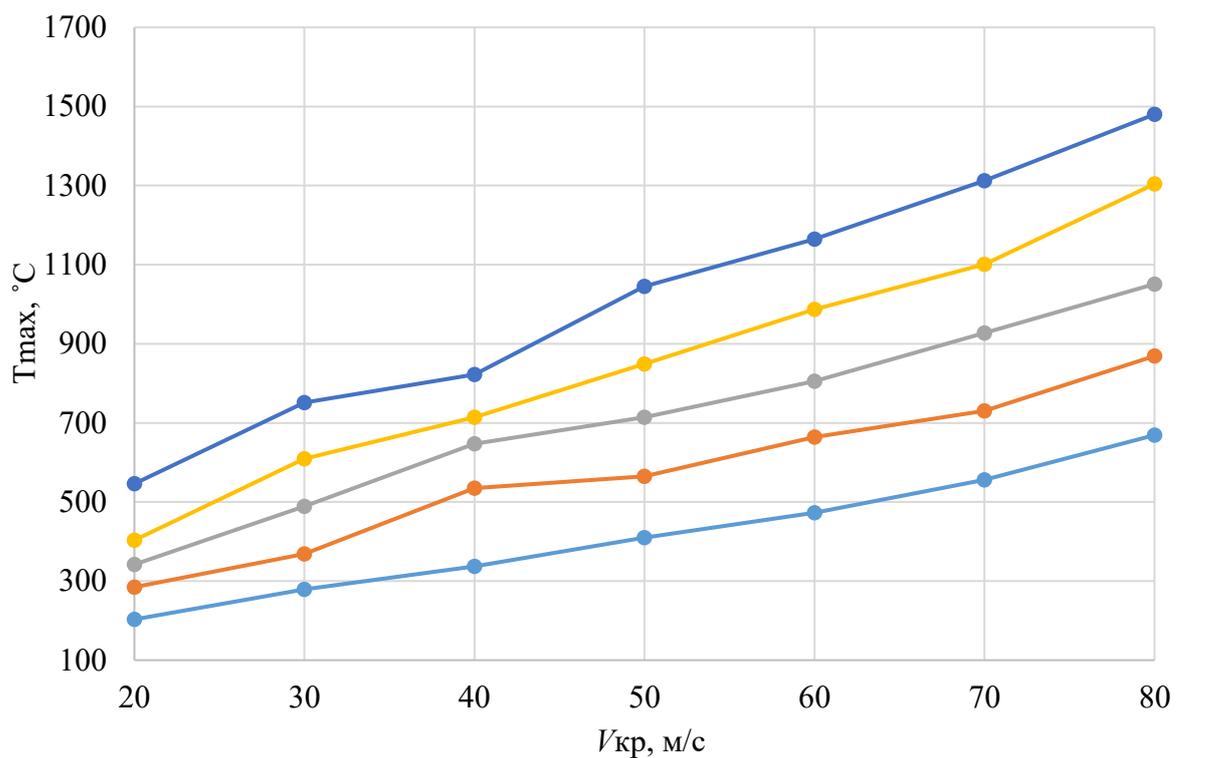


а

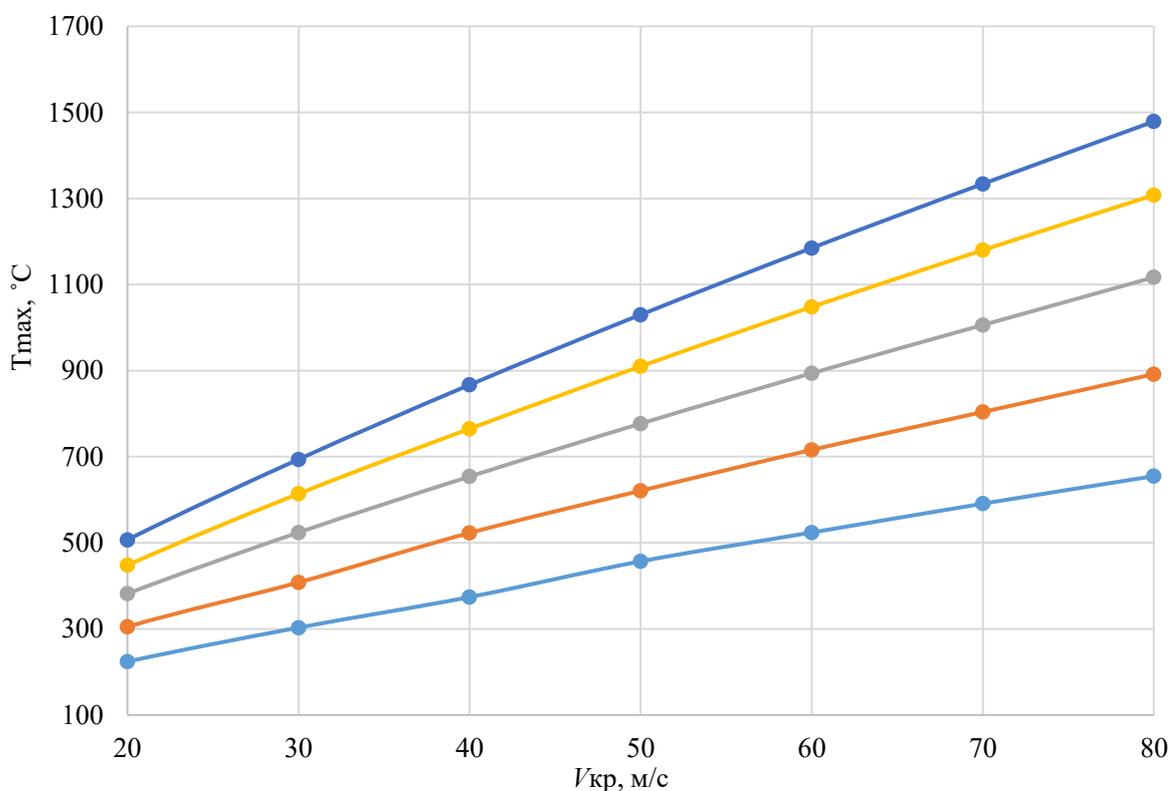


б

Рис. 3.30. Контурная диаграмма относительной погрешности расчета $\max(T_{з,рез})$ с использованием аналитической модели при $K_з = 3\%$: а – для ПШК, б – для сплошного шлифовального круга



а $S_{пр}=0,05 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,10 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,15 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,20 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,25 \text{ м/с}$



б $S_{пр}=0,05 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,10 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,15 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,20 \text{ м/с}$ $S_{пр}=0,25 \text{ м/с}$

Рис. 3.31. Графики зависимости $\max(T_{з,рез}) = f(S_{пр}, V_{кр})$ для модели прерывистого шлифования при $K_3 = 6\%$ по данным: а – численного моделирования, б – аналитического расчета

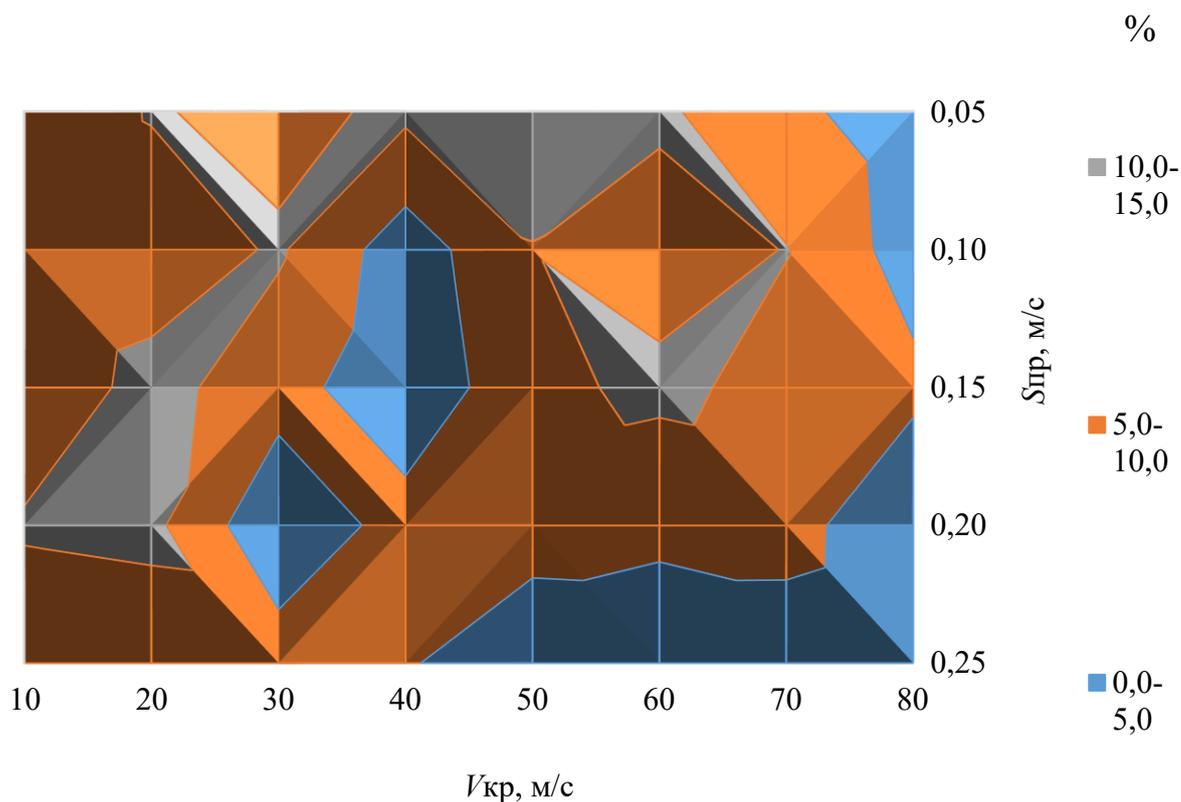


Рис. 3.32. Контурная диаграмма относительной погрешности расчета $\max(T_{z,\text{рез}})$ с использованием аналитической модели при $K_z = 6\%$

Столь высокое отклонение расчетных значений температур, полученных аналитическим методом, от значений, полученных методом численного моделирования, для случая сплошного шлифования в зоне малых скоростей подач может быть обусловлено присутствием в разработанной модели периодических функций, которые, очевидно, мало пригодны для описания неперiodического характера воздействия источника при малых скоростях подач. Увеличение же последних, способствует закономерному уменьшению периода воздействия теплового источника на определенную площадь металла, что приближает динамику нагрева к условиям, соответствующим процессу прерывистого шлифования.

Выполним серию дополнительных расчетов для оценки адекватности аналитической модели для ряда произвольных сочетаний технологических режимов обработки. Исходные параметры, результаты определения численных значений пиковых температур в зоне шлифования аналитическим и численным методами, а также оценки величины относительного отклонения сводим в таблицы приложения Л.

Таким образом, относительное отклонение результатов, полученных с использованием аналитической модели, не превышает 13,4 %, что можно считать приемлемым.

3.5. Выводы по главе 3

1. Разработаны математические зависимости для определения предельной рабочей скорости разработанной конструкции ПШК на вулканитовой связке с учетом требований ГОСТ Р 52588-2011.

2. Экспериментальная оценка физико-механических характеристик материала АС шлифовального круга 63С 10-Н СМ1-5 В позволила определить пределы прочности материала на разрыв и сжатие, составляющие 11,7 и 51,1 МПа, а также модуль упругости, составляющий $0,73 \cdot 10^5$ МПа.

3. Методом численного моделирования исследована зависимость величины коэффициента концентрации напряжений в опасном сечении АС от геометрических характеристик профиля контактных поверхностей в условиях свободного вращения круга. Установлено, что значимое влияние на коэффициент концентрации напряжений в опасном сечении сегмента оказывает ширина линии контакта фронтальной/тыльной поверхности сегмента с вертикальными поверхностями установочного паза корпуса круга b_k . Показано, что в диапазоне варьирования $b_k = 5 \dots 150$ мм значения коэффициентов концентрации напряжений по эквивалентным напряжениям изменяются в диапазоне $\alpha_{\sigma_{\text{экв}}} = 0,85927 \dots 2,44681$, по радиальным – в диапазоне $\alpha_{\sigma_r} = 0,902894 \dots 2,437943$, а сама зависимость указанных коэффициентов от величины b_k в рассматриваемом диапазоне варьирования значений хорошо описывается полиномиальным уравнением регрессии шестой степени.

4. Методом численного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние АС в условиях предельной рабочей скорости вращения круга. Установлено, что наибольшие напряжения, составляющие 49,8 МПа и 46,7 МПа для вариантов нагружения с $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход и $S_{\text{ПОП}} = 30$ мм/дв. ход, достигаются при врезании сегмента в материал заготовки и концентрируются вдоль фронтальной кромки. Картина распределения векторов главных напряжений при этом свидетельствует о формировании вдоль нагружаемой кромки напряжений сжатия. В условиях контакта по всей длине профиля периферии АС пиковые напряжения составляют 10,9 МПа и 13,8 МПа для вариантов нагружения с $S_{\text{ПОП}} = 7,5$ мм/дв. ход и $S_{\text{ПОП}} = 30$ мм/дв. ход и также имеют сжимающий характер, что говорит о наличии у материала АС достаточной прочности для работы в условиях силового нагружения. Деформированное состояние сегмента характеризуется малыми эквивалентными деформациями, не превышающими 8,29 мкм в момент врезания АС в заготовку и 2,56 мкм – при контакте по всей длине дуги профиля периферии.

5. Экспериментально, методом крутильного маятника, определен коэффициент вязкого сопротивления материала АС шлифовального круга 63С 10-Н СМ1-5 В, среднее значение которого составило 1,59 (Н·с)/м.

6. С использованием электронной упрощенной одномассовой имитационной модели технологической системы, построенной в программной среде *COMSOL Multiphysics*, была выполнена оценка влияния демпфирующей способности вулканитовой связки на амплитудно-частотные характеристики динамической системы, нагруженной периодической вынуждающей силой. По результатам выполненной серии численных расчетов было установлено, что наличие у вулканитовой связки демпфирующих свойств способствует достаточно выраженному относительному снижению амплитуды виброперемещений, до 3,46–24,82 % в диапазоне значений вынуждающего усилия 100...700 Н при периодичности воздействия от 0,00049 до 0,00196 с. Установлено наличие прямой зависимости относительного снижения амплитуды виброперемещений от частоты и величины вынуждающего усилия в рамках рассматриваемого диапазона варьирования их значений.

7. Предложена аналитическая теплофизическая модель нагрева заготовки при прерывистом шлифовании. Установлено, что для широкой номенклатуры промышленных марок титановых сплавов и условий обработки максимальная глубина распространения теплового фронта составляет порядка 0,45 мм, что является несопоставимо малым значением в сравнении с ожидаемым радиусом зоны контакта и минимальными размерами сегментов, получаемых из стандартных абразивных брусков и свидетельствует о целесообразности применения модели распределенного быстродвижущегося источника тепла, нагревающего полубесконечное тело при моделировании процесса плоского прерывистого шлифования титановых сплавов.

8. Сопоставление результатов расчета пиковых значений температур заготовки в процессе шлифования, полученных с использованием предложенной аналитической модели и метода численного моделирования, позволило установить, что отклонение расчетных значений составляет не более 13,4 %.

ГЛАВА 4. Экспериментальная оценка эффективности применения и работоспособности прерывистых шлифовальных кругов на вулканитовой связке

Экспериментальные исследования процесса прерывистого шлифования титановых сплавов кругами на вулканитовой связке проводились для решения следующего ряда задач:

- верификации разработанной теплофизической модели процесса прерывистого шлифования титановых сплавов;
- оценки эффективности применения ПШК на вулканитовой связке по критериям температуры в зоне шлифования и вибронагруженности ТС;
- установления эмпирических зависимостей между качественными характеристиками обработанной поверхности, свойствами обрабатываемого сплава и параметрами ТС;
- установления эмпирических зависимостей между коэффициентом шлифования, свойствами обрабатываемого сплава и параметрами ТС.

4.1. Методика экспериментальных исследований

4.1.1. Изготовление прерывистого шлифовального круга на вулканитовой связке.

Подготовка к экспериментальным исследованиям

С целью проведения натурных испытаний работоспособности предложенной конструкции ПШК, было выполнено его изготовление, с последующим проведением прочностных испытаний на специальном стенде.

Была выбрана рассмотренная ранее конфигурация шлифовального круга, соответствующая следующим параметрам: $D_{кр} = 0,2$ м, $n_{сегм} = 16$ шт., $b_{сегм} \times h_{сегм} = 30 \times 20$ мм. Сегменты для исследуемых модификаций ПШК изготавливались из абразивных брусков на основе вулканитовой, бакелитовой и керамической связок серии БП 30x20x200 63С 10-Н СМ1-5 (В/Б/К) ГОСТ 33534-2015.

Изготовление ПШК для проведения натурных испытаний выполнялось в соответствии с описанной ранее технологией, крепление АС в корпусе круга осуществлялось при помощи эпоксидного клея, глубина паза под установку сегмента была принята равной $l_{уст} = 10$ мм для обеспечения запаса прочности в клеевом соединении. Результаты разработки рабочего эскиза и изготовления ПШК приведены на рисунках 4.1 и 4.2.

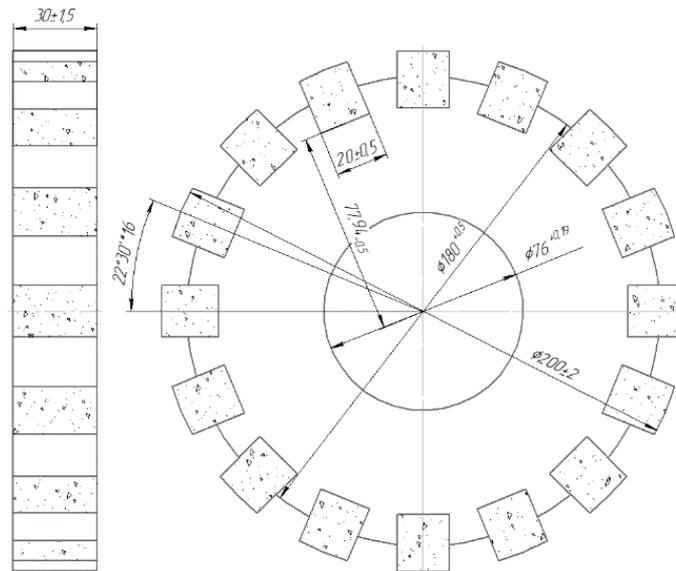


Рис. 4.1. Рабочий эскиз прерывистого шлифовального круга

После сборки ПШК выполнялась его статическая балансировка при помощи комплекта специальной оснастки, общий вид которой приведен на рисунке 4.3.



Рис. 4.2. Прерывистый шлифовальный круг на вулканитовой связке



Рис. 4.3. Оснастка для статической балансировки шлифовальных кругов:
 а – балансировочное приспособление («ножи»), б – балансировочная оправка, в –
 балансировочная планшайба с грузиками

После предварительной статической балансировки ПШК подвергались испытаниям на механическую прочность при вращении на специализированном стенде серии СР-400В (рис. 4.4). Испытания проводились в соответствии с методикой, регламентируемой ГОСТ 30513-97 [24], а также ГОСТ 12.3.023-80 [20], посредством вращения круга в закрытой камере стенда в течение 10 минут при полуторной (от 49 м/с) предельной рабочей окружной скорости вращения, равной 74 м/с (3533 об/мин).



Рис. 4.4. Общий вид стенда для прочностных испытаний шлифовальных кругов серии СР-400В:
1 – панель управления, 2 – привод, 3 – испытательная камера

По итогам проведенных испытаний серии ПШК, оснащённых сегментами на основе различных связанных абразивов, было установлено, что для испытательной скорости, соответствующей предельной рабочей скорости 49 м/с, все варианты материального исполнения шлифовального круга удовлетворяют требованиям прочности. Признаков начала разрушения корпуса круга, а также АС по итогам последующих микроскопических исследований выявлено не было.

Технологические испытания шлифовальных кругов, выполнялись на универсальном плоскошлифовальном станке серии 3Д711ВФ11 мод. 31, общий вид которого приведен на рисунке 4.5. Перед установкой круга на станок производилось контрольное измерение радиального биения центрирующей поверхности шпинделя станка по методике, описанной в [23], в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.6. По итогам проведенных измерений было установлено, что биение центрирующей поверхности шпинделя во всем диапазоне рабочих скоростей испытаний круга не превышает 0,002 мм, что удовлетворяет требованиям к точности для используемого класса оборудования [23].



Рис. 4.5. Общий вид плоскошлифовального станка серии 3Д711ВФ11 мод. 31

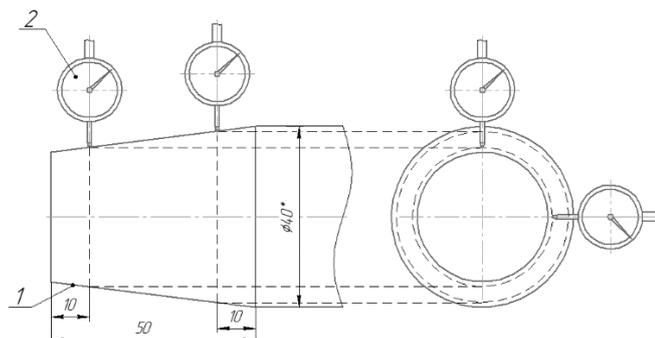


Рис. 4.6. Схема контроля радиального биения центрирующей поверхности шпинделя станка 3Д711ВФ11: 1 – конус шпинделя станка, 2 – индикатор часового типа ИЧ 0-1 0,001 мм

Перед началом проведения каждого эксперимента, а также после замены изношенных АС круг после установки на станок подвергался первичной (для новых сегментов) и вторичной периодической правке со съемом слоя в 0,02–0,03 мм после наработки в течение 30 минут.

4.1.2. Методика экспериментальной оценки качества обработанной поверхности

Качество обработанной поверхности является ключевым параметром, достигаемым при шлифовании. При проведении натурных экспериментов в рамках проводимого исследования, производился контроль качества обработанной поверхности по следующим критериям:

- среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости R_a , мкм;
- волнистость $W(y_B)$, мкм;
- наличие дефектов структуры и сплошности поверхностного слоя: прижогов, шаржирования, микротрещин.

Измерение параметров шероховатости и волнистости обработанной поверхности производилось с использованием автоматического профилометра серии *Mitutoyo Surftest SJ-410*, общий вид которого приведен на рисунке 4.7. Оценка шероховатости и волнистости производились в режиме автоматической обработки измерений «фильтрованный профиль

шероховатости/волнистости». В качестве результирующих значений параметров качества обработанной поверхности принималось среднеарифметическое значение измеряемого параметра, полученное по итогам измерений в трех точках, равноудаленных вдоль продольной оси детали.

Для обеспечения стационарности процесса резания, измерение качественных характеристик обработанной поверхности выполнялось после прохода круга с наработкой (после правки) в пределах $\tau_{\text{наработка}} = 10 - 20$ минут. Также, в ходе оценки влияния параметров ТС на качество обработанной поверхности предусматривалась серия контрольных экспериментов, выполняемых с использованием ПШК на основе бакелитовых и керамических связок, а также сплошных кругов на вулканитовой связке с аналогичными технологическими характеристиками (состав абразива, номер структуры, зернистости, группа твердости).



Рис. 4.7. Общий вид автоматического профилометра *Mitutoyo Surftest SJ-410*

Экспериментальное установление зависимости между качественными характеристиками обработанной поверхности и режимными параметрами обработки выполнялось для следующих условий обработки:

- $S_{\text{пр}} = 0,05$ и $0,25$ м/с;
- $V_{\text{кр}} = 19$ и 49 м/с;
- $t = 0,005$ и $0,105$ мм;
- охлаждение: воздух и СОЖ (ЭКОГРИНД 10М, концентрация 7%).

Для проведения экспериментальной оценки влияния параметров ТС на шероховатость и волнистость обработанной поверхности, а также на значения пиковой амплитуды виброперемещений корпуса шпиндельного узла станка и коэффициента шлифования использовались призматические заготовки размерами $a_1 \times b_1 \times h_1 = 100 \times 40 \times 30$ мм.

Выборка материалов для изготовления образца включала в себя пять марок промышленных титановых сплавов, относящихся к разным группам обрабатываемости [2, 2]: ВТ-1 (гр. I), ВТ-14 (гр. II), ВТ-6 (гр. III), ВТ-9 (гр. IV) и ВТ-22 (гр. V); состояние поставки –

штамповка с отжигом. Минимизация влияния изменчивости физико-механических свойств металла достигалась за счет использования по всем экспериментам заготовок, выполненных из металла, относящегося к одной партии.

4.1.3. Методика экспериментальной оценки вибронгруженности технологической системы

Оценка вибронгруженности технологической системы производилась с использованием измерительного комплекса, включающего в себя два одноосевых вибропреобразователя, закрепленных на внешней поверхности корпуса шпиндельного узла плоскошлифовального станка на удалении 60 мм от переднего торца узла в двух взаимно перпендикулярных направлениях в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.8.

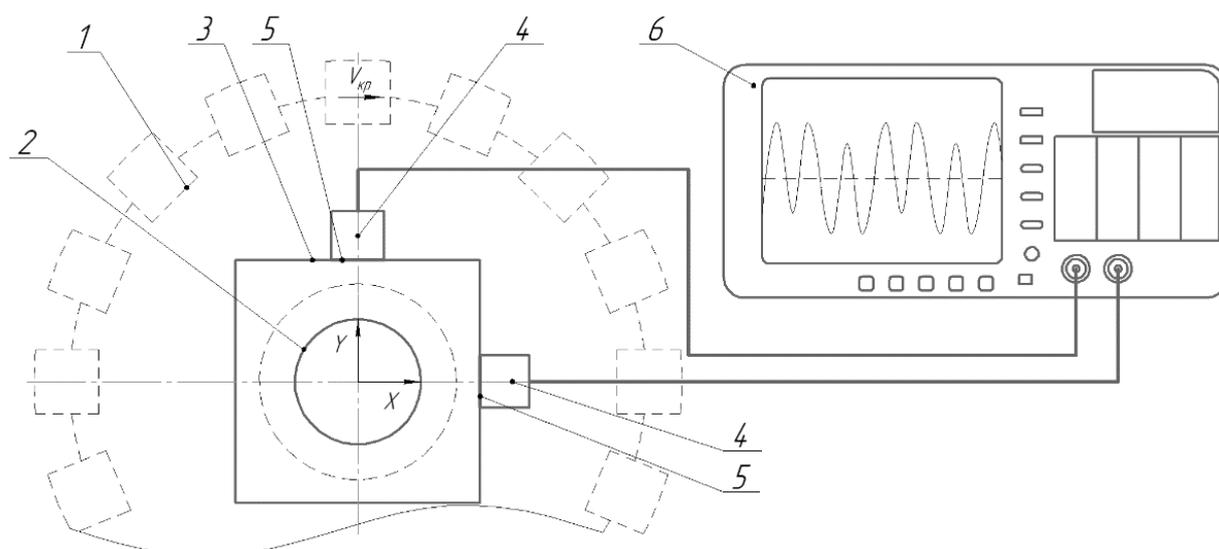


Рис. 4.8. Схема оценки вибронгруженности плоскошлифовального станка:

- 1 – шлифовальный круг, 2 – шпиндель, 3 – шпиндельный узел плоскошлифовального станка, 4 – вибропреобразователи, 5 – клеевое соединение, 6 - осциллограф

Оценка вибронгруженности ТС производилась следующим образом. Перед проведением испытаний, в местах установки вибропреобразователей была выполнена подготовка установочной поверхности, включающая: плоскостную разметку участка прикрепления датчика, таким образом, чтобы линия оси датчика минимально отклонялась от оси шпинделя, зачистку контактного пятна ручной ленточно-шлифовальной машинкой до достижения шероховатости, не превышающей $Rz20$ мкм, обезжиривание пятна контакта, нанесение тонким слоем клеевого цианакрилатного гелеобразного состава. После нанесения клеевого состава производился монтаж датчика прижиманием его с усилием к установочной

поверхности с выдержкой в течение 5 с. Позиционирование датчика относительно установочной плоскости производилось по предварительно нанесенной разметке. По завершению установки датчиков, станок выводился из работы на 24 ч с целью достижения полного отверждения клея.

Измерение вибрационных характеристик ТС производилось с использованием аналогового пьезометрического вибропреобразователя типа AP2019, вид которого представлен на рисунке 4.9.



Рис. 4.9. Общий вид вибропреобразователя AP2019

Съем показаний датчиков производился в двухканальном режиме осциллографом типа АКПП-4122/1(V), вид которого представлен на рисунке 4.10. Коэффициент усиления сигнала настраивался опытным путем вручную до достижения приемлемого уровня отображения развертки сигнала.

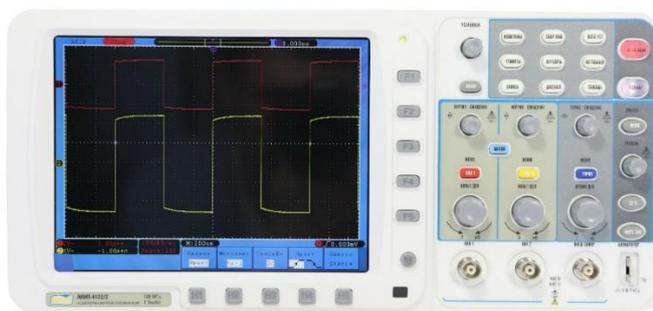


Рис. 4.10. Общий вид осциллографа АКПП-4122/1(V)

Обработка данных осциллограмм производилась с использованием комплектного программного обеспечения осциллографа. Целевым параметром, устанавливаемым по результатам измерений, выступало значение амплитуд виброперемещений, определяемое из амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) через следующее преобразование [48]:

$$A_B(X/Y) = \frac{0,02533 \cdot A_{\text{осц}}}{k_{\text{пр.д}} \cdot f_{\text{осц}}^2}, \text{ мм} \quad (4.1)$$

где $A_{\text{осц}}$ – амплитуда выходного сигнала ($U_{\text{макс.}}$), определяемая по осциллограмме, мВ;
 $k_{\text{пр.д}}$ – коэффициент преобразования датчика, В/м/с²;

$f_{\text{осц}}$ – частота выходного сигнала, определяемая по осциллограмме, Гц.

Проверка гипотезы производилась методом сравнения значений пиковой амплитуды виброперемещений, зафиксированных вибропреобразователем при различных стационарных режимах работы прерывистых шлифовальных кругов (с наработкой в диапазоне 10–20 минут), оборудованных АС на основе брусков с вулканитовой, керамической и бакелитовой связками (с аналогичными технологическими характеристиками). Для нивелирования влияния иных факторов на результаты экспериментальных исследований, параллельно с ПШК выполнялась оценка амплитуды виброперемещений для контрольной группы сплошных шлифовальных кругов, имеющих аналогичные характеристики материала АС.

При проведении испытаний использовали предварительно прошлифованные призматические заготовки из сплава ВТ-6 (гр. III) с шероховатостью обрабатываемой поверхности не более $Ra = 3,2$ мкм и волнистостью не более $W = 6,3$ мкм.

Сравнение пиковых амплитуд виброперемещений производилось при следующих условиях обработки:

- $S_{\text{пр}} = 0,05$ и $0,25$ м/с;
- $V_{\text{кр}} = 19$ и 49 м/с;
- $t = 0,05$ и $0,1$ мм;
- охлаждение: воздух и СОЖ (ЭКОГРИНД 10М, концентрация 7%).

4.1.4. Методика экспериментальной оценки температуры в зоне резания и выявления шлифовочных прижогов

Для измерения температуры в зоне резания при шлифовании был использован пирометрический бесконтактный метод, описанный в работе [162]. Отличительной особенностью данного метода является то, что минимизация погрешностей измерения температуры достигается за счет использования двухволнового пирометра с оптоволоконной передачей инфракрасного излучения и размещением объектива непосредственно под зоной обработки.

Реализация данного метода измерений обеспечивается за счет использования специальной модели заготовки, с обратной стороны, относительно обрабатываемой поверхности, которой выполняется глухое отверстие, дно которого удалено от обрабатываемой поверхности заготовки на расстояние, равное двум глубинам резания. В отверстии на расстоянии порядка 2 мм от дна размещается оптоволоконный объектив пирометра из халькогенидного оптоволокна, закрепляемый при помощи специальной втулки (рис. 4.11).

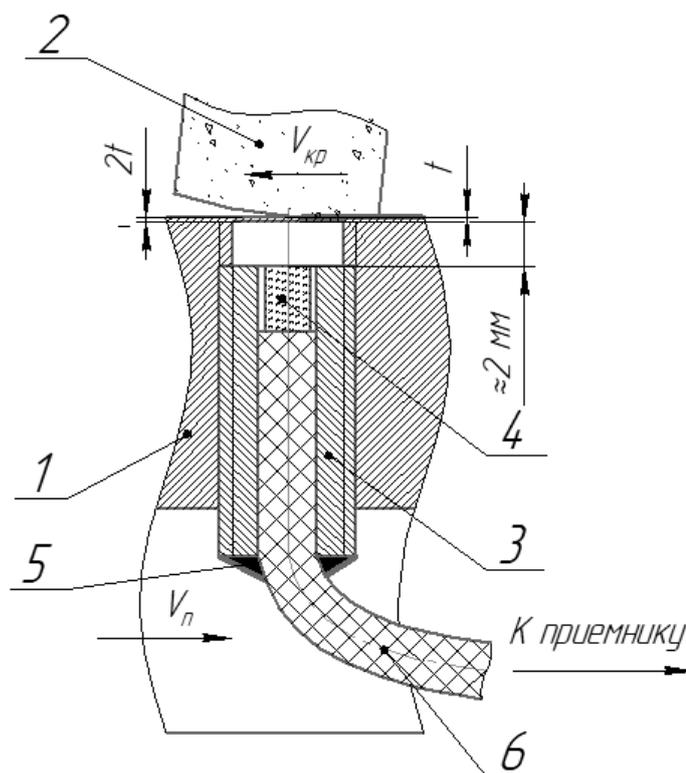


Рис. 4.11. Схема измерений температуры бесконтактным методом:

1 – заготовка, 2 – абразивный сегмент круга, 3 – втулка резьбовая центрирующая, 4 – оптоволоконный объектив (открытый конец световода), 5 – универсальная клейкая масса (мастика), 6 - одноволоконный оптический кабель с халькогенидным световодом

Так, при нагреве зоны обработки, расположенной над объективом пирометра, выделяется инфракрасное излучение, которое воспринимается объективом специального халькогенидного оптоволоконного световода и направляется на фотоэлектрический чувствительный элемент приемника, где преобразуется в аналоговый электрический сигнал. Затем аналоговый сигнал усиливается и преобразуется в цифровой, который по кабельному интерфейсу передается на компьютер, где при помощи специального программного обеспечения обрабатывается и преобразуется в численное значение температуры, соответствующей параметрам входного инфракрасного излучения.

За счет возможности минимизации расстояния между «сканируемой» и обрабатываемой поверхностями, при каждом последующем проходе круга, вплоть до полного срезания металла над приемным объективом, достигается высокая достоверность результатов, ввиду отсутствия теплоизоляционных прослоек материала, влияния способа и точности установки чувствительного датчика, характерных для контактных термопар, а также иных факторов, характерных в том числе для методов бесконтактного измерения температур (изменчивость излучающей способности металла под действием СОЖ, загрязнений, оптические эффекты, обусловленные конвекционными потоками и т.д.).

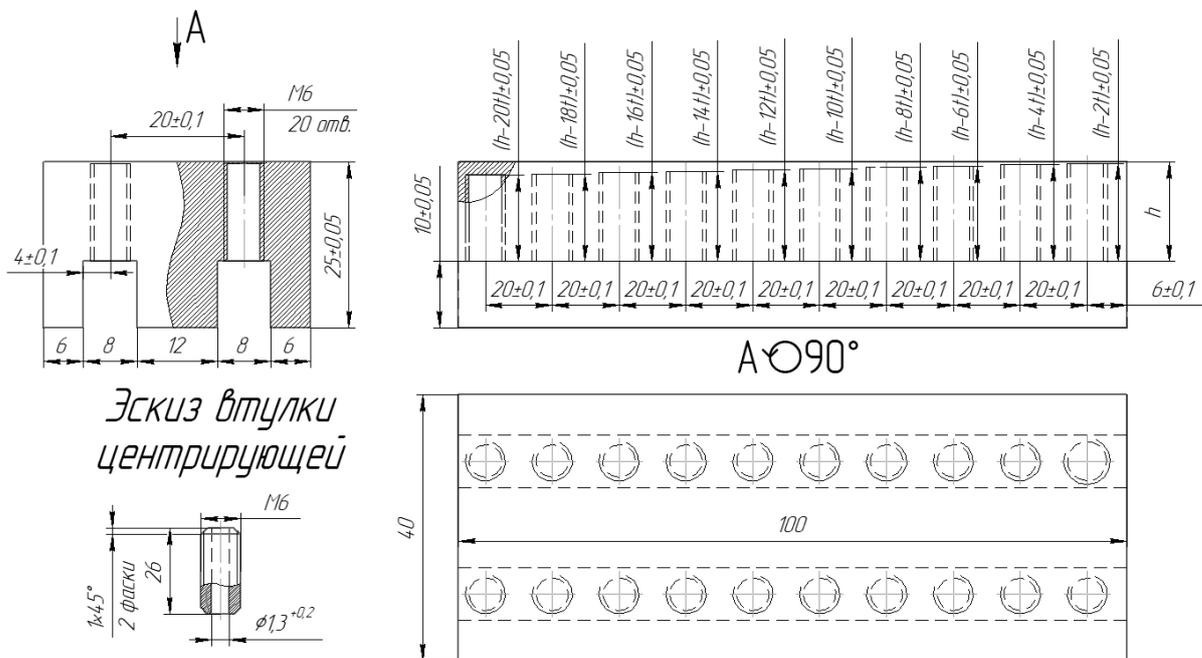
Прием и преобразование инфракрасного излучения осуществлялись с использованием двухволнового пирометра спектрального отношения *Williamson DWF-24-34-C* (рис. 4.12). В основе двухволновой технологии пирометрических измерений лежит использование многослойного детектора, позволяющего фиксировать волны пересекающихся спектров инфракрасного излучения. Это позволяет нивелировать негативное влияние со стороны изменения излучающей способности измеряемой поверхности, оптических помех, неправильного позиционирования приемного объектива, а также обеспечивает высокую скорость отклика, что имеет решающее значение при необходимости регистрации моментальных значений температур. Абсолютная погрешность пирометра в диапазоне измерений до 3035 °С составляет 2 °С, относительная – 0,25% (при измерении через воздушную прослойку).



Рис. 4.12. Общий вид двухволнового пирометра спектрального отношения *Williamson DWF-24-34-C*: а – приемник, б – одноволоконный оптический кабель *Mn* с открытым объективом

Для обеспечения возможности проведения многократных измерений, была разработана и изготовлена специальная призматическая заготовка (рис. 4.13), в теле которой выполнены два параллельных продольных ряда резьбовых отверстий под установку центрирующей втулки со ступенчато изменяющейся глубиной. Так, для проведения каждого последующего параллельного опыта, предусматривается переустановка центрирующей втулки с оптоволоконным объективом в следующее по ряду отверстие, глубина которого на $2 \cdot t$, меньше глубины отверстия, задействованного в предыдущем опыте. Для учета теплового влияния со стороны соседнего «прохода» круга, ось ряда отверстий выполняется на удалении 10 мм от края заготовки, что при поперечной подаче в $S_{\text{Поп}} = 7,5$ мм/дв.ход обеспечивает перекрытие зоной теплового влияния зону измерений при втором продольном прохождении круга, что также повышает достоверность результатов измерений.

Эскиз заготовки



Неуказанные предельные отклонения размеров $\pm \frac{IT14}{2}$

Рис. 4.13. Рабочий эскиз заготовки и центрирующей втулки для экспериментальной оценки температуры в зоне резания

Схема комплекса для измерения температуры в зоне резания при шлифовании с использованием двухволнового пирометра *Williamson DWF-24-34-C* приведена на рисунке 4.14.

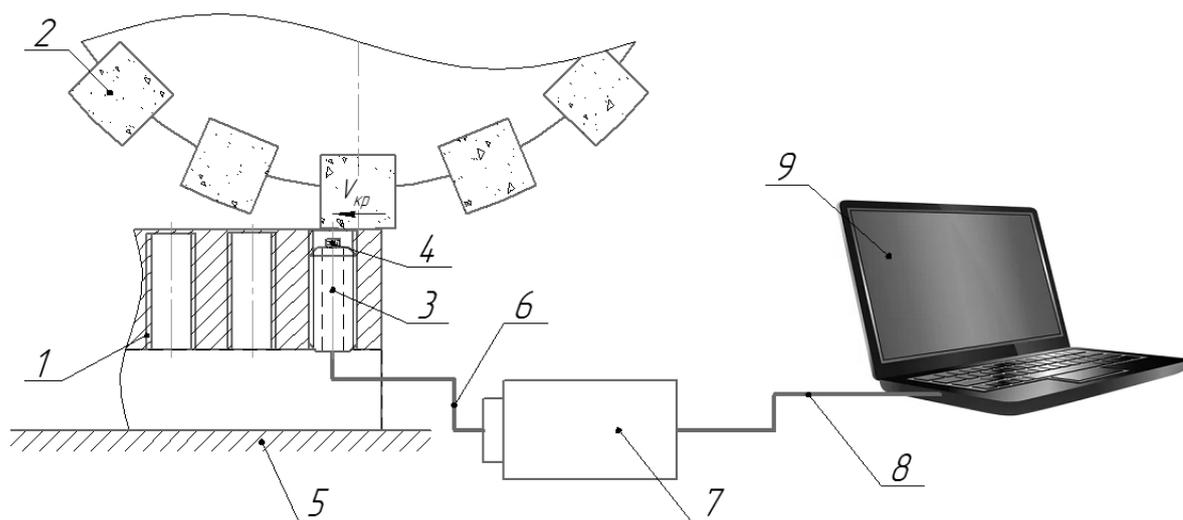


Рис. 4.14. Схема комплекса для измерения температуры в зоне резания: 1 – заготовка, 2 – шлифовальный круг, 3 – втулка центрирующая, 4 – оптоволоконный объектив, 5 – стол станка, 6 – оптический кабель, 7 – приемник/преобразователь, 8 – кабельный интерфейс RS485, 9 – компьютер

Идентификация прижогов обработанной поверхности производилась с использованием метода травления на основании цветовой дифференциации зон прижогов с бездефектными зонами металла в соответствии с методикой, описанной в [129]. Перед выполнением травления, обработанная поверхность заготовки обезжиривалась с использованием 5 % водного раствора бикарбоната натрия (сода) и промывалась в холодной воде. Затем, выполнялось травление обработанной поверхности спиртовым раствором азотной кислоты в течение 2–3 минут. По завершению травления, производилась промывка поверхности и осветление при помощи 10 % водного раствора хромового ангидрида с добавлением 5 г/л серной кислоты в течение 2 минут. После осветления, поверхность нейтрализовалась водным раствором соды с повторной промывкой водой и просушкой. Затем выполнялись микроскопические исследования поверхности.

Выявление структурных дефектов обработанной поверхности выполнялось визуальным методом с использованием цифрового микроскопа серии *Discovery Artisan 64*, общий вид которого приведен на рисунке 4.15.

Экспериментальная верификация аналитической модели, а также оценка эффективности применения ПШК на вулканитовой связке выполнялись для следующих условий обработки:

- $S_{пр} = 0,05 \dots 0,25$ м/с, интервал варьирования – 0,05 м/с;
- $V_{кр} = 19 \dots 49$, интервал варьирования – 10 м/с;
- $t = 0,005 \dots 0,105$ мм, интервал варьирования – 0,05 м/с;
- охлаждение: воздух и СОЖ (ЭКОГРИНД 10М, концентрация 7 %);
- материальное исполнение заготовки: ВТ-1 (гр. I), ВТ-14 (гр. II), ВТ-6 (гр. III), ВТ-9 (гр. IV) и ВТ-22 (гр. V); состояние поставки – штамповка с отжигом;
- способ обработки: ПШК на связках В/Б/К, сплошное шлифование кругом на связке В.
-



Рис. 4.15. Общий вид цифрового микроскопа *Discovery Artisan 64*

Для получения средневзвешенного значения пиковых температур в зоне резания, параллельные опыты производились для различного времени наработки круга: $\tau_{\text{наработка}}(n = 1) = 5 - 10$, $\tau_{\text{наработка}}(n = 2) = 15 - 20$ и $\tau_{\text{наработка}}(n = 3) = 25 - 30$ мин.

4.1.5. Методика экспериментальной оценки коэффициента шлифования

Одним из принятых критериев повышения эффективности прерывистого шлифования выступает рост удельной наработки круга $N_{\text{дет}}$, значение которой имеет прямую зависимость от величины коэффициента шлифования, характеризующего отношение объема снятого при шлифовании металла к объему изношенного абразива [27]:

$$K = \frac{W_M}{W_a}, \quad (4.2)$$

где W_M – объем снятого металла, мм³;

W_a – объем изношенного абразива, мм³.

Анализ динамики изменения данного коэффициента косвенно позволяет определить диапазон устойчивости материала АС, превышение которого может способствовать нерационально быстрому износу круга, например – при нагреве абразивной массы в процессе шлифования до температуры начала термической деградации или разрушения связки.

Ввиду того, что плотность материала АС известна, оценка объема изношенного АС производилась через массу круга. Параметр W_a определялся в соответствии со следующим выражением:

$$W_a = \frac{m_1 - m_2}{\rho} \cdot 1000, \text{ мм}^3, \quad (4.3)$$

где m_1 – исходная масса круга, г;

m_2 – масса круга по завершению эксперимента, г;

$\rho = 3,525$ г/см³ – средняя плотность материала АС.

Измерение массы шлифовального круга до и после проведения эксперимента выполнялось с дискретностью в 0,1 г с использованием аналитических весов ВЛТЭ-6100, имеющих абсолютную погрешность в ± 500 мг.

Объем сошлифованного материала определялся из разницы объема исходной заготовки и объема заготовки, определяемого по завершению эксперимента. Так как при шлифовании изменялась только высота заготовки, то объем сошлифованного металла может быть найден как:

$$W_M = a_1 \cdot b_1 \cdot (h_1 - h_2), \text{ мм}^3, \quad (4.4)$$

где a_1, b_1 – длина и ширина исходной заготовки в плане, мм;

h_1, h_2 – высота заготовки до и после проведения эксперимента, мм.

Контроль высоты заготовки производился по 6–10 точкам с использованием штангенциркуля серии ШЦ-1-125 0.1 кл.2. Время непрерывной работы круга с момента правки и первичного взвешивания до повторного взвешивания составляло 30 минут.

Экспериментальное установление зависимости между режимными параметрами обработки и величиной коэффициента шлифования производилось для следующих диапазонов варьирования факторов:

- $S_{пр} = 0,05$ и $0,25$ м/с;
- $V_{кр} = 19$ и 49 м/с;
- $t = 0,005$ и $0,105$ мм;
- охлаждение: воздух и СОЖ (ЭКОГРИНД 10М, концентрация 7%).

Поперечная подача во всех экспериментальных исследованиях составляла $S_{поп} = 7,5$ мм/дв. ход

4.1.6. Выбор числа параллельных опытов и статистическая обработка результатов

Воспроизводимость результатов параллельных опытов проверялась по расчетному значению G -критерия Кохрена, определяемому как [143]:

$$G_p = \frac{S_{max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \leq G_T, \quad (4.5)$$

где N – количество экспериментов, шт.;

S_{max}^2 – максимальная дисперсия опытов;

S_j^2 – дисперсия j -го опыта;

G_T – табличное значение G -критерия Кохрена (для уровня значимости $\alpha = 0,05$).

Дисперсия j -го эксперимента для серии из n параллельных экспериментов определяется как [143]:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{p=1}^n (y_{jp} - \bar{y}_j)^2, \quad (4.6)$$

где p – номер параллельного эксперимента;

n – количество параллельных опытов;

y_{jp} – значение определяемого параметра, определенное в p -ом параллельном эксперименте;

\bar{y}_j – среднеарифметическое значение определяемого параметра, определенное по итогам выборки параллельных опытов.

В связи с тем, что в рамках проводимого исследования предусматривается построение регрессионных моделей, входящие в их состав коэффициенты регрессии и факторы

подвергались статистическому анализу на предмет значимости. Целесообразность включения фактора в регрессионную модель определяется на основании t – статистики Стьюдента, определяемой из выражения [143]:

$$t_{\text{набл}} = \sqrt{\frac{r_i^2 \cdot (N-2)}{1-r_i^2}}, \quad (4.7)$$

где r_i – значение коэффициента парной линейной корреляции i -го фактора модели.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии производилась по t -критерию Стьюдента [143]:

$$T_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \geq T_T, \quad (4.8)$$

где T_T – табличное значение t -критерия Стьюдента;

b_i – значение i -го коэффициента регрессии;

$S\{b_i\}$ – дисперсия i -го коэффициента регрессии, определяемая как [143]:

$$S\{b_i\} = \frac{1}{n \cdot N} \cdot S_y^2. \quad (4.9)$$

После «отсева» факторов, выполняется построение регрессионной модели и проверка её адекватности по F – критерию Фишера определяемому как [143]:

$$F_p = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{N-m-1}{m} > F_T, \quad (4.10)$$

где F_T – табличное значение F -критерия Фишера;

m – количество факторов, включенных в уравнение регрессии.

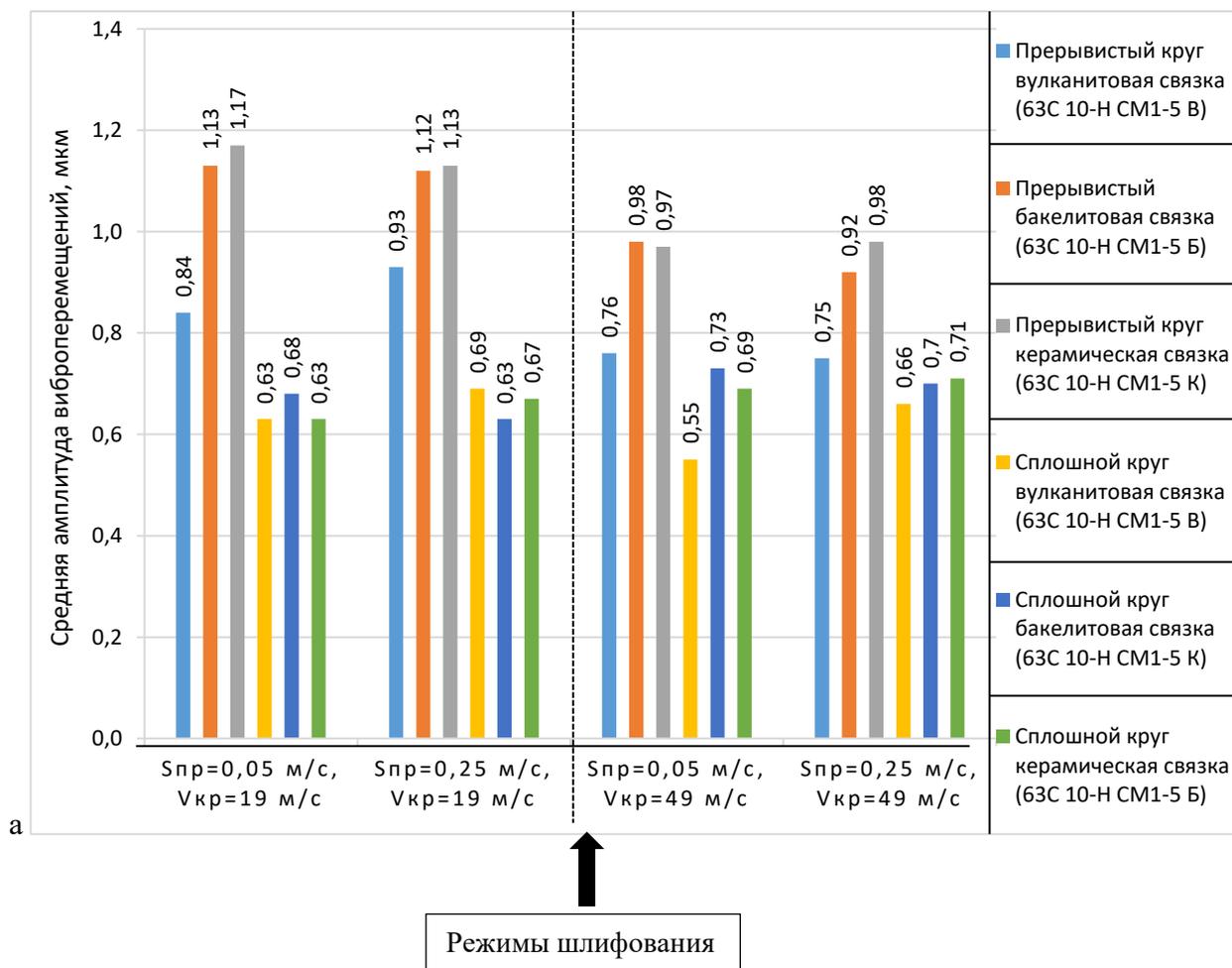
Обработка и статистический анализ экспериментальных данных, а также определение параметров регрессионных моделей выполнялись с использованием математического аппарата, а также встроенных аналитических функций программного продукта *Microsoft Excel*.

Предварительно для всех экспериментов количество параллельных опытов принималось равным $n = 3$ шт. с последующим уточнением числа параллельных опытов по итогам статической обработки полученных результатов при необходимости. В качестве результирующих значений по каждому проводимому эксперименту принималось среднеарифметическое значение измеряемого параметра, полученное по серии параллельных опытов.

4.2. Результаты экспериментальных исследований

4.2.1. Результаты оценки влияния конструктивной конфигурации шлифовальных кругов на вибронгруженность технологической системы

На первом этапе экспериментальных исследований выполнялась проверка гипотезы о влиянии материального исполнения АС на вибронгруженность технологической системы. Значения варьируемых технологических режимов, а также результаты экспериментальной оценки средней амплитуды виброперемещений для рассматриваемых условий обработки сведены в таблицу приложения М. Для наглядности сопоставление среднеарифметических значений пиковых амплитуд виброперемещений по рассматриваемым вариантам конфигурации шлифовальных кругов представим в виде диаграмм, приведенных на рисунках 4.16 и 4.17.



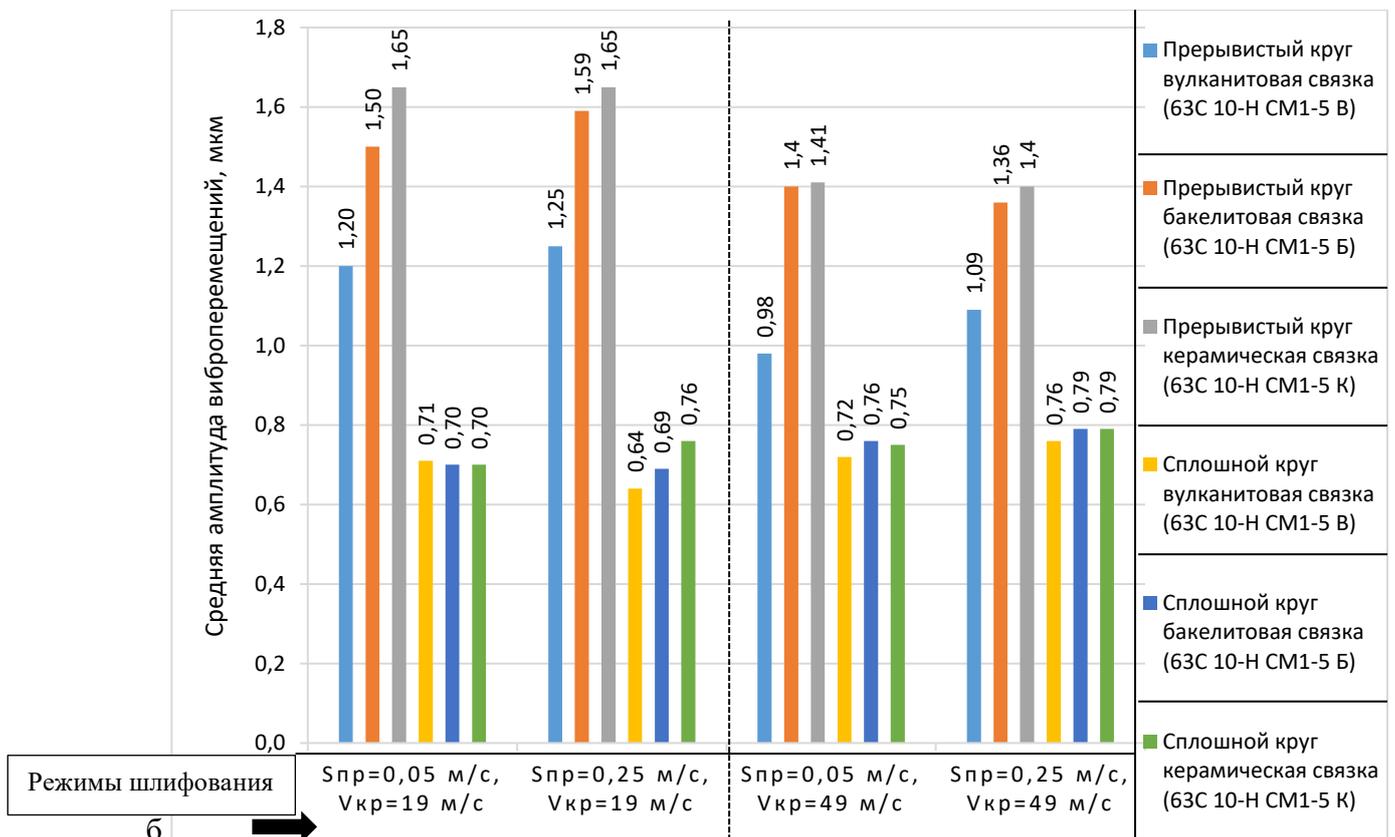
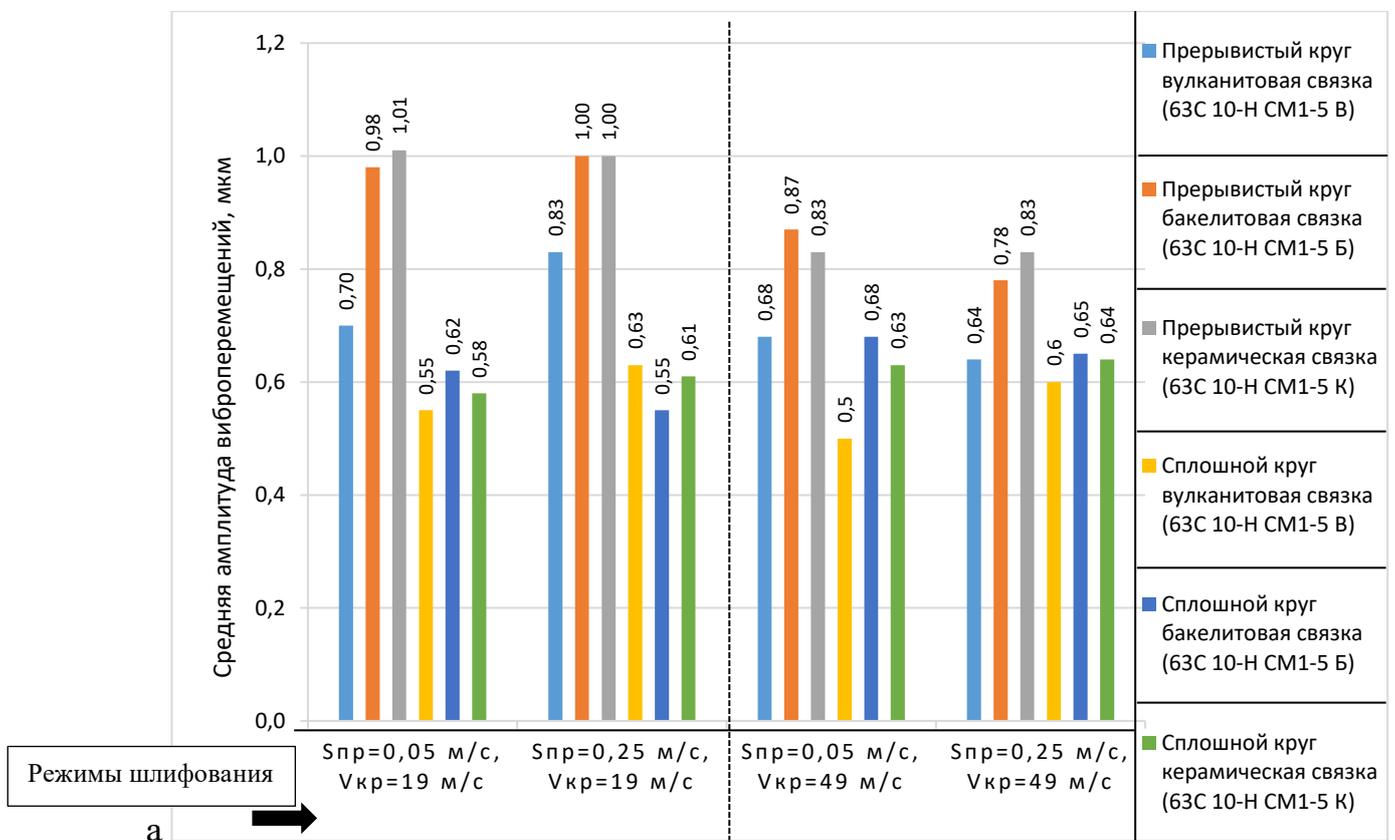


Рис. 4.16. Сопоставление результатов экспериментальной оценки средней амплитуды виброперемещений для условий охлаждения воздухом при: а – $t = 0,05$ мм, б – $t = 0,1$ мм



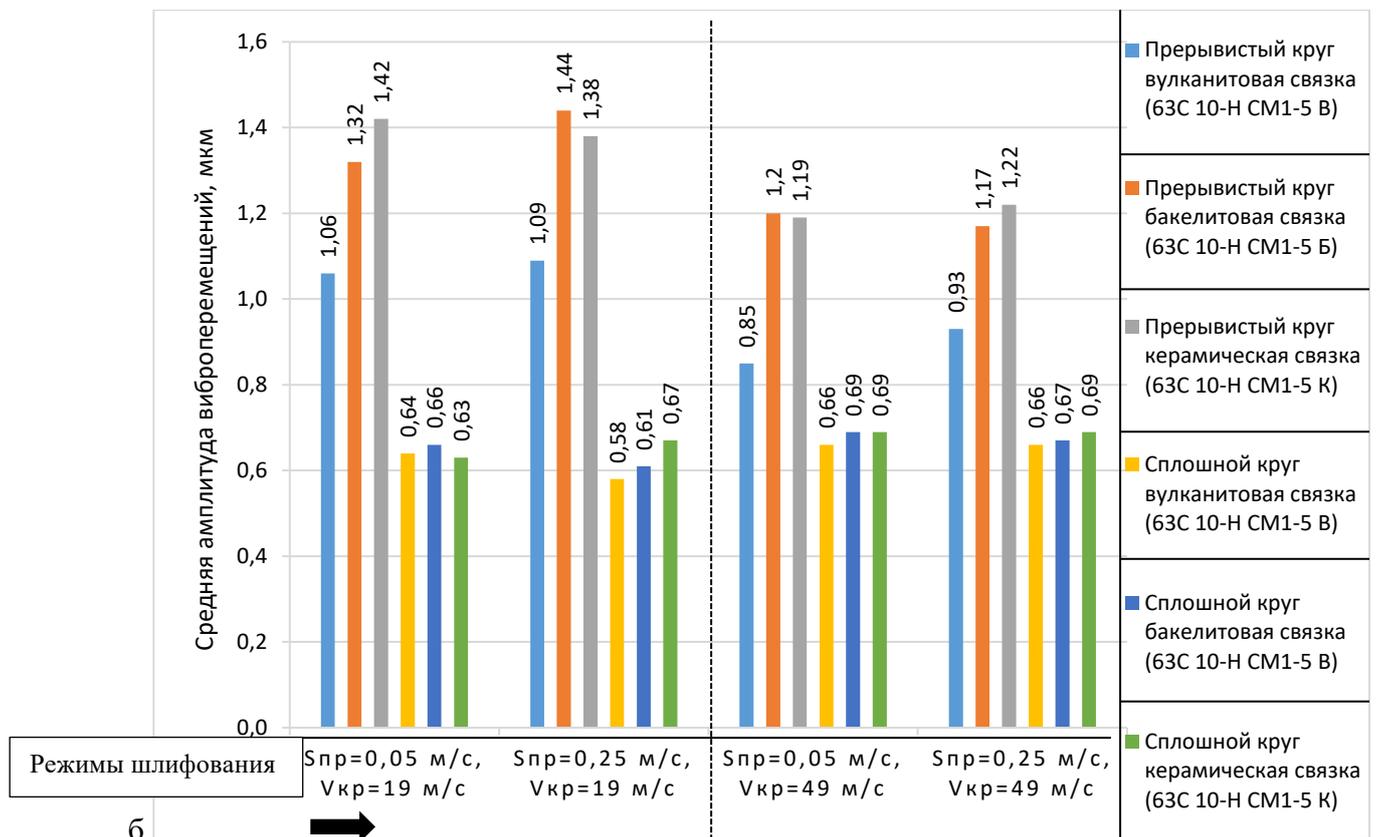


Рис. 4.17. Сопоставление результатов экспериментальной оценки средней амплитуды виброперемещений для условий охлаждения СОЖ при: а – $t = 0,05$ мм, б – $t = 0,1$ мм

При сопоставлении результатов определения средней амплитуды виброперемещений для случаев прерывистого и сплошного шлифования, можно установить, что прерывистое шлифование вносит достаточно существенный вклад в вибрационную нагрузку технологической системы, способствуя росту пиковых амплитуд виброперемещений корпуса шпиндельного узла до 59,2–135,7 %, что хорошо согласуется с выводами проведенных ранее исследований. Рассмотрение связи между режимными параметрами обработки и средней амплитудой виброперемещений позволяет установить, что в диапазоне «мягких» режимов обработки, разница между прерывистым и сплошным шлифованием выражена меньше и повышается по мере увеличения глубины резания и скорости продольной подачи. Увеличение рабочей скорости круга при этом оказывает следующее влияние: при прерывистоом шлифовании способствует уменьшению средней пиковой амплитуды виброперемещений, а при сплошном – некоторому увеличению.

Рассмотрение влияния материального исполнения связки АС круга позволяет установить, что использование материала АС на основе вулканитовой связки в составе ПШК способствует значимому снижению дополнительной вибрационной нагрузки от прерывистого характера шлифования, сокращая пиковую амплитуду виброперемещений корпуса шпиндельного узла станка на 17,23–30,28 % в сравнении с кругами на неэластичных связках.

Это подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о положительном влиянии со стороны демпфирующих свойств вулканитовой связки на картину вибрационной нагрузки ТС. Подкрепление данных выводов обеспечивается высокой однородностью дисперсии полученных экспериментальных результатов, отвечающей критерию Кохрена, а также использованием контрольной группы результатов, полученных для аналогичных условий обработки с использованием иных конфигураций шлифовальных кругов, что позволяет исключить наличие значимого влияния на результаты со стороны иных факторов.

Использование СОЖ способствует снижению вибронгруженности технологической системы, что выражается в относительном снижении амплитуды измеряемых виброперемещений на 10,4–20 % для ПШК и на 6,1–17,9 % – для сплошных. Причем наиболее выраженное влияние использования СОЖ наблюдается для ПШК, средневзвешенное относительное снижение амплитуды виброперемещений для которых составляет 15,4 %, против 10,9 % для сплошных.

4.2.2. Результаты исследования влияния параметров технологической системы на качественные характеристики поверхностного слоя

Результаты экспериментальной оценки влияния условий обработки на качественные характеристики обработанной поверхности приведены в таблицах приложения Н. Сопоставление средних значений параметра шероховатости Ra для рассматриваемых условий обработки представим в виде диаграмм, приведенных на рисунках 4.18–4.20.

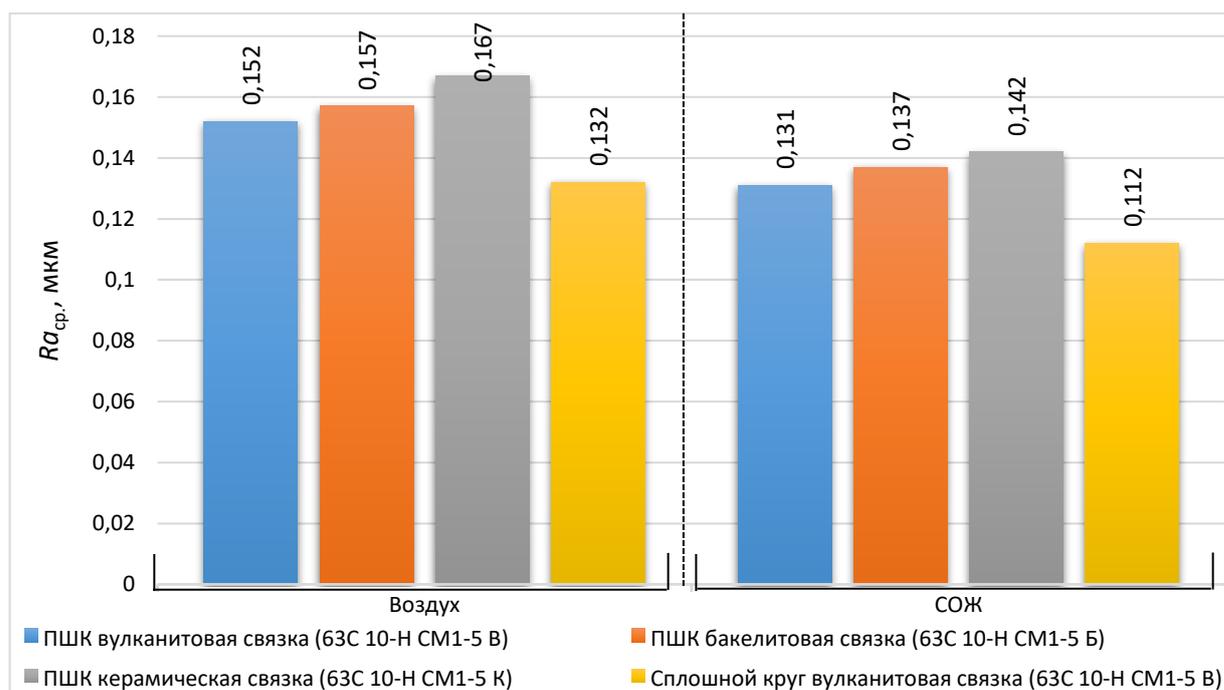
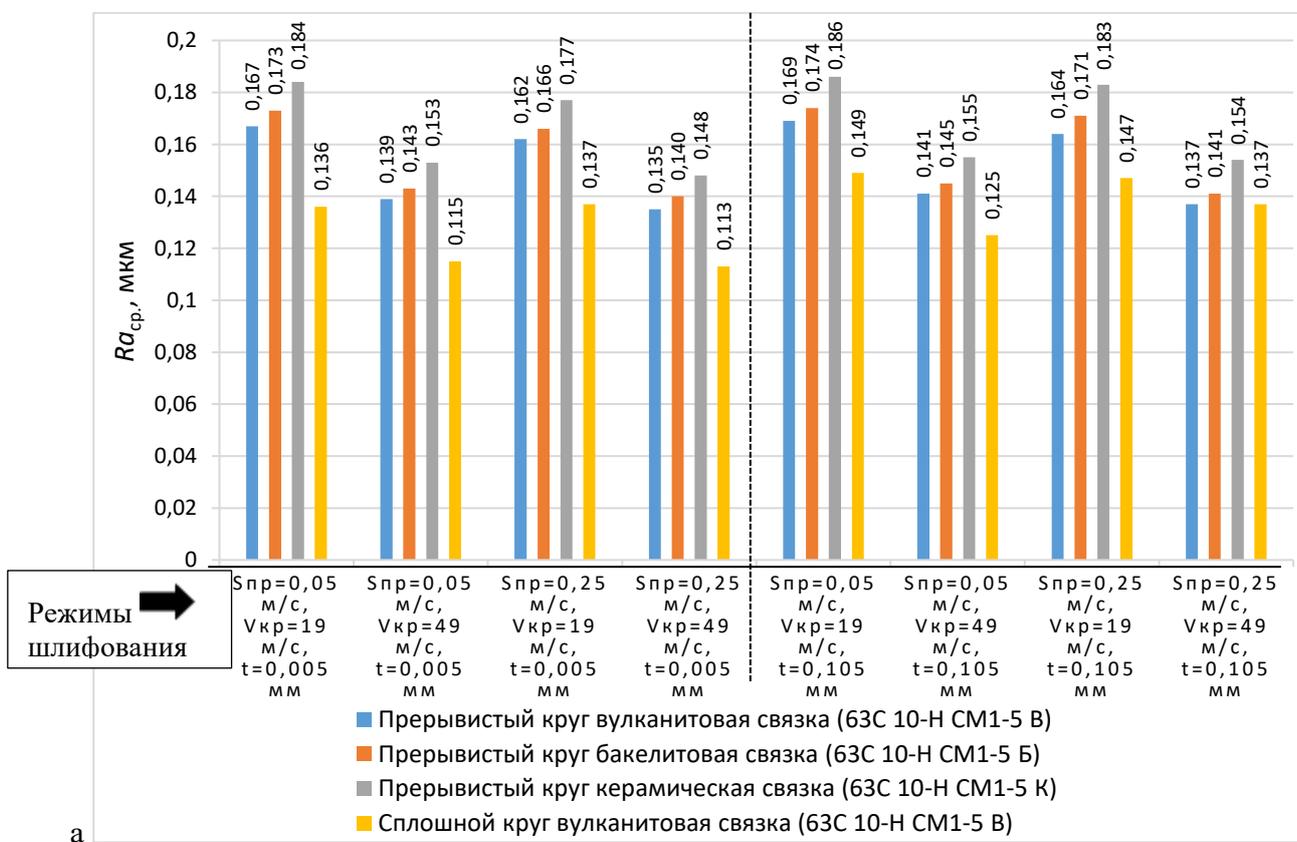


Рис. 4.18. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной шероховатости обработанной поверхности \overline{Ra} по способам обработки и условиям охлаждения

При шлифовании прерывистыми кругами в сравнении с обработкой сплошными увеличивается и параметр Ra шероховатости обработанной поверхности, причем это увеличение в большей степени проявляется при обработке с применением СОЖ. Наиболее высокое качество поверхности обеспечивает шлифование сплошным кругом, способствующее достижению средневзвешенной (во всем диапазоне режимов обработки и марок обрабатываемых сплавов) шероховатости $Ra = 0,132$ мкм при охлаждении воздухом и $Ra = 0,112$ мкм – с использованием СОЖ; для ПШК средневзвешенная шероховатость достигает $Ra = 0,159$ мкм и $Ra = 0,137$ мкм в условиях охлаждения воздухом и СОЖ, что соответствует среднему приросту шероховатости на 20,4% и 22,3% соответственно.



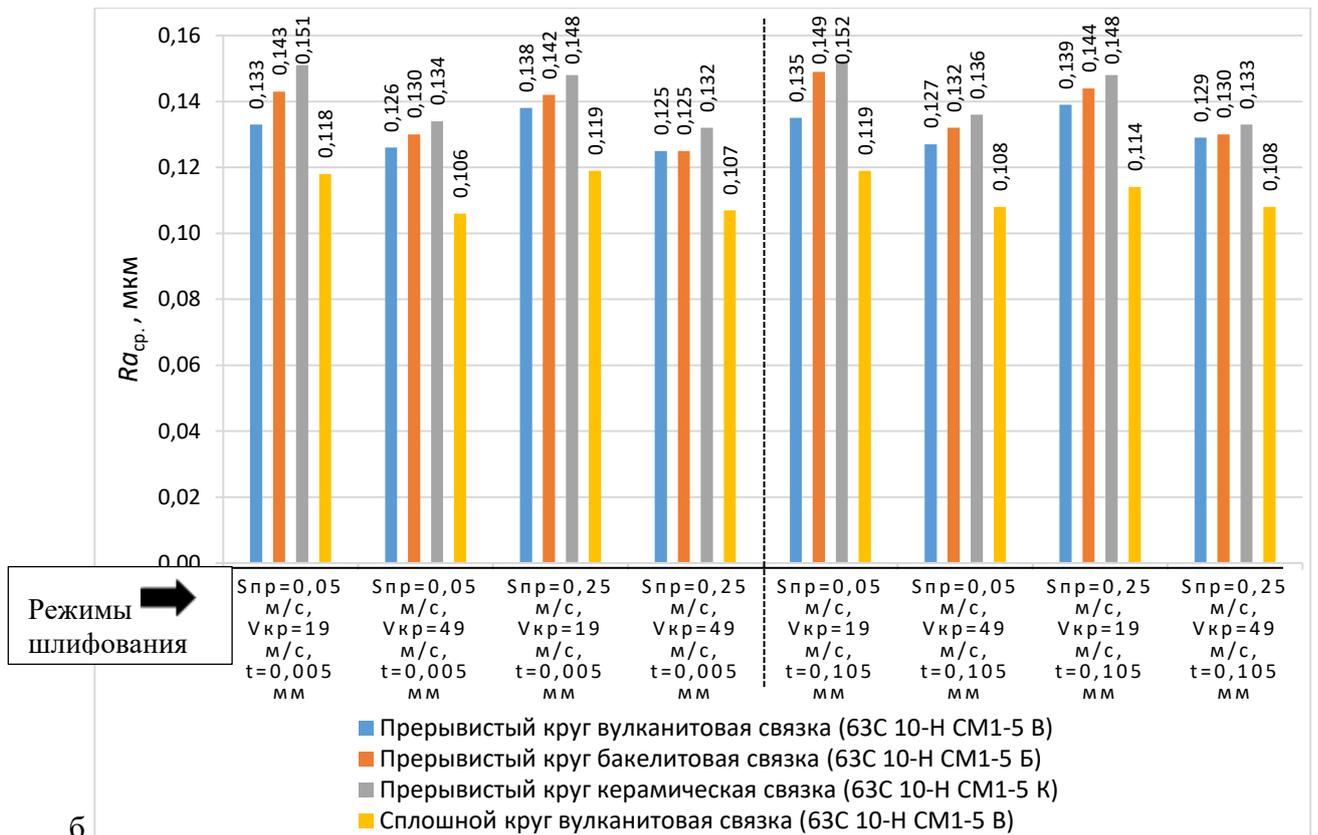


Рис. 4.19. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной шероховатости обработанной поверхности \overline{Ra} по режимам обработки для условий охлаждения: а – воздухом, б - СОЖ

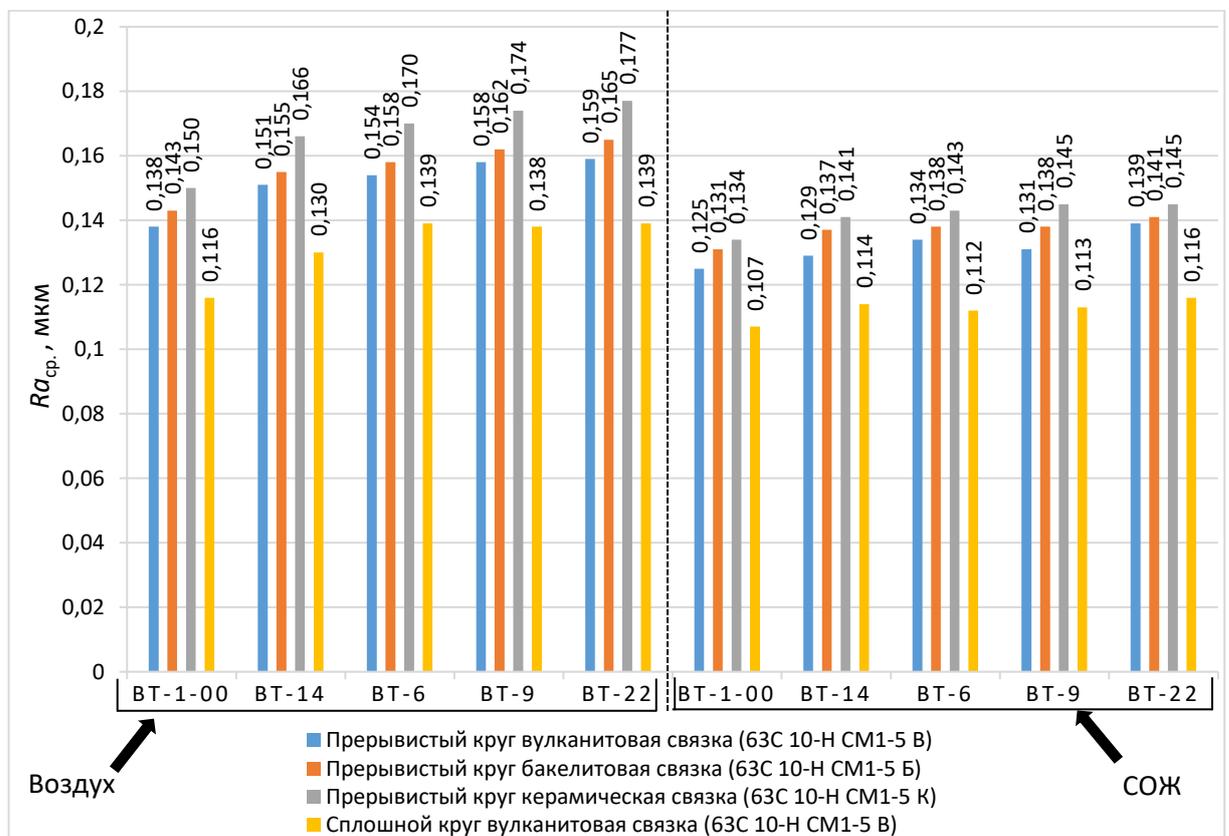


Рис. 4.20. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной шероховатости обработанной поверхности \overline{Ra} по маркам обрабатываемых сплавов и условиям охлаждения

Достаточно выраженное влияние на варьирование средневзвешенных значений Ra по рассматриваемой выборке обрабатываемых сплавов оказывает использование СОЖ. В зависимости от типа связки снижение шероховатости при охлаждении СОЖ в сравнении с воздухом составляет:

- для вулканитовой связки: с 0,152 мкм до 0,131 мкм ($\Delta \approx 14\%$);
- для бакелитовой связки: с 0,157 мкм до 0,137 мкм ($\Delta \approx 13\%$);
- для керамической связки: с 0,167 мкм до 0,142 мкм ($\Delta \approx 15\%$).

Статистически значимое улучшение качества поверхности (снижение Ra на 12–15%) в данном случае может быть обусловлено уменьшением термических деформаций и адгезии материала к абразивным зернам. При этом, СОЖ не оказывает значимого влияния на характер распределения средних значений параметра шероховатости Ra по условиям обработки.

В то же время достижение меньшей шероховатости при использовании кругов на вулканитовой и бакелитовой связках, в сравнении с кругами на керамической связке, может быть обусловлено увеличением доли абразивных зерен, участвующих в резании, а также уменьшением глубины их внедрения в материал заготовки при обработке кругами с более упругими связками. Вулканитовая связка обладает большими упругими свойствами, поэтому обеспечивает меньшее значение шероховатости обработанной поверхности.

Экспериментальные данные также позволяют говорить о наличии значимой зависимости параметра шероховатости Ra от химического состава титанового сплава. При обработке прерывистыми кругами с воздушным охлаждением зафиксированы следующие усреднённые значения шероховатости:

- для инструмента на вулканитовой связке при обработке заготовок из ВТ-1-00 – 0,138 мкм, ВТ-14 – 0,151 мкм, ВТ-6 – 0,154 мкм, ВТ-9 – 0,158 мкм, ВТ-22 – 0,159 мкм;
- для инструмента на бакелитовой связке при обработке заготовок из: ВТ-1-00 – 0,143 мкм, ВТ-14 – 0,155 мкм, ВТ-6 – 0,158 мкм, ВТ-9 – 0,162 мкм, ВТ-22 – 0,165 мкм;
- для инструмента на керамической связке при обработке заготовок из: ВТ-1-00 – 0,150 мкм, ВТ-14 – 0,166 мкм, ВТ-6 – 0,170 мкм, ВТ-9 – 0,174 мкм, ВТ-22 – 0,177 мкм.

Аналогичная корреляция между маркой сплава титана и интегральными показателями шероховатости сохраняется при использовании СОЖ.

Среди режимных параметров обработки наиболее значительное влияние на параметр Ra для всех рассматриваемых вариантов конфигурации шлифовальных кругов оказывает рабочая скорость круга $V_{кр}$, а также скорость продольной подачи $S_{пр}$, при этом глубина резания t не оказывает значимого влияния на параметр Ra . Здесь следует отметить наличие нетривиальной зависимости, характеризующейся уменьшением шероховатости Ra с

увеличением скорости продольной подачи $S_{пр}$. Данное явление может быть объяснено комплексом взаимосвязанных факторов:

— более высокая $S_{пр}$ способствует снижению, температуры заготовки, поскольку уменьшается время теплового воздействия на отдельные участки ее поверхности. Это минимизирует термические деформации и адгезию материала к абразиву, улучшая качество поверхности;

— увеличение $S_{пр}$ может изменять частоту вынужденных колебаний технологической системы, смещая её от резонансных режимов. Это снижает амплитуду вибраций, что положительно влияет на шероховатость;

— для прерывистых кругов на вулканитовой связке упругие свойства материала способствуют адаптации АС к переменным нагрузкам при высоких $S_{пр}$, уменьшая глубину внедрения зерен и, как следствие, Ra .

Сопоставление средних значений результатов экспериментальной оценки параметра волнистости W , для рассматриваемых условий обработки представим в виде диаграмм, приведенных на рисунках 4.21–4.23.

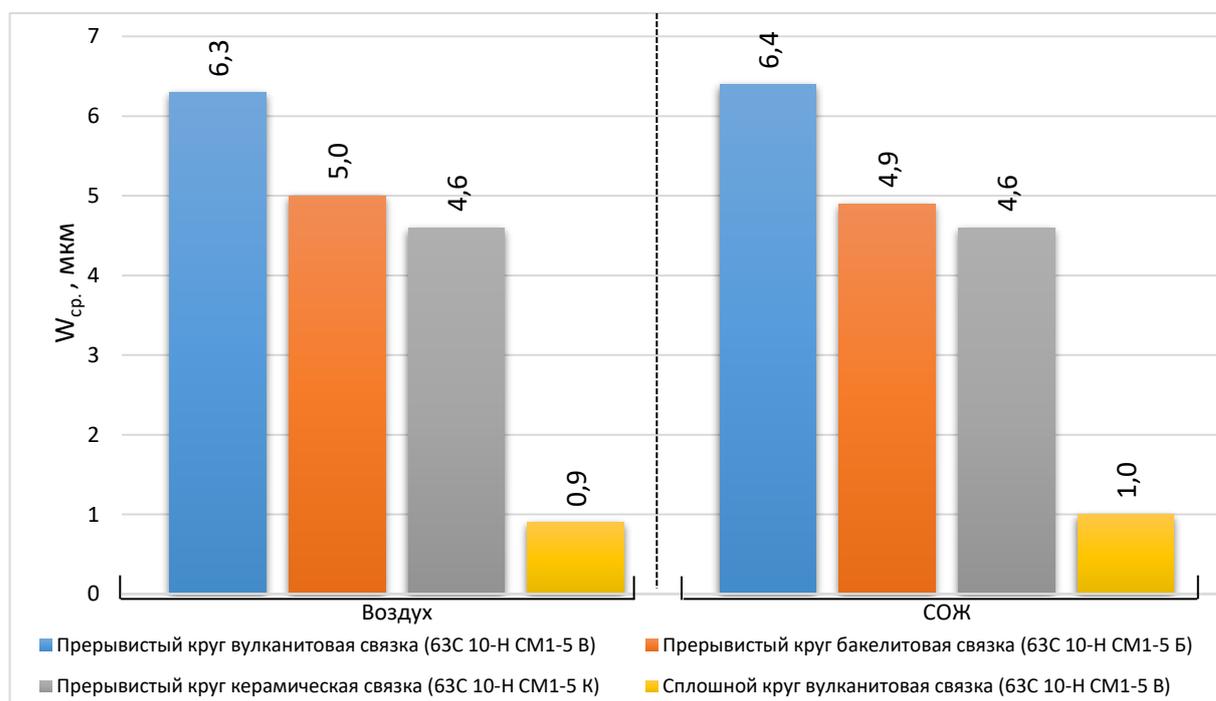
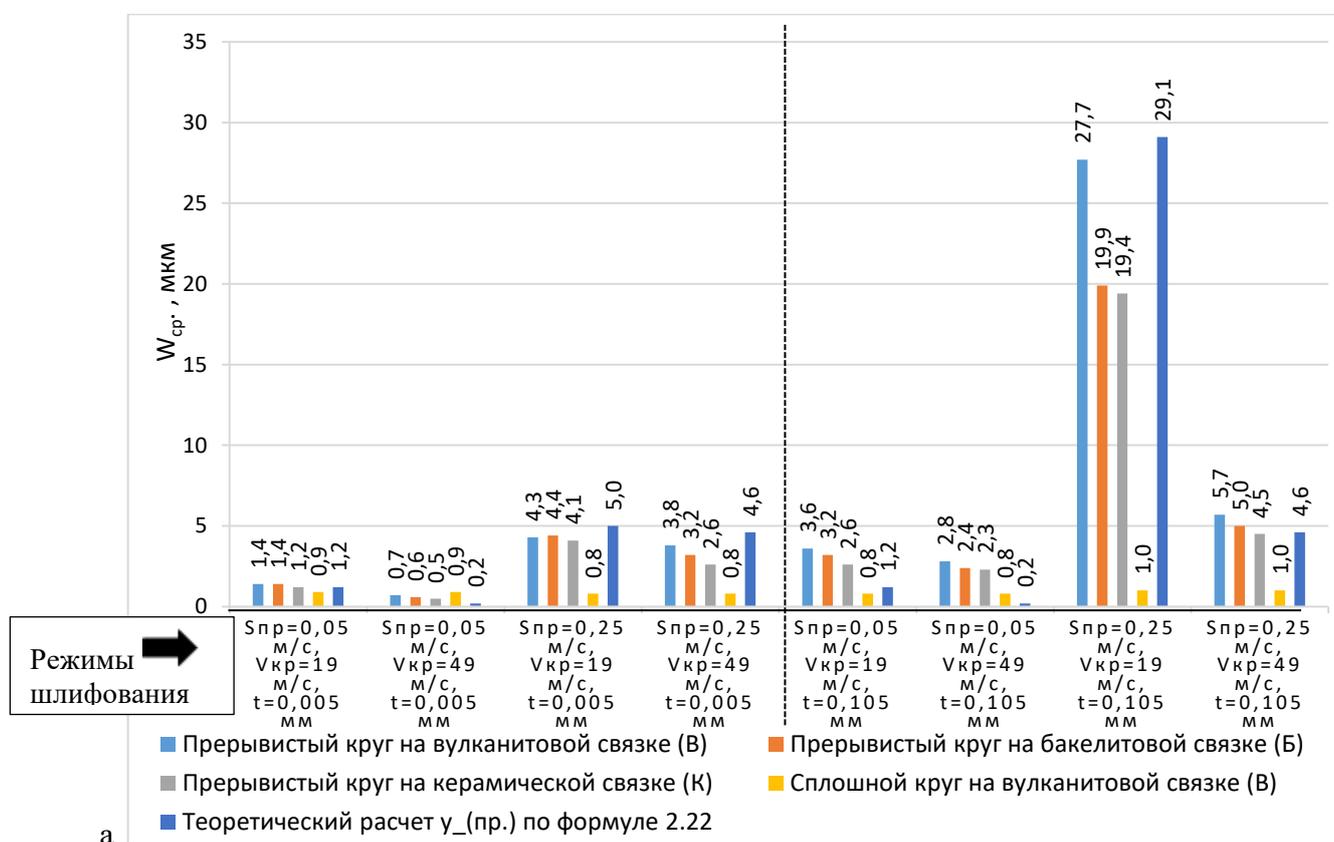


Рис. 4.21. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной волнистости обработанной поверхности \bar{W} по способам обработки и условиям охлаждения

Анализ полученных экспериментальных данных показывает существенную разницу в показателях волнистости при различных методах обработки: при сплошном шлифовании волнистость находится в пределах 0,9–1,0 мкм; при прерывистом – 4,6–6,4 мкм. Таким образом,

прерывистое шлифование способствует получению гораздо более выраженной волнистости поверхности в сравнении со сплошным шлифованием, вплоть до визуального определяемого проявления признаков волнистости на обработанной поверхности (рис. 4.24).

Ключевым фактором, определяющим величину интегрального показателя волнистости, являются режимы резания. Наибольшие значения наблюдаются при сочетании максимальной глубины резания t , высокой скорости продольной подачи $S_{пр}$, минимальной рабочей скорости круга $V_{кр}$. В этих условиях обработки прерывистым шлифованием зафиксированы пиковые значения: с воздушным охлаждением: 27,7 мкм (вулканит), 19,9 мкм (бакелит), 19,4 мкм (керамика); с применением СОЖ: 28,6 мкм (вулканит), 19,1 мкм (бакелит), 18,8 мкм (керамика). Применение СОЖ не демонстрирует статистически значимого влияния на абсолютные значения высоты волнистости.



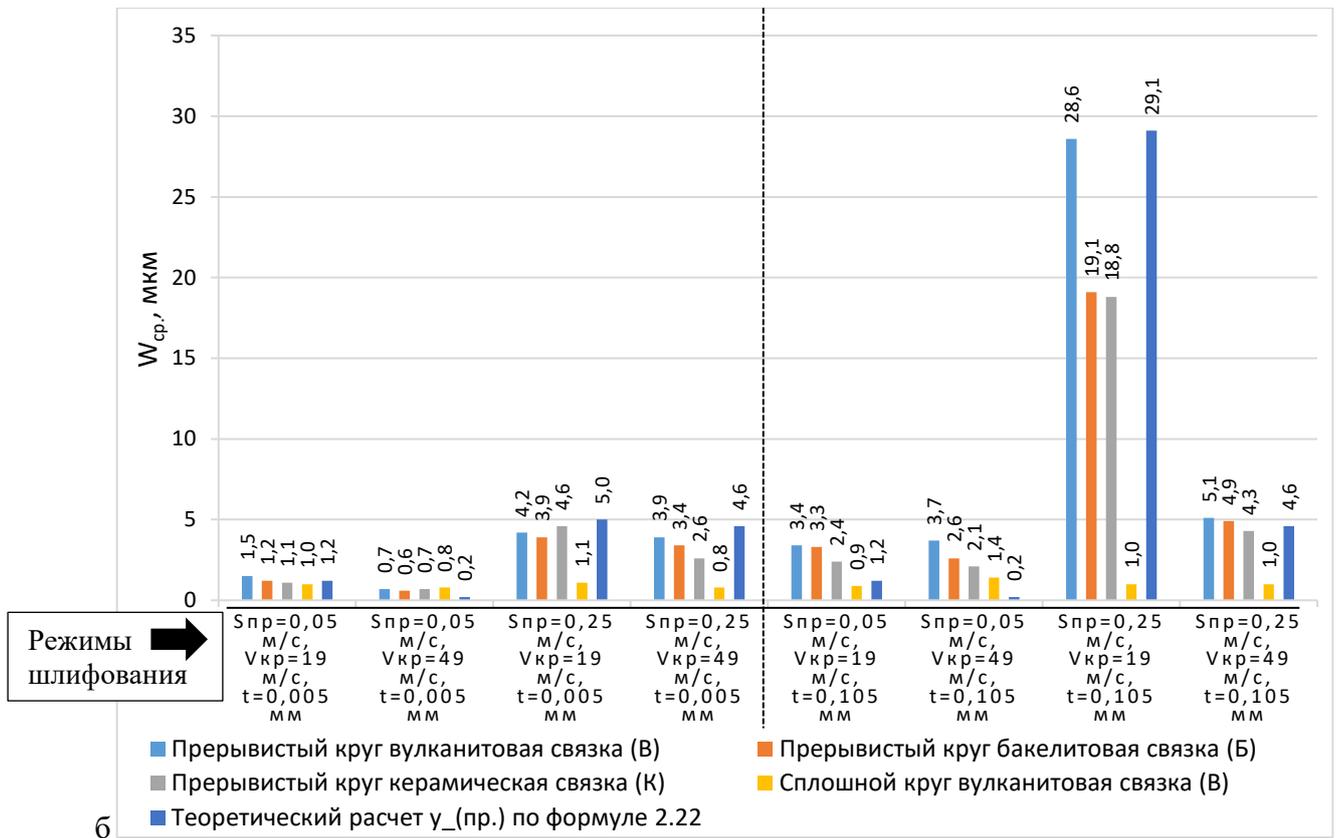


Рис. 4.22. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной волнистости обработанной поверхности \bar{W} по режимам обработки для условий охлаждения: а – воздухом, б - СОЖ

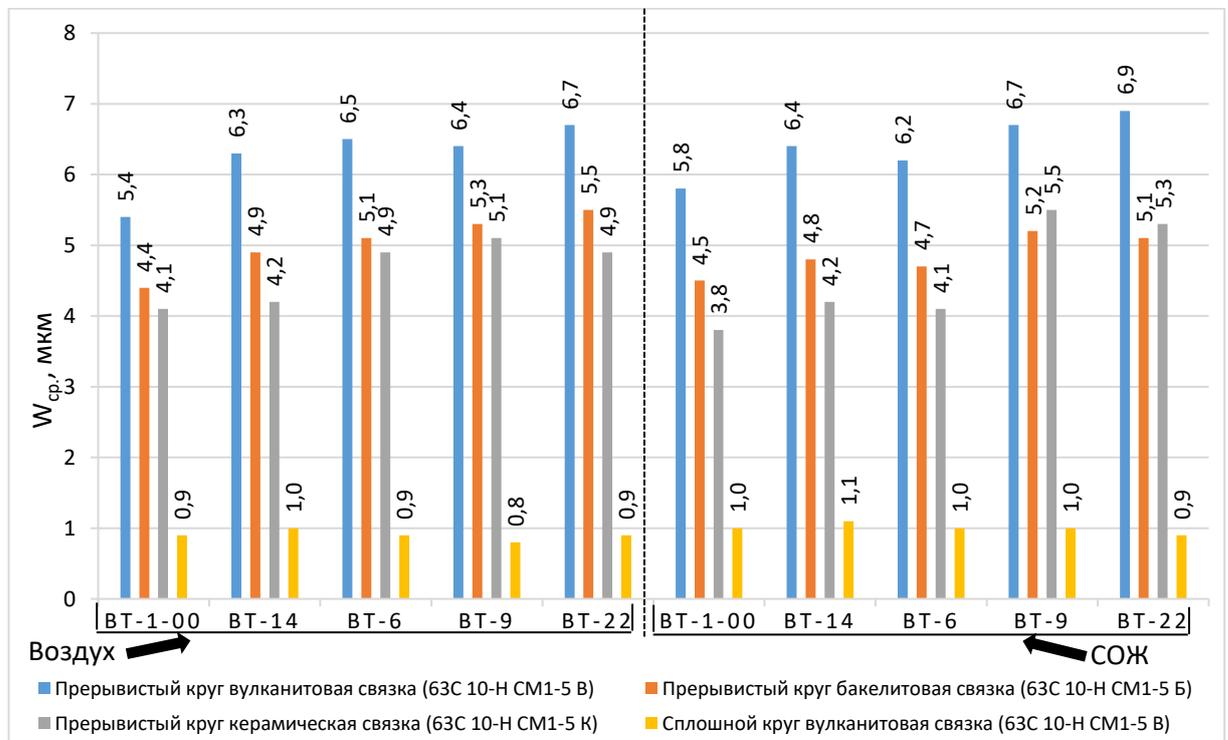


Рис. 4.23. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной волнистости обработанной поверхности \bar{W} по маркам обрабатываемых сплавов и условиям охлаждения



Рис. 4.24. Внешний вид обработанной поверхности заготовки из сплава ВТ-6 (гр. III) с выраженными визуальными признаками волнистости (увеличение 4 крат.)

При сопоставлении экспериментально определенной высоты волнистости с теоретическими значениями составляющей волнистости $u_{пр}$ можно увидеть достаточно высокую степень согласованности ($R^2 > 0,97$). Это, с учетом сопоставления результатов оценки средневзвешенной высоты волнистости для сплошного и прерывистого шлифования, дополнительно подтверждает теорию о значительном вкладе прерывания процесса резания в формирование развитой волнистости обработанной поверхности.

Причем, для ПШК на вулканитовой связке, в среднем, высота волнистости принимает гораздо более высокие значения – 6,3–6,4 мкм, против 4,9–5,0 и 4,6 мкм для ПШК на бакелитовой и керамической связках, а для отмеченных ранее наиболее неблагоприятных сочетаний режимов резания: 27,7–28,6 мкм против 19,1–19,9 и 18,8–19,4 мкм. Следовательно, при ухудшении условий обработки, влияние типа материала АС на высоту волнистости значительно увеличивается. Указанное явление также может быть обусловлено наличием у материала АС на вулканитовой связке меньшей жесткости, следствием чего является более выраженный отжим сегмента при взаимодействии с «недорезанной» частью снимаемого припуска.

4.2.3. Результаты исследования влияния параметров технологической системы на пиковую температуру в зоне резания

Результаты экспериментальной оценки пиковой температуры в зоне резания для рассматриваемых условий обработки, а также характеристика выявленных дефектов типа «прижог» приведены в таблице П.1 приложения П. Исходные данные, результаты аналитического расчета пиковой (температуры в зоне резания, а также оценки абсолютной и

относительной погрешностей аналитической модели сводим в таблицы П.2–П.5 приложения П. Сопоставление результатов экспериментальной оценки средневзвешенной пиковой температуры в зоне резания по режимам, способу и условиям обработки представим в виде диаграмм, представленных на рисунках 4.25–4.28.

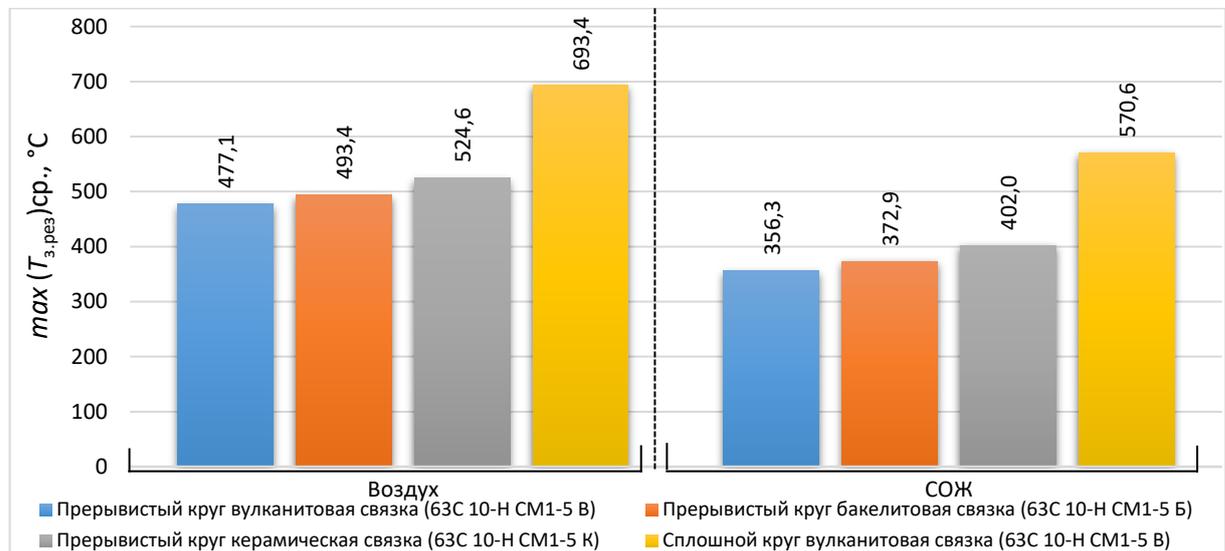
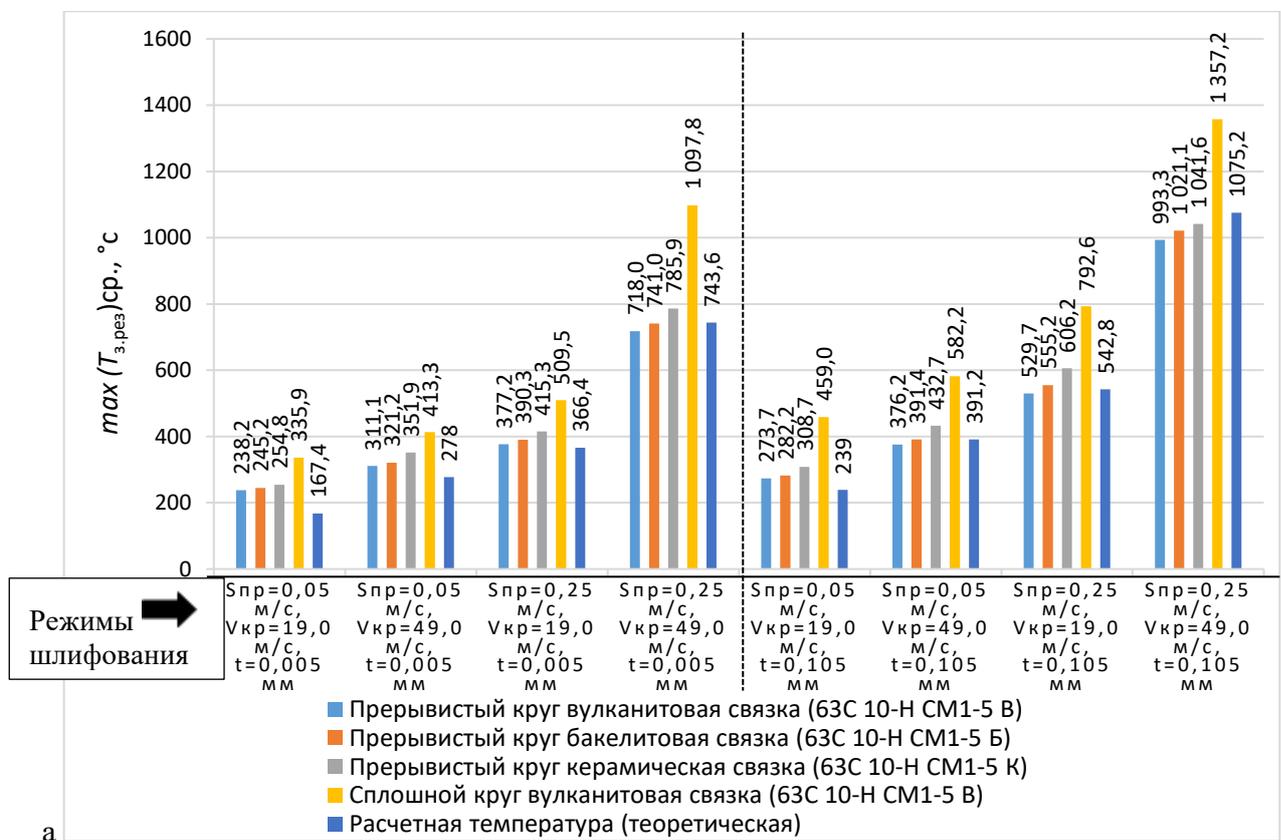


Рис. 4.25. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной пиковой температуры $\overline{max}(T_{z,pez})$ в зоне резания по способам обработки и условиям охлаждения



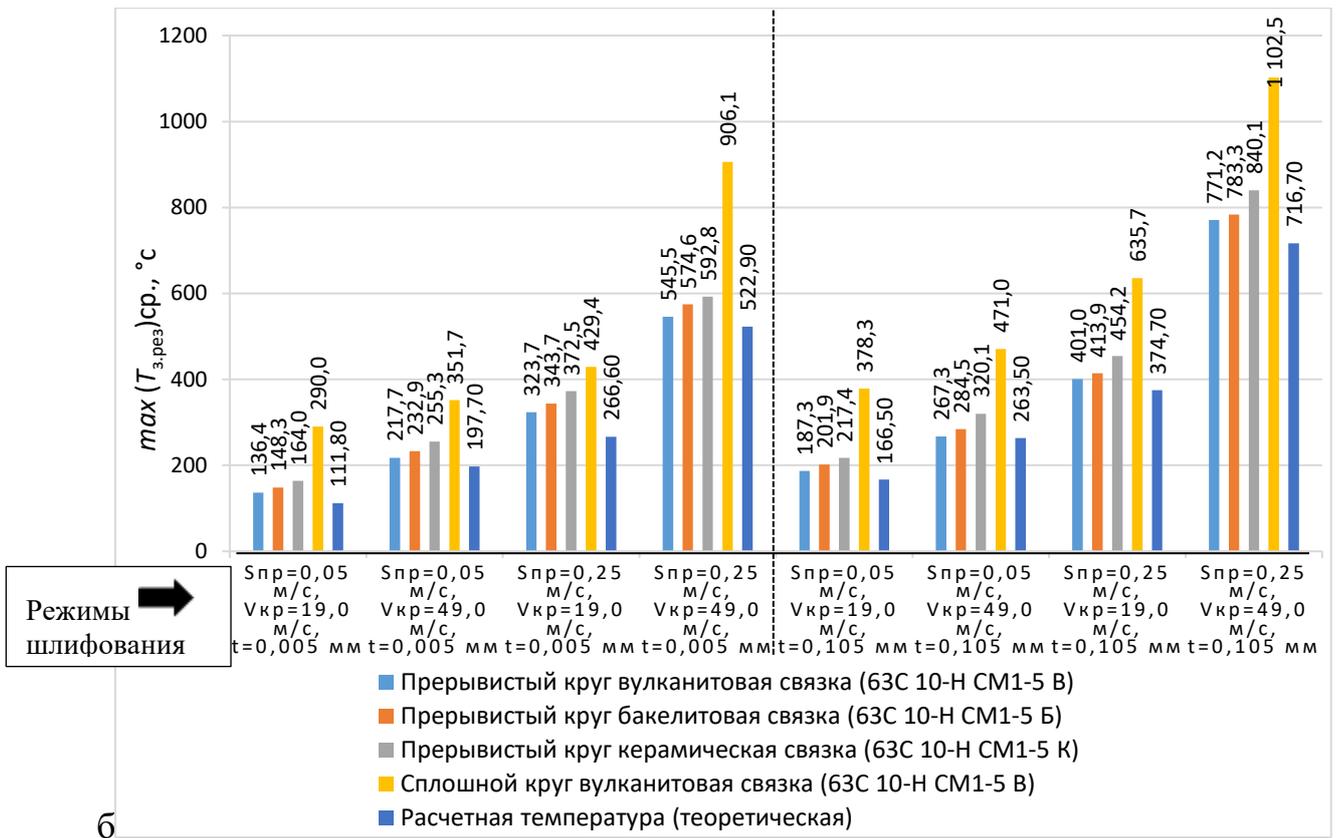


Рис. 4.26. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной пиковой температуры $\max(T_{з.pez})$ в зоне резания по режимам обработки для условий охлаждения: а – воздухом, б – СОЖ

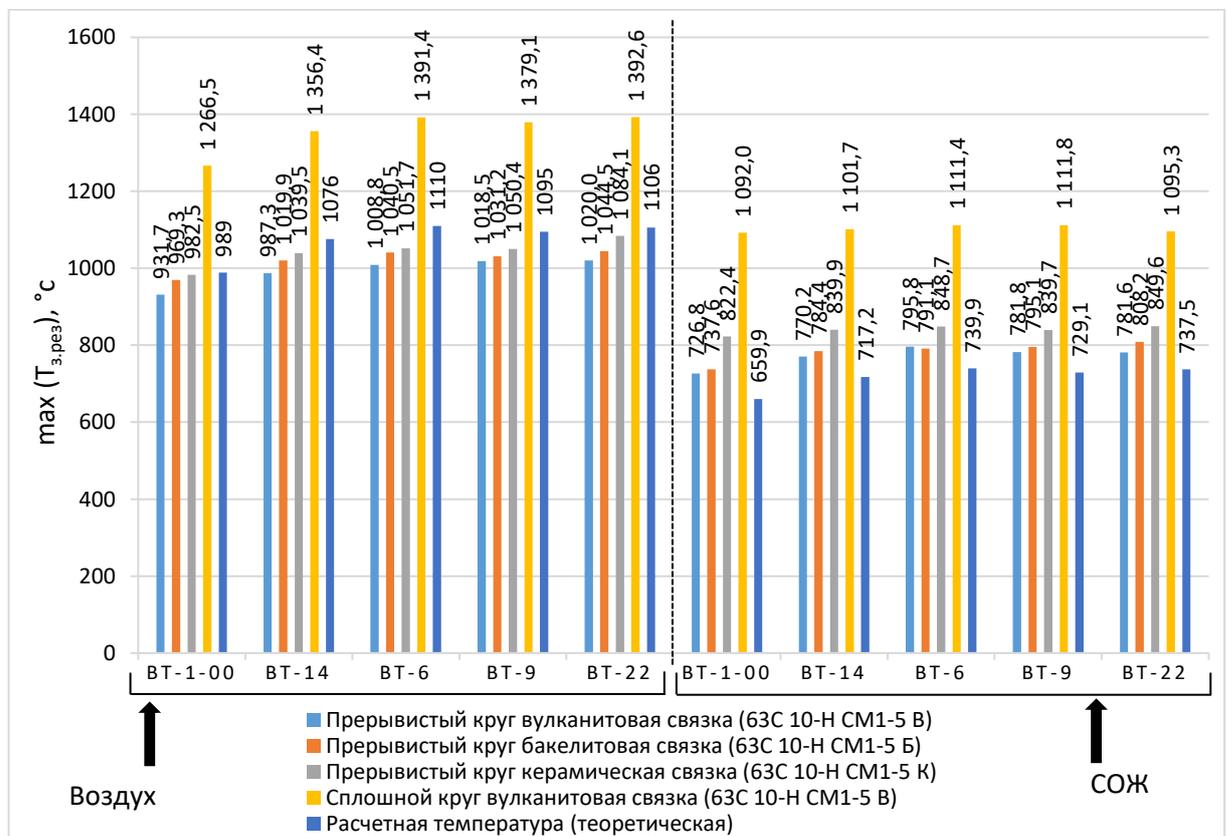


Рис. 4.27. Сопоставление результатов оценки максимальной температуры в зоне резания $\max(T_{з.pez})$

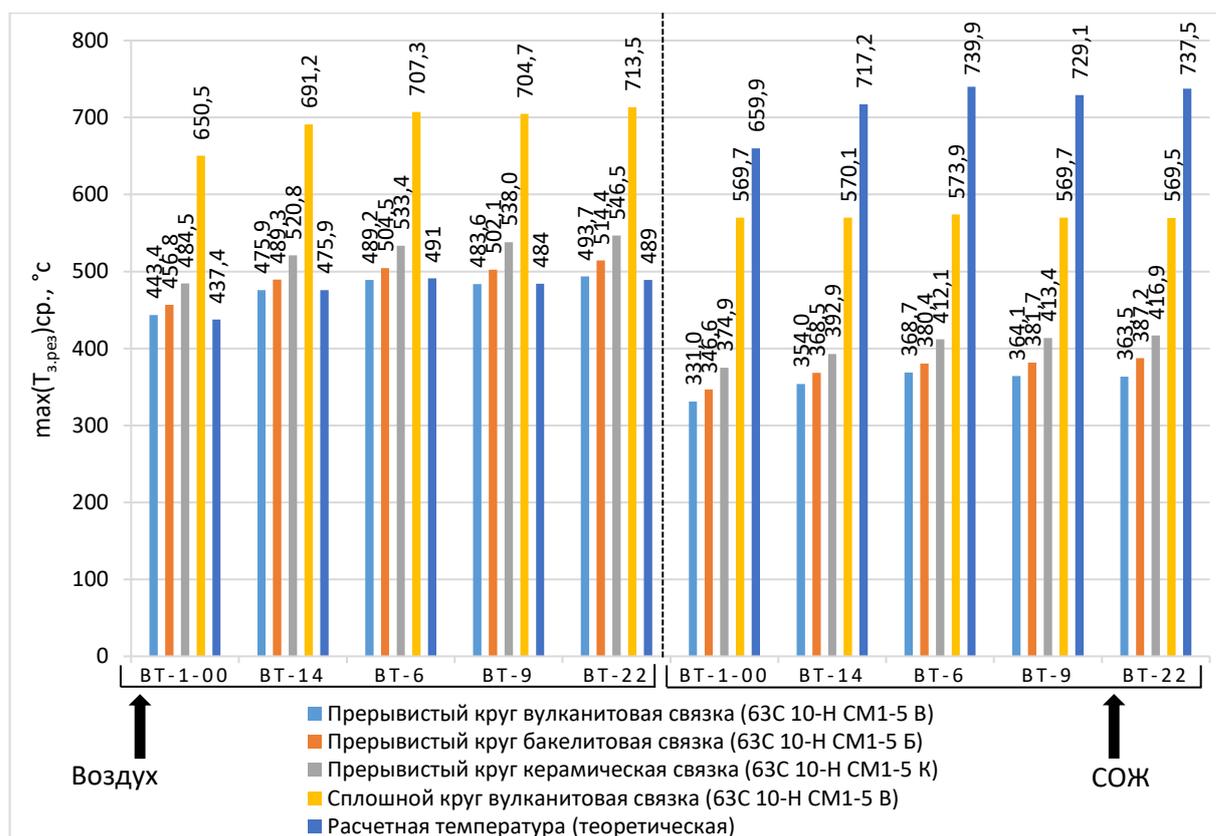


Рис. 4.28. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной пиковой температуры $\overline{\max(T_{з.рез})}$ в зоне резания по маркам обрабатываемых сплавов и условиям охлаждения

Использование способа прерывистого шлифования, способствует уменьшению теплонапряженности в зоне обработки. Средневзвешенные значения пиковых температур на 24,3–31,2 % при охлаждении воздухом и на 29,5–37,6 % – при обработке с применением СОЖ ниже в сравнении со сплошным шлифованием кругом на вулканитовой связке.

Анализ влияния режимов обработки на средневзвешенное значение пиковой температуры в зоне шлифования показывает наличие прямой зависимости между ними. Также можно заметить, что по мере ужесточения режимов имеет место кратное увеличение разницы между абсолютными средневзвешенными значениями пиковой температуры в зоне обработки, более значимое для условий охлаждения воздухом – 97,7 °С при $S_{пр} = 0,05$ м/с, $V_{кр} = 19$ м/с, $t = 0,005$ мм и 363,9 °С при $S_{пр} = 0,25$ м/с, $V_{кр} = 49$ м/с, $t = 0,105$ мм, против разницы в 153,6 °С и 331,3 °С для аналогичных режимов обработки с использованием СОЖ.

Абсолютная разница максимальных температур, зафиксированных при обработке прерывистыми и сплошными кругами, находится в диапазоне 334,8–382,6 °С в условиях охлаждения воздухом и 313,7–365,2 °С – СОЖ. Для наиболее жестких условий обработки рассматриваемых сплавов с использованием сплошного круга на вулканитовой связке максимальные температуры в зоне резания достигают 1392,6 °С, для ПШК – 1084,1 °С (для круга на керамической связке).

Сопоставление результатов экспериментальной оценки средневзвешенных и максимальных значений пиковой температуры в зоне резания показывает значительное влияние материала связки АС ПШК. Применение вулканитовой связки снижает средневзвешенную пиковую температуру в зоне резания на 3,3 % и 9,1 % по сравнению с бакелитовой и керамической связками при охлаждении воздухом, и на 4,5 % и 11,4 % - при использовании СОЖ, что соответствует снижению на 16,3 °С, 47,5 °С и 16,6 °С, 45,8 °С соответственно. Для абсолютных максимальных температур разница ещё более выражена и составляет 24,5 °С и 64,1 °С при охлаждении воздухом, а также 12,4 °С и 53,8 °С при охлаждении СОЖ в сравнении с бакелитовой и керамической связками соответственно.

Ввиду того, что абразивные материалы на указанных связках имеют одинаковую характеристику, природа указанных различий между пиковыми значениями температур в зоне шлифования может быть обусловлена как физико-механическими свойствами материала АС (например, модулем жесткости, коэффициентами теплопроводности, трения и т.д.), так и особенностями взаимодействия связанного абразива с титановыми сплавами. К тому же, свой вклад в теплонапряженность может вносить неопределенный характер фактических значений коэффициента затупления, которые также могут быть связаны со свойствами связки.

Сопоставление средневзвешенных значений абсолютной и относительной погрешности для различных условий обработки изобразим в виде диаграмм, приведенных на рисунках 4.29–4.31.

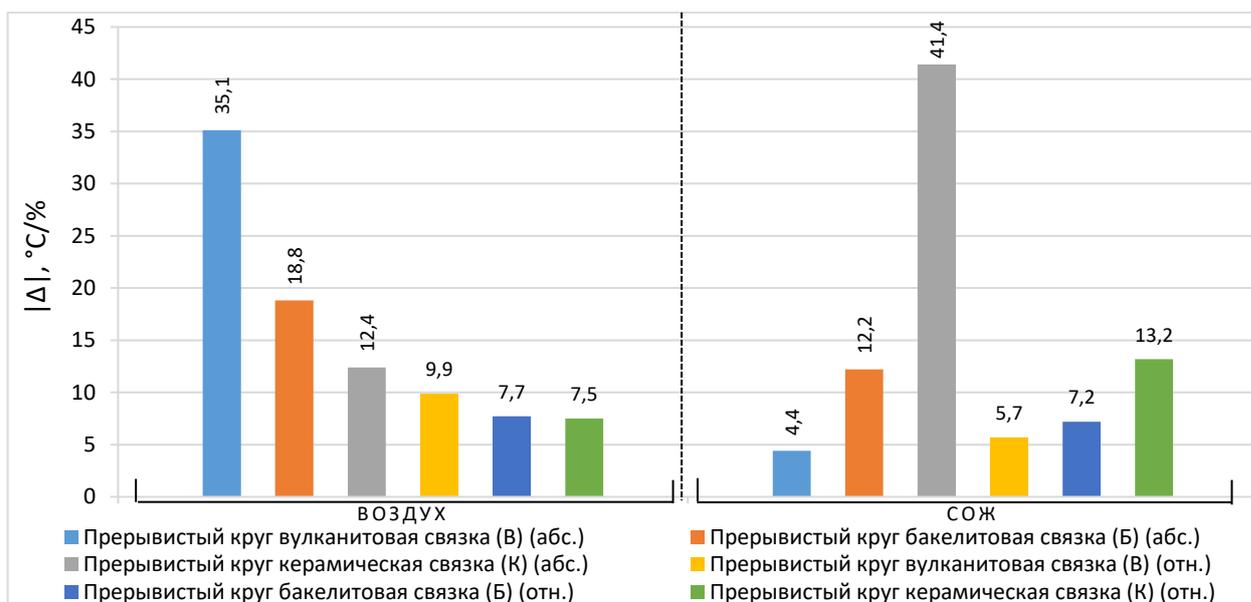


Рис. 4.29. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной погрешности $|\bar{\Delta}|$ аналитической модели по способам обработки и условиям охлаждения

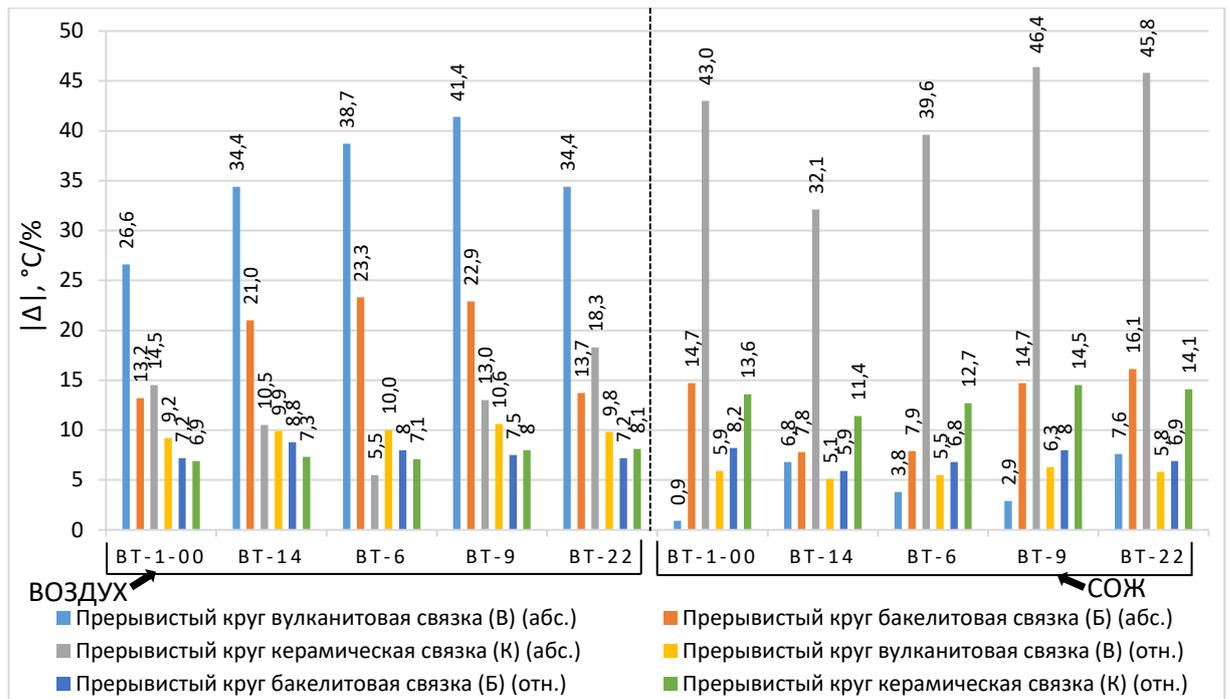
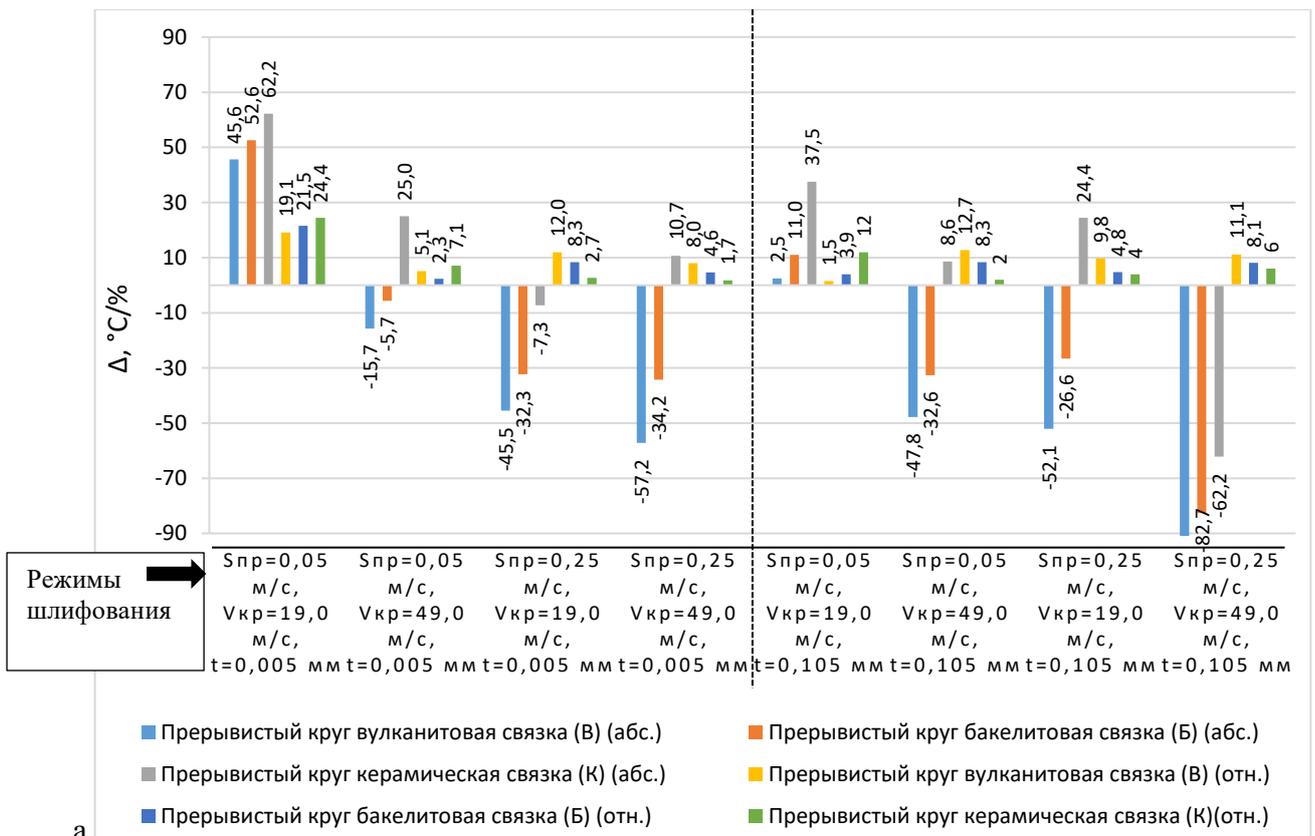


Рис. 4.30. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной погрешности $|\bar{\Delta}|$ аналитической модели по маркам обрабатываемых сплавов и условиям охлаждения



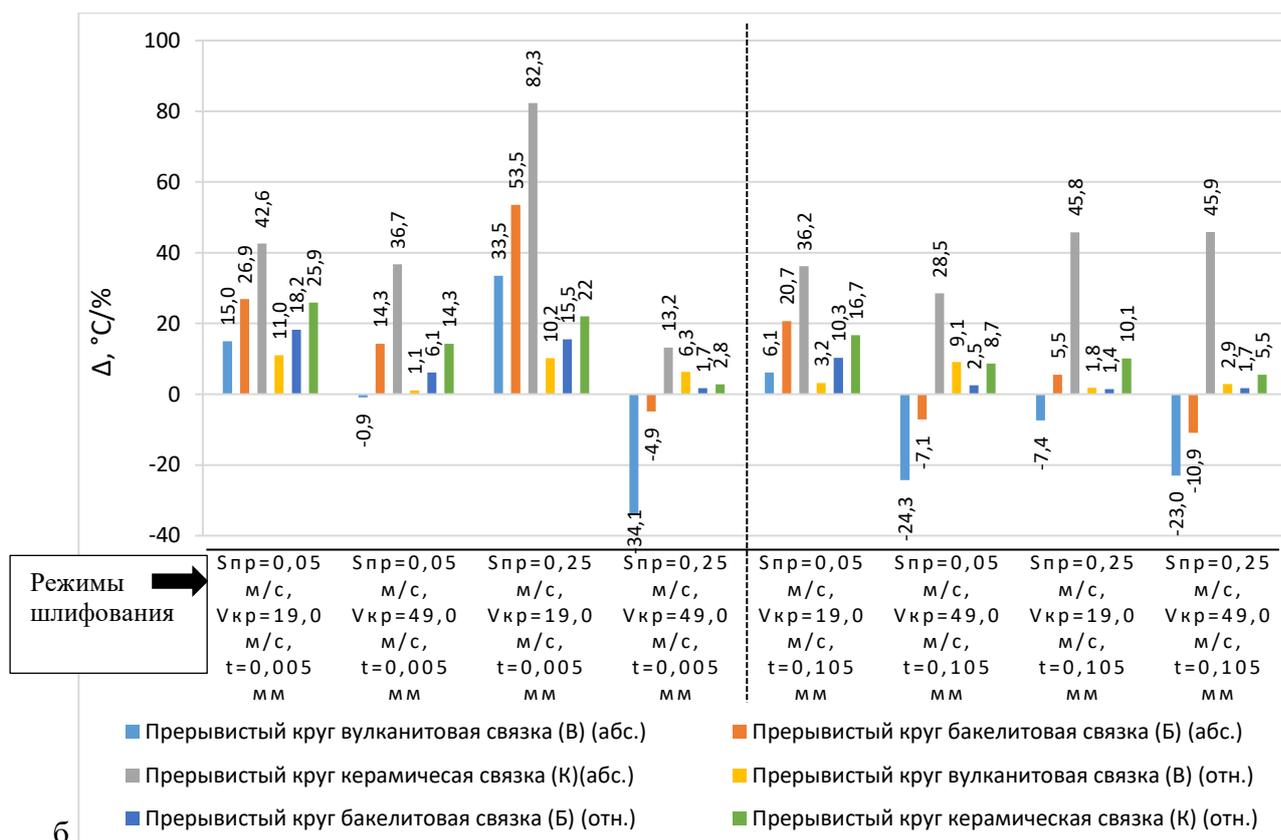


Рис. 4.31. Сопоставление результатов оценки средневзвешенной погрешности $\bar{\Delta}$ аналитической модели по режимам обработки для условий охлаждения: а – воздухом, б – СОЖ

Анализ результатов оценки погрешности аналитической модели, относительно экспериментальных значений пиковых температур в зоне резания, позволяет установить, что для рассматриваемых условий обработки, абсолютная погрешность модели варьируется в диапазоне значений 0,7–120,5 °С для условий обработки с охлаждением воздухом и 0,6–92,2 °С – с охлаждением СОЖ, в относительных величинах – в диапазонах 0,1–25,8 % и 0–27,7 %. Значения средневзвешенной абсолютной погрешности модели варьируются в диапазоне 12,4–35,1 °С для условий охлаждения воздухом и 4,4–41,4 °С для СОЖ, что, в относительных величинах – в диапазонах 7,5–9,9 % и 5,7–13,2 %. Причем, можно увидеть наличие значимого вклада со стороны определенных сочетаний режимов резания в общую картину отклонений аналитической модели, так, например, при малых рабочих скоростях наблюдается более выраженное отклонение расчетных значений температур от экспериментальных.

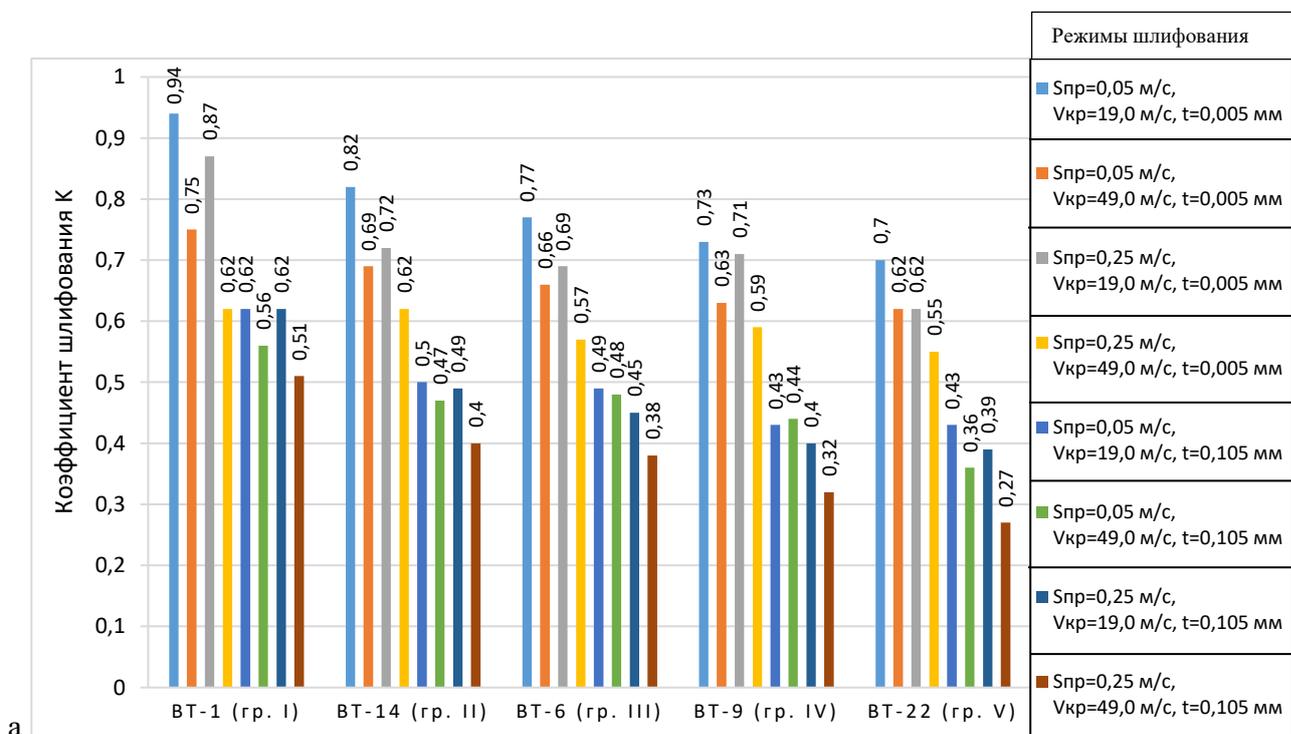
Материальное исполнение АС также оказывает достаточно выраженное влияние на погрешность модели в сочетании с условиями охлаждения, так, в условиях охлаждения воздухом, наибольшая абсолютная и относительная погрешность наблюдается для ПШК с АС на вулканитовой связке, для условий охлаждения СОЖ – на керамической. Свойства обрабатываемого материала вносят менее значимый вклад в погрешность определения

температур, выражаемый в наличии тренда к росту относительной погрешности расчетов по мере увеличения предела выносливости обрабатываемого материала.

Необходимо отметить, что природа указанных погрешностей может иметь широкий спектр причин: начиная от погрешностей, вызванных естественной нестационарностью процесса нагрева и физико-химических свойств обрабатываемого и абразивного материалов, заканчивая погрешностями моделей определения отдельных параметров (сил резания, коэффициента ввода тепла и т.д.). Также, значительное влияние могут оказывать особенности физико-химического взаимодействия абразива и связки с обрабатываемым металлом, лучистый теплообмен, неравномерность снимаемого припуска и т.д. В связи с указанными причинами, уточнение и совершенствование предложенной аналитической модели нагрева заготовки в зоне резания при прерывистом шлифовании периферией круга могут стать перспективными направлениями для дальнейших исследований.

4.2.4. Результаты исследования влияния параметров технологической системы на коэффициент шлифования прерывистых кругов на вулканитовой связке

Результаты экспериментальной оценки коэффициента шлифования для прерывистого круга с АС на вулканитовой связке сводим в таблицу приложения Р. Зависимости коэффициента шлифования от включенных в эксперимент факторов представим в виде диаграмм, приведенных на рисунке 4.32.



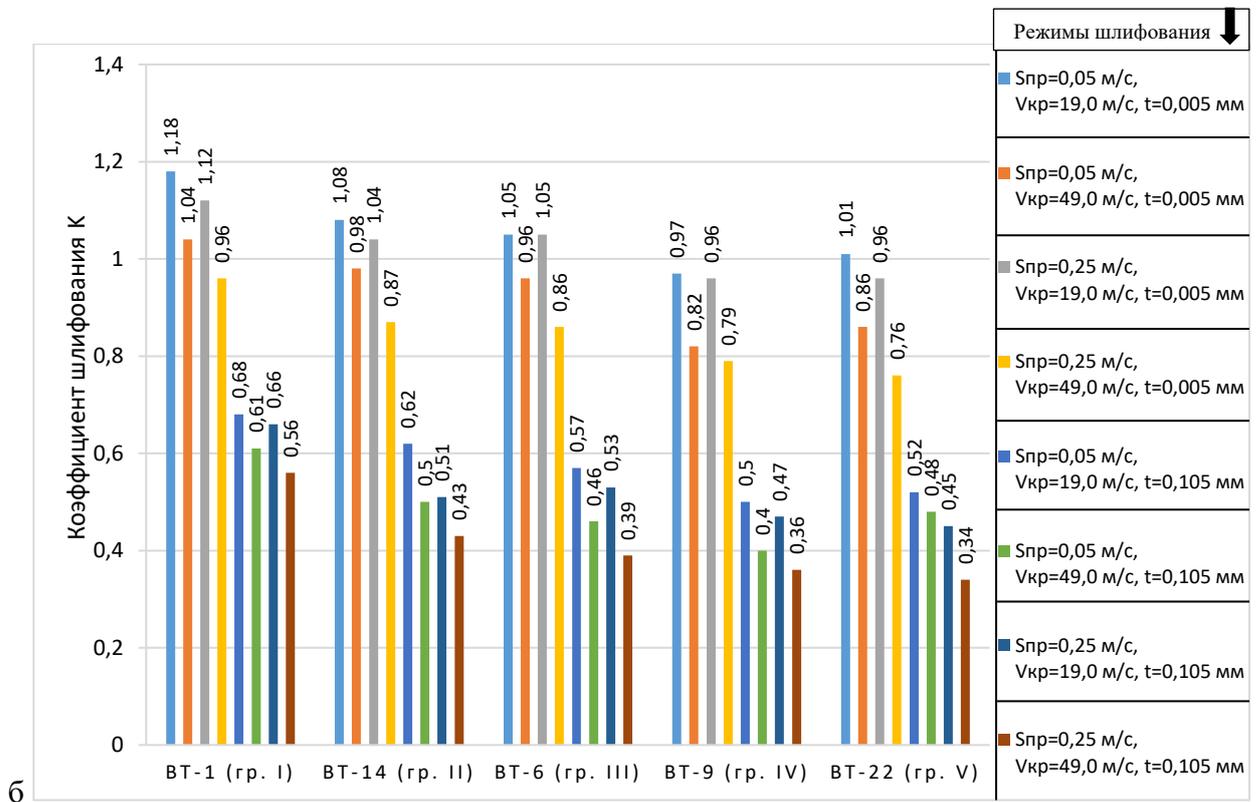


Рис. 4.32. Сопоставление результатов экспериментальной оценки коэффициента шлифования для условий охлаждения: а – воздухом, б – СОЖ

Средневзвешенное значение коэффициента шлифования ПШК по всему диапазону рассматриваемых режимов и марок титановых сплавов составляет менее 0,57 для шлифования с охлаждением воздухом и 0,73 – с СОЖ. Наблюдается достаточно выраженное снижение коэффициента шлифования по мере увеличения прочности обрабатываемого сплава с 0,69 при обработке сплава марки VT-1 (гр. I, $\sigma_B = 465$ МПа) до 0,49 при обработке сплава марки VT-22 (гр. V, $\sigma_B = 1273$ МПа) в условиях охлаждения воздухом и с 0,85 до 0,67 – при обработке с СОЖ. При ужесточении режима обработки коэффициент шлифования снижается.

4.3. Разработка регрессионных моделей

С целью разработки уравнений множественной регрессии для качественных характеристик обработанной поверхности Ra , W , а также коэффициента шлифования K предварительно принимаем включение в модели таких факторов как: использование СОЖ, $S_{пр}$, $V_{кр}$, t , σ_B (марка сплава). В таком случае, описание зависимости значений целевых параметров от варьируемых факторов может быть реализовано через уравнение множественной линейной регрессии типа ПФЭ 2⁵.

Из выражения (1.21) следует, что параметр $W = y_B$ можно представить как сумму двух составляющих высоты волнистости $y_{пр.}$ и $y_{дин.}$. Учитывая то, что значение $y_{пр.}$ достаточно

просто определяется аналитически (в отличие от параметра $y_{дин.}$), а результаты его расчета хорошо согласуются с экспериментальными значениями, то в качестве целевого параметра регрессионной модели целесообразно выбрать составляющую волнистости $y_{дин.}$, определение которой аналитическим методом затруднено. Ввиду того, что параметр $y_{пр.}$ имеет явную зависимость от $S_{пр}$ и $V_{кр}$, согласно выражению (1.23), то его включение в регрессионную модель нецелесообразно. Также, для повышения качества регрессионной модели параметра $y_{дин.}$, учитывая что $W = y_{в} = y_{пр.} + y_{дин.}$, из экспериментально найденной высоты волнистости необходимо вычесть составляющую $y_{пр.}$, т.е.:

$$y_{дин.} = W - y_{пр.}, \text{ мкм.} \quad (4.11)$$

Далее, с использованием встроенного и аналитического аппарата *Microsoft Excel*, выполним определение параметров множественных регрессий для условий плоского прерывистого шлифования кругами на вулканитовой связке с характеристикой абразива 63С 10-Н СМ1-5 В. Результаты определения параметров регрессионных моделей зависимости значений целевых параметров от варьируемых факторов обработки приведены в приложении С.

По итогам проведенного регрессионного анализа, были получены три надежных уравнения линейной регрессии, включающих по три фактора. После преобразования кодированных факторов в их натуральные величины получены следующие уравнения регрессии:

$$Ra = 0,1437427 - 0,008594 \cdot f_{СОЖ} - 0,00066 \cdot V_{кр} + \quad (4.12)$$

$$+ 0,0000217 \cdot \sigma_{в}, \text{ мкм};$$

$$y_{дин.} = -9,4375 \cdot S_{пр} + 11,25 \cdot t + 0,001485 \cdot \sigma_{в} - 0,0561, \text{ мкм}; \quad (4.13)$$

$$K = 1,0649875 + 0,086250 \cdot f_{СОЖ} - 3,4375 \cdot t - 0,0002305 \cdot \sigma_{в}, \quad (4.14)$$

где $f_{СОЖ}$ – функция, учитывающая способ охлаждения и принимающая значения: 1 – при охлаждении СОЖ, -1 – при охлаждении воздухом.

Отсюда:

$$W = y_{в} = y_{пр.} + y_{дин.} = \frac{S_{пр}^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \frac{(360^\circ - \varphi_{сегм} \cdot n_{сегм})}{n_{сегм}} \right)^2}{4 \cdot \left(\frac{V_{кр}}{\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot S_{пр} \cdot \pi}{V_{кр}} + 1 \right)} - \quad (4.15)$$

$$- 9,4375 \cdot S_{пр} + 11,25 \cdot t + 0,001485 \cdot \sigma_{в} - 0,0561, \text{ мкм.}$$

4.4. Рекомендации по проектированию параметров технологической системы плоского прерывистого шлифования титановых сплавов с использованием кругов на вулканитовой связке

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований влияния входных параметров ТС на значения критериев эффективности процесса шлифования позволил сформулировать следующий ряд принципов и рекомендаций по рациональному проектированию параметров технологического процесса плоского прерывистого шлифования заготовок из титановых сплавов. На первом этапе проектирования необходимо определить следующие неуправляемые параметры технологической системы:

— физико-механические и теплофизические свойства обрабатываемого сплава: марка, предел прочности σ_B , модуль упругости E , плотность $\rho_{м.з.}$, теплоемкость $C_{м.з.}$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_{м.з.}$;

— физико-механические и теплофизические свойства охлаждающей среды: динамическая вязкость $\mu_{ср.Тi}$, теплоемкость $C_{ср.Тi}$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_{ср.Тi}$;

— физико-механические, теплофизические и технологические свойства материала АС: материал, номер структуры С и зернистости абразива N, группа твердости, предел прочности материала АС на разрыв σ_{II}^D (в продольном направлении абразивного бруска) и его коэффициент теплопроводности $\lambda_{м.з.}$.

При определении физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого сплава необходимо учитывать особенности принципа суперпозиции, лежащего в основе разработанной аналитической модели для определения температуры в зоне резания. С целью избавления от необходимости применения многоитерационного подхода к вычислениям, при сохранении приемлемой точности, подбор справочных значений физических свойств обрабатываемого сплава следует производить приблизительно по среднему значению пиковой температуры в зоне резания, определенной для температурного диапазона, ориентировочные граничные значения которого могут быть найдены из полученных экспериментальных или известных справочных значений в зависимости от группы обрабатываемости сплава.

Далее, необходимо определить технологические свойства материала АС. При выборе зернистости и номера структуры абразива следует придерживаться общих рекомендаций, приведенных в соответствующих справочных и учебных пособиях [33, 69, 67, 72, 96, 129, 156]. Зернистость круга задается в зависимости от требуемой шероховатости обработанной поверхности, в меньшей степени зависит от вида и назначения шлифовальной операции. Номер структуры и твердость материала АС определяются в зависимости от условий шлифования: для плоского шлифования титановых сплавов наиболее подходящими являются абразивы средней

мягкости и плотности, соответствующие группам твердости СМ1-СМ5 с номерами структур 5–6.

Использование абразивов указанной группы твердости обеспечивает работу круга в режиме частичного самозатачивания, что положительно сказывается на теплонапряженности зоны шлифования. Использование абразивов более мягких групп при шлифовании титановых сплавов нецелесообразно ни по технологическим, ни по экономическим соображениям. В качестве материала абразивных зерен предпочтительным является использование абразивов на основе карбида кремния, также возможно использование алмазного абразива, но, в условиях низких значений коэффициента шлифования, последний вариант является менее предпочтительным ввиду гораздо более высокой стоимости абразива.

Техническая документация на абразивные сегменты, как правило, не содержит данных о прочностных характеристиках абразива, а справочные данные могут варьироваться в широком диапазоне значений, что затрудняет правильное определение предела прочности материала на разрыв. Здесь могут рассматриваться два подхода к определению прочностных характеристик круга: посредством натуральных прочностных испытаний круга вращением, а также прочностных испытаний АС на разрыв. При решении задач многономенклатурного проектирования и производства ПШК наиболее целесообразным представляется использование второго подхода, в то время как при разработке ПШК для решения частных задач, может быть использован первый подход, однако он значительно ограничивает проекторочные возможности и может способствовать получению неоптимальных результатов проектирования.

На следующем этапе необходимо определить значения ограниченно управляемых параметров, таких как: $b_{\text{сегм}}$, $h_{\text{сегм}}$, $l_{\text{сегм}}$, $l_{\text{уст}}$, $D_{\text{к}}$, d , $b_{\text{к}}$, $n_{\text{сегм}}$. Выбор «базовых» параметров шлифовального круга, таких как $D_{\text{к}}$, d и $b_{\text{к}}$ должен производиться с учетом общих рекомендаций к проектированию шлифовального инструмента, а также требований ГОСТ Р 52781-2007. Для обеспечения высокой степени унификации конструкции круга при определении геометрических характеристик сечения АС $b_{\text{сегм}}$ и $h_{\text{сегм}}$ следует ориентироваться на стандартизированные типоразмеры абразивных брусков, приведенные в ГОСТ 33534-2015. С целью повышения площади контакта фронтальной и тыльной поверхностей АС с корпусом круга, как следствие – увеличения прочности крепления сегментов, также следует выполнять условие $b_{\text{сегм}} \geq b_{\text{к}}$.

Также необходимо учитывать, что уменьшение длины контакта сегмента с корпусом круга в плоскости фронтальной или тыльной поверхности $b_{\text{к}}$, способствует увеличению значения коэффициента концентрации напряжений (рис. 3.10) и уменьшению предельной рабочей скорости круга. По этой же причине, в условиях наличия возможности выбора величины $b_{\text{к}}$ в пределах некоторого диапазона значений, превышающих 20 мм, может быть

рекомендовано принятие к проектированию больших значений b_k , а в диапазоне значений до 20 мм – меньших. Однако также необходимо учитывать, что чрезмерно малые значения $b_k \leq b_{\text{сегм}}$, могут способствовать нерациональному уменьшению производительности обработки ввиду невозможности обеспечения приемлемых значений $S_{\text{поп}}$.

Выбор параметра $h_{\text{сегм}}$ необходимо выполнять исходя из следующих закономерностей:

— по мере уменьшения $h_{\text{сегм}}$ снижается изгибная жесткость сегмента, что может способствовать увеличению его изгибных деформаций под действием тангенциальной составляющей силы резания;

— увеличение $h_{\text{сегм}}$ способствует уменьшению максимально возможного количества сегментов круга, что может ограничивать область решения целевых функций критериев повышения эффективности шлифования, а при прочих равных – росту температуры в зоне резания за счет увеличения общей длины дуги периферии круга.

Так как параметр $h_{\text{сегм}}$ тесно связан с такими производными параметрами как l_1 , l_2 и $n_{\text{сегм}}$, можно сказать, что для кругов малого диаметра D_k с сравнительно небольшим плечом момента изгиба АС, могут быть приняты к проектированию меньшие значения $h_{\text{сегм}}$ (с учетом типоразмеров сегментов, приведенных в ГОСТ 33534-2015) для расширения области решения проекторочной задачи, для кругов большего диаметра следует принимать большие значения $h_{\text{сегм}}$. Далее, на основании принятых значений $b_{\text{сегм}}$, $h_{\text{сегм}}$, D_k , d , b_k , производится определение количество сегментов $n_{\text{сегм}}$.

Выбор количества сегментов следует производить с учетом его влияния на значения целевых функций критериев эффективности шлифования во взаимосвязи с влиянием управляемых параметров, что значительно расширяет область регулирования значений того или иного критерия эффективности процесса. Характеристику влияния входных параметров технологической системы на значения критериев эффективности представим в виде матрицы, приведенной в таблице 4.1.

Так, при анализе характера влияния ограниченно управляемого параметра $n_{\text{сегм}}$ на значения критериев эффективности процесса шлифования, можно установить наличие значимого влияния на такие параметры как $u_{\text{пр}}$ и $N_{\text{дет}}$. При этом могут возникать конфликты, как на уровне регулирования ограниченно управляемого параметра $n_{\text{сегм}}$, так и на уровне управляемых параметров. В первом случае, уменьшение числа сегментов $n_{\text{сегм}}$ однозначно приводит к росту $u_{\text{пр}}$ при прочих равных условиях, в то время как в отношении удельной наработки $N_{\text{дет}}$, влияние числа сегментов имеет функциональный вид и может способствовать как увеличению, так и уменьшению её значения. При этом необходимо учитывать, что $n_{\text{сегм}}$ также оказывает влияние, хотя и достаточно низкое, на более иерархически значимый параметр

$T_{з.рез}$, а параметр $y_{пр}$ также находится в значимой зависимости от управляемых режимных параметров обработки.

Таблица 4.1 - Характеристика влияния параметров технологической системы на значения критериев эффективности процесса плоского прерывистого шлифования титановых сплавов периферией круга

| Параметр | Уровень, характер влияния параметра на значение критерия эффективности | | | | | Примечание |
|--|--|-------------|----------|-----------|-----------|--|
| | $Ra(Rz)$ | $T_{з.рез}$ | $U_{пр}$ | $A_{рез}$ | $N_{дет}$ | |
| Ограниченно управляемые | | | | | | |
| $n_{сегм}$ | 4 | 3-a | 1-b | 4 | 1-ab | Влияние на $N_{дет}$ опосредованное через $l_{сегм}$ |
| Управляемые | | | | | | |
| $S_{пр}$ | 3-a | 1-a | 1-a | 3-a | 2-b | Влияние на $N_{дет}$ опосредованное через K |
| $V_{кр}$ | 3-b | 1-a | 1-b | 3-b | 2-b | |
| t | 4 | 1-a | 1-a | 2-a | 2-b | |
| $S_{поп}$ | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| Тип охлаждающей среды | 3-ab | 2-ab | 4 | 3-ab | 2-ab | Применение СОЖ снижает Ra , $T_{з.рез}$, $A_{рез}$ и повышает $N_{дет}$ (опосредованно через K), воздуха – повышает Ra , $T_{з.рез}$, $A_{рез}$ и снижает $N_{дет}$ |
| <p>Принятая кодировка: 1 – высокая степень влияния, соответствующая относительной изменчивости значений критерия в диапазоне 0...50% при изменении технологического параметра в диапазоне $\{max, min\}$;</p> <p>2 – средняя степень влияния, соответствующая относительной изменчивости значений критерия в диапазоне 25...50% при изменении технологического параметра в диапазоне $\{max, min\}$;</p> <p>3 – низкая степень влияния, соответствующая относительной изменчивости значений целевого параметра в диапазоне 0...25% при изменении технологического параметра в диапазоне $\{max, min\}$;</p> <p>4 – степень влияния не установлена или влиянием параметра на значение критерия можно пренебречь;</p> <p>a – прямая функциональная зависимость значения целевой функции от параметра;</p> <p>b – обратная функциональная зависимость значения целевой функции от параметра;</p> <p>ab – обратная функциональная зависимость значения целевой функции от параметра;</p> | | | | | | |

Однако, как показали результаты исследований, $n_{\text{сегм}}$ имеет выраженное влияние на $U_{\text{пр}}$ в достаточно ограниченном диапазоне сочетаний управляемых параметров $S_{\text{пр}}$ и $V_{\text{кр}}$, в таком случае принятие решения о выборе числа АС следует производить на основании сопоставления значений производных параметров $l_{\text{сегм}}$ и η . Так, например, если при $l_{\text{сегм}}(n_{\text{сегм}}) = \max$, $\eta(n_{\text{сегм}})$ принимает малые значения (20 % и менее), то целесообразным представляется выбор значений $n_{\text{сегм}}$, удовлетворяющих условию $l_{\text{сегм}}(n_{\text{сегм}}) \rightarrow \max$ (с учетом ограничений, накладываемых со стороны $V_{\text{кр.р.пред}}$), в то время как снижение $U_{\text{пр}}$ до приемлемых значений может быть достигнуто варьированием управляемых параметров $V_{\text{кр}} \rightarrow \max$ и $S_{\text{пр}} \rightarrow \min$, что удовлетворяет решению более иерархически значимой задачи обеспечения высоких значений целевого параметра $Ra(Rz)$. Ограничения на величину $V_{\text{кр}}$ в данном случае будут накладываться только со стороны необходимости выполнения условия $T_{\text{з.рез}} < T_{\text{ф.пер}}$, так как влияние $V_{\text{кр}}$ на параметр $N_{\text{дет}}$ менее значимое, чем параметра $l_{\text{сегм}}$, а ее увеличение способствует решению вышестоящей задачи рационального проектирования $A_{\text{рез}} \rightarrow \min$.

Также, при определении числа АС, необходимо придерживаться условия (1.17) для исключения резонансных явлений в технологической системе и минимизации её вибронагруженности.

На основе сформулированных рекомендаций, для решения технологических задач и проблем при обработке титановых сплавов в условиях действующего производства ОАО «Авиаагрегат», были спроектированы параметры технологической системы процесса плоского прерывистого шлифования и проведены опытно-промышленные испытания разработанной конструкции круга и режимных параметров обработки, результаты которых приведены в приложении Т.

4.5. Техничко-экономическая эффективность

По результатам выполненных опытно-промышленных испытаний спроектированной ТС плоского прерывистого шлифования титановых сплавов, было установлено что основной технико-экономический эффект от реализации предлагаемых решений состоит в:

- сокращении себестоимости выполнения операций плоского шлифования;
- сокращении расходов на абразивный инструмент;
- сокращении расходов, связанных с производственным браком на операциях плоского шлифования заготовок из титановых сплавов.

В таком случае, суммарный годовой экономический эффект может быть найден как:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\text{себ.}} + \mathcal{E}_{\text{АИ}} + \mathcal{E}_{\text{брак}}, \text{ руб.}, \quad (4.16)$$

где $\mathcal{E}_{\text{себ.}}$ – экономия, связанная с сокращением себестоимости операции плоского шлифования за счет снижения трудозатрат рабочих и отчислений на амортизацию основного технологического оборудования, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{АИ}}$ – экономия, связанная с сокращением затрат на абразивный инструмент, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{брак}}$ – экономия, связанная с устранением технологического брака на операции плоского шлифования, руб.

Годовой экономический эффект, обусловленный сокращением трудоемкости операции плоского шлифования, будет складываться из экономии затрат, связанных с оплатой труда и затрат, связанных с эксплуатацией плоскошлифовального станка [29]:

$$\mathcal{E}_{\text{труд.}} = \mathcal{E}_{\text{ОТ}} + \mathcal{E}_{\text{ст.}}, \text{ руб.}, \quad (4.17)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ОТ}}$ – годовая экономия расходов на оплату труда основных производственных рабочих, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{ст.}}$ – годовая экономия расходов, связанных с эксплуатацией станка, руб.

Экономия расходов на оплату труда будет складываться из экономии расходов, связанных с основной, дополнительной заработной платой, а также с отчислением в социальные фонды [29]:

$$\mathcal{E}_{\text{ОТ}} = (\mathcal{E}_{\text{О.З.П.}} + \mathcal{E}_{\text{Доп.З.П.}}) \cdot 1,302, \text{ руб.}, \quad (4.18)$$

где $\mathcal{E}_{\text{О.З.П.}}$ – годовая экономия основной заработной платы основных производственных рабочих, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{Доп.З.П.}}$ – годовая экономия дополнительной заработной платы основных производственных рабочих, руб.;

1,302 – коэффициент, учитывающий отчисления в социальные фонды.

Годовая экономия основной заработной платы основных производственных рабочих может быть найдена как [29]:

$$\mathcal{E}_{\text{О.З.П.}} = C_{\text{с.т.}} \cdot \left(T_{\text{ш.-к.}}^{\text{спл./пр.шк.}} - T_{\text{ш.-к.}}^{\text{спл./пр.шк.}} \right) \cdot P_{\text{Г}}, \text{ руб.}, \quad (4.19)$$

где $C_{\text{с.т.}}$ – часовая тарифная ставка оплаты труда шлифовщика, руб./ч;

$T_{\text{ш.-к.}}^{\text{спл./пр.шк.}}$ – штучно-калькуляционное время на выполнение операции с использованием сплошного/прерывистого шлифовального круга (базового и предлагаемого вариантов технологического процесса), ч;

$P_{\text{Г}}$ – годовой объем выпуска деталей, шт.

Штучно-калькуляционное время операции плоского шлифования может быть найдено как [29]:

$$T_{ш.-к.}^{спл./пр.шк.} = T_{м.}^{спл./пр.шк.} + T_{уст} + \frac{T_{н}}{N_{спл./пр.шк.}^{п.ст.}} +$$

$$+ \frac{T_{пр}}{N_{спл./пр.шк.}^{п.ст.}} + \frac{T_{зк}}{N_{спл./пр.шк.}} + T_{отд.}, \text{ ч}, \quad (4.20)$$

где $T_{м.}^{спл./пр.шк.}$ – машинное время на выполнение операции с использованием сплошного/прерывистого шлифовального круга (базового и предлагаемого вариантов технологического процесса), ч;

N – средняя наработка сплошного/прерывистого шлифовального круга, шт.;

$N_{спл./пр.шк.}^{п.ст.}$ – средняя стойкость сплошного/прерывистого шлифовального круга, шт.;

$T_{н}$ – нормативное время наладки станка, ч;

$T_{уст}$ – нормативное время установки детали, ч;

$T_{пр}$ – нормативное время правки круга, ч;

$T_{зк}$ – нормативное время замены круга, ч;

$T_{отд.} = 0,05 \cdot T_{м.}^{спл./пр.шк.}$ – нормативное время на отдых и личные нужды, ч.

Согласно данным ОАО «Авиаагрегат», ставка дополнительной заработной платы шлифовщика составляет 15% от основной заработной платы, в таком случае, экономия затрат на дополнительную заработную плату может быть найдена как:

$$\mathcal{E}_{доп.з.п.} = 0,15 \cdot \mathcal{E}_{о.з.п.}, \text{ руб.} \quad (4.21)$$

Годовая экономия расходов, связанных с эксплуатацией плоскошлифовального станка может быть найдена как:

$$\mathcal{E}_{ст.} = C_{м.-ч.} \cdot K_{м} \cdot P_{г} \cdot (T_{м.}^{спл.шк.} - T_{м.}^{пр.шк.}), \text{ руб.}, \quad (4.22)$$

где $C_{м.-ч.}$ – стоимость машино-часа эксплуатации плоскошлифовального станка, руб./ч;

$K_{м}$ – коэффициент машино-часа для плоскошлифовального станка.

Годовая экономия затрат на абразивный инструмент может быть найдена как:

$$\mathcal{E}_{аи} = \left(\frac{C_{спл.к.} \cdot K_{уб.}}{N_{спл.шк.}} - \frac{C_{пр.к.} \cdot K_{уб.}}{N_{пр.шк.}} \right) \cdot P_{г}, \text{ руб.}, \quad (4.23)$$

где $C_{спл.к.}$, $C_{пр.к.}$ – стоимость сплошного и прерывистого круга, руб.;

$K_{уб.}$ – коэффициент, учитывающий убыль инструмента по причине случайных факторов.

В связи с тем, что операция плоского шлифования является завершающей в рамках технологических процессов изготовления деталей «Цилиндр» и «Цапфа», то возникновение брака типа шлифовочных прижогов приводит к полной забраковке изделий. Тогда, экономия затрат, связанных с браком может быть найдена как:

$$\mathcal{E}_{брак} = n_{брак}^{спл.кр} \cdot (C_{изд} - m_{изд.} \cdot C_{втор.}) -$$

$$-n_{\text{брак}}^{\text{пр.кр}} \cdot (C_{\text{изд.}} - m_{\text{изд.}} \cdot C_{\text{втор.}}), \text{ руб.}, \quad (4.24)$$

где $n_{\text{брак}}^{\text{спл.кр}}$, $n_{\text{брак}}^{\text{пр.кр}}$ – объем брака по базовому и предлагаемому вариантам технологического процесса, шт.;

$C_{\text{изд.}}$ – полная себестоимость забракованного изделия, руб.;

$m_{\text{изд.}}$ – масса забракованного изделия, кг;

$C_{\text{втор.}}$ – стоимость реализации 1 кг металла забракованного изделия на вторичную переработку, руб./кг.

Объем брака для j -го варианта технологического процесса может быть найден как:

$$n_{\text{брак}}^j = K_{\text{брак}} \cdot P_j, \text{ шт.}, \quad (4.25)$$

где $K_{\text{брак}}$ – коэффициент, учитывающий долю брака для j -го варианта технологического процесса.

Все необходимые исходные данные принимаем в соответствии с внутренними данными, предоставленными ОАО «Авиаагрегат». Значения общих для всех вариантов технологического процесса параметров приняты следующими: годовой объем выпуска P_j , для деталей «Цилиндр» и «Цапфа» составляет 400 и 320 штук; нормативное время наладки станка T_n – 0,15 ч; нормативное время установки заготовки детали $T_{\text{уст}}$ – 0,08 ч и 0,03 ч для «Цилиндра» и «Цапфы»; нормативное время правки круга $T_{\text{пр}}$ – 0,05 ч; среднее время замены круга $T_{\text{зк}}$ – 0,35 ч; стоимость машино-часа эксплуатации станка $C_{\text{м.-ч.}}$ – 1500 руб./ч; часовая тарифная ставка оплаты труда шлифовщика $C_{\text{с.т.}}$ – 73,8 руб./ч; коэффициент машино-часа станка K_m – 1,07; коэффициент, учитывающий убыль инструмента по причине случайных факторов $K_{\text{уб.}}$ – 1,03; полная себестоимость забракованного изделия $C_{\text{изд.}}$ – 82580 и 77790 руб. для «Цилиндра» и «Цапфы»; масса изделия $m_{\text{изд.}}$ для «Цилиндра» и «Цапфы» – 47,5 кг и 29,9 кг; стоимость реализации 1 кг металла забракованного изделия на вторичную переработку металла $C_{\text{втор.}}$ – 280 руб./кг. Исходные данные для базового и предлагаемому вариантам технологического процесса выполнения плоскошлифовальной обработки деталей типа «Цилиндр» и «Цапфа» на производственной базе ОАО «Авиаагрегат» сводим в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Исходные данные к калькуляции экономического эффекта от внедрения результатов научно-исследовательской работы

| Параметр | Базовый техпроцесс | | Предлагаемый техпроцесс | |
|---|--------------------|----------|-------------------------|-------|
| | Цилиндр | Цапфа | Цилиндр | Цапфа |
| Наименование изделия | Цилиндр | Цапфа | Цилиндр | Цапфа |
| Тип шлифовального круга | Сплошной | | Прерывистый | |
| Доля объема партии деталей с дефектами типа «прижог», шт. (%) | 4 (2) | 5 (3,12) | отс. | отс. |
| Среднее фактическое машинное время обработки T_m , ч | 0,21 | 0,29 | 0,16 | 0,23 |
| Коэффициент, учитывающий долю брака, $K_{\text{брак}}$ | 0,020 | 0,031 | 0 | |
| Стоимость круга $C_{j.k.}$, руб. | 7680 | | 4630 | |
| Средняя наработка круга N_{ij} , шт. | 171 | 125 | 124 | 109 |
| Средняя стойкость круга $N_{ij}^{\text{п.ст.}}$, шт. | 3,2 | 1,9 | 2,7 | 2,2 |

Найдем штучно-калькуляционное время обработки для соответствующих вариантов технологического процесса. Для базового технологического процесса, штучно-калькуляционное время обработки составит:

— для изделия «цилиндр»:

$$T_{\text{ш.-к.}}^{\text{спл.шк.}} = 0,21 + 0,08 + \frac{0,15}{3,2} + \frac{0,05}{3,2} + \frac{0,35}{171} + 0,05 \cdot 0,21 = 0,37 \text{ ч};$$

— для изделия «цапфа»:

$$T_{\text{ш.-к.}}^{\text{спл.шк.}} = 0,29 + 0,03 + \frac{0,15}{1,9} + \frac{0,05}{1,9} + \frac{0,35}{125} + 0,05 \cdot 0,29 = 0,44 \text{ ч};$$

Для предлагаемого варианта технологического процесса:

— для изделия «цилиндр»:

$$T_{\text{ш.-к.}}^{\text{пр.шк.}} = 0,16 + 0,08 + \frac{0,15}{2,7} + \frac{0,05}{2,7} + \frac{0,35}{124} + 0,05 \cdot 0,16 = 0,32 \text{ ч};$$

— для изделия «цапфа»:

$$T_{\text{ш.-к.}}^{\text{спл./пр.шк.}} = 0,23 + 0,03 + \frac{0,15}{2,2} + \frac{0,05}{2,2} + \frac{0,35}{109} + 0,05 \cdot 0,23 = 0,37 \text{ ч}.$$

В таком случае, экономия денежных средств на выплату основной заработной платы составит:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\text{о.з.п.}} = 73,8 \cdot (0,37 - 0,32) \cdot 400 = 1476 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\text{о.з.п.}} = 73,8 \cdot (0,44 - 0,37) \cdot 320 = 1653,1 \text{ руб.}$$

Экономия на выплате дополнительной заработной платы составит:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\text{доп.з.п.}} = 0,15 \cdot 1476 = 221,4 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\text{доп.з.п.}} = 0,15 \cdot 1653,1 = 247,9 \text{ руб.}$$

Тогда, экономия расходов на оплату труда будет равна:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\text{от}} = (1476 + 221,4) \cdot 1,302 = 2210 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\text{от}} = (1653,1 + 247,9) \cdot 1,302 = 2475,1 \text{ руб.}$$

Годовая экономия расходов, связанных с эксплуатацией плоскошлифовального станка составит:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\text{ст.}} = 1500 \cdot 1,07 \cdot 400 \cdot (0,21 - 0,16) = 32100 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\text{ст.}} = 1500 \cdot 1,07 \cdot 320 \cdot (0,29 - 0,23) = 30816 \text{ руб.}$$

Полный экономический эффект от сокращения трудоемкости обработки будет равен:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\text{труд.}} = 2210 + 32100 = 34310 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\text{труд.}} = 2475,1 + 30816 = 33291,1 \text{ руб.}$$

Годовая экономия затрат на абразивный инструмент составит:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\text{АИ}} = \left(\frac{7680 \cdot 1,03}{171} - \frac{4630 \cdot 1,03}{124} \right) \cdot 400 = 3120,3 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\text{АИ}} = \left(\frac{7680 \cdot 1,03}{125} - \frac{4630 \cdot 1,03}{109} \right) \cdot 320 = 6250,2 \text{ руб.}$$

На заключительном этапе найдем экономию денежных средств от снижения брака.

Приблизительный объем брака по базовому технологическому процессу составит:

— для изделия «цилиндр»:

$$n_{\text{брак}} = 0,02 \cdot 400 = 8 \text{ шт.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$n_{\text{брак}} = 0,031 \cdot 320 = 9,9 \approx 10 \text{ шт.}$$

Отсюда:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\text{брак}} = 8 \cdot (82580 - 47,5 \cdot 280) - 0 = 554240 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\text{брак}} = 10 \cdot (77790 - 29,9 \cdot 280) - 0 = 694180 \text{ руб.}$$

В таком случае, суммарный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит:

— для изделия «цилиндр»:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = 34310 + 3120,3 + 554240 = 591670,3 \text{ руб.};$$

— для изделия «цапфа»:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = 33291,1 + 6250,2 + 694180 = 733721,3 \text{ руб.}$$

Для наглядности, структуру экономии денежных средств по основным компонентам экономического эффекта изобразим в виде диаграмм, приведенных на рисунке 4.33.

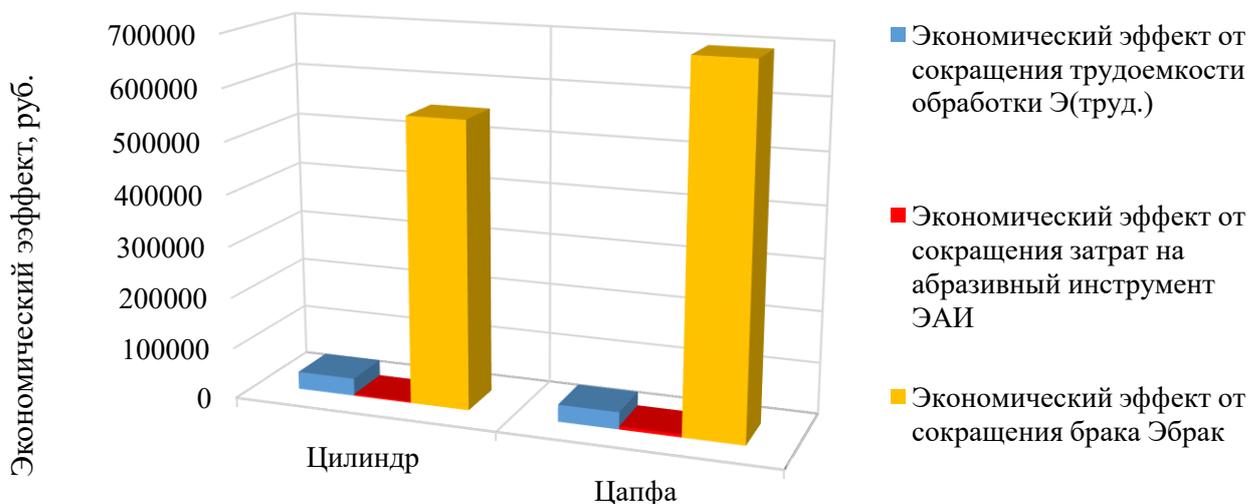


Рис. 4.33. Структура экономии денежных средств

В таком случае, по обоим изделиям экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = 591670,3 + 733721,3 = 1325391,6 \text{ руб.} \quad (4.26)$$

Таким образом, внедрение технологии плоского прерывистого шлифования титановых сплавов позволяет достичь положительный экономический эффект, выраженный в экономии на 1325391,6 руб. в год, причем доминирующая доля экономического эффекта обеспечивается устранением брака от возникновения шлифовочных прижогов. Следовательно, внедрение предлагаемых решений технически и экономически целесообразно.

4.6. Выводы по главе 4

1. По итогам комплексных экспериментальных испытаний разработанной конструкции ПШК было установлено, что использование прерывистых кругов на вулканитовой связке при обработке титановых сплавов позволяет повысить эффективность процесса шлифования за счет: снижения вибрационной нагрузки в технологической системе, высоты профиля шероховатости в сравнении с кругами на бакелитовой и керамической связках, а также минимизации пиковых температур в зоне резания при незначительном относительном увеличении средней высоты профиля волнистости.

2. Подтверждено, что прерывистое шлифование вносит достаточно существенный вклад в вибрационную нагрузку технологической системы, способствуя росту пиковых амплитуд виброперемещений корпуса шпиндельного узла до 59,2–135,7 %. При этом установлено, что использование ПШК на вулканитовой связке позволяет достичь снижения амплитуды виброперемещений на 17,23–30,28 % в сравнении с аналогичными кругами на бакелитовой и керамической связках.

3. Прерывание процесса резания способствует увеличению высоты профиля шероховатости поверхности до 46,5 % в сравнении со сплошным кругом на вулканитовой связке 63С 10-Н СМ1-5 В. Установлено, что использование ПШК на вулканитовой связке в среднем способствует снижению высоты профиля шероховатости на 3,2 % в сравнении с кругом на бакелитовой связке и на 9,8 % в сравнении с кругом на керамической связке при охлаждении воздухом и на 4,5 % и 8,4 % в условиях использования СОЖ.

4. Подтверждено, что прерывание процесса резания способствует увеличению высоты профиля волнистости поверхности в сравнении со сплошным шлифованием: средневзвешенная высота волнистости при сплошном шлифовании составила 0,9–1,0 мкм, при прерывистом – 4,6–6,4 мкм. Установлено, что при использовании кругов на вулканитовой связке наблюдается увеличение высоты профиля волнистости: в среднем на 26 % и 36,9 % в сравнении с кругами на бакелитовой и керамической связках в условиях охлаждения воздухом и на 30,6 % и 39,1 % в условиях применения СОЖ. Столь выраженный рост высоты профиля волнистости объясняется меньшей жесткостью материала АС на вулканитовой связке.

5. Подтверждено, что использование способа прерывистого шлифования способствует снижению пиковых температур в зоне резания в среднем на 24,3–31,2 % при охлаждении воздухом и на 29,5–37,6 % – при использовании СОЖ по сравнению с обработкой сплошными кругами. Установлено, что использование АС на вулканитовой связке способствует снижению средневзвешенной пиковой температуры в зоне шлифования на 3,3 % и 9,1 % в сравнении с кругами на бакелитовой и керамической связках при охлаждении воздухом и на 4,5 % и 11,4 % – СОЖ.

6. Установлено, что погрешность уточненной аналитической модели для расчета температуры заготовки при плоском прерывистом шлифовании титановых сплавов составляет в среднем 7,5–9,9% и 5,7–13,2% в условиях охлаждения воздухом и СОЖ.

7. На основе полученных экспериментальных данных разработаны регрессионные модели зависимости динамической составляющей высоты волнистости $U_{дин.}$, высоты профиля шероховатости R_a и коэффициента шлифования K от значений входных параметров технологической системы для шлифовальных кругов 63С 10-Н СМ1-5 В.

8. Сформулированы общие рекомендации по выбору параметров технологической системы процесса плоского прерывистого шлифования заготовок деталей из титановых сплавов при проектировании, а также разработаны конкретные практические рекомендации по повышению эффективности процесса шлифования титановых сплавов для условий действующего производства предприятия ОАО «Авиаагрегат».

9. Выполнена экономическая оценка эффективности внедрения предлагаемых решений в действующее производство для условий предприятия ОАО «Авиаагрегат», по итогам которой было установлено наличие положительного экономического эффекта, выраженного в экономии 1325391,6 руб. в год.

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 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 показало снижение температуры в зоне резания на 11 % по сравнению с кругами на бакелитовой и керамической связках.

6. Установлена эффективность применения ПШК на вулканитовой связке для обработки заготовок из титановых сплавов: вибрации снижаются на 15 % в сравнении с

ПШК на бакелитовой и на 26 % – с керамической связкой, параметр Ra 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 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;
- АС – абразивный сегмент;
- ПШК – прерывистый шлифовальный круг;
- СОЖ – смазывающе-охлаждающая жидкость;
- ТС – технологическая система;
- УДЭ – упруго-демпфирующий элемент;
- h_i – коэффициент сопротивления, (Н·с)/м;
- A_i – амплитуда, м;
- a_z – толщина срезаемого слоя, мм;
- a_k, b_k – коэффициенты Фурье;
- a_i – коэффициент температуропроводности, м²/с;
- $b_i, h_i, l_i(L_i)$ – ширина, длина и высота, мм;
- С – номер структуры материала АС по ГОСТ 3647-80;
- C_i – теплоемкость, Дж/(кг·К);
- c_i – коэффициент жесткости, Н/м;
- D_i – диаметр, м (мм);
- $d_{в}$ – внутренний (посадочный) диаметр рабочей части круга, мм;
- $d_{и}$ – диаметр площадок износа абразивных зерен, мм;
- E_i – модуль упругости, кг/мм² (МПа);
- F_i – площадь, м²;
- I – момент инерции, кг·м²;
- K – коэффициент шлифования;
- $K_з$ – коэффициент затупления, %;
- $K_с$ – коэффициент передачи силы;
- k_d – коэффициент динамичности;
- N – номер зернистости по ГОСТ 3647-80, 10⁻² мм;
- $N_{дет}$ – удельная наработка шлифовального круга, шт.;
- $N_{рез}$ – механическая мощность резания, Вт;
- $n_{з.п.}$ – количество абразивных зерен, расположенных вдоль линии профиля периферии АС, шт.;

$n_{з.р.п.}$ – удельное количество абразивных зерен, приведенное к площади периферии АС, $1/мм^2$;
 $n_{сегм}$ – число абразивных сегментов, шт.;
 Nu_i – критерий Нуссельта;
 m_i – масса, кг;
 $P_v, P_{ц.б}$ – вынуждающая, центробежная силы, Н;
 P_z, P_y – тангенциальная и нормальная (радиальная) составляющие силы резания, Н;
 $P_{Zc.y}$ – сила преодоления упругой деформации металла, кг;
 Pr_i – критерий Прандтля;
 Ra – высота профиля шероховатости, мкм;
 R_i – радиус, м (мм);
 Re_i – критерий Рейнольдса;
 r_T – радиус зоны контакта источника тепла с заготовкой в плане, м;
 $S_{пр}$ – скорость продольной подачи, м/с;
 $S_{з.п}$ – коэффициент запаса прочности;
 $S_{ПОП}$ – поперечная подача, мм/дв. ход;
 $S_{сегм}$ – подача на сегмент, мм;
 T_i – температура, °С;
 t – глубина резания, мм;
 tga, tga_1 – тангенсы угла дуги контакта рабочей поверхности круга с заготовкой и угла сдвига срезаемого слоя;
 V_i – скорость, м/с;
 v_T – скорость распространения теплового фронта во время воздействия источника тепла, м/с;
 W – высота волнистости, мкм;
 W_i – объем, $мм^3$ ($см^3$);
 q_i – удельный тепловой поток, $Вт/м^2$;
 $x_{1j} \dots x_{nj}$ – условное обозначение переменных, определяющих численное значение целевой функции;
 y_i – высота волнистости, м;
 α_i – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;
 α_σ – коэффициент концентрации напряжений;
 $\delta_{ст}$ – абсолютная статическая деформация стружки, мм;
 λ_i – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$;

μ_i – динамическая вязкость, Па·с;

$\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения;

ν_i – частота, Гц;

ρ_i – плотность, г/см³ (кг/м³);

$\sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{п}}^{\text{р}}, \sigma_{\text{п}}^{\text{с}}$ – предел выносливости, прочности на разрыв и сжатие, МПа (кг/мм²);

$\sigma_{\text{r}}, \sigma_{\text{o}}, \sigma_{\text{экв}}$ – радиальные, окружные, эквивалентные напряжения, МПа;

τ_i – время, с;

φ_i – угол, °;

ω_i – угловая скорость, рад/с;

$\omega_{\text{ф.нач}}$ – начальная фаза, рад.;

Δt – приращение времени, с;

Θ – угол сдвига стружки при микрорезании, °;

β – коэффициент затухания;

η – показатель относительной высоты волнистости, %;

μ – коэффициент Пуассона;

ψ – коэффициент, характеризующий долю тепла, уходящего в заготовку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверков, К. В. Высокоскоростное шлифование жаропрочных и жаростойких сплавов / К. В. Аверков, Е. В. Веселкова. – Текст : непосредственный // БРНИ. – 2014. – № 1 (10). – С. 190-195.
2. Александров, В. К. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар и др. – Москва : Металлургия, 1979. – 512 с. – Текст : непосредственный.
3. Александров, В. К. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, А. П. Белозеров, Б. А. Колачев. – Москва :ВИЛС, 1996. – 581 с. – Текст : непосредственный.
4. Анкудинов, В. Е. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах : учебное пособие / В. Е. Анкудинов, Д. Д. Афлятунова, М. Д. Кривилев, Г. А. Гордеев. – Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2014. – 108 с.
5. Ардашев, Д. В. Повышение эффективности операций шлифования в многономенклатурном производстве на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук / Д. В. Ардашев ; ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». – Ульяновск, 2018. – 351 с. – Текст : непосредственный.
6. Безыкорнов, А. И. Влияние физико-химического взаимодействия титана на износостойкость тугоплавких соединений при прерывистом микрорезании / А. И. Безыкорнов, Н. И. Богомолов, М. С. Ковальченко. – Текст : непосредственный // Электронное строение и свойства твердого тела. Ч. 2. – Киев : Наукова думка, 1972. – С. 128-136.
7. Бернштейн, М. Л. Структура и механические свойства металлов : учебник / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – Москва : Металлургия, 1970. – 472 с. – Текст : непосредственный.
8. Блехман, И. И. Вибрационная механика / И. И. Блехман. – Москва : Физматлит, 1994. – 400 с. – Текст : непосредственный.
9. Богомолов, Н. И. Исследование явлений при взаимодействии эльбора с титановым сплавом в условиях шлифования - микрорезания / Н. И. Богомолов, Г. И. Саютин, А. П.

- Татаринов. – Текст : непосредственный // Абразивы : научно-технический реферативный сборник. – 1974. – № 7. – Москва : НИИМАШ. – С. 15-18.
10. Богомолов, Н. И. К вопросу о влиянии свойств металла на износ абразива при трении / Н. И. Богомолов, Л. Н. Новикова. – Текст : непосредственный // Труды ВНИИАШ ; вып. 7. – 1968. – С. 88-96.
11. Богомолов, Н. И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла : специальность 05.00.00 «Техника» : диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук / Н. И. Богомолов. – Киев, 1967. – 481 с. – Текст : непосредственный.
12. Бойко, А. Ф. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов / А. Ф. Бойко, Е. Ю. Кудеников. – Текст : непосредственный // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. – 2016. – № 8. – С. 128-132.
13. Брытков, Е. В. Механика композиционных материалов : учебное пособие / Е. В. Брытков, В. А. Санников. – Санкт-Петербург : БГТУ, 2012. – 72 с. – Текст : непосредственный.
14. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафти. – Москва : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 708 с. – Текст : непосредственный.
15. Васильев, А. А. Совершенствование процесса плоского глубинного шлифования титановых сплавов с использованием высокопористого абразивного инструмента : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / А. А. Васильев ; ГОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет». – Волгоград, 2008. – 211 с. – Текст : непосредственный.
16. Вульфсон, И. И. Динамические расчеты цикловых механизмов / И. И. Вульфсон. Ленинград : Машиностроение, 1976. – 328 с. – Текст : непосредственный.
17. Галицкий, Б. А. Титан и его сплавы в химическом машиностроении / Б. А. Галицкий, М. М. Абелев, Г. Л. Шварц, Б. Н. Шевелкин. – Москва : Машиностроение, 1968. – 340 с. – Текст : непосредственный.
18. Глазунов, С. Г. Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. – Москва: Металлургия, 1974. – 368 с. – Текст : непосредственный.
19. Глазунов, С. Г. Титановые сплавы / С. Г. Глазунов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Часть 1, Часть 2. – Москва : Всесоюзный ордена Ленина научно-исследовательский институт авиационных материалов. Отдел научно-технической информации, 1959. – 318 с. – Текст : непосредственный.

20. Глейзер, Л. А. Пути усовершенствования инструмента, станков и технологии круглого шлифования. – Москва, 1957. – 47 с. – Текст : непосредственный.
21. ГОСТ 12.3.023-80. Система стандартов безопасности труда. Процессы обработки алмазным инструментом. Требования безопасности : государственный стандарт СССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31.07.80 N 3938 : введен взамен ГОСТ 16182-70 : дата введения 01.01.1982 / разработан Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1995. – 13 с. – Текст : непосредственный.
22. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.07.84 № 2515 : введен взамен ГОСТ 1497-73 : дата введения 01.01.1986 / разработан Министерством черной металлургии СССР. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 24 с. – Текст : непосредственный.
23. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 30 июня 1998 г. № 267 : введен взамен ГОСТ 25.503-80 : дата введения 01.07.1999 / разработан Воронежской государственной лесотехнической академией (ВГЛТЛ), Всероссийским институтом легких сплавов (ВИЛС), Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций (ЦНИИСЖ им. Кучеренко). Всероссийским научно-исследовательским институтом стандартизации и сертификации в машиностроении (ВНИИНМАШ) Госстандарта РФ. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 27 с. – Текст : непосредственный.
24. ГОСТ 273-90. Станки плоскошлифовальные с крестовым столом и горизонтальным шпинделем. Основные размеры. Нормы точности и жесткости : государственный стандарт СССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 20.06.90 N 1662 : введен взамен ГОСТ 9033-78 и ГОСТ 273-77 : дата введения 01.07.1991 / разработан Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1995. – 19 с. – Текст : непосредственный.

25. ГОСТ 30513-97. Инструмент абразивный и алмазный. Методы испытаний на безопасность : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие ПГосударственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 2 апреля 1998 г. № 104 : введен впервые : дата введения 01.07.1999 / разработан МТК 95 «Инструмент». – Москва : Издательство стандартов, 2000. – 7 с. – Текст : непосредственный.
26. ГОСТ 33534-2015. Бруски и сегменты шлифовальные. Технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 июня 2016 г. № 572-ст : введен взамен ГОСТ 2456-82, ГОСТ 2464-82, ГОСТ 28734-90 : дата введения 01.01.2017 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении (ВНИИНМАШ)». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 20 с. – Текст : непосредственный.
27. ГОСТ Р 52588-2011. Инструмент абразивный. Требования безопасности : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 ноября 2011 г. № 250-ст : введен взамен ГОСТ Р 52588-2006 : дата введения 01.01.2013 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении (ВНИИНМАШ)». – Москва : Стандартинформ, 2012. – 21 с. – Текст : непосредственный.
28. ГОСТ Р 52781-2007. Круги шлифовальные и заточные. Технические условия : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2007 г. № 339-ст : введен впервые : дата введения 01.01.2009 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении (ВНИИНМАШ)». – Москва : Стандартинформ, 2008. – 32 с. – Текст : непосредственный.
29. Гребенникова, И. В. Методы оптимизации : учебное пособие / И. В. Гребенникова. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 148 с. – Текст : непосредственный.
30. Гуреева, М. А. Основы экономики машиностроения. – Москва : Академия, 2010. – 208 с. – Текст : непосредственный.

31. Гусев, А. Ф. Прикладная теория колебаний : учебное пособие / А. Ф. Гусев, М. В. Новоселова. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. – 160 с. – Текст : непосредственный.
32. Гусев, В. Г. Критерии сравнительной оценки дискретных шлифовальных кругов. / В. Г. Гусев, А. В. Морозов // Сб. ст. Всерос. совещ. зав. каф. материаловедения и технологии конструкц. материалов. Проблемы качества технологической подготовки. – Волгоград : Волж. ин-т строит. и техн., 2007. – С. 88-91. – Текст : непосредственный.
33. Гусев, В. Г. Сравнительный анализ механической прочности шлифовальных кругов / В. Г. Гусев. – Текст : непосредственный // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – № 3 (129). – С. 18-26.
34. Гусев, В. Г. Технология плоского дискретного шлифования : учеб. пособие / В. Г. Гусев, В. В. Морозов. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 344 с. – Текст : непосредственный.
35. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 2004. – 512 с. – Текст : непосредственный.
36. Денисов, М. А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование : учебное пособие / М. А. Денисов. Екатеринбург : УрФУ, 2011. – 149 с. – Текст : непосредственный.
37. Дианов, А. А. Образование волнистости при плоском прерывистом шлифовании периферией круга / А. А. Дианов, Е. Ю. Татаркин, В. А. Терентьев. – Текст : непосредственный // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 127-131.
38. Дианов, А. А. Технологическое обеспечение качества деталей с износостойкими покрытиями за счёт управления параметрами точности основы и покрытия : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / А. А. Дианов ; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет имени И.И.Ползунова». – Барнаул, 2010. – 152 с. – Текст : непосредственный.
39. Дмитриева, О. В. Компьютерное проектирование и моделирование технологий и инструмента в машиностроении : учебное пособие / О. В. Дмитриева, А. Б. Переладов, Е. М. Кузнецова, И. П. Камкин. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2017. – 70 с. – Текст : непосредственный.
40. Долгов, В. И. Технология обработки титановых сплавов / В. И. Долгов, В. А. Ефимов. – Москва : Машиностроение, 1985. – Текст : непосредственный.
41. Зенков, Б. Н. Исследование устойчивости динамической системы шлифовального станка с учетом упругих свойств абразивного инструмента : специальность 05.02.08

- «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Б. Н. Зенков ; Ижевский механический институт. – Ижевск, 1979. – 234 с. – Текст : непосредственный.
42. Зубчанинов, В. Г. Основы теории упругости и пластичности / В. Г. Зубчанинов. – Москва : Высш. шк., 1990. – 368 с. – Текст : непосредственный.
43. Игнатов, С. Д. Моделирование механических систем при помощи расширений Simulink : учебное пособие / С. Д. Игнатов. – Омск : СибАДИ, 2016. – 115 с. – Текст : непосредственный.
44. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов : учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с. – Текст : непосредственный.
45. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачëв, И. С. Полькин. – Москва : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с. – Текст : непосредственный.
46. Калинин, Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук / Е. П. Калинин ; ОАО «ЗТЛ». – Рыбинск, 2006. – 414 с. – Текст : непосредственный.
47. Калинин, Е. П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента : монография / Е. П. Калинин. – Санкт-Петербург : Политехнический университет, 2009. – 358 с. – Текст : непосредственный.
48. Капанец, Э. Ф. Точность обработки при шлифовании / Э. Ф. Капанец, К. К. Кузьмич, В. И. Прибыльский, Г. В. Тилигузов. – Москва : Наука и техника, 1987. – 152 с. – Текст : непосредственный.
49. Колобов, А. Б. Вибродиагностика. Теория и практика: учебное пособие / А. Б. Колобов. – Москва : Инфра-Инженерия, 2019. – 252 с. – Текст : непосредственный.
50. Корнилов, И. И. Титан и его сплавы. Исследования титановых сплавов / И. И. Корнилов. – Москва : Академия наук СССР, 1963. – 369 с. – Текст : непосредственный.
51. Королев, А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во сарат. ун-та, 1975. – 192 с. – Текст : непосредственный.
52. Королев, А. В. Расчет прочности удержания абразивного зерна связкой / А. В. Королев, А. Н. Тюрин. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2008. – № 3. – С. 100-109.

53. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Корсаков, В. М. Кован, А. Г. Косилова. – Москва : Машиностроение, 1977. – 416 с. – Текст : непосредственный.
54. Красников, Г. Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета *COMSOL Multiphysics* : учебное пособие / Г. Е. Красников, О. В. Нагорнов, Н. В. Старостин. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (НИЯУ МИФИ), 2022. – 184 с. – Текст : непосредственный.
55. Кривоухов, В. А. Обработка резанием титановых сплавов / В. А. Кривоухов, А. Д. Чубаров. – Москва : Машиностроение, 1970. – 180 с. – Текст : непосредственный.
56. Крымов, В. В. Алмазное шлифование деталей из титановых сплавов и жаропрочных сталей / В. В. Крымов, В. А. Горелов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 61 с. – Текст : непосредственный.
57. Кудин, В. В. Моделирование колебательных процессов в машинах : учебно-методическое пособие / В.В. Кудин, А.М. Авсиевич, Э.И. Астахов, М.В. Кудин, А.А. Сухоцкий. – Минск : БНТУ, 2013. – 33 с. – Текст : непосредственный.
58. Кузнецов, С. П. Шаржирование обработанной поверхности при шлифовании кругами из кубического нитрида бора : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / С. П. Кузнецов ; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – Волгоград, 2022. – 136 с. – Текст : непосредственный.
59. Кулаков, Ю. М. Предотвращение дефектов при шлифовании / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков, И. В. Дунин-Барковский. – Москва : Машиностроение, 1975. – 144 с. – Текст : непосредственный.
60. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие. / С. С. Кутателадзе. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с. – Текст : непосредственный.
61. Ласточкин, Д. А., Скуратов, Д. Л. Прочность шлифовальных кругов и их конструкции / Д. А. Ласточкин, Д. Л. Скуратов. – Текст : непосредственный // Вестник СГАУ. – 2006. – № 2-1. – С. 32-37.
62. Лищенко, Н. В. Определение температуры шлифования при периодическом тепловом потоке / Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин. – Текст : непосредственный // Вестник УГАТУ. – 2013. – № 8 (61). – С. 117-122.
63. Лощинин, Ю. В. Теплоемкость промышленных титановых сплавов при температурах 50-1100 °С / Ю. В. Лощинин, В. А. Вертоградский, А. И. Ковалев, И. В.

- Фролкина. – Текст : непосредственный // Научно-технический сборник «Авиационные материалы». – 1979. – С. 35-45.
64. Лукинских, С. В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : учебное пособие / С. В. Лукинских. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2020. – 168 с. – Текст : непосредственный.
65. Магницкий, О. Н. Литейные свойства титановых сплавов / О. Н. Магницкий. – Ленинград : Машиностроение, 1968. – 120 с. – Текст : непосредственный.
66. Макар, Ю. В. Расчет числа работающих зерен на площадке контакта алмазного шлифовального круга с поверхностью заготовок / Ю. В. Макар. – Текст : непосредственный // Глобальная энергия. – 2012. – № 2-2 (147). – С. 81-85.
67. Макаров, В. Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов / В. Ф. Макаров. – СПб. : Лань, 2013. – 320 с. – Текст : непосредственный.
68. Макаров, В. Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки труднообрабатываемых материалов : учебное пособие / В. Ф. Макаров. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 359 с. – Текст : непосредственный.
69. Маковкин, Г. А. Напряженно-деформированное состояние и теории прочности деформируемого твердого тела : учебное пособие / Г.А. Маковкин, В. Б. Штенберг, Д.А. Кожанов. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2024. – 78 с. – Текст : непосредственный.
70. Маслов, Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – Москва : Машиностроение, 1974. – 319 с. – Текст : непосредственный.
71. Морозов, А. В. Повышение эффективности плоского шлифования на основе разработки инструментов и процессов высокочастотного дискретного резания : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук / А. В. Морозов ; ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». – Москва, 2020. – 334 с. – Текст : непосредственный.
72. Муслина, Г. Р. Применение алмазных эластичных кругов для шлифования заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Г. Р. Муслина ; Куйбышевский политехнический институт им. В. В. Куйбышева. – Ульяновск, 1989. – 341 с. – Текст : непосредственный.

73. Наерман, М. С. Справочник молодого шлифовщика : справочник / М. С. Наерман, Я. М. Наерман, А. Э. Исаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1991. – 207 с. – Текст : непосредственный.
74. Нгуен, В. Обеспечение требуемого качества поверхностей при плоском шлифовании закаленных стальных деталей различной жесткости : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / В. Нгуен ; ФГБОУ ВПО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». – Иркутск, 2017. – 224 с. – Текст : непосредственный.
75. Негматов, С. С. Демпфирующие свойства полимерных материалов и покрытий на их основе : обзор / С. С. Негматов, И.И. Пак. – Ташкент, УзННИНТИ, 1974. – 29 с. – Текст : непосредственный.
76. Никитин, С. П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем / С. П. Никитин. – Текст : непосредственный // Вестник УГАТУ. – 2009. – № 4. – С. 61-65.
77. Новиков Ф. В. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. Том 2. Теплофизика резания материалов : монография / Ф. В. Новиков, А. В. 76, Г. В. Новиков, А. А. Якимов, В. А. Остафьев, Ю. Н. Кривошапка, А. В. Усов, В. Г. Лебедев, Л. В. Худобин, А. Ш. Хусаинов, В. П. Ларшин, Ю. А. Сизый, П. Т. Слободяник. – Одесса : Одесский Национальный политехнический университет, 2003. – 625 с. – Текст : непосредственный.
78. Новиков, Ф. В. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. Том 01. Механика резания материалов : монография / Ф. В. Новиков, А. В. Якимов. – Одесса: Одесский Национальный политехнический университет, 2002. – 580 с. – Текст : непосредственный.
79. Новоселов, Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во Сев.НТУ, 2012. – 304 с. – Текст : непосредственный.
80. Носенко, В. А. Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием марковских случайных процессов / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко. – Текст : непосредственный // МНИЖ. – 2015. – № 2-1 (33). – С. 101-106.
81. Носов, Н. В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени

- доктора техн. наук / Н. В. Носов ; ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». – Самара, 1997. – 570 с. – Текст : непосредственный.
82. Овчинников, С. В. Конвективный теплообмен. Методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи : учебно-методическое пособие / С. В. Овчинников. – Саратов : СГУ имени Н.Г. Чернышевского, 2015. – 48 с. – Текст : непосредственный.
83. Орешко, Е. И. Обзор критериев прочности материалов / Е. И. Орешко, В. С. Ерасов, Д. В. Гриневич, П. В. Шершак. – Текст : непосредственный // Труды ВИАМ. – 2019. – № 9 (81). – С. 108-126.
84. Орешко, Е. И. Обзор критериев прочности материалов / Е. И. Орешко, В. С. Ерасов, Д. В. Гриневич, П. В. Шершак. – Текст : непосредственный // Труды ВИАМ. – 2019. – № 9 (81). – С. 108-126.
85. Островский, В. И. Теоретические основы процесса шлифования. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с. – Текст : непосредственный.
86. Пелецкий, В. Э. Теплофизические свойства титана и его сплавов : справочник / В. Э. Пелецкий, В. Я. Чеховской, Э. А. Бельская. – Москва : Металлургия, 1985. – 103 с. – Текст : непосредственный.
87. Писаренко, Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов : справочник / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наукова думка, 1971. – 375 с. – Текст : непосредственный.
88. Победря, Б. Е. Механика композиционных материалов / Б. Е. Победря. – Москва : Издательство МГУ, 1984. – 336 с. – Текст : непосредственный. Поварехо, А. С. САПР машин. Инженерный анализ в среде MATLAB-Simulink : учебное пособие / А. С. Поварехо, В. Н. Плищ. – Минск : БНТУ, 2022. – 73 с. – Текст : непосредственный.
89. Полтавец, В. В. Теоретическое обоснование режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе их оптимизации с учётом нестационарности процесса : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук / В. В. Полтавец ; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». – Донецк, 2020. – 467 с. – Текст : непосредственный.
90. Попов, С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 264 с. – Текст : непосредственный.
91. Пульцин, Н. М. Взаимодействие титана с газами / Н. М. Пульцин. – Москва : Металлургия, 1969. – 216 с. – Текст : непосредственный.

92. Пульцин, Н. М. Титановые сплавы и их применение в машиностроении / Н. М. Пульцин. – Москва-Ленинград : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 168 с. – Текст : непосредственный.
93. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах : учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с. – Текст : непосредственный.
94. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – Москва : Машиностроение, 1969. – 288 с. – Текст : непосредственный.
95. Репко, А. В. Технологическое обеспечение эффективности алмазного шлифования плоских поверхностей деталей из титановых сплавов перфорированными кругами : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / А. В. Репко ; ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет». – Ижевск, 1999. – 162 с. – Текст : непосредственный.
96. Реченко, Д. С. Обработка титановых и жаропрочных сплавов высокоскоростным шлифованием / Д. С. Реченко. – Текст : непосредственный // ОНВ. – 2008. – № 4 (73). – С. 59-61.
97. Рыбаков, В. А. Абразивные материалы и инструменты. Каталог / В. А. Рыбаков, В. И. Муцялко. – Москва: Изд-во НИИмаш, 1981. – 360 с. – Текст : непосредственный.
98. Рыкалин, Н. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – Москва : Машиностроение, 1985. – 496 с. – Текст : непосредственный.
99. Саютин, Г. И. Исследование физико-химических процессов, происходящих в поверхности шлифования деталей из титановых сплавов / Г. И. Саютин, В. М. Сновидцев, Н. И. Богомоллов. – Текст : непосредственный // Ф.Х.М.М. – 1971. – № 5. – С. 22-24.
100. Саютин, Г. И. Шлифование деталей из сплавов на основе титана / Г. И. Саютин, В. А. Носенко. – Москва : Машиностроение, 1987. – 80 с. – Текст : непосредственный.
101. Сибикин, М. Ю. Современное металлообрабатывающее оборудование : справочник / М. Ю. Сибикин. – Москва : Машиностроение, 2013. – 308 с. – Текст : непосредственный.
102. Сизый, Ю. А. Теплофизика резания единичным абразивным зерном / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, А. Ю. Пирогов. – Текст : непосредственный // ВЕЖПТ. – 2008. – № 3 (31). – С. 79-89.

103. Силин, С. С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, Н. С. Рыкунов. – Москва : Машиностроение, 1984. – 62 с. – Текст : непосредственный.
104. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – Москва : Машиностроение, 1978. – 167 с. – Текст : непосредственный.
105. Смирнов, В. А. Повышение эффективности плоского шлифования периферией круга за счет использования прерывистых кругов с упругодемпфирующими элементами : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / В. А. Смирнов ; ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет». – Ижевск, 2008. – 140 с. – Текст : непосредственный.
106. Смирнов, В. А. Решение тепловой задачи при шлифовании с учетом импульсного характера теплового потока / В. А. Смирнов. – Текст : непосредственный // Известия ТПУ. – 2011. – № 2. – С. 46-49.
107. Солонина, О. П. Жаропрочные титановые сплавы / О.П. Солонина, С. Г. Глазунов. – Москва : Металлургия, 1976. – 448 с. – Текст : непосредственный.
108. Спириин, В. А. Моделирование контактных явлений при абразивном глобоидном зубохонинговании : учеб. пособие / В. А. Спириин, В. Ф. Макаров. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 147 с. – Текст : непосредственный.
109. Старков, В. К. Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых кругов при профильном зубошлифовании / В. К. Старков, С. А. Рябцев, В. А. Поклад, В. С. Новиков, М. Кайзер, С. В. Костров. – Текст : непосредственный // Технология машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 17-22.
110. Старшев, Д. В. Динамика процесса прерывистого шлифования / Д. В. Старшев, А. Г. Кирьянов, А. В. Репко. – Текст : непосредственный // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы «Шлифабразив-2004» : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. – 2004. – С. 229 - 232.
111. Старшев, Д. В. Распределение тепловых потоков в зоне резания / Д. В. Старшев, А. Г. Кирьянов, А. В. Репко. – Текст : непосредственный // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы «Шлифабразив-2004» : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. – 2004. – С. 235-238.
112. Старшев, Д. В. Совершенствование процесса шлифования титановых сплавов прерывистыми кругами на базе математического моделирования механики и теплофизики процесса : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование

- механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Д. В. Старшев ; ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет». – Ижевск, 2006. – 153 с. – Текст : непосредственный.
113. Старшев, Д. В., Репко А. В. Параметры срезаемого слоя при плоском шлифовании прерывистым шлифовальным кругом / Д. В. Старшев, А. В. Репко. – Текст : непосредственный // Вестник ИжГТУ. – 2003. – № 4. – С. 41-44.
114. Степанов, Ю. С. Дискретное внутреннее шлифование / Ю. С. Степанов, В. Г. Гусев, Б. И. Афанасьев. – Москва : Машиностроение, 2004. – 190 с. – Текст : непосредственный.
115. Стерин, И. С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки : учебное пособие / И. С. Стерин. – Санкт-Петербург : Политехника, 2003. – 344 с. – Текст : непосредственный.
116. Стратиевский, И. Х. Абразивная обработка : справочник / И. Х. Стратиевский, В. Г. Юрьев, Ю. М. Зубарев. – Москва : Машиностроение, 2010. – 352 с. – Текст : непосредственный.
117. Стружанов, В. В. Свойства разупрочняющихся материалов и определяющие соотношения при одноосном напряженном состоянии / В. В. Стружанов. – Текст : непосредственный // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2007. – № 2 (15). – С. 69-78.
118. Стружанов, В. В. Теория упругости: основные положения : учеб. пособие / В. В. Стружанов, Н. В. Бурмашева. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 204 с. – Текст : непосредственный.
119. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения : монография / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – Москва : Машиностроение, 2002. – 684 с. – Текст : непосредственный.
120. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – Москва : Наука, 1979. – 560 с. – Текст : непосредственный.
121. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов : учебник для вузов. – Москва: Наука, 1986. – 512 с. – Текст : непосредственный.
122. Филимонов, Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 248 с. – Текст : непосредственный.
123. Худобин, Л. В. Исследование эффективности динамической, магнитной и ультразвуковой активации СОЖ при алмазном шлифовании титановых сплавов / Л. В. Худобин, Ю. В. Полянсков, А. Л. Глузман. – Текст : непосредственный // Исследование

- обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов : Межвузовский сборник; вып. 4; Куйбышевский авиационный институт. – Куйбышев, 1976. – С. 38-41 .
124. Худобин, Л. В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин; под. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 298 с. – Текст : непосредственный.
125. Худобин, Л. В. Пути совершенствования технологии шлифования / Л. В. Худобин. – Саратов: Приволжское книжное издательство, 1969. – 213 с. – Текст : непосредственный.
126. Худобин, Л. В. Шлифование композиционными кругами / Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 256 с. – Текст : непосредственный.
127. Чеповецкий, И. Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке / И. Х. Чеповецкий. – Киев: Наукова думка, 1978. – 228 с. – Текст : непосредственный.
128. Чечулин, Б. Б. Титановые сплавы в машиностроении : монография / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 248 с. – Текст : непосредственный.
129. Шишковский, И. В. Расчет тепловых полей обработке материалов КПЭ в среде MATHCAD. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2003. – 40 с. – Текст : непосредственный.
130. Эльянов, В. Д. Прижоги при шлифовании : обзор / В. Д. Эльянов, В. Н. Куликов. – Москва : НИИМАШ, 1974. – 64 с. – Текст : непосредственный.
131. Юсупов, Г. Х. Новый алмазный инструмент для шлифования труднообрабатываемых материалов / Г. Х. Юсупов, И. Г. Жарков, Е. М. Чучков. – Ленинград : ЛДНТП, 1989. – 24 с. – Текст : непосредственный.
132. Юсупов, Г. Х. Оптимизация режимов при шлифовании труднообрабатываемых материалов специальными кругами / Г. Х. Юсупов, В. А. Сипайлов, Е. М. Чучков. – Текст : непосредственный // Сборник трудов Андроповского политехнического института. – 1989. – С. 95-98.
133. Якимов А. В. Теплофизика механической обработки : учебное пособие / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. – Одесса : Лыбидь, 1991. – 240 с. – Текст : непосредственный.
134. Якимов, А. А. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес : монография / А. А. Якимов. – Одесса : Астропринт, 2003. – 453 с. – Текст : непосредственный.
135. Якимов, А. В. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов. – Киев : Техніка, 1993. – 152 с. – Текст : непосредственный.

136. Якимов, А. В. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки : учебное пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Одесса : Одесский государственный политехнический университет, 1999. – 212 с. – Текст : непосредственный.
137. Якимов, А. В. Оптимизация процессов шлифования / А. В. Якимов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 176 с. – Текст : непосредственный.
138. Якимов, А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев; Одесса : Вища школа, 1986. – 176 с. – Текст : непосредственный.
139. Якимов, А. В. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании : учебное пособие / А. В. Якимов, В. О. Ткаченко, С. Г. Зимин, А. А. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков. – Одесса : Одесский государственный политехнический университет, 1998. – 272 с. – Текст : непосредственный.
140. Clideo : онлайн видео-редактор : сайт. - .URL: <https://clideo.com> (дата обращения: 09.01.2024). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
141. Fang, C. *Analysis of temperature distributions in surface grinding with intermittent wheels* / C. Fang, X. Xu. – Текст : непосредственный // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2014. – № 71. – P. 23-31.
142. Guijian, X. *Grinding mechanism of titanium alloy: Research status and prospect* / X. Guijian, Z. Youdong, H. Yun, S. Shayu, C. Benqiang. – Текст : непосредственный // *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology.* – 2021. – № 1. – P. 1-10.
143. Guiyun, J. *Titanium alloys surface integrity of belt grinding considering different machining trajectory direction* / J. Guiyun, Y. Hang, X. Guijian, Z. Zeyong, W. Yuan. – Текст : непосредственный // *Machining Technology and Environmental Degradation Mechanism of Surface Microstructure of Special Materials.* – 2022. – Vol. II. – P. 505-523.
144. Hedderich, J. *Applied Statistics : Methods Using R* / J. Hedderich, L. Sachs. - Springer, 2024. – 1055 p. – Текст : непосредственный.
145. Herzenstiel, P. *Experimental Investigation of Wet and Dry Grinding Using a Grinding Wheel with a Defined Grain Pattern* / P. Herzenstiel, J. Aurich // *Transactions of NAMRI/SME.* – 2009. – Vol. 37. – P. 81-88.
146. Jianwu, Y. *Experimental Investigation on High-speed Grinding of 40Cr Steel with Vitrified CBN Grinding Wheel* / Y. Jianwu, C. Tao, S. Zhentao, S. Xiaomin, X. Guizhi. – Текст : непосредственный // *Advanced Materials Research.* – 2010. – Vol. 128. – P. 154-158.

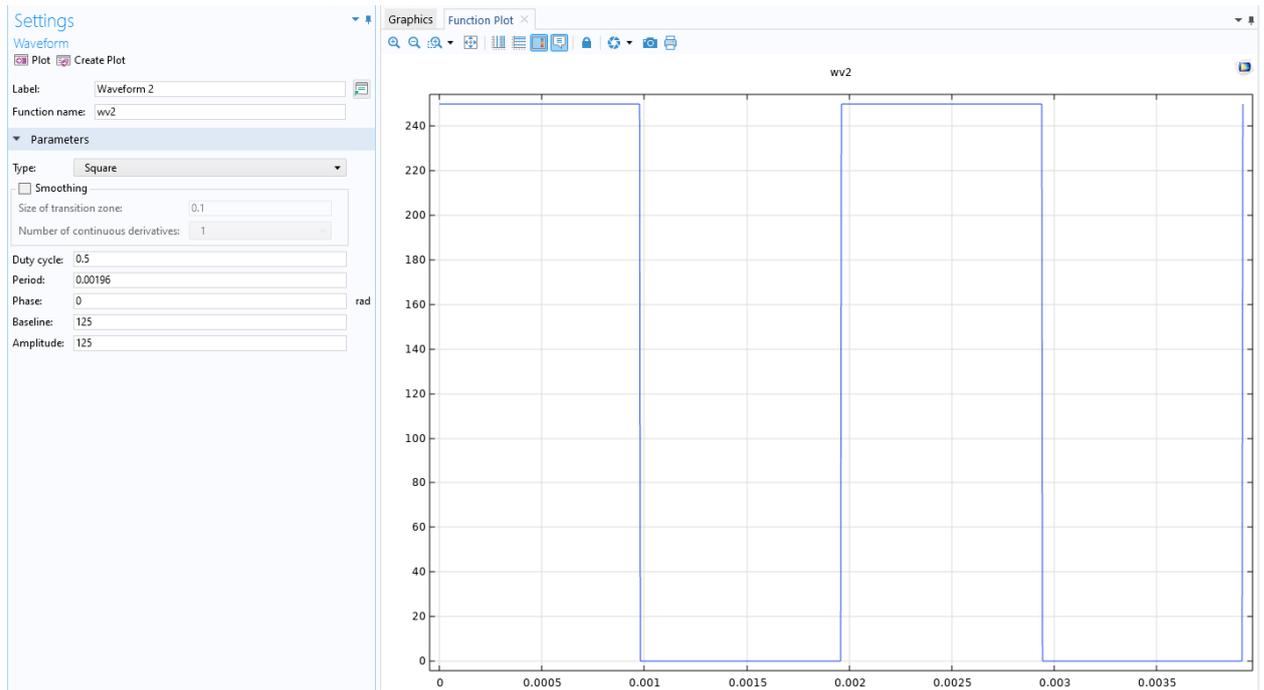
147. Kadivar, M. *The role of specific energy in micro-grinding of titanium alloy* / M. Kadivar, B. Azarhoushang, U. Klement, P. Krajnik. – Текст : непосредственный // *Precision Engineering*. – 2021. – Vol. 72. – P. 172-183.
148. Naskar, A. *Wear mechanism in high-speed superabrasive grinding of titanium alloy and its effect on surface integrity* / A. Naskar, A. Choudhary, S. Paul. – Текст : непосредственный // *Wear*. – 2020. – Vol. 462. – P. 463-475.
149. Nguyen, T.-P. *A research on the effect of cutting parameters on cutting force in flat grinding using segmented grinding wheel* / T.-P. Nguyen, T.-D. Nguyen. – Текст : непосредственный // *Vietnam Journal of Science and Technology*. – 2017. – № 55 (6). – P. 793-802.
150. Ning H. *Fundamental functions of physical and chemical principles in the polishing of titanium alloys: mechanisms and problems* / H. Ning, M. Wang, B. Wang, Y. Zheng, S. Zhou, C. Song. – Текст : непосредственный // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 118. – P. 2079-2097.
151. Novikov, F. *Determining the conditions for decreasing cutting force and temperature during machining* / F. Novikov, V. Polyansky, V. Shkurupiy, D. Novikov, A. Hutorov, Y. Ponomarenko, O. O. Yermolenko, O. A. Yermolenko. – Текст : непосредственный // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – № 6/1 (102). – P. 41-50.
152. Pandit, S. M. *Model for surface grinding based on abrasive geometry and elasticity* / S. M. Pandit, G. A. Sathyanarayanan. – Текст : непосредственный // *Trans. ASME J. Rng. Ind.* – 1982. – 104. – № 4. – P. 349 – 357.
153. Perez, J. *Heat transfer analysis of intermittent grinding processes* / J. Perez, S. Hoyas, D. L. Skuratov, Y. L. Ratis, I. A. Selezneva, P. Fernandez de Cordoba, J. F. Urchueguia. – Текст : непосредственный // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51. – P. 4132-4138.
154. Pramanik, A. *Problems and solutions in machining of titanium alloys* / A. Pramanik. – Текст : непосредственный // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 70. – P. 919-928.
155. Rechenko, D. *Development and Power Calculation of a Grinding Wheel Design for Ultra-High-Speed Grinding* / D. Rechenko, R. Kamenov. – Текст : непосредственный // *EPJ Web of Conferences*. – 2021. – № 248. – P. 1-7.
156. Rout, M. *Forming and Machining of Polymers, Ceramics, and Composites* / M. Rout, K. Debnath. – Boca Raton : CRC Press, 2024. – 269 p. – Текст : непосредственный.
157. Shaw, M. C. *Principles of Abrasive Processes* / M. C. Shaw. – Oxford : Oxford University Press, UK, 1996. – 574 p. – Текст : непосредственный.

158. Tawakoli, T. *Intermittent grinding of advanced ceramic with the T-Tool grinding wheel* / T. Tawakoli, B. Azarhoushang. – Текст : непосредственный // *Advanced Materials Research*. – 2010. – Vol. 126. – P. 615-620.
159. Tawakoli, T. *Theoretical and experimental investigation of intermittent grinding of SiC with a segmented grinding wheel* / T. Tawakoli, B. Azarhoushang. – Текст : непосредственный // *Int. J. Abrasive Technology*. – 2011. – Vol. 4. – № 1 – P. 90-99.
160. Trung, D. D. *Application of TOPSIS Method in Multi-Objective Optimization of the Grinding Process Using Segmented Grinding Wheel* / D. D. Trung, N. V. Thiena, N. T. Nguyen. – Текст : непосредственный // *Tribology in Industry*. – Vol. 43. – № 1 (2021). – P. 12-22.
161. Volkov, D. I. *Adaptive Belt Grinding of Gas-turbine Blades* / D. I. Volkov, A. A. Koryazhkin. – Текст : непосредственный // *Russian Engineering Research*. – 2014. – Т. 34. – № 1. – P. 37-40.
162. Xi, X. *Surface burn behavior in creep-feed deep grinding of gamma titanium aluminide intermetallics: characterization, mechanism, and effects* / Y. Zhu, T. Chen, Z. Wu, L. Anggei, W. Ding. – Текст : непосредственный // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 113. – P. 985-996.
163. Xu, X. *Comparison of Methods to Measure Grinding Temperatures* / X. Xu, S. Malkin. – Текст : непосредственный // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2001. – № 123. – P. 191-195.
164. Zhang, J. *Optimization Design of Segmented Grinding Wheel structure on Super High-Speed* / J. Zhang, G. Wang, T. Yu, W. Wang. – Текст : непосредственный // *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. – 2010. – № 10. – P. 1362-1366.
165. Zhang, J. Q. *Optimization of Segmented Grinding Wheel Matrix Based on Super High-speed Grinding* / J. Q. Zhang, Z. R. Pang, P. Guan, W. S. Wang, H. Z. Pi. – Текст : непосредственный // *Advanced Materials Research*. – 2010. – Vol. 135. – P. 355-360.

ПРИЛОЖЕНИЯ

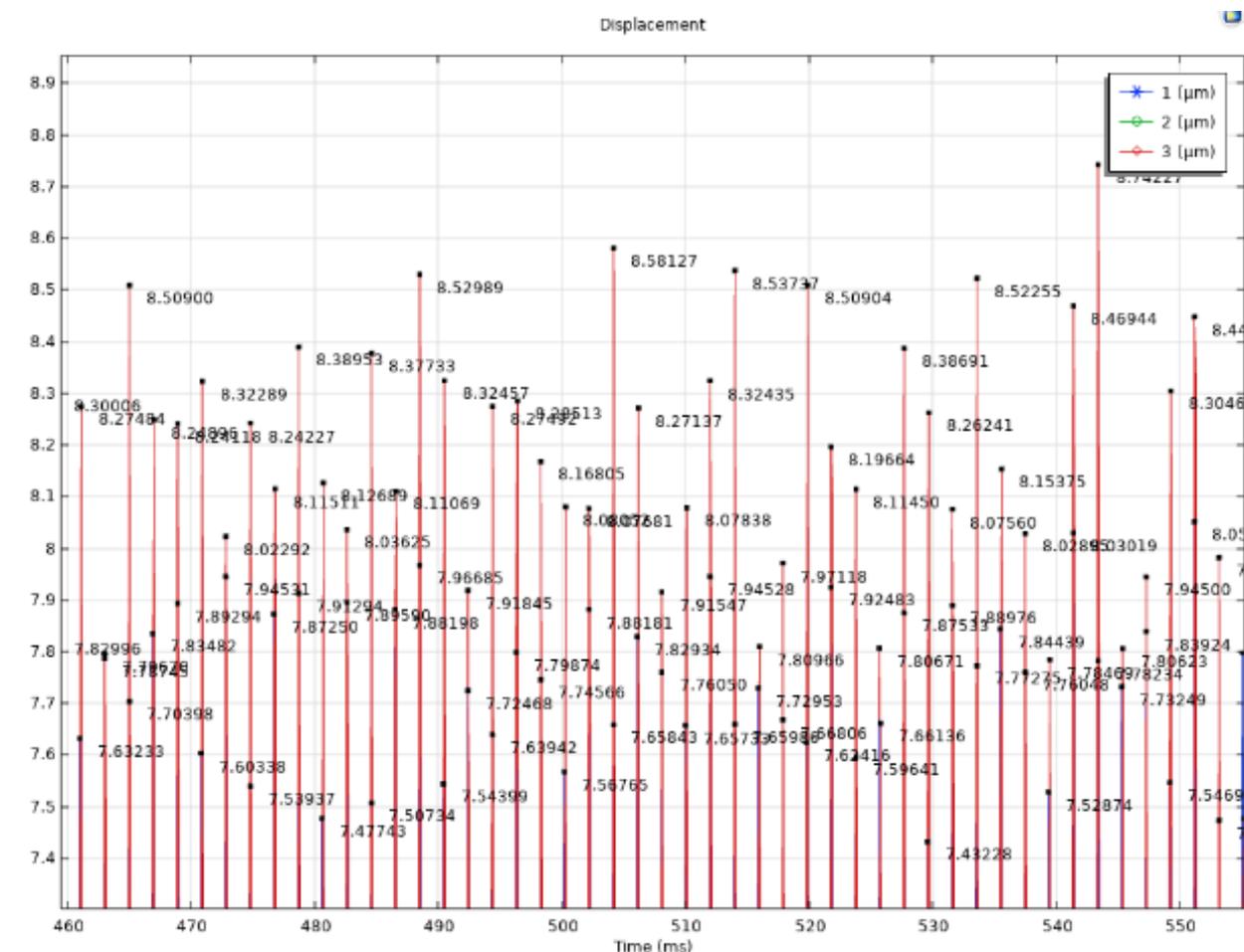
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Окно задания параметров прямоугольного сигнала



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Локальный вид графика абсолютных амплитуд виброперемещений модели шлифовального круга, мкм, при $P_B = 700$ Н: 1 – для модели круга на вулканитовой связке; 2, 3 – для моделей кругов на керамической и бакелитовой связках

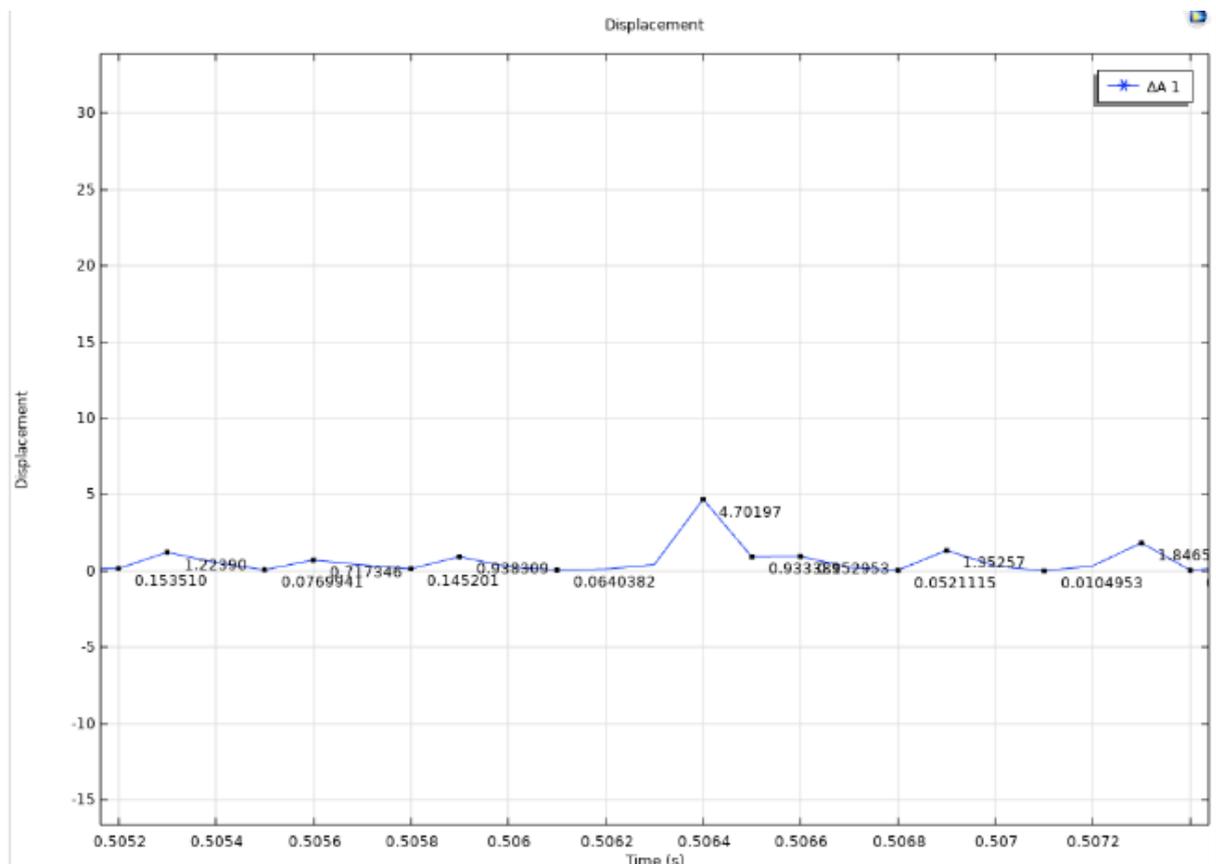


ПРИЛОЖЕНИЕ В

Локальный вид графика относительных амплитуд виброперемещений сосредоточенной массы модели шлифовального круга, %, при $P_B = 700$ Н и $v_B = 0,00196$ с:

с: $1 - \Delta A_B = \frac{A_6(A_K) - A_B}{A_B} \cdot 100\%$, где A_6 , A_K , A_B – амплитуды виброперемещений,

соответствующие кругам на бакелитовой, керамической и вулканитовой связках



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 - Исходные данные и результаты расчета значений коэффициента температуропроводности некоторых промышленных марок титановых сплавов [17, 18, 85, 49, 62, 44, 2, 106]

| Марка титанового сплава | Теплоемкость $C_{м.з.}$, Дж/(кг·К) | | Коэффициент теплопроводности $\lambda_{м.з.}$, Вт/(м·К) | | Плотность $\rho_{м.з.}$, кг/м ³ | | Коэффициент температуропроводности $a_{м.з.}$, м ² /с | |
|-------------------------|-------------------------------------|------------|--|------------|---|------------|---|------------|
| | при 20 °С | при 500 °С | при 20 °С | при 500 °С | при 20 °С | при 500 °С | при 20 °С | при 500 °С |
| ОТ4-1 | 333 | 754 | 9,6 | 14,6 | 4550,0 | н/д | 0,0000063 | - |
| ВТ1 | 71 | 650 | 16,0 | н/д | 4508,0 | 4321,8 | 0,0000500 | - |
| ВТ3-1 | 100 | 670 | 8,0 | 14,2 | 4500,0 | н/д | 0,0000178 | - |
| ВТ4 | 100 | 703 | 8,5 | 14,5 | 4600,0 | н/д | 0,0000185 | - |
| ВТ5 | 118 | 712 | 8,8 | 14,0 | 4404,2 | 4324,3 | 0,0000169 | 0,0000045 |
| ВТ6 | 82 | 795 | 8,4 | 12,0 | 5292,4 | 4098,2 | 0,0000194 | 0,0000037 |
| ВТ14 | 78 | 670 | 8,4 | 13,8 | 4520,0 | н/д | 0,0000238 | - |
| ВТ18 | 95 | 712 | 7,1 | 13,8 | 4540,0 | н/д | 0,0000165 | - |
| ВТ22 | 102 | 712 | 8,3 | 14,6 | 4519,8 | 4442,8 | 0,0000180 | 0,0000046 |
| ВТ25 | 123 | 753 | 6,3 | 13,4 | 4500,0 | н/д | 0,0000114 | - |

Таблица Г.2 - Результаты расчета времени воздействия теплового импульса

| Время воздействия теплового импульса τ , с, в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| 0,00100 | 0,00067 | 0,00050 | 0,00040 | 0,00033 | 0,00029 | 0,00025 |

Таблица Г.3 - Результаты расчета глубины распространения теплового фронта

| Марка титанового сплава | h_T , м, при 20 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с | | | | | | |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| ОТ4-1 | 0,00016 | 0,00013 | 0,00011 | 0,00010 | 0,00009 | 0,00009 | 0,00008 |
| ВТ1 | 0,00045 | 0,00037 | 0,00032 | 0,00028 | 0,00026 | 0,00024 | 0,00022 |
| ВТ3-1 | 0,00027 | 0,00022 | 0,00019 | 0,00017 | 0,00015 | 0,00014 | 0,00013 |
| ВТ4 | 0,00027 | 0,00022 | 0,00019 | 0,00017 | 0,00016 | 0,00015 | 0,00014 |
| ВТ5 | 0,00026 | 0,00021 | 0,00018 | 0,00016 | 0,00015 | 0,00014 | 0,00013 |
| ВТ6 | 0,00028 | 0,00023 | 0,00020 | 0,00018 | 0,00016 | 0,00015 | 0,00014 |
| ВТ14 | 0,00031 | 0,00025 | 0,00022 | 0,00020 | 0,00018 | 0,00017 | 0,00015 |
| ВТ18 | 0,00026 | 0,00021 | 0,00018 | 0,00016 | 0,00015 | 0,00014 | 0,00013 |
| ВТ22 | 0,00027 | 0,00022 | 0,00019 | 0,00017 | 0,00015 | 0,00014 | 0,00013 |
| ВТ25 | 0,00021 | 0,00017 | 0,00015 | 0,00014 | 0,00012 | 0,00011 | 0,00011 |
| h_T , м, при 500 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с | | | | | | | |
| ВТ5 | 0,00013 | 0,00011 | 0,00009 | 0,00008 | 0,00008 | 0,00007 | 0,00007 |
| ВТ6 | 0,00012 | 0,00010 | 0,00009 | 0,00008 | 0,00007 | 0,00007 | 0,00006 |
| ВТ22 | 0,00014 | 0,00011 | 0,00010 | 0,00009 | 0,00008 | 0,00007 | 0,00007 |

Таблица Г.4 - Результаты расчета скорости распространения теплового фронта

| Марка титанового сплава | v_T , м/с, при 20 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с | | | | | | |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| | ОТ4-1 | 0,07937 | 0,09697 | 0,11225 | 0,12550 | 0,13817 | 0,14739 |
| ВТ1 | 0,22361 | 0,27318 | 0,31623 | 0,35355 | 0,38925 | 0,41523 | 0,44721 |
| ВТ3-1 | 0,13342 | 0,16299 | 0,18868 | 0,21095 | 0,23225 | 0,24775 | 0,26683 |
| ВТ4 | 0,13601 | 0,16617 | 0,19235 | 0,21506 | 0,23677 | 0,25257 | 0,27203 |
| ВТ5 | 0,13000 | 0,15882 | 0,18385 | 0,20555 | 0,22630 | 0,24140 | 0,26000 |
| ВТ6 | 0,13928 | 0,17016 | 0,19698 | 0,22023 | 0,24246 | 0,25864 | 0,27857 |
| ВТ14 | 0,15427 | 0,18847 | 0,21817 | 0,24393 | 0,26855 | 0,28648 | 0,30854 |
| ВТ18 | 0,12845 | 0,15693 | 0,18166 | 0,20310 | 0,22361 | 0,23853 | 0,25690 |
| ВТ22 | 0,13416 | 0,16391 | 0,18974 | 0,21213 | 0,23355 | 0,24914 | 0,26833 |
| ВТ25 | 0,10677 | 0,13044 | 0,15100 | 0,16882 | 0,18586 | 0,19827 | 0,21354 |
| v_T , м/с, при 500 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с | | | | | | | |
| ВТ5 | 0,06708 | 0,08195 | 0,09487 | 0,10607 | 0,11677 | 0,12457 | 0,13416 |
| ВТ6 | 0,06083 | 0,07431 | 0,08602 | 0,09618 | 0,10589 | 0,11295 | 0,12166 |
| ВТ22 | 0,06782 | 0,08286 | 0,09592 | 0,10724 | 0,11807 | 0,12594 | 0,13565 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Задание глобальных переменных математической модели в программной среде *COMSOL Multiphysics*

| Settings | | | |
|---------------------|--|------------------------------|--|
| Parameters | | | |
| Label: Parameters 1 | | | |
| Parameters | | | |
| Name | Expression | Value | Description |
| am.z. | 0.0000037 | 3.7E-6 | Коэффициент температуропроводности материала заготовки |
| aohl | $(Nu \cdot hv) / l2$ | 79.088 W/(m ² ·K) | Коэффициент теплоотдачи охлаждающей среды |
| aotn | $(2.77 \cdot (31-C)^{0.33}) / Nzern$ | 0.81175 | Относительное количество зерен, участвующих в резании |
| Ares | $Pz \cdot l1 \cdot (1 / (N \cdot m)) [J]$ | 1.4115 | Работа сил резания |
| asegmmax | $2 \cdot sz \cdot (((trez / (2 \cdot Rkrug)) - ((trez^2) / ((Rkrug^2)^2)))^{0.5})$ | | Максимальная глубина слоя срезаемого сектором |
| az | $Rf \cdot (Rf^2 - 2 \cdot (v_podach \cdot lp / Vkrug) \cdot ((2 \cdot Rf \cdot trez - trez^2)^{0.5}) + (v_podach \cdot lp / Vkrug)^2)^{0.5}$ | 5.258E-6 m | Максимальная глубина слоя, срезаемого единичным зерном |
| bsect | 0.03 [m] | 0.03 m | Ширина сегмента |
| C | 5 | 5 | № структуры |
| di | $(10^{(-2)}) \cdot (31-C)^{(-0.25)} \cdot Nzern \cdot (Kz^{0.25}) [mm]$ | 5.8282E-5 m | Диаметр площадки износа |
| Fk | lk * Spop | 3.3527E-5 m ² | Площадь периферии сектора |
| fsegm | 11.5 | 11.5 | Угол рабочего сектора сегмента |
| hi | $70 \cdot di^2 / Nzern [mm]$ | 2.3778E-5 m | Радиальный износ зерна |
| hm.k. | 1.6 [W/(m·K)] | 1.6 W/(m·K) | Коэффициент теплопроводности абразивного материала |
| hv | 0.026 [W/(m·K)] | 0.026 W/(m·K) | Коэффициент теплопроводности воздуха |
| kpogl | $1 / ((1 + trez \cdot 4.6 \cdot (v_podach / (am.z \cdot (((Rkrug \cdot 1000^2 \cdot trez \cdot 1000)^{0.5}) / 2))^{0.5}))$ | 0.96156 | Коэффициент, учитывающий долю энергии, перешедшей в виде тепла в заготовку |
| Kz | 3 | 3 | Коэффициент затупления |
| l1 | $3.14 \cdot fsegm \cdot Rkrug / 180$ | 0.020061 m | Длина дуги рабочего сегмента |
| l2 | $3.14 \cdot Rkrug \cdot (((360 - nsegm \cdot fsegm) / nsegm) / 180)$ | 0.019189 m | Длина дуги впадины |
| lk | $((3.14 \cdot Rkrug) / 180) \cdot (180 / pi) \cdot \text{acos}((Rkrug - trez) / Rkrug)$ | 0.0044702 m | Длина дуги контакта сегмента и заготовки |
| lp | $1.59 \cdot (10^{(-5)}) \cdot Na^2 / (((31-C)^{(2/3)})^{hi}) \cdot l2$ | 0.019189 m | Длина дуги между зернами с учетом длины впадины |
| lsr | $((3.14 \cdot Rf) / 180) \cdot (180 / pi) \cdot \text{acos}((Rf - trez) / Rf)$ | 0.0044982 m | Средняя длина контакта сегмента |
| Na | 0.1 [mm] | 1E-4 m | Размер ячейки нижнего сита по ГОСТ 9206-80 |
| Nres.pr | $Ares \cdot kpogl / t1 [W]$ | 2706.2 | Затраченная мощность резания |
| nsegm | 16 | 16 | Количество сегментов |
| Nu | $0.032 \cdot (Rev^{0.8})$ | 58.37 | Критерий Нуссельта |
| nz.p. | $115 \cdot ((31-C)^{0.5}) \cdot (Kz^{0.5}) / (Nzern^2)$ | 10.157 | Количество режущих зерен вдоль дуги профиля сегмента |
| nz.r.p. | nz.p. * aotn | 8.2445 | Удельное количество зерен |
| Nzern | 10 | 10 | № зернистости |
| Pz | $Pzz \cdot nz.r.p. \cdot Fk \cdot 1000000$ | 70.361 | Тангенциальная составляющая силы резания |
| Pzz | $((az \cdot di \cdot 1.7 \cdot \text{sigmav} \cdot 0.642) / (0.34 \cdot 0.5 \cdot (1.73 - utri))) + 0.03 \cdot 0.06 \cdot di \cdot \text{sigmat} + 0.785 \cdot di \cdot \text{sigmat} \cdot utri + ((az \cdot di \cdot utri) / (0.34 \cdot 0.25 \cdot (1.73 - utri) \cdot (1.73 - utri))) \dots$ | 0.25455 | Тангенциальная составляющая силы резания, приведенная к единичному зерну |
| qnagr | $Nres / (Spop \cdot l1)$ | 1/m ² | Нагревающий тепловой поток |
| Rev | $(1.2 \cdot Vkrug \cdot lk / 0.000018) \cdot (1 [s/m^2])$ | 11921 | Критерий Рейнольдса |

Продолжение приложения Д

| | | | |
|----------|---|-------------|---|
| Rev | $(1,2 \cdot V_{krug} \cdot l_k / 0,000018) \cdot (1 \text{ [s/m}^2\text{]})$ | 11921 | Критерий Рейнольдса |
| Rf | $R_{krug} + (v_{podach} \cdot l_k \cdot (2 \cdot (2 \cdot R_{krug} \cdot t_{rez} - t_{rez}^2)^{0,5} + (v_{podach} \cdot l_k) / (V_{krug}))) / (2 \cdot t_{rez} \cdot V_{krug})$ | 0.10125 m | Фактический радиус дуги профиля контакта сегмента и заготовки |
| Rkrug | 0.1 [m] | 0.1 m | Радиус круга |
| sigmat | 840 | 840 | Предел текучести обрабатываемого материала |
| sigmav | 1100 | 1100 | Предел прочности обрабатываемого материала |
| Spop | 7.5 [mm] | 0.0075 m | Поперечная подача |
| t1 | l_1 / V_{krug} | 5.0153E-4 s | Время работы сегмента |
| t2 | l_2 / V_{krug} | 4.7972E-4 s | Время прохождения впадины |
| tp | $t_1 + t_2$ | 9.8125E-4 s | Длительность цикла нагрева/охлаждения |
| trez | 0.1 [mm] | 1E-4 m | Глубина резания |
| utr | 0.66 | 0.66 | Коэффициент трения |
| v_podach | 0.25 [m/s] | 0.25 m/s | Скорость продольной подачи |
| vkrug | $(V_{krug} \cdot 60 / (3,14 \cdot R_{krug} \cdot 2))$ | 3821.7 1/s | Частота вращения круга |
| Vkrug | 40 [m/s] | 40 m/s | Окружная скорость круга |
| x0 | 0 [mm] | 0 m | Положение исходной точки |
| x00 | $x_0 + v_{podach} \cdot t$ | | Текущее положение центра источника тепла в момент времени t |
| xi | $\sqrt{(x - x_{00})^2}$ | | Функция, задающая перемещение центра источника тепла во времени |

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Задание параметров электронной модели теплового источника

Численное значение
мощности теплового
источника

Волновая функция от времени

Boundary Heat Source

Heat source: Ширина пятна контакта

Heat rate

$P_b \cdot ((Nres) \cdot (wv1(s))) / (l_{sr} \cdot S_{pop} + xi)$ W

Функция перемещения во времени

Численное значение
коэффициента теплоотдачи

Волновая функция от времени

Heat Flux

Flux type: Convective heat flux

Heat transfer coefficient: User defined

Heat transfer coefficient: $h \cdot ((aoh1) \cdot (wv2(s))) / (xi)$ W/(m²·K)

External temperature: User defined

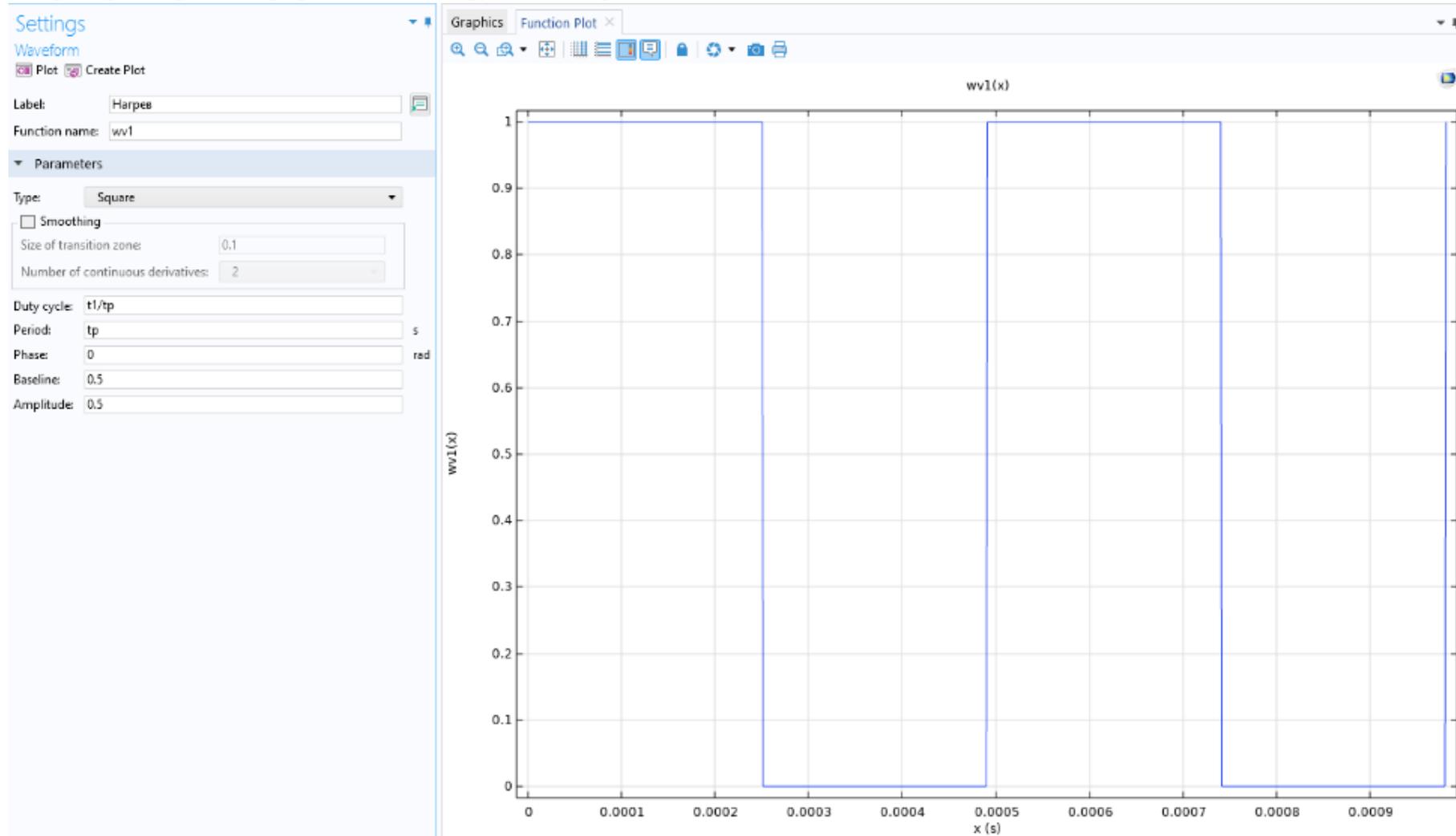
T_{ext} 20 [degC] K

Функция перемещения
во времени

Температура окружающей
среды

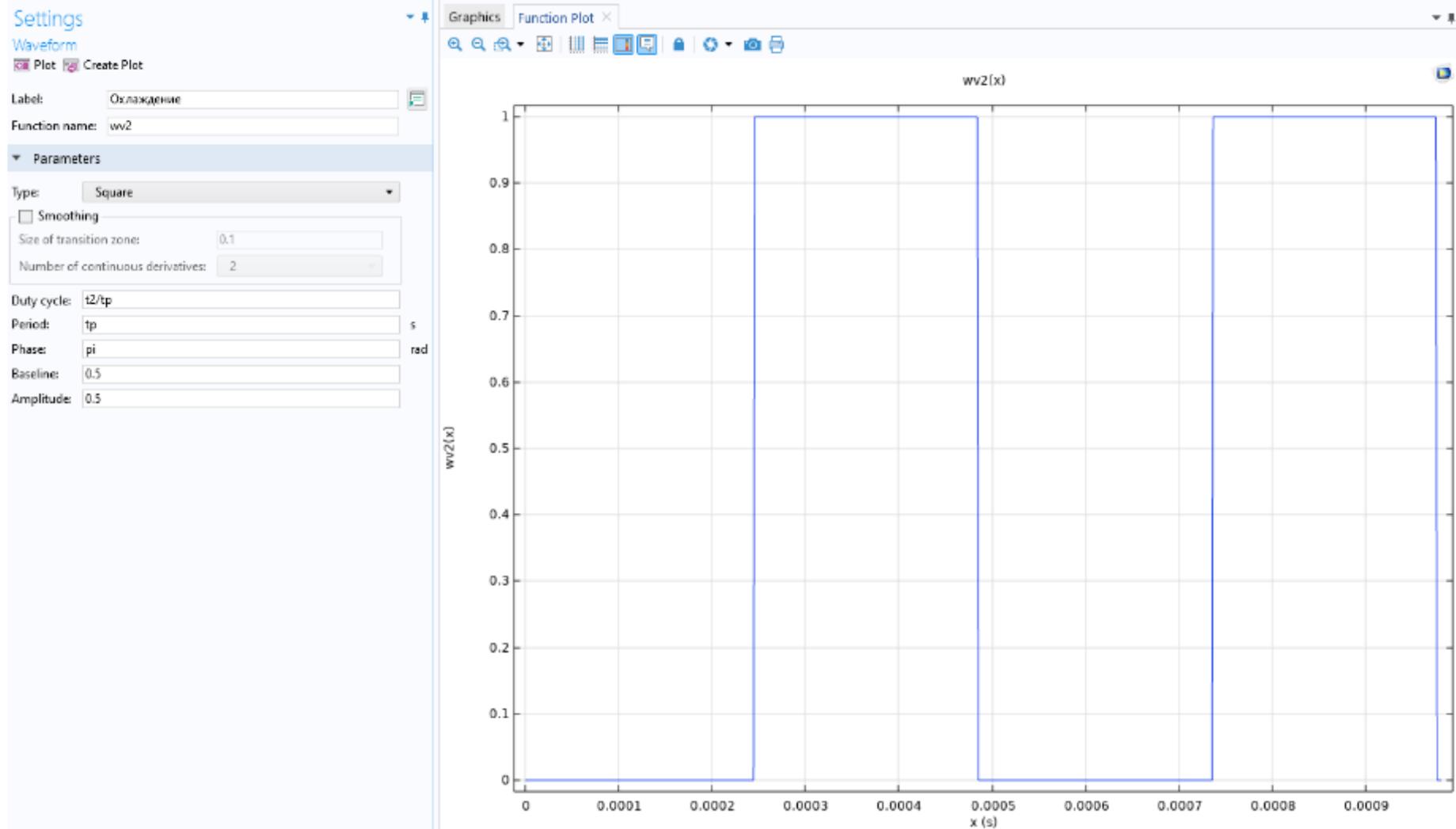
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Пример построения графика волновой функции нагрева



ПРИЛОЖЕНИЕ И

Пример построения графика волновой функции охлаждения



ПРИЛОЖЕНИЕ К

Таблица К.1 - Результаты определения пиковой температуры нагрева заготовки методом численного моделирования, °С

| $max (T_{з.рез})$ | $V_{кр}, м/с$ | | | | | | | |
|--|---------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| $S_{пр}, м/с$ | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Прерывистое шлифование при $K_3 = 3,0\%$ | | | | | | | | |
| 0,05 | 86 | 149 | 189 | 233 | 295 | 342 | 355 | 385 |
| 0,1 | 116 | 201 | 265 | 332 | 397 | 440 | 510 | 555 |
| 0,15 | 145 | 243 | 330 | 420 | 493 | 557 | 622 | 704 |
| 0,2 | 162 | 293 | 383 | 475 | 573 | 685 | 767 | 846 |
| 0,25 | 188 | 364 | 456 | 555 | 642 | 744 | 874 | 1010 |
| Сплошное шлифование при $K_3 = 3,0\%$ | | | | | | | | |
| 0,05 | 137 | 198 | 266 | 355 | 392 | 498 | 576 | 615 |
| 0,1 | 158 | 222 | 369 | 412 | 524 | 584 | 632 | 686 |
| 0,15 | 186 | 323 | 468 | 529 | 632 | 675 | 741 | 843 |
| 0,2 | 224 | 386 | 548 | 611 | 685 | 784 | 877 | 982 |
| 0,25 | 248 | 432 | 600 | 681 | 810 | 928 | 1084 | 1159 |
| Прерывистое шлифование при $K_3 = 6,0\%$ | | | | | | | | |
| 0,05 | 123 | 203 | 279 | 337 | 410 | 473 | 556 | 669 |
| 0,1 | 168 | 285 | 369 | 535 | 565 | 664 | 730 | 869 |
| 0,15 | 210 | 342 | 489 | 647 | 714 | 805 | 927 | 1051 |
| 0,2 | 236 | 403 | 609 | 714 | 849 | 987 | 1101 | 1304 |
| 0,25 | 277 | 546 | 751 | 822 | 1045 | 1165 | 1312 | 1480 |

Таблица К.2 - Результаты определения пиковой температуры нагрева заготовки аналитическим методом, °С

| $max (T_{з.рез})$ | $V_{кр}, м/с$ | | | | | | | |
|--|---------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| $S_{пр}, м/с$ | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Прерывистое шлифование при $K_3 = 3,0\%$ | | | | | | | | |
| 0,05 | 90 | 156 | 209 | 253 | 293 | 333 | 371 | 407 |
| 0,1 | 123 | 212 | 291 | 363 | 432 | 487 | 559 | 620 |
| 0,15 | 155 | 265 | 364 | 455 | 540 | 621 | 699 | 776 |
| 0,2 | 181 | 312 | 426 | 532 | 632 | 728 | 820 | 909 |
| 0,25 | 205 | 352 | 482 | 602 | 716 | 823 | 927 | 1027 |
| Сплошное шлифование при $K_3 = 3,0\%$ | | | | | | | | |
| 0,05 | 111 | 162 | 214 | 267 | 318 | 365 | 411 | 456 |
| 0,1 | 132 | 219 | 297 | 370 | 439 | 504 | 567 | 628 |
| 0,15 | 164 | 282 | 388 | 485 | 579 | 667 | 753 | 836 |
| 0,2 | 197 | 343 | 473 | 595 | 710 | 821 | 927 | 1030 |
| 0,25 | 229 | 401 | 556 | 700 | 836 | 966 | 1091 | 1213 |
| Прерывистое шлифование при $K_3 = 6,0\%$ | | | | | | | | |
| 0,05 | 130 | 224 | 303 | 374 | 457 | 524 | 591 | 655 |
| 0,1 | 177 | 305 | 408 | 523 | 621 | 716 | 804 | 892 |
| 0,15 | 223 | 382 | 524 | 654 | 777 | 894 | 1006 | 1117 |
| 0,2 | 261 | 448 | 614 | 765 | 910 | 1048 | 1180 | 1308 |
| 0,25 | 295 | 507 | 694 | 867 | 1030 | 1185 | 1334 | 1479 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Таблица Л.1 - Исходные данные к расчету температур в зоне шлифования

| № п/п | Параметры круга | | | | | Параметры заготовки [17, 18, 85, 49, 62, 44, 2, 106] | | | | | Технологические режимы | | | | Охлаждение [13, 99, 127] | | | | | |
|-------|-----------------|----|----|--------------------|-------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | R, мм | C | N | K ₃ , % | n _{сегм} , шт. | Марка сплава | C _{м.з.} , Дж/(кг·К) | λ _{м.з.} , Вт/(м·К) | ρ _{м.з.} , кг/м ³ | σ _B , МПа | t, мм | V _{кр} , м/с | S _{пр} , м/с | S _{поп} , мм/дв.ход | Тип | λ _{ср} , Вт/(м·К) | μ _{ср} , 10 ⁻³ Па·с | C _{ср.Т} , Дж/(кг·К) | ρ _{ср} , кг/м ³ | μ _{тр} = μ _{трps} |
| 1 | 0,150 | 10 | 6 | 8 | 21 | BT3-1 | 670 | 14,2 | 4500,0 | 1185 | 0,01 | 76,0 | 0,14 | 9,2 | Воздух | 0,026 | 0,018 | 717 | 1,2 | 0,66 |
| 2 | 0,125 | 9 | 12 | 5 | 18 | OT4-1 | 754 | 14,6 | 4550,0 | 663 | 0,04 | 18,0 | 0,16 | 11,9 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 3 | 0,200 | 12 | 16 | 2 | 20 | BT22 | 712 | 14,6 | 4519,8 | 1400 | 0,01 | 62,0 | 0,13 | 8,2 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 4 | 0,300 | 5 | 8 | 3 | 19 | BT18 | 712 | 13,8 | 4540,0 | 1370 | 0,14 | 46,0 | 0,14 | 10,0 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 5 | 0,125 | 12 | 12 | 6 | 22 | OT4-1 | 754 | 14,6 | 4550,0 | 663 | 0,09 | 38,0 | 0,05 | 6,7 | Воздух | 0,026 | 0,018 | 717 | 1,2 | 0,66 |
| 6 | 0,063 | 9 | 10 | 4 | 15 | BT4 | 703 | 14,5 | 4600,0 | 1030 | 0,01 | 51,0 | 0,11 | 10,0 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 7 | 0,100 | 11 | 6 | 13 | 17 | BT6 | 795 | 12,0 | 5292,4 | 1100 | 0,13 | 37,0 | 0,16 | 13,1 | Воздух | 0,026 | 0,018 | 717 | 1,2 | 0,66 |
| 8 | 0,175 | 9 | 12 | 6 | 9 | BT22 | 712 | 14,6 | 4519,8 | 1400 | 0,08 | 63,0 | 0,30 | 5,8 | Воздух | 0,026 | 0,018 | 717 | 1,2 | 0,66 |
| 9 | 0,090 | 5 | 8 | 5 | 16 | BT25 | 753 | 13,4 | 4500,0 | 1250 | 0,02 | 28,0 | 0,14 | 4,6 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 10 | 0,400 | 5 | 10 | 11 | 19 | BT18 | 712 | 13,8 | 4540,0 | 1370 | 0,01 | 33,0 | 0,15 | 6,8 | Воздух | 0,026 | 0,018 | 717 | 1,2 | 0,66 |
| 11 | 0,013 | 12 | 10 | 4 | 15 | BT5 | 712 | 14,0 | 5292,4 | 1050 | 0,04 | 79,0 | 0,13 | 11,7 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 12 | 0,150 | 12 | 6 | 9 | 17 | BT4 | 703 | 14,5 | 4600,0 | 1030 | 0,03 | 29,0 | 0,08 | 5,0 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 13 | 0,090 | 7 | 12 | 2 | 18 | BT6 | 795 | 12,0 | 5292,4 | 1100 | 0,06 | 71,0 | 0,15 | 8,1 | Воздух | 0,026 | 0,018 | 717 | 1,2 | 0,66 |
| 14 | 0,250 | 11 | 8 | 1 | 10 | BT22 | 712 | 14,6 | 4519,8 | 1400 | 0,08 | 43,0 | 0,18 | 6,4 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 15 | 0,088 | 5 | 16 | 3 | 10 | BT14 | 670 | 13,8 | 4520,0 | 1300 | 0,11 | 71,0 | 0,25 | 15,3 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 16 | 0,100 | 7 | 12 | 4 | 16 | BT5 | 712 | 14,0 | 4404,2 | 1050 | 0,10 | 34,0 | 0,11 | 3,5 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |
| 17 | 0,125 | 12 | 14 | 10 | 13 | BT25 | 753 | 13,4 | 4500,0 | 1250 | 0,08 | 14,0 | 0,07 | 4,2 | Воздух | 0,026 | 0,018 | 717 | 1,2 | 0,66 |
| 18 | 0,200 | 5 | 12 | 6 | 17 | BT3-1 | 670 | 14,2 | 4500,0 | 1185 | 0,01 | 70,0 | 0,09 | 9,7 | СОЖ | 0,580 | 0,890 | 3880 | 1015,0 | 0,21 |

Таблица Л.2 - Результаты верификации аналитической модели для произвольного сочетания параметров технологической системы по результатам численного моделирования

| № п/п | Значение $t_{ax} (T_{з,рез}), ^\circ\text{C}$ | | Относительная погрешность, % |
|-------|---|-------------------------|---------------------------------|
| | Аналитический расчет | Численное моделирование | |
| 1 | 687 | 627 | 9,6 |
| 2 | 211 | 186 | 13,4 |
| 3 | 360 | 329 | 9,4 |
| 4 | 418 | 390 | 7,2 |
| 5 | 250 | 231 | 8,2 |
| 6 | 230 | 225 | 2,2 |
| 7 | 457 | 431 | 6,0 |
| 8 | 2540 | 2333 | 8,9 |
| 9 | 251 | 238 | 5,5 |
| 10 | 428 | 399 | 7,3 |
| 11 | 333 | 298 | 11,7 |
| 12 | 223 | 205 | 8,8 |
| 13 | 704 | 685 | 2,8 |
| 14 | 368 | 349 | 5,4 |
| 15 | 701 | 675 | 3,9 |
| 16 | 283 | 263 | 7,6 |
| 17 | 288 | 260 | 10,8 |
| 18 | 313 | 300 | 4,3 |

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Таблица М.1 - Результаты экспериментальной оценки пиковой амплитуды виброперемещений корпуса шпиндельного узла плоскошлифовального станка при обработке сплава ВТ-6 (гр. III) ($\tau_{\text{наработка}} = 10 \div 20$ мин.)

| Режимы обработки | | | | Среднее значение пиковой амплитуды виброперемещений, мкм | | | | | |
|--|-----------------------|----------|-------------------------------|--|------|------|------------------------------------|------|------|
| $S_{\text{пр}}$, м/с | $V_{\text{кр}}$, м/с | t , мм | $S_{\text{поп}}$, мм/дв. ход | Прерывистый круг | | | Сплошной круг (контрольная группа) | | |
| | | | | В | Б | К | В | Б | К |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,05 | 7,5 | 0,84 | 1,13 | 1,17 | 0,63 | 0,68 | 0,63 |
| 0,25 | 19 | 0,05 | 7,5 | 0,93 | 1,12 | 1,13 | 0,69 | 0,63 | 0,67 |
| 0,05 | 49 | 0,05 | 7,5 | 0,76 | 0,98 | 0,97 | 0,55 | 0,73 | 0,69 |
| 0,25 | 49 | 0,05 | 7,5 | 0,75 | 0,92 | 0,98 | 0,66 | 0,70 | 0,71 |
| 0,05 | 19 | 0,10 | 7,5 | 1,20 | 1,50 | 1,65 | 0,71 | 0,70 | 0,70 |
| 0,25 | 19 | 0,10 | 7,5 | 1,25 | 1,59 | 1,65 | 0,64 | 0,69 | 0,76 |
| 0,05 | 49 | 0,10 | 7,5 | 0,98 | 1,40 | 1,41 | 0,72 | 0,76 | 0,75 |
| 0,25 | 49 | 0,10 | 7,5 | 1,09 | 1,36 | 1,40 | 0,76 | 0,79 | 0,79 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,05 | 7,5 | 0,70 | 0,98 | 1,01 | 0,55 | 0,62 | 0,58 |
| 0,25 | 19 | 0,05 | 7,5 | 0,83 | 1,00 | 1,00 | 0,63 | 0,55 | 0,61 |
| 0,05 | 49 | 0,05 | 7,5 | 0,68 | 0,87 | 0,83 | 0,50 | 0,68 | 0,63 |
| 0,25 | 49 | 0,05 | 7,5 | 0,64 | 0,78 | 0,83 | 0,60 | 0,65 | 0,64 |
| 0,05 | 19 | 0,10 | 7,5 | 1,06 | 1,32 | 1,42 | 0,64 | 0,66 | 0,63 |
| 0,25 | 19 | 0,10 | 7,5 | 1,09 | 1,44 | 1,38 | 0,58 | 0,61 | 0,67 |
| 0,05 | 49 | 0,10 | 7,5 | 0,85 | 1,20 | 1,19 | 0,66 | 0,69 | 0,69 |
| 0,25 | 49 | 0,10 | 7,5 | 0,93 | 1,17 | 1,22 | 0,66 | 0,67 | 0,69 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Таблица Н.1 - Результаты экспериментальной оценки среднеарифметического отклонения профиля шероховатости Ra обработанной поверхности

| Режимы обработки | | | | Среднеарифметическая шероховатость Ra , мкм | | | | | \overline{Ra} , мкм |
|--|----------------|----------|------------------------|---|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------|
| $S_{пр}$, м/с | $V_{кр}$, м/с | t , мм | $S_{поп}$, мм/дв. ход | BT-1 (гр. I) | BT-14 (гр. II) | BT-6 (гр. III) | BT-9 (гр. IV) | BT-22 (гр. V) | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,153 | 0,166 | 0,169 | 0,173 | 0,175 | 0,167 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,127 | 0,138 | 0,141 | 0,145 | 0,146 | 0,139 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,148 | 0,161 | 0,165 | 0,168 | 0,170 | 0,162 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,123 | 0,134 | 0,137 | 0,141 | 0,142 | 0,135 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,154 | 0,167 | 0,171 | 0,175 | 0,177 | 0,169 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,128 | 0,140 | 0,143 | 0,147 | 0,148 | 0,141 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,149 | 0,163 | 0,166 | 0,170 | 0,172 | 0,164 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,124 | 0,136 | 0,139 | 0,143 | 0,144 | 0,137 |
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,138 | 0,151 | 0,154 | 0,158 | 0,159 | 0,152 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,125 | 0,134 | 0,129 | 0,136 | 0,142 | 0,133 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,122 | 0,124 | 0,130 | 0,125 | 0,127 | 0,126 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,130 | 0,128 | 0,139 | 0,137 | 0,155 | 0,138 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,117 | 0,115 | 0,134 | 0,127 | 0,131 | 0,125 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,135 | 0,139 | 0,134 | 0,130 | 0,139 | 0,135 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,115 | 0,125 | 0,132 | 0,126 | 0,136 | 0,127 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,129 | 0,137 | 0,142 | 0,141 | 0,148 | 0,139 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,123 | 0,130 | 0,132 | 0,127 | 0,131 | 0,129 |
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,125 | 0,129 | 0,134 | 0,131 | 0,139 | 0,131 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,160 | 0,176 | 0,172 | 0,177 | 0,180 | 0,173 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,131 | 0,141 | 0,143 | 0,150 | 0,150 | 0,143 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,155 | 0,164 | 0,163 | 0,173 | 0,173 | 0,166 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,128 | 0,136 | 0,140 | 0,144 | 0,151 | 0,140 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,161 | 0,174 | 0,172 | 0,179 | 0,185 | 0,174 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,129 | 0,142 | 0,150 | 0,150 | 0,155 | 0,145 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,155 | 0,169 | 0,172 | 0,180 | 0,179 | 0,171 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,126 | 0,141 | 0,149 | 0,142 | 0,147 | 0,141 |
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,143 | 0,155 | 0,158 | 0,162 | 0,165 | 0,157 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,133 | 0,146 | 0,142 | 0,145 | 0,150 | 0,143 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,121 | 0,132 | 0,137 | 0,132 | 0,128 | 0,130 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,133 | 0,141 | 0,144 | 0,146 | 0,148 | 0,142 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,122 | 0,126 | 0,127 | 0,123 | 0,127 | 0,125 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,146 | 0,154 | 0,150 | 0,149 | 0,146 | 0,149 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,125 | 0,129 | 0,131 | 0,133 | 0,140 | 0,132 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,137 | 0,140 | 0,141 | 0,149 | 0,152 | 0,144 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,129 | 0,126 | 0,132 | 0,130 | 0,135 | 0,130 |

Продолжение таблицы Н.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,131 | 0,137 | 0,138 | 0,138 | 0,141 | 0,137 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,162 | 0,183 | 0,189 | 0,195 | 0,189 | 0,184 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,138 | 0,149 | 0,155 | 0,160 | 0,163 | 0,153 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,157 | 0,171 | 0,178 | 0,186 | 0,191 | 0,177 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,132 | 0,141 | 0,152 | 0,158 | 0,159 | 0,148 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,166 | 0,191 | 0,194 | 0,181 | 0,196 | 0,186 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,136 | 0,159 | 0,153 | 0,168 | 0,158 | 0,155 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,168 | 0,181 | 0,183 | 0,189 | 0,192 | 0,183 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,144 | 0,151 | 0,158 | 0,153 | 0,166 | 0,154 |
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,150 | 0,166 | 0,170 | 0,174 | 0,177 | 0,167 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,143 | 0,150 | 0,152 | 0,154 | 0,156 | 0,151 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,128 | 0,134 | 0,136 | 0,138 | 0,133 | 0,134 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,140 | 0,147 | 0,149 | 0,151 | 0,152 | 0,148 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,125 | 0,132 | 0,134 | 0,135 | 0,136 | 0,132 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,143 | 0,151 | 0,153 | 0,155 | 0,158 | 0,152 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,128 | 0,135 | 0,137 | 0,139 | 0,140 | 0,136 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,141 | 0,148 | 0,149 | 0,152 | 0,151 | 0,148 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,126 | 0,133 | 0,135 | 0,137 | 0,136 | 0,133 |
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,134 | 0,141 | 0,143 | 0,145 | 0,145 | 0,142 |
| Сплошной круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,116 | 0,133 | 0,142 | 0,138 | 0,149 | 0,136 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,102 | 0,107 | 0,113 | 0,122 | 0,130 | 0,115 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,130 | 0,129 | 0,132 | 0,147 | 0,149 | 0,137 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,097 | 0,110 | 0,126 | 0,116 | 0,115 | 0,113 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,135 | 0,147 | 0,154 | 0,152 | 0,158 | 0,149 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,103 | 0,122 | 0,139 | 0,130 | 0,131 | 0,125 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,129 | 0,144 | 0,153 | 0,159 | 0,148 | 0,147 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,119 | 0,147 | 0,149 | 0,138 | 0,134 | 0,137 |
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,116 | 0,130 | 0,139 | 0,138 | 0,139 | 0,132 |
| Сплошной круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,110 | 0,121 | 0,113 | 0,120 | 0,124 | 0,118 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,091 | 0,103 | 0,110 | 0,117 | 0,109 | 0,106 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,112 | 0,112 | 0,122 | 0,118 | 0,133 | 0,119 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,104 | 0,101 | 0,116 | 0,110 | 0,104 | 0,107 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,121 | 0,123 | 0,117 | 0,115 | 0,121 | 0,119 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,099 | 0,119 | 0,094 | 0,109 | 0,119 | 0,108 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,114 | 0,117 | 0,120 | 0,101 | 0,118 | 0,114 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,108 | 0,115 | 0,106 | 0,112 | 0,101 | 0,108 |
| \overline{Ra} , мкм | | | | 0,107 | 0,114 | 0,112 | 0,113 | 0,116 | 0,112 |

Таблица Н.2 - Результаты экспериментальной оценки средней высоты волнистости $W(y_B)$ обработанной поверхности

| Режимы обработки | | | | Среднее значение волнистости $W(y_B)$, мкм | | | | | \bar{W} , мкм |
|--|----------------|----------|------------------------|---|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| $S_{пр}$, м/с | $V_{кр}$, м/с | t , мм | $S_{поп}$, мм/дв. ход | ВТ-1 (гр. I) | ВТ-14 (гр. II) | ВТ-6 (гр. III) | ВТ-9 (гр. IV) | ВТ-22 (гр. V) | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,3 | 1,1 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,4 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,3 | 0,7 | 0,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 4,7 | 4,1 | 4,4 | 4,2 | 4,1 | 4,3 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 3,5 | 3,8 | 3,6 | 4,0 | 4,1 | 3,8 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 2,2 | 3,5 | 4,2 | 4,0 | 4,3 | 3,6 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,8 | 3,0 | 2,9 | 3,6 | 3,7 | 2,8 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 25,9 | 28,4 | 28,1 | 27,1 | 29,0 | 27,7 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 4,1 | 5,5 | 6,1 | 6,3 | 6,4 | 5,7 |
| \bar{W} , мкм | | | | 5,4 | 6,3 | 6,5 | 6,4 | 6,7 | 6,3 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,2 | 1,1 | 1,6 | 2,0 | 1,7 | 1,5 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 1,1 | 0,7 | 0,9 | 0,3 | 0,7 | 0,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 4,2 | 3,7 | 4,3 | 4,6 | 4,0 | 4,2 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 3,9 | 3,8 | 3,3 | 4,1 | 4,3 | 3,9 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 3,1 | 2,9 | 4,0 | 3,1 | 3,9 | 3,4 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1,7 | 4,4 | 3,7 | 4,3 | 4,4 | 3,7 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 28,0 | 28,9 | 27,4 | 29,7 | 29,1 | 28,6 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 3,0 | 5,6 | 4,7 | 5,2 | 6,8 | 5,1 |
| \bar{W} , мкм | | | | 5,8 | 6,4 | 6,2 | 6,7 | 6,9 | 6,4 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,4 | 1,2 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,4 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 1,0 | 0,6 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 3,8 | 4,3 | 4,8 | 4,7 | 4,6 | 4,4 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 3,3 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 3,2 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 1,8 | 2,9 | 3,2 | 3,7 | 4,2 | 3,2 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1,6 | 2,5 | 2,3 | 2,8 | 3,0 | 2,4 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 18,7 | 19,8 | 19,9 | 20,4 | 20,7 | 19,9 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 3,9 | 4,7 | 5,1 | 5,5 | 5,6 | 5,0 |
| \bar{W} , мкм | | | | 4,4 | 4,9 | 5,1 | 5,3 | 5,5 | 5,0 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,7 | 0,9 | 0,5 | 1,3 | 1,6 | 1,2 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,9 | 0,6 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 4,0 | 4,2 | 3,7 | 3,0 | 4,6 | 3,9 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 3,9 | 2,8 | 2,6 | 3,8 | 3,8 | 3,4 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 2,1 | 3,6 | 3,4 | 3,5 | 4,0 | 3,3 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1,6 | 2,9 | 2,4 | 3,2 | 2,9 | 2,6 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 18,5 | 18,3 | 20,4 | 21,4 | 16,7 | 19,1 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 3,9 | 5,3 | 3,9 | 5,2 | 6,1 | 4,9 |
| \bar{W} , мкм | | | | 4,5 | 4,8 | 4,7 | 5,2 | 5,1 | 4,9 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,9 | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,2 | 1,2 |

| | | | | | | | | | |
|------|----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,7 | 0,5 |
|------|----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Продолжение таблицы Н.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|----|-------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 3,6 | 4,5 | 4,6 | 3,0 | 4,9 | 4,1 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 2,7 | 3,2 | 1,8 | 2,1 | 3,2 | 2,6 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 1,6 | 2,1 | 2,5 | 3,4 | 3,3 | 2,6 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 2,1 | 1,7 | 2,2 | 2,8 | 2,6 | 2,3 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 17,6 | 16,9 | 20,7 | 22,8 | 18,9 | 19,4 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 3,7 | 3,5 | 5,8 | 4,6 | 4,7 | 4,5 |
| \bar{W} , мкм | | | | 4,1 | 4,2 | 4,9 | 5,1 | 4,9 | 4,6 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,8 | 0,9 | 1,3 | 1,7 | 0,9 | 1,1 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,3 | 1,1 | 0,5 | 1,0 | 0,8 | 0,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 3,1 | 4,6 | 4,9 | 2,8 | 7,4 | 4,6 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 2,0 | 3,5 | 1,9 | 2,6 | 3,2 | 2,6 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 1,2 | 2,1 | 2,2 | 3,3 | 3,2 | 2,4 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1,7 | 2,0 | 1,5 | 4,0 | 1,6 | 2,1 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 18,0 | 15,2 | 15,0 | 25,3 | 20,3 | 18,8 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 3,5 | 3,8 | 5,9 | 3,3 | 4,8 | 4,3 |
| \bar{W} , мкм | | | | 3,8 | 4,2 | 4,1 | 5,5 | 5,3 | 4,6 |
| Сплошной круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 0,9 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,5 | 0,6 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,6 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,8 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 1,0 | 1,2 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,8 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,8 | 1,0 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 0,8 | 1,0 | 1,0 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,8 | 1,2 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 1,0 |
| \bar{W} , мкм | | | | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 |
| Сплошной круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,0 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,5 | 0,6 | 1,2 | 1,0 | 0,5 | 0,8 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 1,0 | 0,7 | 1,1 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 1,2 | 0,8 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 1,3 | 1,0 | 0,9 | 0,4 | 0,8 | 0,9 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1,9 | 1,7 | 0,8 | 1,8 | 0,9 | 1,4 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 1,3 | 1,2 | 0,7 | 1,0 | 0,8 | 1,0 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,7 | 1,3 | 1,3 | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
| \bar{W} , мкм | | | | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,0 |

ПРИЛОЖЕНИЕ П

Таблица П.1 - Результаты экспериментальной оценки пиковой температуры в зоне шлифования $max(T_{з.рез})$ при обработке титановых сплавов

| Режимы обработки | | | | Среднее значение пиковой температуры в зоне резания $max(T_{з.рез})$, °C | | | | | $\overline{max(T_{з.рез})}$, °C |
|--|----------------|----------|-----------------------|---|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------------------------|
| $S_{пр}$, м/с | $V_{кр}$, м/с | t , мм | $S_{поп}$, мм/дв.ход | BT-1 (гр. I) | BT-14 (гр. II) | BT-6 (гр. III) | BT-9 (гр. IV) | BT-22 (гр. V) | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 224,4 | 234,1 | 244,1 | 236,0 | 252,5 | 238,2 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 285,0 | 312,6 | 321,2 | 308,2 | 328,3 | 311,1 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 355,0 | 377,1 | 385,0 | 379,0 | 389,6 | 377,2 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 660,0 | 719,1 | 736,9 | 726,8 | 747,0 | 718,0 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 248,6 | 273,9 | 283,3 | 281,6 | 281,1 | 273,7 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 353,1 | 371,7 | 388,8 | 378,7 | 388,6 | 376,2 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 489,3 | 531,0 | 545,6 | 539,8 | 542,8 | 529,7 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 931,7 | 987,3 | 1008,8 | 1018,5 | 1020,0 | 993,3 |
| $\overline{max(T_{з.рез})}$, °C | | | | 443,4 | 475,9 | 489,2 | 483,6 | 493,7 | 477,1 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 127,2 | 133,6 | 140,8 | 136,6 | 143,8 | 136,4 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 198,7 | 221,9 | 220,8 | 220,9 | 226,1 | 217,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 299,6 | 305,9 | 337,9 | 343,4 | 331,5 | 323,7 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 498,6 | 553,6 | 570,0 | 555,3 | 550,0 | 545,5 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 177,3 | 187,0 | 189,8 | 195,6 | 186,6 | 187,3 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 245,7 | 267,1 | 276,1 | 267,1 | 280,4 | 267,3 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 373,8 | 392,5 | 418,8 | 411,9 | 408,2 | 401,0 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 726,8 | 770,2 | 795,8 | 781,8 | 781,6 | 771,2 |
| $\overline{max(T_{з.рез})}$, °C | | | | 330,9 6 | 353,99 | 368,74 | 364,08 | 363,52 | 356,26 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 226,4 | 250,1 | 252,7 | 245,6 | 251,4 | 245,2 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 291,0 | 319,9 | 339,4 | 317,9 | 337,5 | 321,2 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 367,9 | 373,2 | 395,1 | 404,1 | 411,2 | 390,3 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 671,8 | 732,4 | 751,6 | 767,3 | 782,1 | 741,0 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 255,4 | 277,6 | 289,0 | 284,8 | 304,1 | 282,2 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 362,6 | 380,1 | 396,0 | 408,9 | 409,3 | 391,4 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 509,9 | 561,2 | 572,1 | 557,4 | 575,3 | 555,2 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 969,3 | 1019,9 | 1040,5 | 1031,2 | 1044,5 | 1021,1 |
| $\overline{max(T_{з.рез})}$, °C | | | | 456,8 | 489,3 | 504,5 | 502,1 | 514,4 | 493,4 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 139,6 | 144,2 | 152,3 | 153,8 | 151,7 | 148,3 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 214,2 | 231,5 | 239,0 | 239,7 | 240,2 | 232,9 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 319,3 | 330,6 | 347,9 | 359,7 | 360,8 | 343,7 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 518,1 | 569,9 | 587,9 | 590,8 | 606,6 | 574,6 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 190,1 | 195,0 | 207,1 | 209,7 | 207,7 | 201,9 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 260,3 | 283,8 | 296,1 | 283,3 | 299,1 | 284,5 |

Продолжение таблицы П.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|----|-------|-----|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 393,5 | 408,6 | 422,0 | 421,8 | 423,6 | 413,9 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 737,6 | 784,4 | 791,1 | 795,1 | 808,2 | 783,3 |
| $\max (T_{з,рез}), ^\circ\text{C}$ | | | | 346,58 | 368,49 | 380,41 | 381,74 | 387,23 | 372,89 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 230,5 | 260,3 | 258,8 | 260,9 | 263,5 | 254,8 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 322,4 | 344,2 | 363,0 | 360,6 | 369,0 | 351,9 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 399,1 | 407,8 | 418,9 | 427,8 | 423,1 | 415,3 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 719,2 | 776,7 | 796,9 | 813,7 | 822,8 | 785,9 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 266,4 | 303,7 | 317,6 | 324,6 | 331,0 | 308,7 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 398,3 | 424,4 | 439,7 | 447,6 | 453,1 | 432,7 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 557,7 | 609,4 | 620,4 | 618,6 | 625,0 | 606,2 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 982,5 | 1039,5 | 1051,7 | 1050,4 | 1084,1 | 1041,6 |
| $\max (T_{з,рез}), ^\circ\text{C}$ | | | | 484,5 | 520,8 | 533,4 | 538,0 | 546,5 | 524,6 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 148,9 | 159,3 | 168,9 | 171,6 | 171,3 | 164,0 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 234,4 | 245,4 | 264,6 | 265,0 | 267,1 | 255,3 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 334,2 | 366,1 | 385,2 | 387,2 | 389,7 | 372,5 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 532,8 | 570,2 | 614,0 | 620,6 | 626,2 | 592,8 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 204,2 | 219,3 | 220,0 | 222,4 | 220,9 | 217,4 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 287,1 | 301,3 | 330,6 | 338,6 | 342,9 | 320,1 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 435,3 | 441,5 | 464,4 | 462,3 | 467,5 | 454,2 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 822,4 | 839,9 | 848,7 | 839,7 | 849,6 | 840,1 |
| $\max (T_{з,рез}), ^\circ\text{C}$ | | | | 374,93 | 392,87 | 412,05 | 413,43 | 416,89 | 402,04 |
| Сплошной круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 324,6 | 335,7 | 339,1 | 339,0 | 341,2 | 335,9 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 399,4 | 402,9 | 417,4 | 417,1 | 429,7 | 413,3 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 484,3 | 508,9 | 516,9 | 516,3 | 521,0 | 509,5 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 1042,3 | 1097,2 | 1118,3 | 1111,2 | 1119,9 | 1097,8 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 430,2 | 457,9 | 466,8 | 467,1 | 472,9 | 459,0 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 534,6 | 580,6 | 595,5 | 595,5 | 605,0 | 582,2 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 721,9 | 789,9 | 813,2 | 812,2 | 825,6 | 792,6 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1266,5 | 1356,4 | 1391,4 | 1379,1 | 1392,6 | 1357,2 |
| $\max (T_{з,рез}), ^\circ\text{C}$ | | | | 650,5 | 691,2 | 707,3 | 704,7 | 713,5 | 693,4 |
| Сплошной круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 287,9 | 292,7 | 293,2 | 286,7 | 289,6 | 290,0 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 350,8 | 350,7 | 361,3 | 340,8 | 354,7 | 351,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 434,3 | 428,4 | 430,3 | 431,2 | 422,9 | 429,4 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 899,0 | 908,4 | 909,6 | 903,8 | 909,8 | 906,1 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 375,7 | 368,6 | 379,1 | 377,4 | 390,6 | 378,3 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 474,0 | 469,6 | 474,5 | 477,2 | 459,7 | 471,0 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 644,0 | 641,2 | 632,0 | 628,4 | 633,0 | 635,7 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1092,0 | 1101,7 | 1111,4 | 1111,8 | 1095,3 | 1102,5 |
| $\max (T_{з,рез}), ^\circ\text{C}$ | | | | 569,7 | 570,1 | 573,9 | 569,7 | 569,5 | 570,6 |
| Примечание | | | | | | | | | |
| | | | | - прижоги не выявлены | | | | | |
| | | | | - одиночные штриховые прижоги и пятна | | | | | |
| | | | | - сплошные штриховые прижоги | | | | | |

Таблица П.2 - Исходные данные к аналитическому расчету температуры в зоне резания

| Условия: прерывистое резание, $C = 5, N = 10, D_{кр} = 0,2 \text{ м}, K_z = 3\%, n_{сегм} = 16 \text{ шт.},$ $b_{сегм} \times h_{сегм} = 30 \times 20 \text{ мм}, \lambda_k = 1,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, t_{нач.м.з.} = t_{окр.} = 20 \text{ }^\circ\text{C},$ | | | | | |
|---|---------------------------|----------------|--|---------------|---------------|
| Свойства материала заготовки ($t_{ср.м.з.} = 500,0 \text{ }^\circ\text{C}$) | Значение для сплава марки | | | | |
| | BT-1 (гр. I) | BT-14 (гр. II) | BT-6 (гр. III) | BT-9 (гр. IV) | BT-22 (гр. V) |
| $\sigma_B, \text{ МПа}$ | 465 | 891 | 1075 | 1112 | 1273 |
| $C_{м.з.}, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ | 650 | 670 | 795 | 670 | 712 |
| $\lambda_{м.з.}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ | 18,0 | 13,8 | 12,0 | 14,2 | 14,6 |
| $\rho_{м.з.}, \text{ кг/м}^3$ | 4321,8 | 4520,0 | 4098,2 | 4500,0 | 4442,8 |
| Свойства воздуха ($t_{окр.} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$) | | | $\lambda_{ср.}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ | | 0,026 |
| | | | $\mu_{ср.}, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ | | 0,018 |
| | | | $C_{ср.Т}, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ | | 717 |
| | | | $\rho_{ср.}, \text{ кг/м}^3$ | | 1,2 |
| | | | $\mu_{тр} = \mu_{трs}$ | | 0,66 |
| Свойства СОЖ (ЭКОГРИНД 10М, концентрация 7,0%) ($t_{окр.} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$) | | | $\lambda_{ср.}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ | | 0,573 |
| | | | $\mu_{ср.}, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ | | 8,21 |
| | | | $C_{ср.Т}, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ | | 4038 |
| | | | $\rho_{ср.}, \text{ кг/м}^3$ | | 991 |
| | | | $\mu_{тр} = \mu_{трs}$ | | 0,21 |

Таблица П.3 - Результаты аналитического расчета пиковых температур в зоне резания $max(T_{з.рез})$

| Режимы обработки | | | | Среднее значение пиковой температуры в зоне резания $max(T_{з.рез}), \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | | $\overline{max(T_{з.рез})}, \text{ }^\circ\text{C}$ |
|--|------------------------|-----------------|--------------------------------|--|----------------|----------------|---------------|---------------|---|
| $S_{пр.}, \text{ м/с}$ | $V_{кр.}, \text{ м/с}$ | $t, \text{ мм}$ | $S_{поп.}, \text{ мм/дв. ход}$ | BT-1 (гр. I) | BT-14 (гр. II) | BT-6 (гр. III) | BT-9 (гр. IV) | BT-22 (гр. V) | |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 177,0 | 193,0 | 199,0 | 196,0 | 198,0 | 192,6 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 301,0 | 327,0 | 337,0 | 333,0 | 336,0 | 326,8 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 389,0 | 423,0 | 436,0 | 430,0 | 435,0 | 422,6 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 705,0 | 776,0 | 804,0 | 791,0 | 800,0 | 775,2 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 243,0 | 265,0 | 285,0 | 280,0 | 283,0 | 271,2 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 383,0 | 421,0 | 435,0 | 438,0 | 443,0 | 424,0 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 535,0 | 582,0 | 601,0 | 593,0 | 598,0 | 581,8 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 1027,0 | 1095,0 | 1126,0 | 1139,0 | 1132,0 | 1103,8 |
| $\overline{max(T_{з.рез})}, \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | 470,0 | 510,3 | 527,9 | 525,0 | 528,1 | 512,3 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 112,0 | 121,0 | 121,4 | 121,4 | 121,4 | 121,4 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 201,0 | 218,0 | 218,6 | 218,6 | 218,6 | 218,6 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 267,0 | 291,0 | 290,2 | 290,2 | 290,2 | 290,2 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 533,0 | 580,0 | 579,6 | 579,6 | 579,6 | 579,6 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 167,0 | 181,0 | 181,2 | 181,2 | 181,2 | 181,2 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 268,0 | 292,0 | 291,6 | 291,6 | 291,6 | 291,6 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 376,0 | 408,0 | 408,4 | 408,4 | 408,4 | 408,4 |

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 731,0 | 795,0 | 794,2 | 794,2 | 794,2 | 794,2 |
| $\max(T_{з.рез}), ^\circ\text{C}$ | | | | 331,9 | 360,8 | 372,5 | 367,0 | 371,1 | 360,7 |

Таблица П.4 - Результаты определения абсолютной погрешности Δ аналитической модели расчета температуры в зоне резания

| Режимы обработки | | | | Средняя погрешность аналитической модели $\Delta = \max(T_{з.рез})_{оп.} - \max(T_{з.рез})_{расч.}, ^\circ\text{C}$ | | | | | $\bar{\Delta}, ^\circ\text{C}$ |
|--|------------------|-----------------|-----------------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|
| $S_{пр},$ м/с | $V_{кр},$ м/с | $t, \text{ мм}$ | $S_{поп},$ мм/дв. ход | BT-1 (гр. I) | BT-14 (гр. II) | BT-6 (гр. III) | BT-9 (гр. IV) | BT-22 (гр. V) | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 47,4 | 41,1 | 45,1 | 40 | 54,5 | 45,6 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | -16 | -14,4 | -15,8 | -24,8 | -7,7 | -15,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | -34 | -45,9 | -51,0 | -51,0 | -45,4 | -45,5 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | -45 | -56,9 | -67,1 | -64,2 | -53 | -57,2 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 5,6 | 8,9 | -1,7 | 1,6 | -1,9 | 2,5 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | -29,9 | -49,3 | -46,2 | -59,3 | -54,4 | -47,8 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | -45,7 | -51,0 | -55,4 | -53,2 | -55,2 | -52,1 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | -95,3 | -107,7 | -117,2 | -120,5 | -112 | -110,5 |
| $ \bar{\Delta} , ^\circ\text{C}$ | | | | -26,6 | -34,4 | -38,7 | -41,4 | -34,4 | -35,1 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 15,2 | 12,6 | 15,8 | 12,6 | 18,8 | 15,0 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | -2,3 | 3,9 | -4,2 | -1,1 | -0,9 | -0,9 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 32,6 | 14,9 | 37,9 | 48,4 | 33,5 | 33,5 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | -34,4 | -26,4 | -29,0 | -34,7 | -46,0 | -34,1 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 10,3 | 6,0 | 2,8 | 10,6 | 0,6 | 6,1 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | -22,3 | -24,9 | -25,9 | -28,9 | -19,6 | -24,3 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | -2,2 | -15,5 | -3,2 | -4,1 | -11,8 | -7,4 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | -4,2 | -24,8 | -24,2 | -26,2 | -35,4 | -23,0 |
| $ \bar{\Delta} , ^\circ\text{C}$ | | | | -0,9 | -6,8 | -3,8 | -2,9 | -7,6 | -4,4 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 49,4 | 57,1 | 53,7 | 49,6 | 53,4 | 52,6 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | -10,0 | -7,1 | 2,4 | -15,1 | 1,5 | -5,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | -21,1 | -49,8 | -40,9 | -25,9 | -23,8 | -32,3 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | -33,2 | -43,6 | -52,4 | -23,7 | -17,9 | -34,2 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 12,4 | 12,6 | 4,0 | 4,8 | 21,1 | 11,0 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | -20,4 | -40,9 | -39,0 | -29,1 | -33,7 | -32,6 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | -25,1 | -20,8 | -28,9 | -35,6 | -22,7 | -26,6 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | -57,7 | -75,1 | -85,5 | -107,8 | -87,5 | -82,7 |
| $ \bar{\Delta} , ^\circ\text{C}$ | | | | -13,2 | -21,0 | -23,3 | -22,9 | -13,7 | -18,8 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 27,6 | 23,2 | 27,3 | 29,8 | 26,7 | 26,9 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 13,2 | 13,5 | 14,0 | 17,7 | 13,2 | 14,3 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 52,3 | 39,6 | 47,9 | 64,7 | 62,8 | 53,5 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | -14,9 | -10,1 | -11,1 | 0,8 | 10,6 | -4,9 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 23,1 | 14,0 | 20,1 | 24,7 | 21,7 | 20,7 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | -7,7 | -8,2 | -5,9 | -12,7 | -0,9 | -7,1 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 17,5 | 0,6 | 0,0 | 5,8 | 3,6 | 5,5 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 6,6 | -10,6 | -28,9 | -12,9 | -8,8 | -10,9 |

| | | | | | | | | | |
|--|----|-------|-----|------|------|------|------|------|------|
| $\bar{\Delta}$], °C | | | | 14,7 | 7,8 | 7,9 | 14,7 | 16,1 | 12,2 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 53,5 | 67,3 | 59,8 | 64,9 | 65,5 | 62,2 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 21,4 | 17,2 | 26,0 | 27,6 | 33,0 | 25,0 |

Продолжение таблицы П.4

| | | | | | | | | | |
|---|----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 10,1 | -15,2 | -17,1 | -2,2 | -11,9 | -7,3 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 14,2 | 0,7 | -7,1 | 22,7 | 22,8 | 10,7 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 23,4 | 38,7 | 32,6 | 44,6 | 48,0 | 37,5 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 15,3 | 3,4 | 4,7 | 9,6 | 10,1 | 8,6 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 22,7 | 27,4 | 19,4 | 25,6 | 27,0 | 24,4 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | -44,5 | -55,5 | -74,3 | -88,6 | -47,9 | -62,2 |
| $\bar{\Delta}$], °C | | | | 14,5 | 10,5 | 5,5 | 13,0 | 18,3 | 12,4 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 36,9 | 38,3 | 43,9 | 47,6 | 46,3 | 42,6 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 33,4 | 27,4 | 39,6 | 43,0 | 40,1 | 36,7 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 67,2 | 75,1 | 85,2 | 92,2 | 91,7 | 82,3 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | -0,2 | -9,8 | 15,0 | 30,6 | 30,2 | 13,2 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 37,2 | 38,3 | 33,0 | 37,4 | 34,9 | 36,2 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 19,1 | 9,3 | 28,6 | 42,6 | 42,9 | 28,5 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 59,3 | 33,5 | 42,4 | 46,3 | 47,5 | 45,8 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 91,4 | 44,9 | 28,7 | 31,7 | 32,6 | 45,9 |
| $\bar{\Delta}$], °C | | | | 43,0 | 32,1 | 39,6 | 46,4 | 45,8 | 41,4 |

Таблица П.5 - Результаты определения относительной погрешности Δ аналитической модели расчета температуры в зоне резания

| Режимы обработки | | | | Средняя погрешность аналитической модели $\Delta = \max (T_{з.рез})_{оп.} - \max (T_{з.рез})_{расч.}, °C$ | | | | | $\bar{\Delta}, \%$ |
|--|------------------|-----------------|------------------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|
| $S_{пр},$ м/с | $V_{кр},$ м/с | $t, \text{ мм}$ | $S_{поп.},$ мм/дв. ход | ВТ-1 (гр. I) | ВТ-14 (гр. II) | ВТ-6 (гр. III) | ВТ-9 (гр. IV) | ВТ-22 (гр. V) | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 21,1 | 17,6 | 18,5 | 16,9 | 21,6 | 19,1 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 5,6 | 4,6 | 4,9 | 8,0 | 2,3 | 5,1 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 9,6 | 12,2 | 13,2 | 13,5 | 11,7 | 12,0 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 6,8 | 7,9 | 9,1 | 8,8 | 7,1 | 8,0 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 2,3 | 3,2 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 1,5 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 8,5 | 13,3 | 11,9 | 15,7 | 14,0 | 12,7 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 9,3 | 9,6 | 10,2 | 9,9 | 10,2 | 9,8 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 10,2 | 10,9 | 11,6 | 11,8 | 11,0 | 11,1 |
| $\bar{\Delta}$], % | | | | 9,2 | 9,9 | 10,0 | 10,6 | 9,8 | 9,9 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 11,9 | 9,4 | 11,2 | 9,2 | 13,1 | 11,0 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 1,2 | 1,8 | 1,9 | 0,5 | 0,4 | 1,1 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 10,9 | 4,9 | 11,2 | 14,1 | 10,1 | 10,2 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 6,9 | 4,8 | 5,1 | 6,2 | 8,4 | 6,3 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 5,8 | 3,2 | 1,5 | 5,4 | 0,3 | 3,2 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 9,1 | 9,3 | 9,4 | 10,8 | 7,0 | 9,1 |

| | | | | | | | | | |
|--|----|-------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,7 | 3,9 | 0,8 | 1,0 | 2,9 | 1,8 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,6 | 3,2 | 3,0 | 3,4 | 4,5 | 2,9 |
| Δ , % | | | | 5,9 | 5,1 | 5,5 | 6,3 | 5,8 | 5,7 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 21,8 | 22,8 | 21,3 | 20,2 | 21,2 | 21,5 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 3,4 | 2,2 | 0,7 | 4,7 | 0,4 | 2,3 |

Продолжение таблицы П.5

| | | | | | | | | | |
|--|----|-------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 5,7 | 13,3 | 10,4 | 6,4 | 5,8 | 8,3 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 4,9 | 6,0 | 7,0 | 3,1 | 2,3 | 4,6 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 4,9 | 4,5 | 1,4 | 1,7 | 6,9 | 3,9 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 5,6 | 10,8 | 9,8 | 7,1 | 8,2 | 8,3 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 4,9 | 3,7 | 5,1 | 6,4 | 3,9 | 4,8 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 6,0 | 7,4 | 8,2 | 10,5 | 8,4 | 8,1 |
| Δ , % | | | | 7,2 | 8,8 | 8,0 | 7,5 | 7,2 | 7,7 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 Б, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 19,8 | 16,1 | 17,9 | 19,4 | 17,6 | 18,2 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 6,2 | 5,8 | 5,9 | 7,4 | 5,5 | 6,1 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 16,4 | 12,0 | 13,8 | 18,0 | 17,4 | 15,5 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 2,9 | 1,8 | 1,9 | 0,1 | 1,7 | 1,7 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 12,2 | 7,2 | 9,7 | 11,8 | 10,4 | 10,3 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 3,0 | 2,9 | 2,0 | 4,5 | 0,3 | 2,5 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 4,4 | 0,1 | 0,0 | 1,4 | 0,8 | 1,4 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,9 | 1,4 | 3,7 | 1,6 | 1,1 | 1,7 |
| Δ , % | | | | 8,2 | 5,9 | 6,8 | 8,0 | 6,9 | 7,2 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 23,2 | 25,9 | 23,1 | 24,9 | 24,8 | 24,4 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 6,6 | 5,0 | 7,2 | 7,7 | 8,9 | 7,1 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 2,5 | 3,7 | 4,1 | 0,5 | 2,6 | 2,7 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 2,0 | 0,1 | 0,9 | 2,8 | 2,8 | 1,7 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 8,8 | 12,7 | 10,3 | 13,7 | 14,5 | 12,0 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 3,8 | 0,8 | 1,1 | 2,1 | 2,2 | 2,0 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 4,1 | 4,5 | 3,1 | 4,1 | 4,3 | 4,0 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 4,5 | 5,3 | 7,1 | 8,4 | 4,4 | 6,0 |
| Δ , % | | | | 6,9 | 7,3 | 7,1 | 8,0 | 8,1 | 7,5 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 К, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 24,8 | 24,0 | 26,0 | 27,7 | 27,0 | 25,9 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 14,2 | 11,2 | 15,0 | 16,2 | 15,0 | 14,3 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 20,1 | 20,5 | 22,1 | 23,8 | 23,5 | 22,0 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,0 | 1,7 | 2,4 | 4,9 | 4,8 | 2,8 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 18,2 | 17,5 | 15,0 | 16,8 | 15,8 | 16,7 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 6,7 | 3,1 | 8,7 | 12,6 | 12,5 | 8,7 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 13,6 | 7,6 | 9,1 | 10,0 | 10,2 | 10,1 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 11,1 | 5,3 | 3,4 | 3,8 | 3,8 | 5,5 |
| Δ , % | | | | 13,6 | 11,4 | 12,7 | 14,5 | 14,1 | 13,2 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Р

Таблица Р.1 - Результаты экспериментальной оценки коэффициента шлифования K

| Режимы обработки | | | | Среднее значение коэффициента шлифования K | | | | | \bar{K} |
|--|-------------------|----------|------------------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------|
| $S_{пр}$, м/с | $V_{кр}$, м/с | t , мм | $S_{Поп}$, мм/дв. ход | ВТ-1 (гр. I) | ВТ-14 (гр. II) | ВТ-6 (гр. III) | ВТ-9 (гр. IV) | ВТ-22 (гр. V) | |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - воздух | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,94 | 0,82 | 0,77 | 0,73 | 0,70 | 0,79 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,75 | 0,69 | 0,66 | 0,63 | 0,62 | 0,67 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 0,87 | 0,72 | 0,69 | 0,71 | 0,62 | 0,72 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,62 | 0,62 | 0,57 | 0,59 | 0,55 | 0,59 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,62 | 0,50 | 0,49 | 0,43 | 0,43 | 0,49 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,56 | 0,47 | 0,48 | 0,44 | 0,36 | 0,46 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,62 | 0,49 | 0,45 | 0,40 | 0,39 | 0,47 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,51 | 0,40 | 0,38 | 0,32 | 0,27 | 0,38 |
| \bar{K} | | | | 0,69 | 0,59 | 0,56 | 0,53 | 0,49 | 0,57 |
| Прерывистый круг 63С 10-Н СМ1-5 В, охлаждение - СОЖ | | | | | | | | | |
| 0,05 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,18 | 1,08 | 1,05 | 0,97 | 1,01 | 1,06 |
| 0,05 | 49 | 0,005 | 7,5 | 1,04 | 0,98 | 0,96 | 0,82 | 0,86 | 0,93 |
| 0,25 | 19 | 0,005 | 7,5 | 1,12 | 1,04 | 1,05 | 0,96 | 0,96 | 1,03 |
| 0,25 | 49 | 0,005 | 7,5 | 0,96 | 0,87 | 0,86 | 0,79 | 0,76 | 0,85 |
| 0,05 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,68 | 0,62 | 0,57 | 0,50 | 0,52 | 0,58 |
| 0,05 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,61 | 0,50 | 0,46 | 0,40 | 0,48 | 0,49 |
| 0,25 | 19 | 0,105 | 7,5 | 0,66 | 0,51 | 0,53 | 0,47 | 0,45 | 0,52 |
| 0,25 | 49 | 0,105 | 7,5 | 0,56 | 0,43 | 0,39 | 0,36 | 0,34 | 0,42 |
| \bar{K} | | | | 0,85 | 0,75 | 0,73 | 0,66 | 0,67 | 0,73 |

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Результаты определения параметров регрессионных моделей зависимости значений целевых параметров от варьируемых факторов обработки

| Таблица 1 - Уровни и интервалы варьирования натуральных значений факторов | | | | | | | Таблица 2 - Зависимость кодированных величин факторов X от натуральных значений | | | | | | | | | |
|---|--------------|---|------|-----|-------|------|---|-----------------|---------------|-------------|----------------|--------------|--------|--------|-------|-------|
| Уровни факторов | | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | Примечание | Вид зависимости | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | | | |
| | Код | Использование СОЖ (1 - да, -1 - нет) | Vn | Vkr | t | ов | | - | (Vn-0,15)/0,1 | (Vkr-34)/15 | (t-0,055)/0,05 | (ов-869)/404 | | | | |
| Верхний | 1 | 1 | 0,25 | 49 | 0,105 | 1273 | BT-22 (гр. V) | | | | | | | | | |
| Нижний | -1 | -1 | 0,05 | 19 | 0,005 | 465 | BT-1-00 (гр. I) | | | | | | | | | |
| Основной | 0 | 0 | 0,15 | 34 | 0,055 | 869 | - | | | | | | | | | |
| Интервал варьирования | ΔX_i | 1 | 0,1 | 15 | 0,05 | 404 | - | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | -0,516 | -0,024 | -0,595 | 0,036 | 0,527 |

| Таблица 4 - Определение значений коэффициентов парной линейной корреляции r _i | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--|--|--|
| | X1X2 | X1X3 | X1X4 | X1X5 | X1Y | X2Y | X3Y | X4Y | X5Y | | | |
| | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | -0,516 | -0,024 | -0,595 | 0,036 | 0,527 | | | |

| Таблица 3 - Матрица ПФЭ 2 ⁵ | | | | | | | |
|--|-------|-----|----|-----|----|----|--------|
| N | Yon. | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | Yрегр. |
| | Ra | СОЖ | Vn | Vkr | t | ов | |
| 1 | 0,153 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,150 |
| 2 | 0,127 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,130 |
| 3 | 0,148 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0,150 |
| 4 | 0,123 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0,130 |
| 5 | 0,154 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,150 |
| 6 | 0,128 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,130 |
| 7 | 0,149 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,150 |
| 8 | 0,124 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,130 |
| 9 | 0,175 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,167 |
| 10 | 0,146 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,148 |
| 11 | 0,17 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,167 |
| 12 | 0,142 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,148 |
| 13 | 0,177 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,167 |
| 14 | 0,148 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,148 |
| 15 | 0,172 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,167 |
| 16 | 0,144 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,148 |
| 17 | 0,125 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,133 |
| 18 | 0,122 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,113 |
| 19 | 0,13 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0,133 |
| 20 | 0,117 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0,113 |
| 21 | 0,135 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,133 |
| 22 | 0,115 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,113 |
| 23 | 0,129 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,133 |
| 24 | 0,123 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,113 |
| 25 | 0,142 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,150 |
| 26 | 0,127 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,130 |
| 27 | 0,155 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,150 |
| 28 | 0,131 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,130 |
| 29 | 0,139 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,150 |
| 30 | 0,136 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,130 |
| 31 | 0,148 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,150 |
| 32 | 0,131 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,130 |
| Yon. cp. = | 0,140 | | | | | | Σ = |

| Таблица 5 - Оценка значимости коэффициентов уравнения | | |
|--|--------|-----------|
| Параметр | X5 | X1 |
| Tr _i = b _i / S(b _i) | 8,459 | 0,391 |
| Tr (0,05; v=26) | 2,0555 | |
| Значимость | Значим | Не значим |

| Таблица 6 - Оценка значимости факторов | | | |
|--|----------|------------|-----------------|
| табл | Значение | Значимость | ткр (0,05; N-2) |
| t(X1Y) | 3,30 | Значим | 2,0423 |
| t(X2Y) | 0,13 | Не значим | |
| t(X3Y) | 4,05 | Значим | |
| t(X4Y) | 0,20 | Не значим | |
| t(X5Y) | 3,40 | Значим | |

| Вид уравнения множественной регрессии после отсева факторов | | |
|---|--|--|
| Yрегр. = 0,14016 - 0,008594 * X1 - 0,009906 * X3 + 0,008781 * X5 | | |

| | |
|-------------------|--------------------------|
| R ² = | 0,897201311 |
| Fp = | 81,46 |
| Ft(0,05; 3; 26) = | 2,98 |
| Вывод | Уравнение надежно |

Продолжение приложения С

| Уровни факторов | | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | Примечание | Вид зависимости | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | | | |
|-----------------|--------------|---|------|-----|-------|------|-----------------|---|-------|---------------|-------------|----------------|--------------|-------|-------|-------|
| | Код | Использование СОЖ (1 - да, -1 - нет) | Vn | Vkr | t | σв | | | - | (Vn-0,15)/0,1 | (Vkr-34)/15 | (t-0,055)/0,05 | (σв-869)/404 | | | |
| Верхний | 1 | 1 | 0,25 | 49 | 0,105 | 1273 | BT-22 (гр. V) | | | | | | | | | |
| Нижний | -1 | -1 | 0,05 | 19 | 0,005 | 465 | BT-1-00 (гр. I) | Таблица 4 - Определение значений коэффициентов парной линейной корреляции r_i | | | | | | | | |
| Основной | 0 | 0 | 0,15 | 34 | 0,055 | 869 | - | X1X2 | X1X3 | X1X4 | X1X5 | X1Y | X2Y | X3Y | X4Y | X5Y |
| Интервал варь | ΔX_i | 1 | 0,1 | 15 | 0,05 | 404 | - | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,077 | -0,608 | 0,189 | 0,363 | 0,387 |

| N | W(ув) | y(пр.) (расчет) | Уоп. у(дин.) | X1 СОЖ | X2 Vn | X3 Vkr | X4 t | X5 σв | Урегр. | Уоп.-Уоп.ср.) ² | (Уоп.-Урегр.) ² | (Урегр.- Уоп.ср.) ² |
|----|-------|-----------------|-----------------|-----------|----------|-----------|---------|----------|--------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 1,3 | 1,2 | 0,100 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,219 | 0,11390625 | 0,01410156 | 0,04785156 |
| 2 | 0,9 | 0,2 | 0,700 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,219 | 0,06890625 | 0,23160156 | 0,04785156 |
| 3 | 4,7 | 5 | -0,300 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1,669 | 0,54390625 | 1,87347656 | 4,43628906 |
| 4 | 3,5 | 4,6 | -1,100 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1,669 | 2,36390625 | 0,32347656 | 4,43628906 |
| 5 | 2,2 | 1,2 | 1,000 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1,344 | 0,31640625 | 0,11816406 | 0,82128906 |
| 6 | 0,8 | 0,2 | 0,600 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1,344 | 0,02640625 | 0,55316406 | 0,82128906 |
| 7 | 25,9 | 29,1 | -3,200 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -0,544 | 13,23140625 | 7,05566406 | 0,96285156 |
| 8 | 4,1 | 4,6 | -0,500 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -0,544 | 0,87890625 | 0,00191406 | 0,96285156 |
| 9 | 1,6 | 1,2 | 0,400 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1,419 | 0,00140625 | 1,03785156 | 0,96285156 |
| 10 | 0,7 | 0,2 | 0,500 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1,419 | 0,00390625 | 0,84410156 | 0,96285156 |
| 11 | 4,1 | 5 | -0,900 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -0,469 | 1,78890625 | 0,18597656 | 0,82128906 |
| 12 | 4,1 | 4,6 | -0,500 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -0,469 | 0,87890625 | 0,00097656 | 0,82128906 |
| 13 | 4,3 | 1,2 | 3,100 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2,544 | 7,08890625 | 0,30941406 | 4,43628906 |
| 14 | 3,7 | 0,2 | 3,500 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 2,544 | 9,37890625 | 0,91441406 | 4,43628906 |
| 15 | 29 | 29,1 | -0,100 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,656 | 0,28890625 | 0,57191406 | 0,04785156 |
| 16 | 6,4 | 4,6 | 1,800 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,656 | 1,85640625 | 1,30816406 | 0,04785156 |
| 17 | 1,2 | 1,2 | 0,000 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,219 | 0,19140625 | 0,04785156 | 0,04785156 |
| 18 | 1,1 | 0,2 | 0,900 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,219 | 0,21390625 | 0,46410156 | 0,04785156 |
| 19 | 4,2 | 5 | -0,800 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1,669 | 1,53140625 | 0,75472656 | 4,43628906 |
| 20 | 3,9 | 4,6 | -0,700 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1,669 | 1,29390625 | 0,93847656 | 4,43628906 |
| 21 | 3,1 | 1,2 | 1,900 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1,344 | 2,13890625 | 0,30941406 | 0,82128906 |
| 22 | 1,7 | 0,2 | 1,500 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1,344 | 1,12890625 | 0,02441406 | 0,82128906 |
| 23 | 28 | 29,1 | -1,100 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -0,544 | 2,36390625 | 0,30941406 | 0,96285156 |
| 24 | 3 | 4,6 | -1,600 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -0,544 | 4,15140625 | 1,11566406 | 0,96285156 |
| 25 | 1,7 | 1,2 | 0,500 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1,419 | 0,00390625 | 0,84410156 | 0,96285156 |
| 26 | 0,7 | 0,2 | 0,500 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1,419 | 0,00390625 | 0,84410156 | 0,96285156 |
| 27 | 4 | 5 | -1,000 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -0,469 | 2,06640625 | 0,28222656 | 0,82128906 |
| 28 | 4,3 | 4,6 | -0,300 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -0,469 | 0,54390625 | 0,02847656 | 0,82128906 |
| 29 | 3,9 | 1,2 | 2,700 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2,544 | 5,11890625 | 0,02441406 | 4,43628906 |
| 30 | 4,4 | 0,2 | 4,200 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 2,544 | 14,15640625 | 2,74316406 | 4,43628906 |
| 31 | 29,1 | 29,1 | 0,000 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,656 | 0,19140625 | 0,43066406 | 0,04785156 |
| 32 | 6,8 | 4,6 | 2,200 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,656 | 3,10640625 | 2,38316406 | 0,04785156 |
| | | Уоп.ср.= | 0,438 | | | | | | Σ= | 77,03500000 | 26,88875000 | 50,14625000 |

| | X5 | X4 | X3 | X2 | X1 | e |
|----------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| b _i | 0,600000 | 0,562500 | 0,293750 | -0,943750 | 0,118750 | 0,437500 |
| S{b _i }=σ | 0,16869212 | 0,16869212 | 0,16869212 | 0,16869212 | 0,16869212 | 0,16869212 |
| R2 | 0,692655936 | 0,954266734 | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д |
| Frасч | 11,71914894 | 26 | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д |
| SS | 53,35875 | 23,67625 | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д |

| Параметр | X5 | X4 | X3 | X2 | X1 |
|---|--------|--------|-----------|--------|-----------|
| Tr _i = b _i /S{b _i } | 3,557 | 3,334 | 1,741 | 5,595 | 0,704 |
| Tr (0,05;v=26) | 2,0555 | | | | |
| Значимость | Значим | Значим | Не значим | Значим | Не значим |

| tнабл | Значение | Значимость | tkp (0,05;N-2) |
|--------|----------|------------|----------------|
| t(X1Y) | 0,42 | Не значим | 2,0423 |
| t(X2Y) | 4,20 | Значим | |
| t(X3Y) | 1,06 | Не значим | |
| t(X4Y) | 2,13 | Значим | |
| t(X5Y) | 2,30 | Значим | |

| |
|--|
| $Y_{регр.} = 0,4375 - 0,94375 * X2 + 0,5625 * X4 + 0,6 * X5$ |
|--|

| | |
|------------------|-------------------|
| R ² = | 0,650954112 |
| Fp= | 17,41 |
| Ft(0,05;3;26)= | 2,98 |
| Вывод | Уравнение надежно |

Продолжение приложения С

| Таблица 1 - Уровни и интервалы варьирования натуральных значений факторов | | | | | | | Таблица 2 - Зависимость кодированных величин факторов X от натуральных значений | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|----|------|----|-------|------|---|--|---------------|-------------|----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Уровни факторов | | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | Примечание | Вид зависимости | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | | | |
| Код | Использование СОЖ (1 - да, -1 - нет) | Vn | Vkr | t | ов | - | | | (Vn-0,15)/0,1 | (Vkr-34)/15 | (t-0,055)/0,05 | (ов-869)/404 | | | | |
| Верхний | 1 | 1 | 0,25 | 49 | 0,105 | 1273 | BT-22 (гр. V) | | | | | | | | | |
| Нижний | -1 | -1 | 0,05 | 19 | 0,005 | 465 | BT-1-00 (гр. I) | Таблица 4 - Определение значений коэффициентов парной линейной корреляции ρ_i | | | | | | | | |
| Основной | 0 | 0 | 0,15 | 34 | 0,055 | 869 | - | X1X2 | X1X3 | X1X4 | X1X5 | X1Y | X2Y | X3Y | X4Y | X5Y |
| Интервал варьирования | Δxi | 1 | 0,1 | 15 | 0,05 | 404 | - | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,370 | -0,148 | -0,258 | -0,738 | -0,400 |

| Таблица 3 - Матрица ПФЭ 2 ⁵ | | | | | | | |
|--|-------|----|----|----|----|----|--------|
| N | Уоп. | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | Уперп. |
| 1 | 0,94 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,854 |
| 2 | 0,75 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,854 |
| 3 | 0,87 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0,854 |
| 4 | 0,62 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0,854 |
| 5 | 0,62 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,511 |
| 6 | 0,56 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,511 |
| 7 | 0,62 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,511 |
| 8 | 0,51 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,511 |
| 9 | 0,7 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,668 |
| 10 | 0,62 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,668 |
| 11 | 0,62 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,668 |
| 12 | 0,55 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,668 |
| 13 | 0,43 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,324 |
| 14 | 0,36 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,324 |
| 15 | 0,39 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,324 |
| 16 | 0,27 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,324 |
| 17 | 1,18 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1,027 |
| 18 | 1,04 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1,027 |
| 19 | 1,12 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1,027 |
| 20 | 0,96 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1,027 |
| 21 | 0,68 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,683 |
| 22 | 0,61 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,683 |
| 23 | 0,66 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,683 |
| 24 | 0,56 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,683 |
| 25 | 1,01 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,841 |
| 26 | 0,86 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,841 |
| 27 | 0,96 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,841 |
| 28 | 0,76 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,841 |
| 29 | 0,52 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,497 |
| 30 | 0,48 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,497 |
| 31 | 0,45 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,497 |
| 32 | 0,34 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,497 |
| Уоп. ср. = | 0,676 | | | | | | Σ = |

| Таблица 4 - Параметры уравнения линейной регрессии | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | X5 | X4 | X3 | X2 | X1 |
| bi | -0,093125 | -0,171875 | -0,060000 | -0,034375 | 0,086250 |
| S {bi} =σ | 0,012074488 | 0,012074488 | 0,012074488 | 0,012074488 | 0,012074488 |
| R2 | 0,93009401 | 0,068303621 | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д |
| Fрасч | 69,18561418 | 26 | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д |
| SS | 1,6138875 | 0,1213 | #Н/Д | #Н/Д | #Н/Д |

| Таблица 5 - Оценка значимости коэффициентов уравнения | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Параметр | X5 | X4 | X3 | X2 | X1 |
| Tри= bi / S{bi} | 7,713 | 14,235 | 4,969 | 2,847 | 7,143 |
| Tт (0,05;v=26) | 2,0555 | | | | |
| Значимость | Значим | Значим | Значим | Значим | Значим |

| Таблица 6 - Оценка значимости факторов | | | |
|--|----------|------------|----------------|
| tнабл | Значение | Значимость | tкр (0,05;N-2) |
| t(X1Y) | 2,18 | Значим | 2,0423 |
| t(X2Y) | 0,82 | Не значим | |
| t(X3Y) | 1,46 | Не значим | |
| t(X4Y) | 5,99 | Значим | |
| t(X5Y) | 2,39 | Значим | |

| Вид уравнения множественной регрессии после отсева факторов | |
|---|--|
| Уперп. = | 0,675625+0,086250*X1-0,171875*X4-0,093125*X5 |

| | |
|------------------|-------------------|
| R ² = | 0,841911897 |
| Fp = | 49,71 |
| Fт(0,05;3;26) = | 2,98 |
| Вывод | Уравнение надежно |

ПРИЛОЖЕНИЕ Т

УТВЕРЖДАЮ:

Главный технолог

ОАО «АВИААГРЕГАТ»

И.М. Постников

17 июля 2025

Для документов

г. Самара

Акт опытно-промышленной проверки

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Гордиенко Ярослава Михайловича, прошли опытно-промышленные испытания на ОАО «Авиаагрегат» и были внедрены на операциях плоского шлифования.

Опытно-промышленные испытания выполнялись в условиях обработки деталей «Цилиндр» и «Цапфа», выполненных из марок сплавов ВТ-6 и ВТ-22 соответственно, объем выборки - 8 и 6 деталей. Результаты опытно-промышленных испытаний разработанной конструкции круга приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты опытно-промышленных испытаний результатов научно-исследовательской работы Гордиенко Ярослава Михайловича

| Параметр | Базовый техпроцесс | | Предложенный техпроцесс | |
|---|---|-------|--|-------------|
| | Цилиндр | Цапфа | Цилиндр | Цапфа |
| Наименование изделия | Цилиндр | Цапфа | Цилиндр | Цапфа |
| Требования к качеству обработанной поверхности | [Ra] = 0,2 мкм, [W] = 10 мкм | | | |
| Инструмент | Круг сплошной $D_k = 500$ мм, $b_k = 40$ мм, $d = 127$ мм, абразив - 63С 10-Н СМ1-5 К | | Круг прерывистый $D_k = 500$ мм, $b_k = 30$ мм, $d = 127$ мм, $h_{сегм} \times b_{сегм} = 20 \times 40$ мм, $l_{сегм} = 70$ мм, 63С 10-Н СМ1-5 В | |
| Режим обработки | $t = 0,01$ мм, $V_{п} = 0,25$ м/с, $V_{кр} = 32$ м/с, $S_{поп} = 10$ мм/дв. ход. | | $t = 0,01$ мм, $V_{п} = 0,25$ м/с, $V_{кр} = 45$ м/с, $S_{поп} = 10$ мм/дв. ход. | |
| Средняя шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм | 0,114 | 0,121 | 0,135 | 0,129 |
| Средняя высота профиля волнистости W, мкм | 0,9 | 1,4 | 2,4 | 2,1 |
| Среднее фактическое машинное время обработки T_m , ч | 0,21 | 0,29 | 0,16 | 0,23 |
| Наработка круга N, шт. | 171 | 125 | 124 | 109 |
| Доля объема партии деталей с дефектами типа «прижог», шт. | 2 | 2 | отсутствует | отсутствует |

Продолжение приложения Т

По итогам проведенных опытно-промышленных испытаний, была установлена эффективность результатов исследовательской работы, что выражается в устранении брака, связанного с дефектами типа «прижог», на $12 \div 17\%$, при достижении требуемым параметрам показателей качества обработанной поверхности.

В связи с положительными результатами опытно-промышленных испытаний, принято решение о внедрении результатов исследований Гордиенко Я.М. в действующее производство ОАО «Авиаагрегат».

Начальник отдела главного технолога



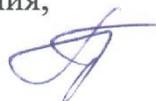
В.Н. Масов

Начальник бюро механической обработки ОГТ



к.т.н. В.А. Парфенов

Доцент кафедры «Технология машиностроения,
станки и инструменты»



к.т.н. Р.Г. Гришин

ПРИЛОЖЕНИЕ У



Россия, 443022, г. Самара, Заводское шоссе, 3,
т/факс 955-04-58, 372-12-55
e-mail: sekretar@agregat63.ru
ИНН/ ОГРН 6318103898/1026301505603

АКТ

опытно-промышленных испытаний прерывистого шлифовального круга на вулканитовой связке, представленной в диссертационной работе Гордиенко Я.М.

Цель испытаний: оценка технологической эффективности применения прерывистого шлифовального круга на вулканитовой связке при обработке деталей из титанового сплава ВТ-6.

Условия проведения испытаний:

1. Вид обработки: плоское шлифование периферией круга
2. Оборудование: плоскошлифовальный станок ОП-400
3. Режимы обработки: глубина шлифования: 0,01 мм; окружная скорость круга: 49 м/с; поперечная подача: 10 мм/двойной ход; продольная подача: 0,25 м/мин
4. Конфигурация инструмента: диаметр круга - 200 мм, количество абразивных сегментов - 16 шт.; размер абразивных сегментов: 30×20 мм; характеристики абразива: бруски БП 30×20×200 63С 10-Н СМ1-5 на вулканитовой связке
5. Обрабатываемый материал: Титан марки ВТ-6
6. Требуемая шероховатость: Ra 0,1-0,5 мкм

Контролируемые параметры:

1. Показатель шероховатости поверхности (Ra)
2. Количество деталей с дефектами "прижог" в партии

Результаты испытаний:

1. Обработана партия деталей «Заслонка» в количестве 50 шт.
2. Достигнутая шероховатость: Ra 0,1-0,3 мкм
3. Снижение брака по дефектам "прижог": 18%

Выводы

Применение прерывистого шлифовального круга на вулканитовой связке позволяет повысить производительность обработки на 20%, снизить процент бракованных деталей на 18%, обеспечить стабильное качество поверхности в пределах Ra 0,1-0,3 мкм

Первый заместитель генерального
директора




В.В. Усачев

ПРИЛОЖЕНИЕ Ф



УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор-проректор
по учебной работе д.э.н., профессор
Д.Е. Овчинников

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы в образовательный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «Повышение эффективности шлифования заготовок деталей из титановых сплавов за счет рационального применения прерывистых кругов на вулканитовой связке», выполненного аспирантом кафедры «Технология машиностроения станки и инструменты» Гордиенко Ярославом Михайловичем, принята для использования в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» при изучении дисциплин «Основы технологии машиностроения», «Прикладные задачи технологии машиностроения», а также дисциплин «Научные основы технологии машиностроения» и «Методологии научных исследований», входящих в образовательную программу подготовки магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль «Технология машиностроения», кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО СамГТУ.

При подготовке лекционных курсов, практических и лабораторных работ, а также курсовому проектированию были использованы следующие материалы диссертации:

1. Конструкция прерывистого шлифовального круга.
2. Инженерная методика выбора оптимальных параметров технологической системы плоского прерывистого шлифования периферией круга, учитывающая их взаимное влияние на выходные параметры обработки.
3. Аналитическая и электронная тепловые модели плоского прерывистого шлифования титановых сплавов.
4. Регрессионные модели шероховатости, динамической составляющей высоты волнистости, а также коэффициента шлифования для условий прерывистого шлифования титановых сплавов.

СОГЛАСОВАНО:

Начальник учебного управления

Е.А. Алонцева

Декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта д.т.н., профессор

К.В. Никитин

И.о. зав. кафедрой технология машиностроения, станки и инструменты, к.т.н

А.Р. Галлямов