

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Полтавец Валерий Васильевич

В.Полтавец

УДК 621.923

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ШЛИФОВАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СТАЛЕЙ
И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ
С УЧЁТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССА**

05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Матюха Пётр Григорьевич

Идентичность всех экземпляров диссертации
ПОДТВЕРЖДАЮ:

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 01.014.02, д-р техн. наук, профессор **С.И. Ерошкo**



Донецк – 2020

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	10
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	20
1.1 Потребность экономики в труднообрабатываемых инструментальных и конструкционных материалах	20
1.1.1 Производство и потребление специальных и инструментальных сталей в России, на Украине и в странах СНГ.....	20
1.1.2 Производство и потребление твердых сплавов в России, на Украине и в странах СНГ	22
1.1.3 Производство и перспективы использования титановых сплавов на Украине и в мире	26
1.2 Обрабатываемость резанием инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов	32
1.3 Обеспечение эффективности алмазного шлифования за счёт использования различных схем шлифования	38
1.3.1 Шлифование с фиксированными режимами обработки	38
1.3.2 Шлифование с постоянной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга	40
1.4 Повышение эффективности обработки за счёт определения оптимальных режимов резания при шлифовании	43
1.4.1 Сущность аналитического способа определения режимов резания при шлифовании	43
1.4.2 Существующие способы оптимизации режимов шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов	48
1.5 Основные принципы математического описания процесса шлифования по различным схемам	64

1.5.1 Математическое описание процесса шлифования с фиксированными режимами обработки	64
1.5.2 Математическое описание процесса шлифования с фиксированной поджима заготовки к рабочей поверхности круга ..	71
1.6 Использование шлифования с постоянной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга для определения фиксированных режимов обработки шлифованием	78
1.7 Постановка цели и задач исследований	80
РАЗДЕЛ 2 МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОБОРУДОВАНИЕ. ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ИНСТРУМЕНТЫ. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ	84
2.1 Методология исследований	84
2.2 Применяемое оборудование	87
2.2.1 Модернизация плоскошлифовального станка модели 3Д711АФ11	87
2.2.2 Модернизация плоскошлифовального станка модели 3Г71	91
2.2.3 Подвод электрической энергии	92
2.3 Применяемая оснастка	93
2.3.1 Устройство для электроэрозионных воздействий на РПК в автономной зоне	93
2.3.2 Устройство для реализации шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга	95
2.3.3 Устройство для измерения расхода алмазов при шлифовании и визуального контроля состояния РПК	97
2.4 Обрабатываемые и инструментальные материалы	100
2.4.1 Характеристики инструментальных сталей	100
2.4.2 Характеристики твердых сплавов	103
2.4.3 Характеристики титановых сплавов	104
2.4.4 Характеристики шлифовальных кругов	105

2.5 Методики исследований	106
2.5.1 Методика определения количества сошлифованного материала	106
2.5.2 Методика определения расхода алмазов	109
2.5.3 Методика определения высотного параметра шероховатости обработанной поверхности	111
РАЗДЕЛ 3 ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ВОЗМОЖНЫХ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССА	
113	
3.1 Исходные условия при оптимизации режимов с учетом нестационарности процесса	113
3.2 Обоснование схемы врезного шлифования с постоянным усилием поджима заготовки к РПК	114
3.3 Выбор способа формирования параметров РПК с помощью электроэрозионной правки	118
3.4 Определение сопротивления деформации труднообрабатываемых сталей в условиях шлифования с помощью термомеханических коэффициентов	121
3.5 Выбор управляемого режимного параметра для обеспечения максимальной производительности обработки	126
3.6 Интегральное техническое ограничение на режим шлифования, обеспечивающее требуемые показатели качества обработанной поверхности и максимальную производительность обработки	131
3.7 Область возможных режимов шлифования при изменении режущей способности круга в процессе обработки	135
3.8 Последовательность поиска рациональных режимов шлифования для схемы шлифования с фиксированными режимами с учетом нестационарности процесса	139
3.9 Выводы	141

РАЗДЕЛ 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ, НАЛАГАЕМЫХ НА РЕЖИМ ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЕМ И ШЛИФОВАЛЬНЫМ КРУГОМ	144
4.1 Расчет скорости детали, ограниченной параметрами шероховатости обработанной поверхности	144
4.2 Определение усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного температурой фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемого материала	152
4.3 Определение усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного температурой окисления алмазных зёрен	155
4.4 Определение усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного механической прочностью алмазных зёрен	166
4.5 Определение обобщенных режимов шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к рабочей поверхности круга	171
4.6 Выводы	172
РАЗДЕЛ 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ	173
5.1 Выбор способа управления характеристиками инструмента в технологической системе шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов	173
5.2 Определение рациональных режимов при шлифовании без электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга	182
5.3 Определение оптимальных режимов при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга ...	184
5.3.1 Способы стабилизации режущей способности рабочей поверхности круга	184
5.3.2 Определение оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки	189
5.4 Выводы	200

РАЗДЕЛ 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ, ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	201
6.1 Определение режимов плоского шлифования инструментальных ванадиевых сталей	201
6.1.1 Определение коэффициента, учитывающего влияние пластических свойств материала на параметры шероховатости шлифованной поверхности для стали Р6М5Ф3	201
6.1.2 Расчет технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и шифровальным кругом	202
6.1.3 Влияние зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга при шлифовании стали Р6М5Ф3	205
6.1.4 Определение рациональных режимов шлифования стали Р6М5Ф3 при отсутствии электроэрозионных воздействий на РПК ...	209
6.1.5 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании стали Р6М5Ф3 с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК	210
6.1.6 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании с фиксированными режимными параметрами стали Р6М5Ф3 с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК	217
6.1.7 Проверка оптимальности найденных значений средней силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий	220
6.1.8 Техничко-экономические показатели шлифования стали Р6М5Ф3 различными способами	221
6.2 Определение режимов плоского шлифования твердых сплавов группы ВК	223

6.2.1	Определение коэффициента, учитывающего влияние особенностей разрушения материала на параметры шероховатости шлифованной поверхности для твердого сплава группы ВК	223
6.2.2	Расчет технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и шифровальным кругом	226
6.2.3	Влияние зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга при шлифовании твердого сплава ВК8	230
6.2.4	Определение рациональных режимов шлифования твердого сплава ВК8 при отсутствии электроэрозионных воздействий на РПК	233
6.2.5	Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании твердого сплава ВК8 с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК	234
6.2.6	Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании твердого сплава ВК8 с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК и назначение глубины шлифования по схеме с фиксированными режимными параметрами	240
6.2.7	Технико-экономические показатели шлифования твердого сплава ВК8 различными способами	241
6.3	Определение режимов плоского шлифования титанового сплава ВТ14	243
6.3.1	Определение коэффициента, учитывающего влияние пластических свойств материала на параметры шероховатости шлифованной поверхности для титанового сплава ВТ14	243
6.3.2	Расчет технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и шифровальным кругом	249
6.3.3	Влияние зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга при шлифовании титанового сплава ВТ14	253

6.3.4	Определение рациональных режимов шлифования титанового сплава ВТ14 при отсутствии электроэрозионных воздействий на РПК	256
6.3.5	Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании титанового сплава ВТ14 с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК	257
6.3.6	Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании с фиксированными режимными параметрами титанового сплава ВТ14 с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК	264
6.3.7	Технико-экономические показатели шлифования титанового сплава ВТ14 различными способами	266
6.4	Выводы	268
РАЗДЕЛ 7 ВЛИЯНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВЫХОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ		
7.1	Влияние обрабатываемых материалов на установившиеся значения текущей лимитированной режущей способности и текущего расхода алмазов алмазных шлифовальных кругов из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей	270
7.2	Влияние обрабатываемых материалов на удельную себестоимость шлифования алмазными шлифовальными кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей с периодическими электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК	272
7.3	Выбор способа управления режущей способностью шлифовальных кругов на основе кубического нитрида бора	273
7.4	Исследование точности определения силовых факторов процесса шлифования с применением термомеханических коэффициентов	276

7.4.1 Погрешность определения составляющих силы резания при шлифовании с применением термомеханических коэффициентов	276
7.4.2 Сопротивление обрабатываемого материала деформированию с учётом скорости деформации при обработке шлифованием	279
7.5 Определение относительного вклада процессов изнашивания зёрен и засаливания межзёрненного пространства в ухудшение режущей способности рабочей поверхности шлифовального круга	287
7.6 Внедрение результатов исследований	292
7.6.1 Разработка новых способов шлифования	292
7.6.2 Внедрение результатов исследований в производство	295
7.6.3 Внедрение результатов исследований в учебный процесс	298
7.7 Выводы	299
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	301
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	305
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Исходные данные для расчета усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных изделием и шлифовальным кругом, при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3, твердых сплавов группы ВК и титанового сплава ВТ14	327
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Определение сил поджима заготовки к кругу по техническим ограничениям при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3	332
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Определение сил поджима заготовки к кругу по техническим ограничениям при обработке твердых сплавов группы ВК	372
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Определение сил поджима заготовки к кругу по техническим ограничениям при обработке титанового сплава ВТ14	409
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Описания патентов на новые способы шлифования	446
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Акты и справки о внедрении разработок, выполненных в диссертационной работе, в производство и учебный процесс	461

Актуальность темы исследования. Шлифовальные круги из сверхтвёрдых материалов (СТМ) широко применяются в машиностроительном и инструментальном производстве при обработке высокопрочных труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных материалов: быстрорежущих сталей повышенной производительности, штамповых ванадийсодержащих сталей, твёрдых сплавов и титановых сплавов. Использование шлифовального инструмента на металлических связках, которые способны прочно удерживать зерна СТМ, обуславливает необходимость использования отдельных средств для управления режущей способностью шлифовальных кругов путём осуществления дополнительных управляющих воздействий на рабочую поверхность круга (РПК), например, в форме электроэрозионных воздействий (ЭЭВ).

При шлифовании кругами из СТМ производительность обработки является в наибольшей мере следствием эффективного использования режущих свойств инструмента. Основными направлениями повышения эффективности работы шлифовального инструмента является увеличение доли зёрен СТМ, выполняющих полезную работу по разрушению, диспергированию и удалению обрабатываемого материала, уменьшение доли зёрен, удаляемых с РПК без совершения полезной работы, и повышение нагрузки на единичное зерно вплоть до допустимой по техническим ограничениям. Положительные результаты, достигнутые в указанных направлениях, обеспечат технико-экономический эффект при осуществлении процессов алмазно-абразивной обработки за счёт снижения трудоёмкости процесса, уменьшения затрат на технологическую электроэнергию и уменьшения расхода дорогостоящих инструментальных материалов.

Основные трудности в выполнении теоретических и прикладных работ по увеличению показателей эффективности работы шлифовального инструмента из СТМ обусловлены явно выраженной нестационарностью процессов обработки изделий указанным инструментом, его высокой стоимостью и наличием тесной

корреляционной связи между величиной затрат на инструмент и условиями протекания процессов обработки и восстановления режущих свойств инструмента.

В связи с тем, что годовой объём абразивной обработки и обработки кругами из СТМ изделий из рассматриваемых групп высокопрочных труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных материалов в обрабатывающей промышленности России оценивается суммой около 400-500 млн. руб, то определение оптимальных или рациональных режимов обработки, обеспечивающих повышение эффективности шлифования труднообрабатываемых материалов кругами из СТМ, выражающееся в снижении трудоёмкости процесса обработки, уменьшении затрат на технологическую электроэнергию и уменьшении расхода дорогостоящих инструментальных материалов представляет собой важную хозяйственную проблему, решение которой приведёт к получению существенного технико-экономического результата.

Степень разработанности темы. Вопросами повышения эффективности шлифования инструментами из СТМ и разработки методов определения оптимальных режимов алмазно-абразивной обработки занимались ученые научных школ по технологии машиностроения и резанию материалов Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Московского государственного технологического университета «Станкин», Брянского государственного технического университета, Омского государственного технического университета, Самарского государственного технического университета, Севастопольского государственного университета, Тольяттинского государственного университета, Южно-Уральского государственного университета, Института сверхтвёрдых материалов им. В.М. Бакуля (г. Киев), Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Сумского национального университета, Одесского национального технического университета, Черниговского государственного технического университета, Белорусского национального технического университета.

Отдельные вопросы по методикам выбора оптимальных режимов алмазно-абразивной обработки для инструмента или станков собственного производства раскрывают инструментальные и станкостроительные фирмы Rappold Winterthur Technologie GmbH (Австрия-Швейцария), TYROLIT CEE k.s. (Австрия), Steinemann Technology AG (Австрия), Blohm Jung GmbH (Германия), Fritz Studer AG (Германия), Norton (США-Франция), Carborundum Grinding Wheel Company (США), Carborundum Schleifmittelfabrik GmbH (Германия).

Как показал анализ имеющейся в научно-технических источниках информации по описанию процесса шлифования, большей частью произошел переход от рассмотрения процесса работы шлифовального круга как стационарного процесса к его представлению в виде квазистационарного процесса или к учёту динамики изменения отдельных факторов в процессе работы шлифовального инструмента. Комплексный показатель процесса алмазно-абразивной обработки, который бы интегрально характеризовал режущую способность шлифовального круга, учитывал её непрерывное изменение в процессе обработки и мог быть использован как динамическое техническое ограничение при поиске оптимальных режимных параметров процесса, в проанализированных источниках информации не выделен.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является обеспечение минимальной удельной себестоимости шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твёрдых и титановых сплавов кругами из СТМ за счёт наиболее полного использования динамически изменяющихся режущих свойств рабочей поверхности круга в заданных условиях проведения обработки путём оптимизации режимных параметров процесса с использованием в качестве характеристики нестационарности процесса текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

– проанализировать современные способы повышения эффективности шлифования труднообрабатываемых конструкционных, инструментальных сталей и

сплавов и определить приоритетные в настоящее время тенденции совершенствования методик определения режимов резания при шлифовании;

– разработать научные основы оптимизации режимных параметров шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов кругами из СТМ с учётом нестационарности процесса обработки;

– разработать способы оптимизации режимов алмазного шлифования без управляющих воздействий и алмазного шлифования с периодическим восстановлением режущих свойств РПК с помощью электроэрозионных управляющих воздействий с учётом нестационарности процесса;

– определить технико-экономические показатели алмазного шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей и сплавов при обработке без управляющих воздействий на рациональных режимах, а также при обработке с непрерывными и периодическими управляющими ЭЭВ на оптимальных режимах;

– исследовать влияние характеристик обрабатываемых материалов на выходные показатели процесса обработки заготовок из труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов шлифовальными кругами из СТМ, внедрить результаты исследований.

Объект исследования. Процесс плоского шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов кругами из сверхтвердых материалов на металлической связке без управляющих воздействий и с электроэрозионными управляющими воздействиями на рабочую поверхность круга.

Предмет исследования. Закономерности изменения во времени параметров процесса плоского шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов кругами из сверхтвердых материалов на металлической связке без управляющих воздействий и с электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК при фиксированной силе поджима заготовки к кругу.

Научная новизна полученных результатов.

1. Получила развитие классическая теоретико-экспериментальная методика оптимизации режимов алмазно-абразивной обработки, состоящее в учете нестационарности процесса путём использования динамически изменяющегося во время обработки технического ограничения, в качестве которого впервые использована поверхность, образованная семейством кривых, описывающих изменение текущей лимитированной фактической глубины шлифования.

2. Получила развитие основанная на геометрическом копировании профилем риски на обработанной поверхности профиля режущей части абразивно-алмазного зерна математическая модель формирования неровностей шлифованной поверхности. Модель дополнена учётом влияния на высотные параметры шероховатости шлифованной поверхности для изделий из твердых сплавов группы ВК хрупкого характера разрушения, а для изделий из двухфазных титановых сплавов со структурой $(\alpha + \beta)$ – пластических деформаций и интенсивного наростообразования в температурно-скоростных условиях, характерных для шлифования кругами из СТМ.

3. Впервые определен относительный вклад процессов изнашивания зёрен и засаливания межзёренного пространства в общее снижение режущей способности РПК при шлифовании труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей.

4. Впервые при определении оптимальной средней величины тока непрерывных электроэрозионных управляющих воздействий на рабочую поверхность шлифовального круга для поддержания его высоких режущих свойств предложено использовать принцип равенства энергий периодических и непрерывных электроэрозионных воздействий.

5. Впервые при определении напряжений сдвига на основе положений теории упругости в температурно-скоростных условиях шлифования конструкционных и инструментальных сталей, а также титановых сплавов, для уточнения значений напряжений сдвига, полученных стандартными методами механических

испытаний, применены термомеханические коэффициенты, учитывающие отличие в скорости и степени деформации.

Теоретическая значимость работы.

1. Разработаны научные основы определения режимных параметров процесса шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов кругами из СТМ с учётом нестационарности процесса обработки.

2. Обосновано применение в качестве количественной характеристики нестационарности процесса шлифования кругами из СТМ текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга.

3. Обосновано использование для определения максимальной режущей способности РПК схемы врезного шлифования, при котором зерно инструментального материала совершает наибольшую полезную работу.

4. Определена функциональная зависимость удельной технологической себестоимости шлифования с периодическим управляющими ЭЭВ, представляющего собой чередование циклов «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», от параметров процесса обработки, которая может быть использована для многопараметрической оптимизации процесса шлифования по критерию минимальной удельной себестоимости обработки. Параметрами оптимизации приняты время формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность шлифовального круга при управляющих ЭЭВ, τ_{np} , и длительность периода шлифования без ЭЭВ T .

5. Определена зависимость текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга и текущего расхода алмазов от времени обработки при шлифовании труднообрабатываемых ванадиевых инструментальных сталей, твердых сплавов группы ВК и двухфазных титановых сплавов со структурой $(\alpha + \beta)$ при различных способах обработки и управления режущей способностью шлифовальных кругов.

Практическая значимость работы.

1. Разработан алгоритм определения рациональных или оптимальных режимных параметров обработки при шлифовании труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов кругами из СТМ с учётом нестационарности процесса обработки.

2. Выбраны и обоснованы методики определения усилий поджима заготовки к РПК при обработке по схеме с фиксированной силой поджима по техническим ограничениям, налагаемым на режим резания температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое обработанной поверхности, температурой окисления алмазов и механической прочностью алмазных зерен.

3. Разработана методика определения напряжений сдвига в условиях шлифования для конструкционных и инструментальных сталей, основанная на применении положений теории упругости и термомеханических коэффициентов.

4. Разработаны рекомендации по выбору способов управления режущей способностью шлифовальных кругов, обеспечивающих минимальную удельную себестоимость плоского алмазного шлифования труднообрабатываемых ванадиевых инструментальных сталей, твердых сплавов группы ВК и двухфазных титановых сплавов со структурой $(\alpha + \beta)$ по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к кругу.

5. На основе технико-экономического анализа процесса шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов с управлением режущей способностью шлифовального круга электроэрозионным способом сформулированы технологические рекомендации по назначению механических режимов обработки, а также режимов непрерывных и периодических управляющих воздействий при обработке указанных материалов.

Методология и методы исследования.

Теоретические исследования в работе основывались на фундаментальных положениях теории резания, общей теории систем, материаловедения, сопротивления материалов, теории упругости, теории оптимизации и методологии техни-

ко-экономического анализа процессов алмазно-абразивной обработки; реализовывались с использованием математических моделей, включающих аналитические и эмпирические составляющие, в среде современных инструментальных средств математического анализа. Полученные результаты не противоречат теоретическим основам технологии машиностроения. Экспериментальные исследования изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга и изменения текущего расхода алмазов при плоском алмазном шлифовании проводились на реальном металлообрабатывающем оборудовании в лабораторных условиях. При обработке результатов проведенных экспериментов опытов применялись общепринятые корректные методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту.

1. Для моделирования и оптимизации процесса шлифования кругами из СТМ по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к кругу с учётом его нестационарности достаточно использовать два обобщенных показателя процесса: 1) текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга, которая описывает изменение режущих свойств шлифовального круга во времени и является характеристикой нестационарности процесса; 2) отношение скорости шлифовального круга к скорости обрабатываемой детали, которое учитывается при обеспечении заданных высотных параметров шероховатости шлифованной поверхности.

2. Производительность восстановления режущих свойств шлифовальных кругов из СТМ с помощью электроэрозионных управляющих воздействий, выполняемых в автономной зоне одновременно со шлифованием или при его прерывании, не зависит от способа осуществления электроэрозионных управляющих воздействий и однозначно определяется количеством подводимой в автономную зону энергии.

3. При шлифовании кругами из СТМ труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, разрушение которых при резании носит преимущественно пластический характер, относительный вклад процессов изнаши-

вания зёрен инструментального материала и засаливания межзёренного пространства в снижение режущей способности РПК характеризуется соотношением 1:2.

Степень достоверности результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием основным положениям теоретических основ технологии машиностроения и теории абразивно-алмазной обработки, корректным использованием методов математического моделирования и математической статистики, а также отсутствием противоречий с данными, полученными в производственных условиях машиностроительных предприятий, и с данными, опубликованными другими исследователями.

Апробация результатов.

Основные результаты исследований и выдвинутые научные положения были доложены и обсуждены на:

- 4-й, 5-й, 8-й Международных научно-технических конференциях «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве» (2001-2003 гг., г. Харьков, Украина);
- I-й, VI – XI-й Международных научно-технических конференциях «Тяжелое машиностроение. Проблемы и перспективы развития» (2003, 2008-2013 гг., г. Краматорск, Украина);
- 3-м, 6-м, 12-м, 13-м, 15-м международных научно-практических семинарах «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (2002, 2005, 2011, 2012, 2014 гг., г. Таганрог, Россия, г. Донецк, Украина);
- VII-й Международной научно-технической конференции «Техника и технологии машиностроения» (2018 г., г. Омск, Россия);
- Международной научно-практической заочной конференции «Инновационные технологии в металлообработке» (посвященной 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., профессора Л.В. Худобина, 2018 г., г. Ульяновск, Россия);
- 4-м междисциплинарном научном форуме «Новые материалы и перспективные технологии» (2018 г., Московская область, Россия);

– IV-й Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве» (2018 г., г. Чебоксары, Россия);

– III-й Международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения» (2019 г., г. Гродно, Беларусь).

В полном объёме диссертационная работа докладывалась на расширенных семинарах кафедры мехатронных систем машиностроительного оборудования ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Структура работы.

Диссертация включает введение, семь разделов, выводы, список использованных источников и приложения.

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Потребность экономики в труднообрабатываемых инструментальных и конструкционных материалах

1.1.1 Производство и потребление специальных и инструментальных сталей в России, на Украине и в странах СНГ

На международной конференции «Спецсталь-Маркет-2008», которая проводилась Российской ассоциацией «Спецсталь» 2 апреля 2008 года в Москве, в отеле Radisson SAS Славянская, была представлена оценка аналитических компаний, согласно которой доля специальных сталей и сплавов в мире (без учета конструкционных сталей) составляет около 2,8 % от общего объема производства стальной продукции или около 31,3 млн. тонн. На долю коррозионностойкой стали приходится около 78 % от общего объема производства специальной стали, доля подшипниковой стали составляет приблизительно 16 %, около 5 % приходится на инструментальную сталь и менее 1% – на жаропрочную [1] (рис. 1.1). По данным ООО «ДСС Глобал Трейдинг» в 2010 году мировое потребление специальных сталей составило 23 млн тонн, что на 21% выше аналогичного показателя 2009 года. При этом объем рынка СНГ составил 1,47 млн тонн [2].

В мире нет единой спецификации специальных сталей. Трудность выработки единого подхода к классификации сталей заключается в выборе критериев, по которым ту или иную сталь можно отнести к специальной. Различие двух основных существующих подходов заключается в том, что в одном случае на первое место ставится применение стали, во втором – степень ее легирования.

Мировые аналитические компании ориентируются на область применения стали и к специальным сталям относят: подшипниковые стали; инструментальные

и быстрорежущие стали, коррозионностойкие (нержавеющие) и жаропрочные стали и сплавы [1].

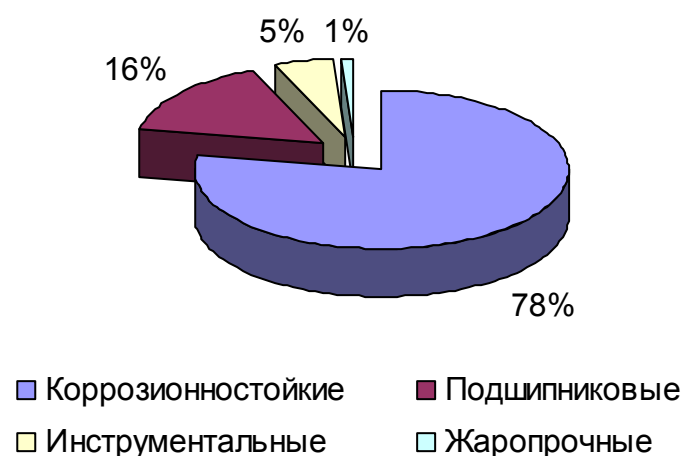


Рисунок 1.1 – Номенклатура специальных сталей в общемировом производстве [1]

приходится приблизительно 56 % от общего объема производства специальной стали, доля коррозионностойкой стали составляет – 32 %, около 10 % приходится на инструментальную сталь и менее 1 % – на жаропрочную. При этом структура российского производства продиктована реально существующими возможностями металлургической промышленности, в то время как структура потребления идентична мировой [1].

Годовое потребление специальных сталей украинским рынком находится на достаточно низком уровне. Ориентировочно на Украине ежегодно потребляется около 32-36 тыс. тонн нержавеющей и специальных сталей. Доля плоского проката – около 65 %, доля сортового проката – 20%, нержавеющая труба (сварная и бесшовная) занимает 15 % в общем объеме рынка нержавеющей и специальных сталей [2].

Если экстраполировать общемировую структуру потребления специальных сталей на условия Украины, то потребление инструментальных сталей составляет 1,6-1,8 тыс. тонн в год. С учетом того, что доля инструментальных сталей повышенной и высокой теплостойкости, характеризующихся низкой шлифуемостью, в общем объеме составляет до 20 % [3], получим потребление труднообрабатывае-

Россия и страны СНГ переживают затяжной кризис в области производства специальных сталей. Их доля в общем объеме выплавки стали в России (72,2 млн. тонн в 2007 году) составила менее 0,6 %, т.е. около 440 тыс. тонн. В данном объеме учтены только подшипниковые, коррозионностойкие, инструментальные и жаропрочные стали. На долю подшипниковой стали

мых инструментальных сталей украинской промышленностью на уровне 300-350 тонн в год. Практически вся продукция, которая изготавливается из указанных сталей, подвергается обработке шлифованием кругами из сверхтвёрдых материалов (СТМ) при изготовлении изделий, их заточке и восстановлении эксплуатационных характеристик. Производство и потребление специальных и инструментальных сталей в мире и по отдельным государствам представлено в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Производство и потребление специальных и инструментальных сталей в современной экономике

Группа сталей и сплавов	Производство, млн. т				Потребление, млн. т		
	Весь мир	Страны СНГ	Россия	Украина (тыс. т)	Страны СНГ	Россия	Украина (тыс. т)
Специальные стали	30-35	0,8-1,0	0,5-0,7	100-120	1,4-1,8	1,2-1,6	30-35
Инструментальные стали	1,5-1,8	0,06-0,08	0,04-0,06	10-12	0,07-0,09	0,06-0,08	1,5-1,8

Эксперты металлоторговых компаний, которые занимаются поставками нержавеющей и специальных сталей на украинский рынок, уверены, что потребление нержавеющей и специальных сталей на Украине, как и во всем мире, будет увеличиваться, что в первую очередь связано с качественными характеристиками продукта и растущей потребностью промышленности в нём [2].

1.1.2 Производство и потребление твердых сплавов в России, на Украине и в странах СНГ

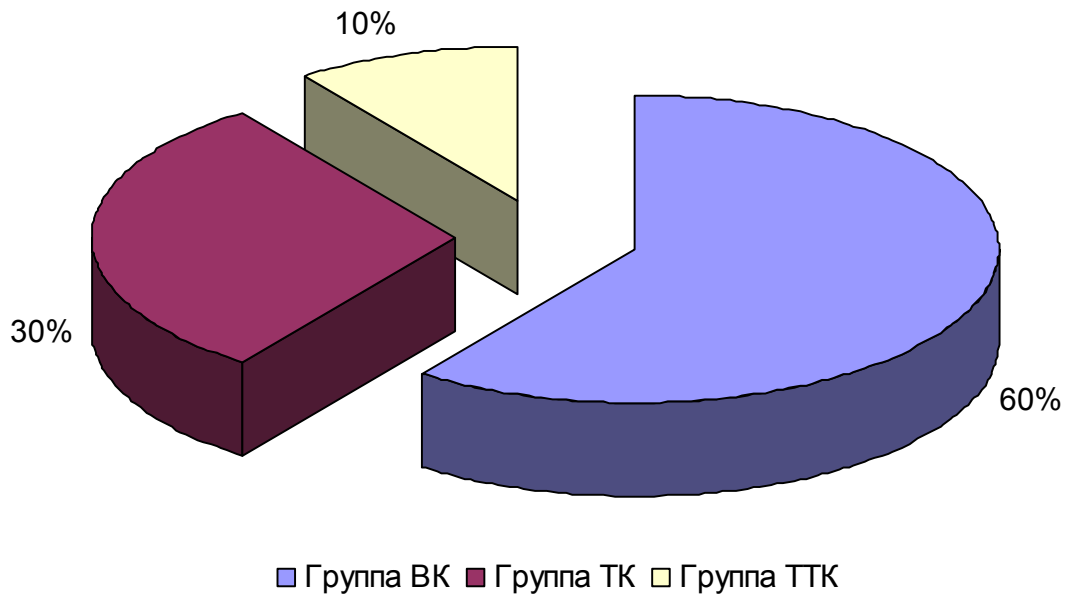
В Российской Федерации в настоящее время наиболее крупными производителями твердосплавной продукции являются: АО «КЗТС», Кировградский завод твердых сплавов, Свердловская область; ОАО «Победит», г. Владикавказ; ФГУП ВНИИТС, г. Москва; «МКТС-САНДВИК», г. Москва; ОАО «Волгобурмаш», г. Самара; ООО «АЛГ», г. Москва. Лидером твердосплавной промышленности России является АО «КЗТС». Это предприятие специализируется на производстве металлических порошков, спеченных твердосплавных изделий и

инструмента. Широкий спектр выпускаемых изделий охватывает практически все области применения твердых сплавов: обработка металлов и труднообрабатываемых материалов резанием, волочение, оснащение горно-бурового инструмента. Предполагаемый годовой объем производства составляет ориентировочно 1200-1800 т твердосплавной продукции, из которых приблизительно 60 % приходится на сплавы ВК, 30 % – сплавы ТК и 10 % – сплавы ТТК. ОАО «Победит» производит из твердых сплавов изделия для обработки металлов резанием, для обработки металлов давлением и синтеза алмазов, для оснащения горно-бурового инструмента, а также товарные карбиды и смеси. Объем производства твердосплавной продукции составляет ориентировочно 180-240 тонн в год, 70 % от этого объема приходится на сплавы ВК, 15 % – ТК и 15 % – ТТК [4].

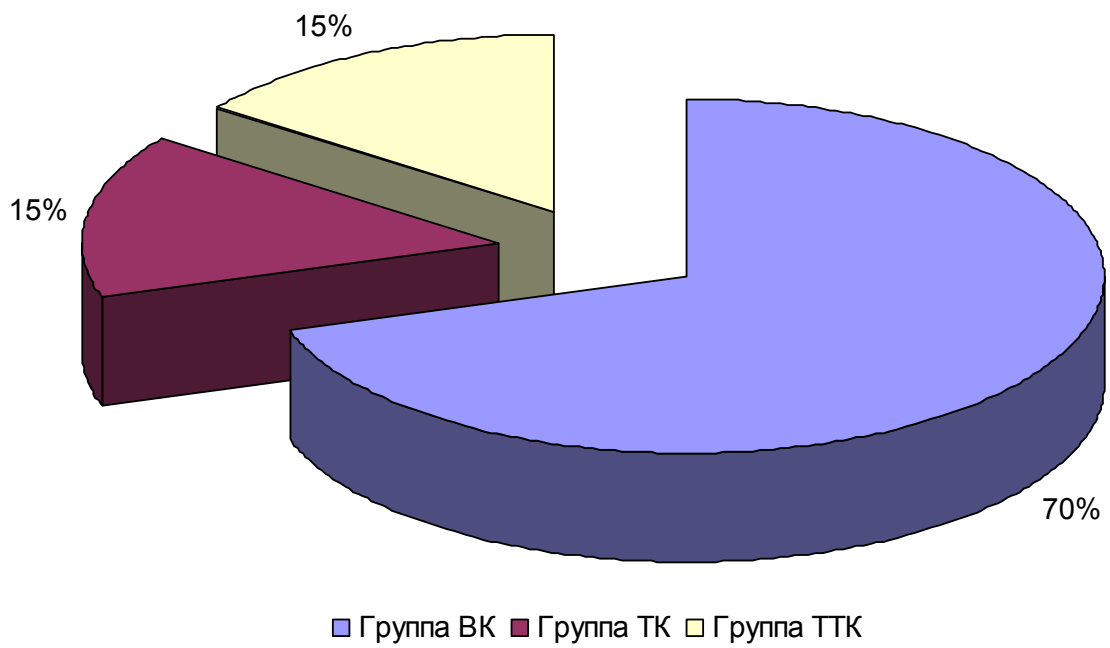
Остальные предприятия характеризуются более узким ассортиментом продукции и занимают меньшую долю рынка. Металлургический цех ФГУП ВНИИТС выпускает до 40 марок сплавов, включая опытные, с целью определения областей применения новых видов продукции. Годовой объем производства не превышает 40 т, из которых 80 % составляют сплавы ВК, 5% – ТК и 15% – ТТК [4].

Номенклатура твердых сплавов по данным предприятий Российской Федерации приведена на рис. 1.2.

ОАО «Волгобурмаш» производит изделия для оснащения шарошечных долот из твердых сплавов ВК. Годовой объем производства составляет ориентировочно 250-300 т. ООО «АЛГ» изготавливает в год более 60 т изделий, в основном из твердых сплавов. Фирма выпускает широкую номенклатуру изделий из стандартных марок и из сплавов собственной разработки для следующих областей применения: обработки резанием колесных пар; сверления и фрезерования рельсов; обработки осей; обработки стрелочного привода; СМП для тяжелого резания и фрезерования; заготовки осевого инструмента; быстроизнашивающиеся детали штампов, сопла; коррозионностойкие немагнитные твердые сплавы марок СН8, ВНКЮ, ВН8-ОМ, из которых изготавливаются износостойкие изделия для: погружных нефтяных насосов; подшипников и опор скольжения; торцевых уплотнений насосов; прессовой оснастки при формовании магнитов [4].



а



б

Рисунок 1.2 – Номенклатура твердых сплавов по данным российских предприятий:

- а) – АОТ «Кировградский завод твердых сплавов», Свердловская область
- б) – ОАО «Победит», г. Владикавказ

С учётом того, что Кировградский завод твердых сплавов является ведущим производителем твердых сплавов в Российской Федерации и занимает около 60 % рынка, общий объём производства твердосплавной продукции в России можно оценить в 3 тыс. тонн (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Изделия, изготавливаемые из твердых сплавов

Ежегодно для нужд промышленности Украины требуется 500-600 тонн твердого сплава – в основном это инструмент для машиностроительной, угледобывающей и металлургической отраслей народного хозяйства. Украинские предприятия, которые работают с этими материалами, выпускают всего около 50-70 тонн твердосплавной продукции [5]. Оставшаяся часть рынка занята преимущественно импортерами из России, Китая и Чешской республики.

Объём производства и потребления твердых сплавов в России и Украине представлен в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Производство и потребление твердых сплавов в России и Украине

Вид деятельности	Россия	Украина
Производство твердых сплавов, т	2800-3000	50-70
Потребление твердых сплавов, т	3600-4000	500-600

Не менее половины твердосплавной продукции (на Украине – это 250-300 тонн изделий) подвергается абразивной обработке и обработке кругами из СТМ.

1.1.3 Производство и перспективы использования титановых сплавов на Украине и в мире

Исходным материалом для производства титана и его соединений служит диоксид титана со сравнительно небольшим количеством примесей. Производство диоксида титана в мире начиная с 2000 года непрерывно росло: в 2008 году составило 5,1 млн тонн, в 2012 году – 5,3 млн тонн [6] и эта тенденция сохраняется. В чистом виде и в виде сплавов титан применяется в: химической промышленности (реакторы, трубопроводы, насосы, трубопроводная арматура), военной промышленности (бронезилеты, броня и противопожарные перегородки в авиации, корпуса подводных лодок), промышленных процессах (опреснительные установки, оборудование для изготовления целлюлозы и бумаги), автомобильной промышленности, сельскохозяйственной и пищевой промышленности (рис. 1.4), медицинской промышленности (протезы, эндопротезы), стоматологических и эндодонтических инструментах, зубных имплантатах (рис. 1.5), спортивных товарах, ювелирных изделиях, мобильных устройствах и т.д. Титановые сплавы являются важнейшим конструкционным материалом в авиа-, вертолёт-, ракето-, кораблестроении (рис. 1.6).

Титан является легирующей добавкой во многих легированных сталях и большинстве спецсплавов. Алюминиды титана являются очень стойкими к окислению и жаропрочными, что в свою очередь определило их использование в авиации и автомобилестроении в качестве конструкционных материалов. Титан

является одним из наиболее распространённых геттерных материалов, используемых в высоковакуумных насосах.



Рисунок 1.4 – Детали из титановых сплавов, подвергаемые механической обработке



а



б

Рисунок 1.5 – Титановые зубные импланты (а)
и изделия для остеосинтеза (б)

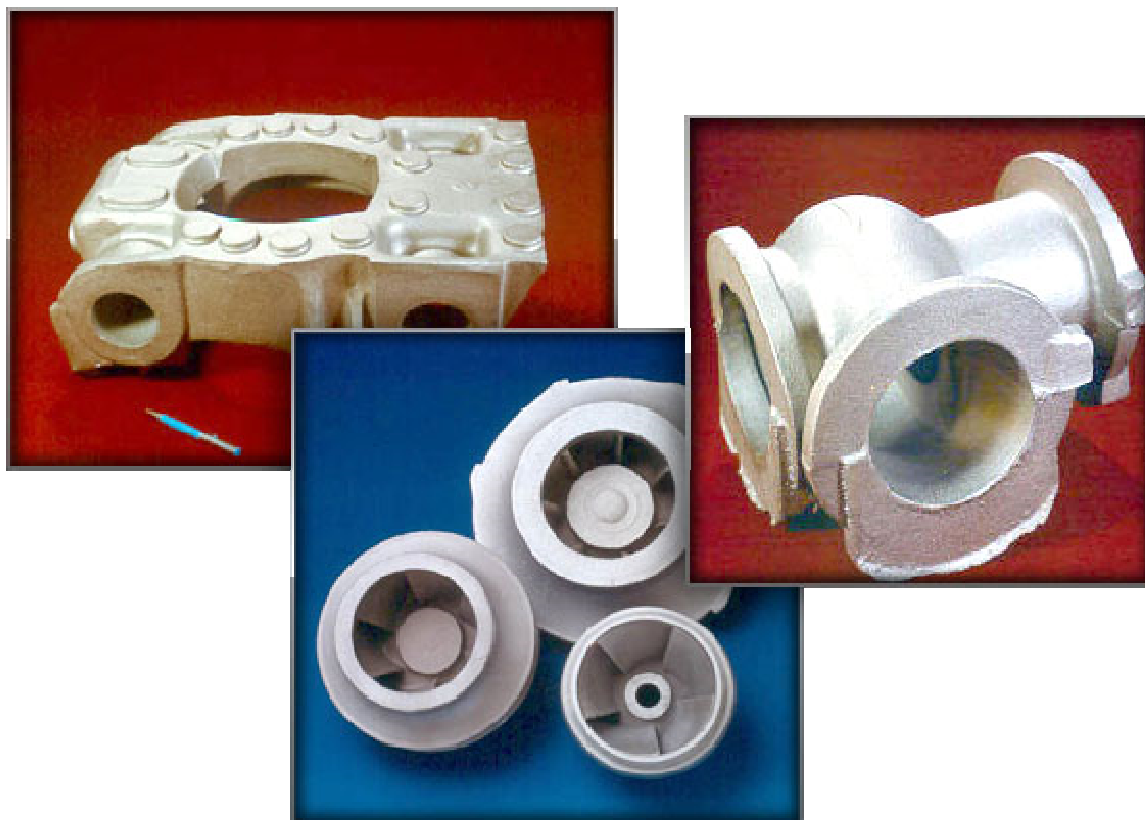


Рисунок 1.6 – Фасонные отливки из титановых сплавов

Мировой рынок титановых продуктов, как ожидается, будет расти ежегодно примерно на 6 %. Это приведет к росту производства титановых продуктов до 140-160 тыс. тонн в год, что потребует ежегодно до 200-240 тыс. тонн титановой губки [6].

В Европе и Северной Америке на долю авиационно-космической промышленности регулярно приходится до 60 % потребления титана. Производство титановой губки и проката в этих регионах также в значительной степени ориентировано на аэрокосмический рынок. Стремительный рост производства губки и проката в Китае является следствием растущего внутреннего спроса в промышленном секторе этой страны, на долю которого пришлось более 80 % потребления в 2012 году. Губка для космических технологий в основном производилась в Японии, России, США и Казахстане, но в настоящее время основным производителем стал Китай, который только в 2010 году увеличил ее производство на 41 %. Крупнейшими импортерами титаносодержащего сырья являются США и Китай. Доля

Китай составляет примерно 33 % мирового импорта, США – 13 %, Германии – 12%, России – 1% [6].

Данные о потреблении титановых продуктов в мире (без учета Китая и России) приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Потребление титановых продуктов в мире, тыс. тонн [6]

Отрасль экономики	Год				
	2008	2010	2012	2014	2016
Аэрокосмическая промышленность	46,9	41,2	60,0	51,0	64,0
Оборонная промышленность	6,4	6,7	6,0	6,8	7,5
Прочая промышленность	43,0	36,9	53,0	56,0	60,0
Развивающиеся рынки	5,3	2,4	3,0	3,2	3,5
Всего	101,6	87,1	122,0	117,0	135,0

Структура потребления титановых продуктов в России и Украине достаточно близка к данным табл. 1.1. В частности, аэрокосмическая промышленность потребляет в России 60 – 70 % титанового проката, остальные 30 % – это химическое машиностроение, энергетика, медицина, строительная отрасль [7].

Доля российской продукции в сегменте мирового рынка авиастроения в денежном выражении составляет: в авиационной отрасли в целом – 5,2 %, в производстве военной авиационной продукции – 12,5. В натуральном выражении эта доля примерно в 1,5-2 раза выше [8]. Таким образом, потребление титановых сплавов в России можно оценить в 8-10 тыс. тонн (табл. 1.4) . При этом авиационные специалисты полагают, что сегодняшние фундаментальные изменения в аэрокосмической отрасли ведут к значительному увеличению использования титана в конструкциях самолетов и в обозримом будущем альтернативной замены титановым сплавам пока не предвидится.

Единственный в Украине производитель металлического губчатого титана – это государственное предприятие «Запорожский титаномагниевого комбинат». В настоящее время комбинат производит порядка 12,5 тыс. тонн данной продукции в год. На комбинате организовано производство титановых слитков и сплавов

мощностью до 3 тыс. т. Часть губки комбинат перерабатывает на собственных мощностях в полуфабрикаты – титановые слитки, оставшуюся часть (90-95 %) поставляет на другие предприятия, в основном за рубеж. Несколько предприятий на Украине производят в значительно меньшем количестве слитки титана и его сплавов, как из губки, так и из лома и отходов титана.

Таблица 1.4 – Потребление титановой металлопродукции в России и на Украине (прогноз) на 2013 год [8, 9]

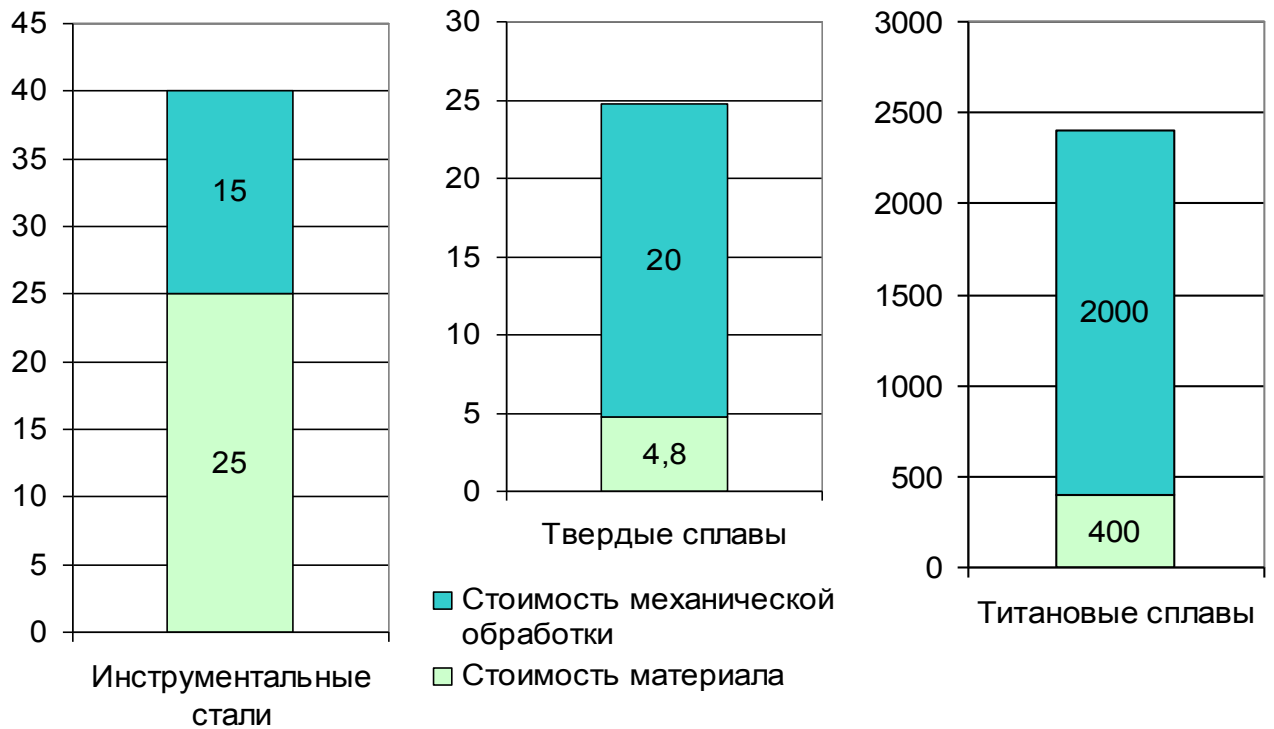
Отрасль экономики	Годовой объём потребления титановой металлопродукции, тыс. т	
	Россия	Украина (прогноз)
Аэрокосмическая промышленность	5,6-7,2	1,1-1,4
Химическое машиностроение, энергетика, производство медицинской техники, строительство	2,4-2,8	0,5-0,6
Всего	8,0-10,0	1,5-2,0

Прокатные мощности для переработки титановых полуфабрикатов на Украине отсутствуют, поэтому практически весь объём данной продукции поступает на экспорт. Вопрос о наладке производства титанового проката на одном из предприятий Украины, имеющих свободные прокатные мощности, не решается с 2000 г. [9].

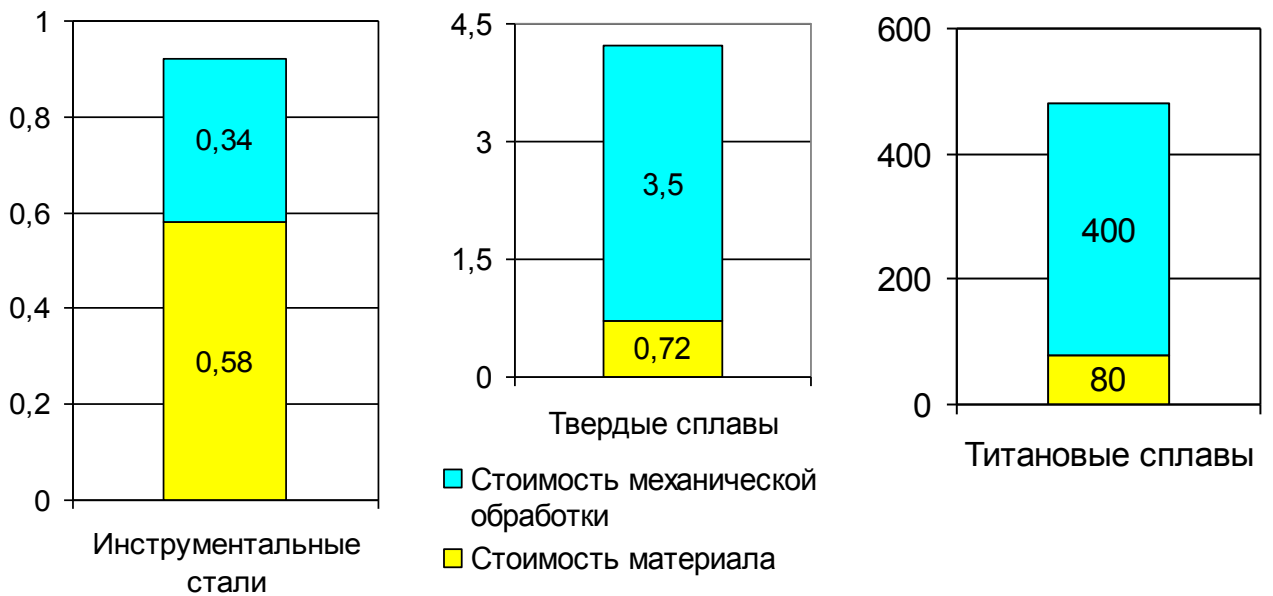
Государственной программой Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013 - 2025 годы» планируется увеличить долю российских производителей авиационной продукции на мировом рынке до 6,3 % [8].

При условии возобновления тесных кооперационных связей авиастроителей России и Украины можно прогнозировать потребление титановой металлопродукции промышленностью Украины на уровне 1,5 – 2 тыс. тонн в год (см. табл. 1.4). Более 60 % деталей из титановых сплавов на заключительных этапах изготовления обрабатывается абразивным инструментом и инструментом из СТМ. На этом основании перспективный объём алмазно-абразивной обработки титановых сплавов на Украине составляет 800-900 тонн в год.

Приблизительные оценки стоимости материала заготовок из перечисленных видов труднообрабатываемых материалов и механической обработки изделий из них для условий России и Украины приведены на рис. 1.7.



а – Россия



б – Украина

Рисунок 1.7 – Оценочная стоимость заготовок из труднообрабатываемых материалов и механической обработки изделий из них для условий России и Украины, млн. руб

1.2 Обрабатываемость резанием инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов

Рассмотренные в п. 1.1 группы конструкционных и инструментальных материалов по обрабатываемости резанием относятся к труднообрабатываемым материалам в соответствии с классификацией обрабатываемых материалов по стандарту ISO 513: 2004 [10, 11] и по хорошо известной в машиностроительной отрасли отечественной классификации [12] (табл. 1.5).

К инструментальным труднообрабатываемым сталям относятся ванадиевые, молибденовые, вольфрамо-молибденовые быстрорежущие и штамповые стали. Их плохая обрабатываемость резанием, в частности шлифованием абразивным инструментом, связана с наличием в структуре этих сталей очень твердых карбидов: хрома Cr_{23}C_6 (HV 15 ГПа), вольфрама $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ и молибдена $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$ (HV 16,5 ГПа), ванадия VC и V_4C (HV 27-28 ГПа) [13], твердость которых в ряде случаев превышает твердость электрокорунда (HV 18,9-23,5 ГПа) [14]. Карбид ванадия VC повышает красностойкость и увеличивает твердость после отпуска. Чем выше содержание ванадия в этих сталях, тем выше их износостойкость и хуже шлифуемость «вследствие увеличения количества самого твердого карбида» [15].

Исключительно большие трудности для обработки лезвийным инструментом и абразивными кругами представляет обработка твердых сплавов, как вольфрамосодержащих, так и безвольфрамовых. Разрушение твердых сплавов при резании представляет собой сочетание пластического деформирования и хрупкого разрушения.

В настоящее время основным способом шлифования твердых сплавов является алмазное шлифование с электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга (РПК) [16, 17, 18, 19, 20]. Характер процесса резания при этом в значительной степени обусловлен тем, что твердые сплавы имеют величину зерна карбидов в 10-25 раз меньше выступающей части алмазного зерна. Соответственно, как утверждается в работе [21], зерно срезает стружку, состоящую не из отдельных карбидов, а группы карбидов с наполнителем.

Таблица 1.5 – Классификация по обрабатываемости резанием инструментальных сталей, титановых и твердых сплавов

Наименование вида материала	Классификация по обрабатываемости резанием			
	ISO 513: 2004 [10]		Труднообрабатываемые материалы по классификации СССР [12]	
	Группа	Подгруппа	Группа	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45
Инструментальные стали	Р Стали, ферритные и мартенситные нержавеющие стали	Р8 Инструментальные стали Быстрорежущая сталь	I Теплостойкие стали	0,4 - 0,5
	Н Твердые материалы	Н8 Инструментальные стали Быстрорежущая сталь		
Титановые сплавы	S Суперсплавы и титан	S11 Низколегированные сплавы титана S12 Среднелегированные сплавы титана S13 Высоколегированные сплавы титана	VII Сплавы на титановой основе	0,25 - 0,5
Твердые сплавы	Прочие труднообрабатываемые материалы	HF1, HF2 Наплавляемые твердые сплавы CC1 Спеченный карбид вольфрама	–	0,7 - 0,9 (при электроэрозионной обработке)

По данным работы [17], при алмазно-искровом шлифовании сплава Т15К6 кругами на связке Б1 на поверхности твёрдого сплава режущие кромки алмазных

зерен оставляют широкие следы, которые состоят из большого числа мелких следов взаимодействия субмикрокромки (ширина последних составляет доли микрометра). Можно констатировать, что съём припуска осуществляется за счет массового микрорезания кромками алмазных зерен. При этом доминирующим видом разрушения карбидов вольфрама и титана является срез их зерен.

В работе Скоробогатько П.К. [20] проводилось исследование алмазного шлифования твердых сплавов ВК6 и ТН-20 при их обработке со скоростями 35; 21 м/с. Автор отмечает отсутствие следов пластической деформации по краям рисок от единичного алмазного зерна на образцах из твердого сплава ВК6. Это свидетельствует о том, что характер разрушения твердых сплавов преимущественно хрупкий.

Анализ электронно-микроскопических объектов показал, что после 15-20 резов, когда общее время контакта зерна с деталью достигло 1500-2000 мкс, и на зерне появилась площадка износа, образуется ровная поверхность, пересекаемая микротрещинами. Следы зерна на поверхности риска, характерные для среза, выявлены менее четко, что говорит о наличии пластического течения материала и повышения температуры в точке контакта.

После 30-40 резов (время контакта зерна с образцом 3000-4000 мкс) для поверхности твердого сплава характерно наличие разрыхлений, расшатанной карбидной структуры, сильного пластического течения и очень большого числа беспорядочно расположенных микротрещин. В местах входа и выхода зерна дефектов меньше, поверхность ровная, но покрыта микротрещинами. По мере продвижения зерна и увеличения глубины резания усилия возрастают настолько, что компоненты сплава отделяются от основной массы, вдавливаются в неё, вспучиваются, обнажая карбиды, которые не успевают покрыться связкой. Микротрещины встречаются чаще и размеры их больше; часто они содержат осколки продуктов разрушения. Встречаются карбиды с характерными участками сколов и вырывов [20].

При микрорезании сплава ТН-20 со скоростью 21 м/с характер образующейся поверхности коренным образом изменяется, что обусловлено, в первую

очередь, незначительным истиранием зерна за время контакта. При глубине риски 3-4 мкм, в основном, формируется бездефектная ровная поверхность со следами срезанного материала. С увеличением глубины резания до 5-6 мкм в отдельных местах риски появляются «окна», в которых вскрывается структура, что свидетельствует о наличии, кроме среза, хрупкого разрушения. При дальнейшем углублении зерна (да 8-10 мкм) доминирующим становится хрупкое разрушение. Таким образом, при скорости резания 21 м/с температура в точке контакта не превышает температуры размягчения компонентов твердого сплава [20].

При микрорезании твердого сплава ВК6 алмазным зерном основные закономерности формирования поверхности риски остаются такими же, как и для сплава ТН-20, хотя характер влияния скорости на образование дефектов выявить не удалось. Наиболее значительные повреждения риски наблюдали при обработке с высокой скоростью (35 м/с) и большой толщиной среза (до 10-12 мкм). В этом случае наряду со следами, характерными для среза, имеет место раскалывание некоторых зерен, ослабление их связей с соседними зёрнами; наблюдается даже поворот отдельных компонентов твердого сплава к направлению резания. Такая поверхность твёрдого сплава после обработки считается дефектной.

Описанный механизм формирования поверхностного слоя при микрорезании является характерным и для алмазно-искрового шлифования. Например, при обработке сплава ТН-20 крупнозернистыми кругами АСВ 400/315 при глубине резания 0,02 мм со скоростью 35 м/с формируется такой же рельеф, как и при микрорезании затупленным алмазным зерном, т.е. образуется дефектный слой, в котором наблюдаются трещины, вспучивание материала и другие повреждения. Уменьшение скорости резания до 21 м/с и зернистости инструмента приводит к образованию бездефектной поверхности, которая формируется с преобладанием среза или хрупкого разрушения при больших значениях глубин. Таким образом, поверхность, образованная при суммарном воздействии алмазных зерен, представляет собой результат наложения следов отдельных зерен и по характеру сходна с описанной выше при микрорезании алмазным зерном.

По данным исследований, приведенным в работе [22], при малой величине заглупления алмазного зерна происходит только пластическая деформация без диспергирования твёрдого сплава. С увеличением глубины резания доля пластически деформированного материала по отношению к срезаемому уменьшается. При резании реальным алмазным зерном пластическое течение материала наблюдается не только по краям царапины, но и по всему её полю. Это объясняется тем, что в резании участвуют несколько микровершин зерен, каждая из которых может вызвать пластическое течение обрабатываемого материала. Наплывы деформированного слоя наблюдаются и перед режущим элементом зерна.

Таким образом, при шлифовании твёрдых сплавов со скоростью резания меньше 35 м/с преобладает хрупкое разрушение срезом зерен карбидов, входящих в состав сплава. При скорости резания 35 м/с разрушение срезом выявлено менее четко, что говорит о наличии пластического течения.

Соответственно, с учётом сложного характера разрушения твёрдых сплавов важное значение имеет обеспечение получения обработанной поверхности с минимальным количеством дефектов.

Сплавы с высокой удельной прочностью преимущественно являются труднообрабатываемыми. К ним относятся и сплавы на основе титана. При этом в отличие от высокопрочных сталей, обработка заготовок из титановых сплавов происходит примерно с такими же усилиями, что и обработка стали 45 [12].

Сложности при окончательной механической обработке указанной группы материалов связаны с тем, что обработка шлифованием титановых сплавов характеризуется рядом особенностей. Вследствие низкой пластичности и склонности титановых сплавов к упругому деформированию, пластические деформации при обработке резанием являются незначительными [23]. При скорости резания 35-50 м/с коэффициент усадки стружки титановых α -сплавов и сплавов с $(\alpha + \beta)$ -структурой меньше единицы, т.е. наблюдается «отрицательная» усадка [23].

Отмеченная особенность деформации объясняется тем, что при увеличении скорости резания из-за возникновения высокой температуры в деформированной зоне значительно интенсифицируется процесс поглощения поверхностным слоем

сплава газов воздуха: возрастает роль охрупчивания, слой теряет пластичность и способность к сжатию, что приводит к преобладанию деформаций сдвига [23].

Следующей особенностью титановых сплавов является высокая склонность к контактному схватыванию при трении, что создает трудности при шлифовании за счёт налипания металла на вершины всех абразивных зёрен независимо от их природы [24]. Налипание металла на вершины зёрен ведёт к вибрациям [25] и катастрофическому износу инструмента [26], увеличивает силы трения и условные напряжения микрорезания [27], снижает качество обработанной поверхности [28, 29].

Титановые сплавы обладают высокой химической активностью, которая увеличивается с повышением температуры. Вследствие этого создаются предпосылки для протекания химических реакций титана с технологической средой и абразивами при шлифовании. В результате этих реакций могут образовываться нитриды, карбиды и прочие твердые соединения титана, которые увеличивают сопротивление микрорезанию титановых сплавов и, как следствие, силы резания при шлифовании. Так как коэффициент трения абразивов по титану в условиях внешнего трения при скорости 30 м/с приблизительно в 4 раза больше, чем по никелю и железу [30], составляющие силы резания при шлифовании титановых сплавов в 1,5-2 раза выше, чем при шлифовании конструкционных сталей [31].

Поэтому, учитывая, что внешняя механическая работа при трении трансформируется в тепловую энергию, температура в зоне контакта при шлифовании титановых сплавов достигают 1000-1560°C [23, 31].

В связи с тем, что титановые сплавы обладают в 3-10 раз меньшей теплопроводностью, чем алюминиевые, железоуглеродистые и никелевые [23, 32], в зоне контакта зерно-материал при шлифовании титановых сплавов возникает высокая концентрация тепла, что вследствие недостаточного теплоотвода в материал обрабатываемой заготовки приводит к высокой теплонапряженности процесса обработки.

1.3 Обеспечение эффективности алмазного шлифования за счёт использования различных схем шлифования

1.3.1 Шлифование с фиксированными режимами обработки

В настоящее время для обработки рассмотренных групп материалов широко используется шлифование кругами из СТМ на металлических связках. Обеспечение эффективности процесса – повышение производительности, качества и снижение себестоимости обработки – достигается выбором характеристик шлифовальных кругов, обеспечением высоких режущих свойств круга правкой [33], шлифованием с одновременным электрофизикохимическим воздействием на РПК с целью стабилизации во времени режущих свойств круга [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39], оптимизацией режимов шлифования [19, 33, 34, 40, 41, 42].

При абразивно-алмазной обработке в промышленности наиболее широкое распространение получило шлифование с фиксированными режимами обработки (в технической литературе для этого способа используется термин «шлифование по жесткой схеме») (рис. 1.8). При этом условия обработки, например, плоского шлифования, определяется следующими режимами:

- скоростью круга V_k , м/с;
- продольной скоростью стола V_d , м/мин;
- поперечной подачей S_n , мм/ход;
- вертикальной подачей S_g , которая определяет глубину шлифования t , мм.

В этом случае производительность процесса шлифования

$$Q = 1000V_d S_n t, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (1.1)$$

практически не изменяется во времени и объём сошлифованного материала $V_{\text{сшл}} = \text{const}$ в любой момент обработки. При этом изменение во времени параметров рабочей поверхности круга приводит к увеличению составляющих сил резания на круге по некоторой зависимости $P_z, P_y = f(\tau)$, что зачастую является причиной ухудшения качества обработанной поверхности.

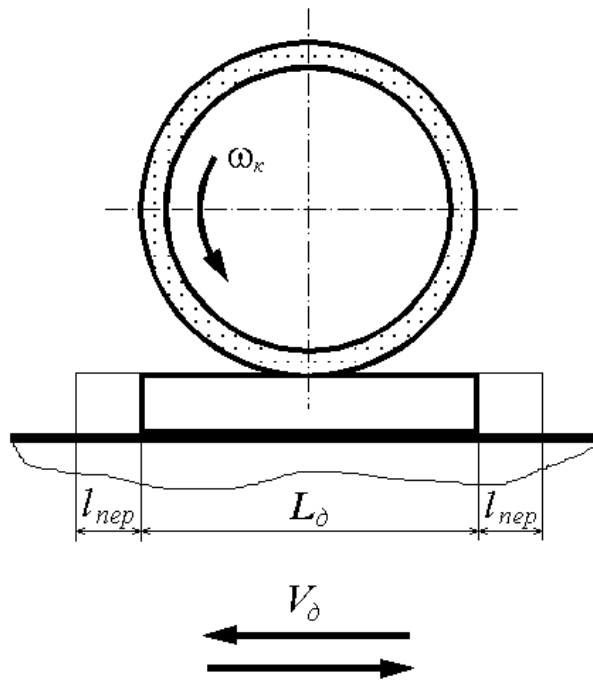


Рисунок 1.8 – Плоское врезное шлифование с фиксированными режимами обработки

Для обеспечения требуемого фазово-структурного состояния обработанной поверхности силы резания не должны превышать критического значения, определяемого условием предотвращения фазово-структурного превращения в поверхностном слое заготовки, образования прижогов, термических трещин:

$$P_z \leq P_{z\text{кр}}; \quad P_y \leq P_{y\text{кр}}, \quad (1.2)$$

где $P_{z\text{кр}}$, $P_{y\text{кр}}$ – допустимые значения составляющих сил резания на круге.

Выполнение требований (1.2) является одной из основных задач, решаемых при определении режимов шлифования, и основывается на существующих представлениях о физических процессах, сопровождающих процесс абразивной обработки.

Преобладающая часть парка шлифовальных станков, установленного в механических цехах и механических участках машиностроительных предприятий, реализует описанную выше схему шлифования с фиксированными режимами (схему «жесткого» шлифования).

1.3.2 Шлифование с постоянной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга

На основании изучения закономерностей процесса шлифования П.Е.Дьяченко и Л.А.Глейзером [43, 44] было выдвинуто предположение о том, что фактором, определяющим ход процесса, является радиальное давление круга на изделие. От величины радиального давления непосредственно зависят: наличие прижогов на шлифуемой поверхности; производительность, износ и затупление шлифовального круга [44]. На основании этой гипотезы был предложен способ шлифования с заданной радиальной силой прижима шлифовального круга к изделию («шлифование по упругой схеме»).

При плоском шлифовании по упругой схеме (рис. 1.9) условия обработки определяются режимами резания V_k , V_d , S_n и силой поджима РПК к заготовке P_n , которая уравнивается радиальной составляющей силы резания P_y . Так как с помощью соответствующих нагрузочных устройств обеспечивается постоянство величины сил $P_n = P_y$ на протяжении всего времени обработки, то изменение параметров РПК в процессе шлифования приводит к уменьшению глубины шлифования t и, в соответствии с (1.1), к уменьшению производительности обработки, сохраняя, однако, при этом стабильными показатели качества обработанной поверхности.

По сравнению со шлифованием по жёсткой схеме шлифование с определенным радиальным давлением, по мнению Л.А.Глейзера [44], представляет собой достаточно устойчивый процесс, обладающий большей степенью детерминированности. Шлифование по упругой схеме с заданной силой прижима P_n шлифовального круга к заготовке позволяет «исключить влияние на температуру шлифования непостоянства припуска, нестабильности физико-механических свойств материала изделия и изменения режущей способности шлифовального круга за период его стойкости, что исключает опасность появления дефектов на шлифованной поверхности» [45].

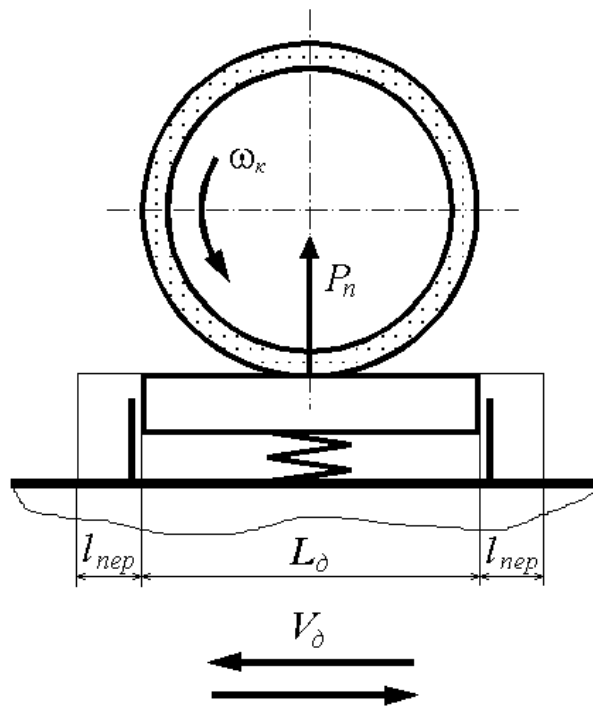


Рисунок 1.9 – Плоское врезное шлифование с фиксированной силой поджима шлифовального круга к изделию

Применение процесса шлифования по упругой схеме «позволяет снизить силовую и тепловую напряженность процесса, повысить точность и качество поверхностного слоя» заготовки [17]. Шлифование и заточка по упругой схеме дают возможность наиболее полно проявить высокие режущие свойства алмазных кругов, так как глубина внедрения зёрен в шлифуемое изделие определяется нормальной силой [21]. Постоянная нормальная сила поджима детали к кругу может быть реализована с помощью различных конструктивных решений, среди которых наиболее часто используются: создание постоянной силы с помощью пружины, с помощью рычажного механизма и путём применения гидравлического устройства [46].

Следует отметить, что использование упругого шлифования с управлением параметрами РПК будет способствовать повышению степени детерминированности процесса, так как в процессе обработки параметры РПК поддерживаются постоянными на протяжении всего периода обработки с помощью управляющих воздействий.

В настоящее время кроме шлифования с постоянной нормальной силой поджима круга к заготовке [44] известно также шлифование по упругой схеме, когда в процессе обработки постоянной поддерживается тангенциальная составляющая силы резания [47, 48].

Основываясь на анализе изменения температуры поверхности резания для способов шлифования по упругой схеме с поддержанием постоянными нормальной и тангенциальной силы, в работе [49] сделан вывод о том, что стабилизация выходных технологических показателей шлифования обеспечивается при использовании в качестве постоянного параметра обработки силы поджима заготовки к РПК P_n .

Для шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к шлифовальному кругу (по упругой схеме) в промышленности применяются заточные и точильно-шлифовальные станки, в частности:

1) станок для заточки резцов ЗБ632В, в котором при работе без зажима подачу резца на круг осуществляют, передвигая резец вдоль опорной планки транспортира, а при работе с зажимом резца подачу осуществляют вращением маховичка [50].

2) станок для заточки свёрл модели ЗБ652, в котором подача сверла на круг осуществляется вручную, поворотом рукоятки суппорта, что при больших подачах может привести к прижогам на затачиваемой поверхности сверла [51].

3) универсально-заточной станок модели ЗБ642, где при затачивании хвостового и насадного инструмента его перемещение относительно шлифовального круга производится столом станка [52].

4) точильно-шлифовальный станок ТШ-300, в котором обрабатываемое изделие подводится к кругу с постепенным нажатием, величина которого устанавливается заточником вручную [53].

На подавляющем большинстве станков шлифовальной группы без применения специальных устройств или выполнения модернизации станка реализация шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к шлифовальному кругу невозможна.

1.4 Повышение эффективности обработки за счёт определения оптимальных режимов резания при шлифовании

1.4.1 Сущность аналитического способа определения режимов резания при шлифовании

Определение оптимальных режимов шлифования является одним из необходимых составляющих в повышении эффективности обработки. При этом под оптимальным режимом будем понимать такой режим, который обеспечивает максимальную производительность и экономическую эффективность процесса при выполнении всех требований к показателям качества изделия, оговоренных в технической документации.

Отдельные вопросы по методикам выбора оптимальных режимов алмазно-абразивной обработки для инструмента или станков собственного производства раскрывают инструментальные и станкостроительные фирмы Rappold Winterthur Technologie GmbH (Австрия-Швейцария), TYROLIT CEE k.s. (Австрия), Steinemann Technology AG (Австрия), Blohm Jung GmbH (Германия), Fritz Studer AG (Германия), Norton (США-Франция), Carborundum Grinding Wheel Company (США), Carborundum Schleifmittelfabrik GmbH (Германия). При этом подходы, на которых основывается выбор оптимальных режимов обработки, в фирменных методиках не конкретизируются.

Учитывая большое внимание, которое постоянно уделяется исследователями решению вопроса определения оптимальных режимов обработки, остановимся на общих подходах, которые используются при решении данной задачи.

Способы определения режимов резания выражают оптимальный алгоритм решения поставленной задачи оптимизации в зависимости от формы и полноты охвата исходных данных. Все способы охватывают большое количество разнообразных методик реализации, различающихся набором исходных данных, мерой их точности и формой представления, применяемым математическим аппаратом, сложностью механизма реализации и т.п.

Табличный и графический способы определения режимов могут быть основаны или на большом количестве опытно-статистических данных, полученных в реальных производственных или лабораторных условиях, или же на представлении в соответствующей форме результатов многократной реализации аналитического способа. В связи с широким и все более возрастающим внедрением в современное машиностроительное производство технологий обработки и использования больших массивов информации роль табличного и графического способов уменьшается, а область применения в производственных условиях в перспективе сузится вплоть до использования в отдельных случаях на отдельных предприятиях. Таким образом, наибольшую научную и практическую ценность имеет аналитический способ определения режимов, который рассмотрим более подробно.

Аналитический способ основывается на использовании функциональных зависимостей между входными факторами и выходными параметрами, характеризующими процесс обработки [54]. Совокупность этих зависимостей образует математическую модель процесса обработки.

С использованием математической модели процесса определение режимов резания аналитическим способом при шлифовании выполняется в три этапа [55]:

а) составление системы уравнений, описывающих технические ограничения, налагаемые на режим резания требованиями к детали, станком, инструментом и условиями производства;

б) математическое описание целевой функции, т.е. функции, выражающей цель оптимизации;

в) совместное рассмотрение технических ограничений и целевой функции и определение на этой основе оптимального режима шлифования.

Математические выражения, описывающие технические ограничения, однотипны и представляются в виде неравенств [55]:

$$Z^* < (>) Z(V, V_1, t, \dots),$$

в левой части которых приведено заданное (предельное) значение какой-либо ограничивающей величины или параметра Z^* , а в правой – фактическое значение

этой величины или параметра при той или иной комбинации элементов режима резания и других условий обработки.

Технические ограничения, налагаемые на режим резания при шлифовании требованиями к изделию (ТИ), следующие:

- предельно допустимая высота неровностей профиля обработанной поверхности Ra^* (ТИ1);
- требуемая точность детали после шлифования (допуск на размер поверхности δ^*) (ТИ2);
- температура шлифуемой поверхности Θ_{\max}^* , предельно допустимая с точки зрения прижогов, остаточных напряжений или других показателей качества поверхностного слоя (ТИ3).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания станком (ТС), таковы:

- мощность привода шлифовального круга N^* (ТС1);
- наибольшая и наименьшая частоты вращения шпинделя (n_{\max}^* , n_{\min}^*) (ТС2);
- наибольшее и наименьшее значение подач ($V_{1\max}^*$, $V_{1\min}^*$, $S_{2\max}^*$, $S_{2\min}^*$) (ТС3).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания шлифовальным кругом (ТК):

- требуемая стойкость инструмента T^* (ТК1);
- предельная температура на режущих зёрнах Θ_3^* (ТК2);
- прочность круга V_{\max}^* (ТК3).

Комплекс перечисленных технических ограничений описывает область возможных режимов шлифования. Если оптимизации подвергается комплекс из двух элементов режима резания, а другие элементы заданы, то упомянутая область представляет собой плоскую фигуру, очерченную соответствующими линиями (рис. 1.10). Если оптимизируется комплекс из трёх элементов режима резания, то каждое ограничение описывается не линией, а поверхностью того или иного вида, а область возможных режимов шлифования обращается в трёхмерное

пространство. При большем количестве элементов, характеризующих режим резания, область возможных режимов обращается в четырёх- или более мерное пространство.

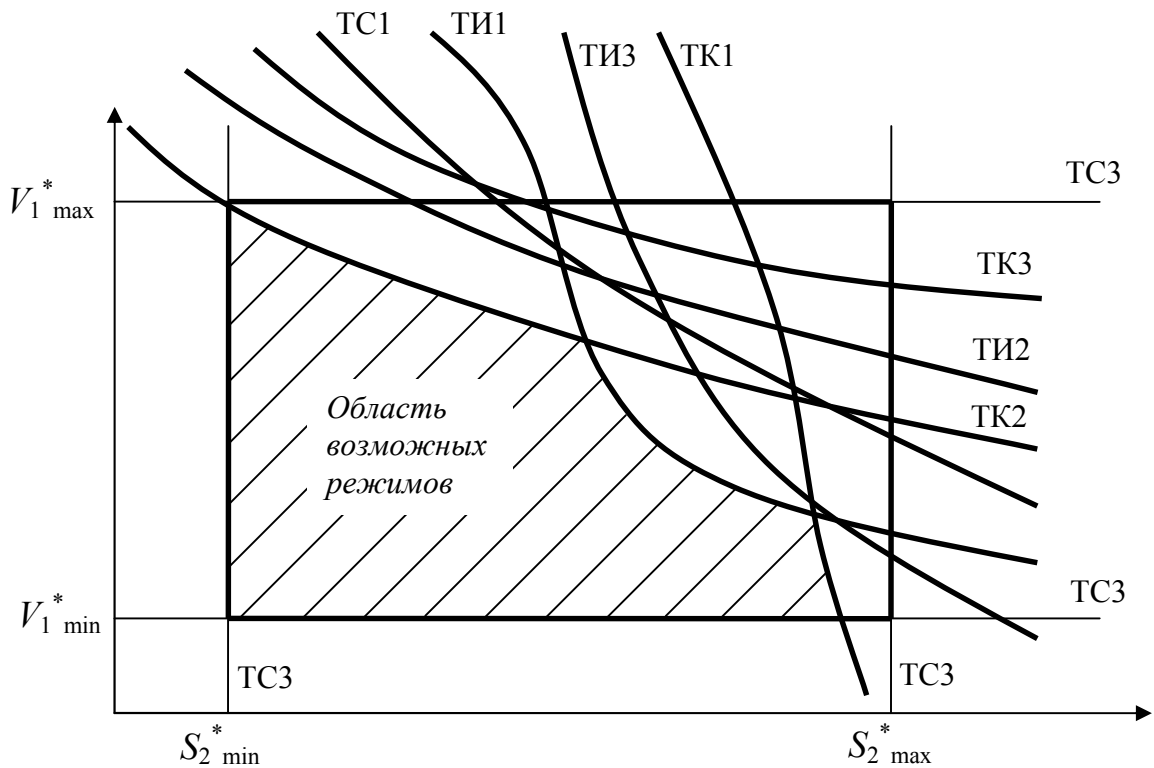


Рисунок 1.10 – Принципиальная схема области возможных режимов резания при шлифовании [55]

ТИ1-ТИ3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания изделием

ТС1-ТС3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания станком

ТК1-ТК3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания шлифовальным кругом

Целевые функции представляют математическое описание цели, с которой производят оптимизацию режима шлифования. Такими целями (критериями оптимизации) могут быть: наименьшая себестоимость обработки, наибольшая производительность, минимальные затраты на эксплуатацию шлифовального инструмента и другие [56].

Критерий максимальной производительности применяется либо в случае производственной необходимости, например, при ликвидации узких мест на производстве, либо в случае, когда решается задача экономии рабочего времени производственных рабочих. Критерий минимальных затрат на эксплуатацию режущего инструмента используется, когда возникает необходимость экономии дефицитного режущего инструмента, замена которого нежелательна.

В работе [55] за основу оптимизации режимов шлифования рекомендуется принимать достижение наибольшей производительности процесса. При этом целевая функция описывается сравнительно простой, легко линеаризуемой зависимостью, однако во многих случаях предпочтительнее выбирать в качестве целевой нелинейную функцию себестоимости, играющую при оптимизации процесса шлифования «более важную роль» [56].

Таким образом, в области возможных режимов, описываемой техническими ограничениями (см. рис. 1.10), необходимо найти точку, в которой выполняется целевая функция и которая, следовательно, соответствует оптимальному режиму шлифования.

Математические выражения технических ограничений $TI1 - TI3$, $ТС1 - ТС3$, $TK1 - TK3$ совместно с математической записью целевой функции представляют математическую модель оптимального режима шлифования. Если ограничения и целевая функция представлены в виде линейных многочленов, то решение этой системы выполняют методом линейного программирования [57]. Если же выражения для ограничений и целевой функции нельзя линеаризовать, используют нелинейные методы оптимизации, в частности, методы многофакторного планирования [58], теории функциональных определителей и метод множителей Лагранжа [56].

Анализ описанной методики определения режимов резания при шлифовании показывает, что при её использовании процесс обработки рассматривается как стационарный, в котором свойства взаимодействующих элементов статичны или же их изменение настолько невелико, что им можно пренебречь. Условность такого допущения для компонентов системы резания при шлифовании в настоя-

щее время очевидна, так как многочисленными исследованиями установлено, что режущая способность шлифовального круга непрерывно и с различной интенсивностью изменяется в процессе обработки. Если же при обработке одновременно осуществляются управляющие воздействия на инструмент, то изменение режущих свойств круга вследствие осуществления резания сочетается с изменением режущих свойств вследствие управляющих воздействий, что значительно усложняет решение задачи оптимизации.

1.4.2 Существующие способы оптимизации режимов шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов

Методика определения режимов, изложенная в [55], подразумевает проведение комплекса экспериментальных исследований с целью получения зависимостей, описывающих технические ограничения ТИ1, ТИ2, ТИ3, ТК2. Это обуславливает её высокую трудоёмкость. Кроме того, при шлифовании с управляющими воздействиями на РПК, по нашему мнению, в качестве критерия оптимизации предпочтительно использовать минимальную удельную себестоимость обработки, представляющую собой отношение себестоимости обработки к количеству сошлифованного материала [60]. Использование данного критерия ещё более усложняет решаемую задачу.

Этим, как нам представляется, объясняется тот факт, что уже на протяжении достаточно длительного времени для поиска оптимальных условий шлифования кругами из СТМ используются опытно-статистические модели, основанные на кибернетическом подходе [38, 39, 40, 41, 42, 61, 62]. Эти модели отличаются способом определения направления движения в факторном пространстве для достижения оптимума функции отклика и организацией самого движения.

Оптимизация процесса шлифования с помощью опытно-статистических моделей также достаточно трудоёмка и в ряде случаев не позволяет вскрыть физическую природу влияния факторов на целевую функцию, что усложняет управление процессом.

Кроме того, предложены математические модели процесса алмазно-абразивной обработки на основе полученных аналитических зависимостей между режимами шлифования и эксплуатационными свойствами деталей машин: элементным составом поверхностного слоя детали, его фазовым состоянием и микроструктурой [63, 64].

Методика, основанная на использовании описанных моделей, позволяет осуществить многокритериальную оптимизацию режимов абразивной обработки, однако она неприменима для определения режимов шлифования с управлением параметрами РПК по следующим причинам:

– методика не учитывает изменения глубины шлифования во времени при обработке с фиксированной силой поджима шлифовального круга к заготовке, вследствие чего, в частности, изменится производительность обработки Q ;

– при минимизации затрат энергии на обработку при алмазном шлифовании с фиксированной силой поджима шлифовального круга к заготовке данная методика не учитывает непроизводительный расход инструмента в результате управляющих воздействий на РПК.

При создании гибких производственных модулей (ГПМ) абразивной обработки для инструментальных гибких автоматизированных производств (ГАП) необходимо учитывать низкую обрабатываемость применяемых в конструкциях инструментов твердых сплавов и быстрорежущих сталей, которая во многих случаях исключает использование традиционных электрокорундовых и карбидных кругов. Инструментальное обеспечение таких ГПМ кругами из СТМ в сочетании с электрофизикохимическими методами стабилизации режущей способности гарантирует необходимый уровень производительности и качества обработки. Здесь первостепенное значение приобретают вопросы устойчивости процессов формообразования и надежности шлифовального инструмента [65].

В инструментальном производстве массовыми деталями труднообрабатываемых материалов являются мелкозернистые кольца, диски, втулки, обрабатываемая поверхность которых имеет цилиндрическую или коническую форму. Исходя из процесса формообразования, определяется оптимальная структура схемы

обработки таких изделий и принцип управления режимными параметрами съёма припуска [65].

Для врезных схем шлифования с большой долевой подачей $S_d \approx 1$, для которых превалирующим фактором, вызывающим неравномерность износа образующей круга, является изменение износостойких свойств шлифовального круга по его высоте и неоднородность изнашивающих свойств обрабатываемого материала, в качестве принципа управления режимными параметрами процесса обработки предложена такая организация процесса формообразования, при которой все элементарные сечения детали будут последовательно проходить через весь ряд элементарных сечений круга и каждое элементарное сечение круга станет функционировать в стационарных или квазистационарных условиях, а их совокупность сохранит некоторую устойчивую форму. Этот принцип выполняется в том случае, если обрабатываемое изделие совершает относительно круга продольное движение только в установленном направлении, деление припуска осуществляется между элементарными сечениями круга, которые расположены в порядке возрастания радиусов сечений. В условиях однопроходного врезного шлифования режимная производительность единичного участка профиля описывается со следующим ограничением

$$Q_{уд.м} = \pi \cdot d \cdot S_{np} \cdot \frac{\partial H(x, \tau)}{\partial x}, \quad (1.3)$$

где d – диаметр обрабатываемой поверхности;

S_{np} – продольная подача;

$H(x, \tau)$ – функция ординат поперечного профиля круга.

Формообразование рабочей поверхности инструмента при однопроходной врезной схеме шлифования кругами из СТМ на металлических связках происходит под влиянием взаимосвязанных процессов автогенерации макрогеометрии (эволюции макроформы под действием установившихся процессов износа) и дозированного воздействия дополнительной электрической энергии на связку круга. Причем интенсивность этого воздействия устанавливается минимально допустимой и определяется экспериментально при эквидистантном расположении отно-

сительно образующей круга катодной поверхности автономного устройства. Устойчивая форма макрогеометрии в этом случае – результат установления на совокупности зёрен баланса между нагрузкой с учётом её распределения и режущими элементами, динамической прочностью зёрен и силой алмазоудержания. Макрогеометрия поперечного профиля рабочей поверхности инструмента определяется в процессе автогенерации, математическое описание которого основывается на методах условной аналогизации [65].

При энергетическом подходе к моделированию в общем балансе энергозатрат в изолированной системе выделяется идущая на износ – формобразование шлифовального круга – энергия автогенерации. В процессе шлифования происходит превращение этой энергии. Первоначально содержащаяся в припуске энергия на обработку в потенциальном виде U_z при съёме материала поглощается участками рабочей поверхности круга и, таким образом, осуществляется превращение $U_z \rightarrow U_n$. Здесь движение детали можно представить в виде процесса переноса и превращения энергии автогенерации вдоль моделирующего стержня, длина которого равна ширине круга B . Элементарные участки профиля круга шириной dx образуют систему взаимосвязанных звеньев, для которых превращение энергии автогенерации подчиняется аддитивному закону

$$\Delta U_z = \Sigma U_{n,i} - \Delta U_{z\text{ост}}, \quad (1.4)$$

где ΔU_z – потенциальная энергия автогенерации,

$\Sigma U_{n,i}$ – прирост энергии автогенерации по i -м элементарным участкам;

$\Delta U_{z\text{ост}}$ – остаточная энергия автогенерации.

Мерой энергетического взаимодействия обрабатываемого материала с абразивной поверхностью служит функция ординат профиля $H(x, \tau)$, представляющая собой изохрону процесса энергопереноса. С учётом равенства (1.3) предполагается, что плотность потока энергии автогенерации \vec{U}_h пропорциональна градиенту функции $H(x, \tau)$:

$$|\vec{U}_h| = -x \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (1.5)$$

где $x(H)$ – удельная проводимость энергии автогенерации.

При упругих отжатиях в технологической системе выражение (1.5) усложняется:

$$|\vec{U}_h| = -x \frac{\partial H}{\partial x} - \tau_r \frac{\partial \vec{U}_h}{\partial \tau}, \quad (1.6)$$

где τ_r – время релаксации.

Дифференциальное уравнение для нестационарного потока энергии автогенерации имеет вид

$$q(H) \left[\frac{\partial H}{\partial \tau} + \tau_r \frac{\partial^2 H}{\partial \tau^2} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[x(H) \frac{\partial H}{\partial x} \right], \quad (1.7)$$

где $q(H)$ – удельная энергоёмкость процесса автогенерации.

Удельные характеристики $q(H)$ и $x(H)$ из выражения (1.7) определяются расчетно-экспериментальными методами. Предельные значения $x_0 = x(H)$ и $q_0 = q(H)$ обусловлены износом круга при скольжении детали по рабочей поверхности. При численном решении уравнения (1.7) в конечно-разностной форме определялась совокупность последовательных макропрофилей круга через фиксированные промежутки времени. Площадь поперечного сечения изношенного слоя равна

$$S_n = \int [H_k(x) - H_0(x)] dx, \quad (1.8)$$

где $H_0(x)$, $H_k(x)$ – начальная и конечная ординаты поперечного профиля.

В качестве критерия оптимизации в работе [69] принят минимум технологической себестоимости, достигаемый на основе следующих положений.

Требования по устойчивости процесса шлифования накладывают дополнительные ограничения на область возможных сочетаний режимных и геометрических параметров, подлежащих оптимизации. Отличительной особенностью абразивной обработки является вероятностная взаимосвязь между параметрами, что обуславливается во многом стохастической природой шлифовального инструмента. Такой многомерный векторный случайный процесс описывается уравнением

$$\vec{R}_m(\tau) = L(\vec{V}_k(\tau), \vec{\Omega}_n), \quad (1.9)$$

где $\vec{R}_m(\tau) = (R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_m)$ – вектор структурных параметров процесса (точность, шероховатость поверхности);

$\vec{V}_k(\tau) = (V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_k)$ – вектор управляющих режимных параметров;

$\vec{\Omega}_n(\tau) = (W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n)$ – вектор неуправляемых случайных параметров;

L – оператор вероятностной связи.

Уравнение (1.9) используется для определения детерминированных и вероятностных ограничений для задачи стохастической оптимизации по критерию технологической себестоимости.

Оптимизация технологических процессов шлифования в составе ГПС включает три основных этапа [66]:

- оптимизацию в контуре САПР параметров шлифовального круга и технологических режимов шлифования по заданным критериям качества на основе разработанных математических моделей протекающих процессов;

- отладку (настройку) технологии на оптимальный режим функционирования на основе регрессионных уравнений, полученных на основе методов планирования эксперимента на основе натуральных испытаний;

- управление тепловыми режимами в процессе работы на основе программно-технического комплекса, обеспечивающего обратную связь от малоинерционной микротермопары к устройству управления на базе микроЭВМ с использованием решения обратной задачи теплопроводности для идентификации граничных условий теплообмена.

В работе [67] оптимизация процесса шлифования инструментов из безвольфрамовых твёрдых сплавов проводилась по таким интегральным показателям качества инструмента как стойкость, выраженная длиной пути резания L и технологическая себестоимость C_m , которая учитывает не только удельную себестоимость шлифования инструментов $C_{ш}$, но и себестоимость механической обработки обработанным инструментом. Эти параметры выбирались в качестве критериев оптимизации, а оптимизация проводилась опытно-экспериментальным путем с получением однофакторных регрессионных зависимостей.

А.П. Фалалеев [68] предложил оптимизировать процесс электроэрозионного шлифования на основе имитационной модели обработки с учетом вероятностного подхода к процессу удаления материала в результате работы эрозии и абразива. Общая вероятность удаления материала в результате совместных механических и эрозионных воздействий представляется в таком виде:

$$P(M \cdot \mathcal{E}) = 1 - P(\bar{M}) \cdot P(\bar{\mathcal{E}}),$$

где $P(\bar{M})$ – вероятность неудаления материала в результате воздействия абразивных зёрен;

$P(\bar{\mathcal{E}})$ – вероятность эрозионного неразрушения материала.

В работе [69] для решения задач автоматического управления процессом шлифования шеек распределительных валов предлагается использовать динамическую модель поведения технологической системы шлифования, представленную в следующем виде:

$$c\ddot{S}_y - a\dot{S}_y = -c\ddot{Q}_\Sigma + b\dot{Q}_\Sigma + \dot{S}_R + \dot{y}_T,$$

где \dot{S}_y – величина поперечной подачи;

\dot{Q}_Σ – интенсивность съёма материала;

\dot{S}_R – интенсивность размерного износа инструмента;

\dot{y}_T – интенсивность температурных деформаций в технологической системе;

c, a, b – постоянные коэффициенты:

$$c = \frac{G_\kappa}{J_{mc}}; \quad a = \left(\left(1 + \frac{C_\kappa}{J_{mc}} \right) \alpha - 1 \right); \quad b = \left(2 - \frac{C_\kappa}{J_{mc}} \right),$$

где G_κ – коэффициент сопротивления;

C_κ – приведенная жёсткость контакта шлифовального круга и заготовки;

J_{mc} – жёсткость технологической системы;

α – постоянная величина.

С использованием предложенной зависимости осуществляется управление операцией шлифования путём стабилизации съёма припуска на протяжении всего

цикла обработки изделия. При использовании такого подхода применяется специальная стратегия регулирования, согласно которой подача шлифовального круга S_y изменяется с частотой, равной частоте вращения детали, и корректируется через каждый оборот изделия автоматической системой до тех пор, пока величина съёма припуска не достигнет номинального значения, а затем шлифование осуществляется с постоянной подачей до момента переключения режим резания.

Таким образом, оптимизация управления режимами операции шлифования валов состоит в выравнивании системой управления подачи круга относительно её номинального значения как на этапе чернового, так и на этапе чистового шлифования [69, 70].

Достоинством такого подхода является заметное уменьшение нестационарных фаз в цикле автоматического управления как на этапе чернового, так и на этапе чистового шлифования по сравнению с традиционными циклами обработки.

В работе [71] рассматривается процесс алмазного шлифования сверхтвёрдых материалов кругами на металлических связках с автономным управлением режущим рельефом круга. Способ шлифования СТМ с управлением режущим рельефом круга позволяет трансформировать процесс шлифования в диапазоне от производительного до прецизионного и ультрапрецизионного. Во всех случаях для оптимизации характеристик круга и режимов обработки предлагается использовать в качестве критерия оптимизации нагрузку на единичное зерно P_3 . На основании введения указанного критерия предложена схема расчёта оптимальных условий шлифования СТМ. Согласно этой схеме для производительного шлифования нагрузка на единичное зерно должна быть достаточной для его самозатачивания у вершины (в зоне контакта).

Для определения величины действующей на зерно нагрузки и характера распределения контактного давления решается задача динамического (ударного) взаимодействия зерна с поверхностью СТМ. Для прецизионного шлифования нагрузка на зерно должна быть меньше величины его самозатачивания, т.е. должен иметь место процесс истирания зерна и СТМ. При этом число зёрен в контакте с СТМ ограничивается предельно допустимой температурой шлифования, исклю-

чающей его растрескивание. Рабочая высота зёрен h_p должна обеспечивать участие в работе всех зёрен, т.е. коэффициент участия зёрен $K_y \geq 1$. Эта высота обеспечивается соответствующей интенсивностью дозируемого удаления связки [71].

С.М. Братаном разработана методика комбинированного управления операцией плоского шлифования, по которой шлифование осуществляется по эталонному циклу с контролем размера и оценкой состояния технологической системы на всех этапах [72]. Реализующая данную методику автоматическая система управляет процессом шлифования путём стабилизации глубины резания на протяжении всего цикла шлифования с применением специальной стратегии регулирования, основой которой является введение в память управляющей ЭВМ данных, полученных ранее при расчёте циклов с помощью теоретико-вероятностной модели и метода динамического программирования.

Форсированная подача и черновое шлифование осуществляется системой по номинальному циклу (с оценкой состояния технологической системы с помощью фильтра Кальмана) до момента переключения режима резания на чистовое шлифование. На этапе чистового шлифования подача шлифовального круга S_y изменяется и корректируется через каждый проход до достижения заданного размера изделия, величина которого оценивается автоматической системой, после чего шлифовальный круг выводится из зоны резания.

Реализация стохастического управления операцией плоского шлифования, в которой используемый для синтеза оптимального детерминированного регулятора критерий оптимальности включает независимые белые шумы, увеличивает точность обработки и повышает производительность шлифования за счёт учёта возмущений [72].

При оптимизации циклов управления операцией круглого наружного шлифования поведение технологической системы моделируется уравнением баланса перемещений, которое для одного j -го оборота заготовки записывается в следующем виде:

$$\Delta A_j = \Delta t_{\phi j} + \Delta r_{j-1} + \Delta R_j + \Delta y_j, \quad (1.10)$$

где ΔA_j – расчётное изменение межцентрового расстояния между кругом и заготовкой, вычисляется по величине поперечной подачи S_y и времени одного оборота τ_j ,

$$\Delta A_j = S_y \cdot \tau_j;$$

$\Delta t_{\phi j}$, Δr_{j-1} , Δy_j – приращение глубины резания, износа круга, упругих деформаций технологической системы на j -м обороте заготовки;

Δr_{j-1} – радиальный съём материала при j -м контакте поверхности с инструментом.

Уравнение (1.10) устанавливает связь управляющего воздействия с параметрами состояния технологической системы, одним из которых является фактическая глубина резания t_{ϕ} . Решение уравнения (1.10) осуществлялось итерационными методами, что позволяет при известном (рассчитанном) алгоритме изменения t_{ϕ} найти алгоритм изменения поперечной подачи [73]. В модель процесса шлифования вносились при этом технические ограничения, обусловленные требованиями к качеству обработанной детали, станком, на котором выполняется операция и технологической системой.

Задача оптимизации режимов круглого наружного шлифования решалась методом динамического программирования, что позволило разработать общую последовательность построения циклов обработки на операции шлифования. Оптимальные значения номинальных траекторий изменения поперечной подачи S_y определялись при изготовлении партии деталей в целом, а не отдельных деталей, как, например, при применении метода спирального покоординатного спуска.

Полученные циклы управления операцией круглого наружного шлифования состоят из трёх этапов [73]:

- этапа «форсированной подачи», на котором подача принимается постоянной и ограничивается возможностями кинематики станка;
- этапа «чернового шлифования», на котором подача ограничивается максимальной силой резания, допускаемой технологической системой и величиной дефектного слоя;

– этапа чистового шлифования, где подача закономерно уменьшается и лимитируется ограничениями на шероховатость поверхности, точность обработки, глубину дефектного слоя.

Каждый новый цикл рассчитывается с учётом изменённого состояния инструмента, вызванного затуплением режущих кромок и снижением его режущей способности.

В работе [74] для оценки эффективности процесса алмазного шлифования сверхтвёрдых материалов применяется коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зёрен K_u , который в данном случае является критерием оптимизации:

$$K_u = \frac{V_d}{V_z},$$

где V_d – объём диспергированных зёрен, V_z – объём всех израсходованных зёрен.

Для оценки вклада материала связки в износ круга изнашивание алмазного инструмента при шлифовании постулируется как непрерывный процесс происходящих с различной вероятностью двух равновозможных, несовместимых и независимых случайных событий – диспергирования активных зёрен, т.е. их микровыкрашивания и выкрашивания, и вырывание зёрен из связки в результате когезионного и (или) адгезионного разрушения границы контакта «зерно-связка». Вероятность разрушения связки, т.е. вырывания из неё зёрен

$$P_e = \frac{V_e}{V_z} = \frac{1}{e}, \quad (1.11)$$

где V_e – объём выпавших из связки зёрен, V_z – объём разрушенных зёрен в алмазном слое.

Тогда вероятность другого несовместимого случайного события – диспергирования активных зёрен основной фракции – составляет

$$P_d = 1 - e^{-1}. \quad (1.12)$$

Соотношение вероятностей P_δ и P_ϵ , описываемых выражениями (1.11) и (1.12), количественно характеризует механизм изнашивания рабочего слоя круга как многокомпонентной системы.

Для оценки влияния физико-механических свойств алмазных зёрен на изнашивание инструмента В.А. Федорович [74] ввёл новое понятие – удельный износ, который представляет собой отношение объёмов разрушенных алмазных зёрен к объёму снятого обрабатываемого материала:

$$q_u = \frac{V_z}{V_{СТПМ}} = \frac{(d_z - h_{кр} - h_{св})^3}{d_z^3}, \quad (1.13)$$

где $V_{СТПМ}$ – объём разрушенного сверхтвёрдого поликристаллического материала (СТПМ);

d_z – средний размер зёрен;

$h_{кр}$ – критическая величина заделки зерна в связку;

$h_{св}$ – величина микронеровностей связки (рис. 1.11).

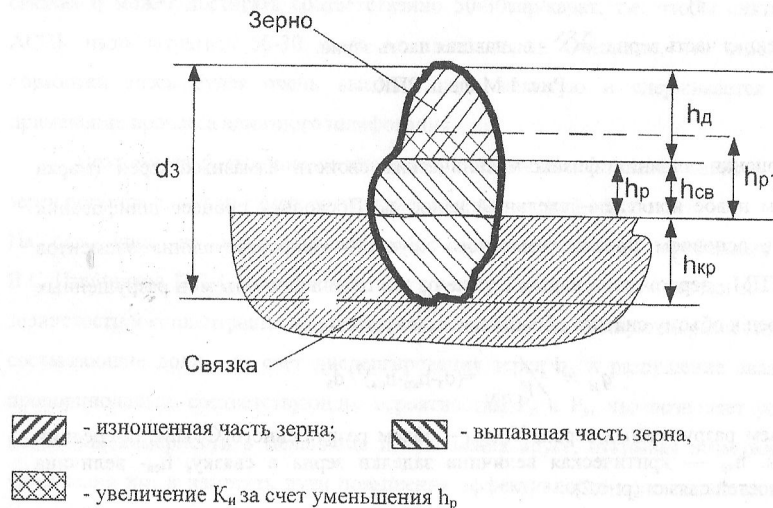


Рисунок 1.11 – Схема износа алмазного зерна при шлифовании СТМ [74]

Величина q_u определяется экспериментально. Способ оценки влияния материала связки на износ круга основан на его разделении на составляющие доли – за счёт диспергирования активных зёрен q_δ и за счёт разрушения связки q_ϵ – пропорционально соответствующим вероятностям (1.11) и (1.12):

$$\frac{q_d}{q_s} = \frac{P_d}{P_s} = e^{-1}.$$

По экспериментальным значениям величин e и q_u , зная, что $q_u = q_d + q_s$, и используя уравнение (1.13), можно количественно оценить в первом приближении вклад материала связки в износ круга, что позволяет управлять им или его прогнозировать.

Если осуществлять управляемый процесс шлифования с оптимальной рабочей высотой зёрен h_p (см. рис. 1.11), равной величине микронеровностей связки $h_{св}$, то это исключает контакт связки с СТПМ и, соответственно, практически исключает выпадение из связки неработающих зёрен, что ведёт к уменьшению непроизводительного расхода СТПМ [74].

Ещё один путь снижения непроизводительного расхода дорогостоящих алмазных зёрен предложен в работе [75] – это определение оптимальной концентрации алмазов в круге, обеспечивающей достаточную производительность обработки при минимальном расходе алмазных зёрен.

Методика выбора концентрации алмазов исходя из прочностных свойств обрабатываемого и инструментального материалов предложена в [76]; в соответствии с ней концентрация алмазных зёрен определяется из соотношения:

$$K = 25 \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_2},$$

где σ_1 – предел прочности на сжатие шлифуемого СТМ;

σ_2 – предел прочности на сжатие алмазных зёрен круга.

В дополнение к этому в [75] учитывались также прочностные свойства связки. Здесь рассматривалась взаимосвязь рабочей высоты зёрен над уровнем связки и концентрация зёрен как дополняющих друг друга параметров, принимающих участие в обеспечении оптимального сочетания производительности, себестоимости и качества обработки. Расчёт оптимальной концентрации алмазов вёлся исходя из условия, чтобы на алмазных зёрнах круга в процессе их работы не образовывались плоские площадки износа, тормозящие процесс шлифования.

Зёрна должны иметь возможность самозатачиваться с образованием субмикроромок.

С течением времени обработки СТМ зёрна инструментального материала с образовавшимися площадками износа удерживают на себе всю нагрузку, не давая возможность вступить в работу новым острым зёрнам. Такие зёрна необходимо либо удалить из связки, либо заставить их хрупко самозатачиваться, увеличив нагрузку в контакте «зерно-СТМ» при той же рабочей высоте зёрен.

В первом случае вопрос решается электроэрозионным или электрохимическим удалением металлической связки. Однако практическая реализация этих способов воздействий на алмазный круг при шлифовании СТМ показала, что они неэффективны с точки зрения себестоимости, так как большое количество зёрен выпадает из связки, либо вообще не принимая участия в шлифовании, либо с очень низким коэффициентом использования своих режущих свойств [75].

Во втором случае происходит чрезмерное возрастание общей нагрузки на обрабатываемый СТМ. А поскольку предел прочности алмазных зёрен, как правило, выше, чем обрабатываемых сверхтвёрдых материалов в силу большей дефектности последних, то до наступления момента самозатачивания зёрен может происходить либо макрорастрескивание обрабатываемого СТМ, либо образование на его поверхности сетки микротрещин. Чем большую площадь занимают зёрна на РПК, т.е. чем больше их концентрация, тем вероятнее макроразрушение СТМ, приводящее к браку шлифованной поверхности.

При 100%-й концентрации алмазов не представляется возможным увеличить нагрузку, необходимую для разрушения зёрен, без разрушения СТМ. Это свидетельствует о том, что концентрация алмазных зёрен в применяемых алмазных шлифовальных кругах намного превышает оптимальную. Это проявляется в возможности обеспечить одну и ту же опорную площадь поверхности круга t_{pi} при работе кругами с различной концентрацией (рис. 1.12).

Таким образом, алгоритм определения оптимальных условий шлифования СТМ, представленный в [75], выглядит следующим образом. При 3D-моделировании контакта единичного зерна с поверхностью СТМ методом конеч-

ных элементов определяются оптимальные условия интенсивного съёма припуска для данной марки обрабатываемого материала – марка алмазного зерна, зернистость, скорость шлифования, давление в контакте. Определив через режимы нагрузки на единичное зерно, достаточную для его самозатачивания, задаётся минимальная высота зёрен, исключая контакт с обрабатываемой поверхностью. Рассчитывается максимально допустимая нагрузка на шлифуемый образец, не вызывающая его растрескивание, и определяется максимально допустимое число зёрен в контакте. По назначенной рабочей высоте и рассчитанному числу зёрен в контакте назначается концентрация зёрен.



Рисунок 1.12 – Иллюстрация возможности обеспечения одинаковой опорной площади РПК при различной концентрации зёрен в круге [75]

Принципиальной особенностью алмазного шлифования СТММ является практическое отсутствие внедрения алмазных зёрен в обрабатываемый материал (твёрдости обрабатываемого и инструментального материалов одинаковы). Следовательно, в работе (в контакте) будут находиться только максимально выступающие зёрна (точнее, вершины зёрен, находящиеся в диапазоне их вдавливания в связку Δh [77]).

При шлифовании торцевых поверхностей изделий типа кольцо, втулка и других тел вращения из таких труднообрабатываемых материалов, как твёрдые сплавы и рэлит, обеспечить наибольшую производительность можно примени-

ем алмазных кругов на органических (бакелитовых) связках, работающих в режиме самозатачивания и высокого износа [78].

Именно интенсивный износ зёрен круга позволяет непрерывно в процессе шлифования поддерживать высокую режущую способность круга, что является основным условием уменьшения сил и температуры резания, повышения производительности и качества обработки. По данным исследований [78], при врезном шлифовании алмазным кругом 12A2 150x10x3 AC4 100/80 B2-01 кольцо из рэлита (диаметром 34 мм и шириной 5 мм) обеспечивается линейная скорость съёма материала (производительность обработки) более 1 мм/мин; причем такая производительность находится на стабильном уровне вплоть до полного износа круга.

При шлифовании аналогичным алмазным кругом AC6 125/100 на металлической связке M1-01 такая же производительность обработки имеет место лишь в начальный момент времени после правки круга. Через 15-30 с круг заметно теряет режущую способность в результате затупления алмазных зёрен, производительность обработки снижается в 2-3 раза. В таком режиме самозатачивания алмазный круг может работать достаточно длительное время, после чего его необходимо править. При этом износ алмазного круга на металлической связке приблизительно в 5-6 раз меньше, чем круга на органической связке.

Анализ рассмотренных способов оптимизации режимов шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов показывает, что для случая осуществления процесса шлифования без управления параметрами режущего рельефа круга, независимо от выбора критерия оптимизации, в последовательность этапов оптимизации включается получение регрессионных уравнений на основе применения методов планирования эксперимента. Если оптимизация процесса шлифования без управления параметрами РПК производится на основе использования имитационных моделей обработки, то либо сама модель строится на основе вероятностного подхода, либо она включает в себя составляющие, которые определяются опытно-экспериментальным методом.

В случае осуществления процесса шлифования с управлением параметрами режущего рельефа круга оптимизация процесса производится на основе построе-

ния циклов обработки с использованием эталонного цикла и автоматической системы управления, которая осуществляет регулирование на базе данных, полученных с помощью теоретико-вероятностных моделей или оценкой состояния технологической системы.

Когда в качестве критерия оптимизации применяются показатели, характеризующие использование режущих свойств зерен СТМ или нагрузку на отдельное зерно в процессе обработки, задача оптимизации решается путём выбора характеристик инструментального материала и шлифовального круга, наилучшим образом подходящих для пары элементов технологической системы «шлифовальный инструмент – обрабатываемая заготовка» при заданных технических ограничениях на процесс обработки.

Такой подход оправдан в массовом и крупносерийном производстве, где возможно затратить достаточно большие средства на технологическую подготовку производства, в частности на его инструментальное обеспечение. В производстве с низкими коэффициентами серийности он малоприменим, так как в предельном случае использование такого подхода сведется к индивидуальному подбору характеристик шлифовального круга не только для каждой марки обрабатываемого материала, но и для каждого вида обрабатываемых изделий.

1.5 Основные принципы математического описания процесса шлифования по различным схемам

1.5.1 Математическое описание процесса шлифования с фиксированными режимами обработки

Процесс шлифования с фиксированными режимами обработки (шлифования по жёсткой схеме), как правило, описывается с помощью формул для расчёта сил резания, так как именно составляющие силы резания определяют такие выходные показатели шлифования как мощность обработки, точность полученных размеров, качество обработанного поверхностного слоя детали и т. п.

Существующие способы описания процесса шлифования можно условно разделить на два группы, различающиеся подходами. При первом подходе процесс шлифования рассматривается как квазистационарный [65, 79, 80, 81, 82]; при втором – как нестационарный [19, 60], в котором выходные параметры шлифования зависят от времени обработки.

Для объяснения причин изменения производительности шлифования по жёсткой схеме используются аналитические зависимости, описывающие изменение сил резания при различных режимах и условиях шлифования [17, 19, 81, 83, 84]. Зависимости получены на основе плоской модели стружкообразования с единственной условной плоскостью сдвига. С.Н. Корчак, исходя из постоянного соотношения между нормальным и касательным напряжением в обрабатываемом материале $\sigma \approx 1,5 \tau_s$, вывел следующие формулы для расчёта сил резания на единичном зерне [83]:

$$\begin{aligned} P_y &= \left(\frac{\sqrt{3,25} \cdot a_z \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5 l_3 \right) \tau_s; \\ P_z &= \left(\frac{\sqrt{3,25} \cdot a_z \cos \beta}{\sin \beta_1} + 0,5 \mu l_3 \right) \tau_s, \end{aligned} \quad (1.14)$$

где a_z – толщина среза единичным зерном;

β – угол действия (угол между вектором скорости резания и равнодействующей силой резания);

β_1 – угол сдвига;

μ – коэффициент трения задней поверхности зерна о поверхность резания;

l_3 – величина площадки затупления на задней поверхности зерна.

Формулы (1.14) учитывают две автономные системы сил, действующие на зерно. Одна система зависит от толщины среза a_z , а вторая – от величины площадки затупления l_3 задней поверхности зерна. Связь между этими системами сил осуществляется через величину τ_s , характеризующую прочность обрабатываемого материала на сдвиг в условиях резания и определяемую по функциональной зави-

симости от интенсивности напряжённого состояния $\sigma_{i\dot{\varepsilon}_i U^\circ}$ при скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$ и температуре U° , присущих исследуемому процессу обработки [83]. Интенсивность напряжений при скоростях деформации, соответствующих процессу шлифования ($\dot{\varepsilon}_i = 10^7 \text{ с}^{-1}$), определялась С.Н.Корчаком по экспериментальным данным испытаний образцов на разрыв для статической скорости деформации ($\dot{\varepsilon}_{cm} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) и различных температур нагрева образца; для экспериментальных данных были рассчитаны поправки на скорость деформации с использованием закономерностей, приведенных в работе [85].

Так как при шлифовании величина площадки затупления l_3 при увеличении времени обработки увеличивается, то соотношение P_y/P_z постоянно растёт. В связи с этим зависимости (1.15) использовались С.Н.Корчаком для определения производительности шлифования при одинаковой точности обработки, которая обеспечивается постоянством радиальной составляющей силы резания P_y .

В работе [84] составляющие силы резания при микрорезании единичным зерном определяются через предел прочности обрабатываемого материала на сжатие $[\sigma]_{сж}$:

$$F_{y1} = \frac{2[\sigma]_{сж} S}{(K_{ш} - f)^2}; \quad F_{z1} = \frac{2[\sigma]_{сж} S}{(K_{ш} - f)}, \quad (1.15)$$

где S – площадь поперечного сечения среза, мм^2 ;

$K_{ш}$ – коэффициент шлифования;

f – коэффициент трения зерна с обрабатываемым материалом.

Площадь поперечного сечения среза в формулах (1.15) определяется толщиной среза a_z , а, следовательно, зависит от геометрической формы и от разноразмерности зёрен.

В работе [19] процесс шлифования с управляющими воздействиями на РПК рассматривается как система, состоящая из двух подсистем: подсистемы резания и подсистемы управляющих воздействий. В ходе функционирования этих подсистем как единой системы они взаимосвязаны и взаимообусловлены. Наличие такой

взаимосвязи выдвигает требование к описанию подсистемы резания как нестационарного процесса, выходные показатели которого зависят от времени обработки.

В связи с этим для расчёта составляющих сил резания, действующих на шлифовальный круг в момент времени τ , предложены следующие формулы:

$$P_{зк} = \frac{\left[\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z(\tau) \cos \omega}}{\sin \beta} + K_3 M \mu l_3(\tau) \right] z_p(\tau) b(\tau) C}{1 + \left[\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z(\tau) \cos \omega}}{\sin \beta} + K_3 M \mu l_3(\tau) \right] z_p(\tau) b(\tau) \frac{4\alpha a \cdot 60V_k \sqrt{H} \alpha_v}{\lambda V_\delta S \sqrt{\pi}}}; \quad (1.16)$$

$$P_{ук} = \left[\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z(\tau) \cos \omega}}{\sin \beta} + K_3 M \mu l_3(\tau) \right] z_p(\tau) b(\tau) \left(C - \frac{4\alpha a \cdot 60V_k \sqrt{H} \alpha_v}{\lambda V_\delta S \sqrt{\pi}} P_{зк} \right), \quad (1.17)$$

где $M = 1 + 2(\pi/4 - \beta)$ – коэффициент, определяемый соотношением σ/τ_s ;

$a_z(\tau)$ – максимальная толщина среза, мм;

β, ω – соответственно угол сдвига и угол действия;

K_3 – коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью;

μ – коэффициент трения задней поверхности зерна о поверхность резания;

$l_3(\tau)$ – величина площадки контакта зерна, мм;

$z_p(\tau)$ – количество одновременно контактирующих с деталью зёрен;

$b(\tau)$ – ширина единичного среза, мм;

a, λ – соответственно коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$, и теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, обрабатываемого материала;

H – безразмерная полуширина источника тепла;

α_v – коэффициент ввода, учитывающий количество тепла, поступающее в деталь;

S – площадь зоны контакта детали со шлифовальным кругом, мм^2 ;

C , α – начальная ордината и коэффициент в линейной зависимости, отражающей влияние температурно-скоростных факторов в условиях шлифования на величину касательных напряжений; зависимость имеет вид $\tau_s = C - \alpha T$.

Толщина единичного запятообразного среза оценивается фактической толщиной среза:

$$a_{z \max \phi} = \begin{cases} a_{z \max} & \text{при } a_{z \max} > R_{\max}; \\ a_{z \max} + R_{\max} & \text{при } a_{z \max} \leq R_{\max}, \end{cases} \quad (1.18)$$

где R_{\max} – максимальная высота неровностей на поверхности резания.

Полученные в работе [19] формулы для расчета максимальной толщины запятообразного среза имеют следующий вид:

при внутреннем и круглом наружном шлифовании

$$a_{z \max} = R_{\kappa} - \sqrt{R_{\delta}^2 + H^2 - 2R_{\delta}H \cos \left[\arccos \frac{(R_{\delta}(+) - R_{\kappa})(R_{\delta}(+) - t_{\phi})}{V_{\delta} l_{\phi} 180} - \frac{60V_{\kappa} R_{\delta} \pi}{60V_{\kappa} R_{\delta} \pi} \right]}, \quad (1.19)$$

где R_{κ} , R_{δ} – соответственно радиус круга и радиус детали, мм;

$H = R_{\delta}(+) - R_{\kappa}(-) + t_{\phi}$; знаки в скобках относятся к круглому наружному шлифованию;

при плоском шлифовании

$$a_{z \max} = R_{\kappa} - \sqrt{\left(\frac{V_{\delta} l_{\phi}}{60V_{\kappa}} \right)^2 + R_{\kappa}^2 - 2 \frac{V_{\delta} l_{\phi} R_{\kappa}}{60V_{\kappa}} \sqrt{\frac{2t_{\phi}}{R_{\kappa}}}}. \quad (1.20)$$

В приведенных формулах (1.20), (1.21):

l_{ϕ} – фактическое расстояние между двумя последовательно контактирующими зернами,

t_{ϕ} – фактическая глубина шлифования.

Для шаровой модели алмазного зерна фактическое окружное расстояние между зёрнами предлагается определять по формуле

$$l_{\phi_{ок}} = \frac{20}{\sqrt[3]{iN_z}} \sqrt{\frac{d}{d - h_k}} \cdot \frac{\alpha + \beta(60V_k/V_d)}{\sqrt{F(t_\phi)}}, \quad (1.21)$$

где i – содержание зёрен в единице объёма алмазонасного слоя шлифовального круга;

N_z – среднее количество алмазных зёрен в одном карате;

d – диаметр шаровой модели зерна;

h_k – критическая глубина заделки зерна;

α, β – соответственно свободный член и коэффициент регрессии, характеризующие влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зернами;

$F(t_\phi)$ – значение функции распределения разновысотности зёрен на глубине t_ϕ .

Из перечисленных в формуле (1.21) величин время шлифования влияет на значение функции распределения $F(t_\phi)$. В работе [19] это влияние предложено учитывать с помощью коэффициента K_τ :

$$F(t_\phi, \tau) = F(t_\phi) \cdot K_\tau \quad (1.22)$$

$$\text{Здесь } K_\tau = A_1 \cdot \tau^{q_1},$$

где τ – время шлифования,

A_1, q_1 – эмпирические коэффициент и показатель степени.

Сходным образом предложено описывать и влияние времени обработки на длину контактных площадок зёрен:

$$l_s = C_1 \cdot \tau^q, \quad (1.23)$$

где C_1, q – эмпирические коэффициент и показатель степени.

Ширина единичных срезов b при наличии их поперечного перекрытия оценивается через расстояние между статистически равнозначными сечениями математической модели РПК S_x :

$$b = S_x = \frac{S_{3n}^2}{l_{\phi_{ок}} F(t_\phi) K_k}, \quad (1.24)$$

где S_{3n} – расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга,

$$S_{zn} = \frac{20}{\sqrt[3]{iN_z}} \sqrt{d - h_k}; \quad (1.25)$$

K_k – коэффициент контактирования, представляющий отношение количества контактирующих зёрен к количеству зёрен, попавших в активную часть РПК.

Поскольку количество контактирующих зёрен на единице поверхности шлифовального круга определяется по формуле

$$z_k(t_\phi) = \frac{1}{S_{zn}^2} F(t_\phi) K_k, \quad (1.26)$$

то общее количество одновременно контактирующих с поверхностью детали зёрен рассчитывается следующим образом

$$z_p = \frac{BL}{S_{zn}^2} F(t_\phi) K_k, \quad (1.27)$$

где B – ширина шлифования,

L – длина дуги контакта абразивного зерна с деталью.

Величина L для сегментообразного и запятообразного срезов определяется по следующим зависимостям:

$$L_c = 2\sqrt{D_k t_\phi}; \quad L_z = \sqrt{D_k t_\phi}, \quad (1.28)$$

где D_k – диаметр шлифовального круга.

Таким образом, в рассмотренной выше модели шлифования с фиксированными режимами обработки (шлифования по жёсткой схеме) при описании подсистемы резания как нестационарного процесса, в случае, если такое описание выполняется с помощью формул для расчёта составляющих силы резания, параметрами, непосредственно отражающими влияние времени на показатели обработки, являются:

а) значение функции распределения разновысотности зёрен на глубине резания t_ϕ ;

б) длина контактных площадок зёрен l_z .

В литературе имеются экспериментальные данные об изменении этих параметров во времени обработки при алмазном шлифовании труднообрабатываемых ванадийсодержащих сталей для жёсткой [19] и упругой [60] схем шлифования.

Для описания процесса шлифования по жёсткой схеме предложены также формулы для аналитического расчета параметров шероховатости обработанной поверхности с использованием значений используемых режимов шлифования и значений параметров РПК [86].

1.5.2 Математическое описание процесса шлифования с фиксированной поджима заготовки к рабочей поверхности круга

При описании процесса шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга (шлифования по упругой схеме) наиболее часто используют формулы, отражающие взаимосвязь производительности обработки Q с режимами шлифования [17, 84]:

$$Q = \frac{2F_y V_{кр}}{\pi \tan \gamma \cdot HV} (1 - \eta),$$

где F_y – радиальная составляющая силы резания, Н;

$V_{кр}$ – скорость круга, м/с;

γ – половина угла заострения зерна;

HV – микротвёрдость обрабатываемого материала;

η – коэффициент, характеризующий степень затупления зерна.

В работе [84] отмечается, что на производительность обработки наиболее существенно влияет параметр η , который «при шлифовании по упругой схеме, как и при шлифовании по жёсткой схеме, является основным физическим параметром». Значение этого параметра пропорционально длине контактных площадок зёрен l_3 , которая растёт в процессе шлифования.

При рассмотрении процесса шлифования по упругой схеме Л.А.Глейзер на основании выдвинутого и подтвержденного им экспериментально положения о

том, что «основным фактором, влияющим на производительность данного шлифовального круга при обработке данного изделия, является радиальное давление», предложил следующее условие обеспечения заданной исходной величины радиального давления: некоторый “подводимый” объём материала изделия должен быть равен производительности шлифовального круга [44], т.е.

$$W_o = W,$$

где W_o – “подводимый” объём;

W – производительность шлифовального круга.

Величина W_o рассчитывается по формуле:

$$W_o = 1000 V_u S_o t, \text{ мм}^3/\text{мин},$$

где V_u – окружная скорость изделия, м/мин;

S_o – продольная подача, мм/об;

t – глубина шлифования.

Если “подводимый” объём будет больше производительности круга, то радиальное давление превысит исходную величину. Однако сам Л.А.Глейзер отметил [44], что назначение режимов шлифования в соответствии с описанным условием не может гарантировать точность задания и неизменность радиального давления, так как, во-первых, не учитывается изменение режущей способности круга по мере его затупления, и, во-вторых, различные шлифовальные круги с одной и той же паспортной характеристикой нестабильны в качественном отношении.

Методика расчёта объёма сошлифованного материала за 1 мин при круглом наружном шлифовании с упругим поджатием РПК к детали впервые была предложена Л.А.Глейзером в работе [87]. По Л.А.Глейзеру производительность шлифования

$$W = 600 V_k S_o n_o W_c, \text{ см}^3/\text{мин},$$

где V_k – скорость круга, м/с;

S_o – ширина обработки, мм;

n_o – число рисок, образуемых на заготовке 1 см^2 рабочей поверхности круга, шт/см²;

W_c – объём единичного среза, см³.

В работе [87] предложены формулы для расчёта единичного среза, числа рисок, нанесенных 1 см² РПК на заготовку, учитывается связь радиального усилия с числом зёрен, углубившихся в поверхность заготовки по линии контакта длиной 10 мм, а также с разновысотностью зёрен, под которой автор понимает среднее расстояние между вершинами соседних зерен в радиальном направлении, которое определяется в предположении о равномерном распределении вершин зёрен по высоте РПК.

Как показывает анализ приведенной методики расчёта, определение производительности шлифования по упругой схеме осуществляется путем умножения объёма среза материала, удаляемого одним зерном, на количество зёрен, контактирующих с заготовкой в единицу времени, что не может вызывать возражений. Вместе с тем при определении ряда величин, необходимых для расчёта, приняты допущения или методики их определения, которые ограничивают область применения рекомендаций.

Так, формулы для расчёта количества рисок, нанесенных на поверхность заготовки поверхностью круга площадью в 1 см², справедливы для случая, когда выполняются следующие условия:

- в процессе резания удаляются не перекрытые в осевом направлении сегментообразные срезы;
- расстояния между осевыми сечениями РПК, содержащими на дуге контакта длиной 10 мм постоянное число контактирующих зерен, равны длине среза;
- при прохождении в процессе резания дуги РПК длиной 10 мм отсутствует перекрытие профилей зёрен, расположенных в осевых сечениях круга.

В действительности, во-первых, в ряде случаев могут преобладать запятообразные срезы; во-вторых, расстояния между осевыми сечениями РПК зависят от размера зёрен инструментального материала и структуры круга, а также условий правки рабочей поверхности; в-третьих, отсутствие перекрытия профилей будет лишь в том случае, когда риски наносятся на полированную поверхность заготовки, форма которой близка к идеальной.

Кроме того, необоснованно ограничена одной величиной 10 мм максимальная длина дуги контакта, которая в действительности зависит от глубины шлифования, геометрических размеров круга и заготовки, а также соотношения их скоростей [88].

В работе [61] проводится расчёт производительности шлифования, исходя из условия внедрения режущей поверхности круга в обрабатываемый материал при поджиге неподвижного образца к РПК с усилием P_3 .

Данная методика расчёта производительности шлифования по упругой схеме основана на определении мгновенной суммарной площади поперечного сечения срезов, удаляемых с заготовки разновысотными расположенными зёрнами, S_c с последующим умножением её на скорость резания [61]:

$$Q = S_c v,$$

где v – скорость вращения круга.

При этом рабочая поверхность круга описывается функцией распределения их высот относительно уровня связки, аппроксимируемой полиномом, а площадь поперечного сечения определяется вдавливанием с заданной силой неподвижного круга в заготовку. Зависимость глубины внедрения от приложенного усилия описана степенной зависимостью, параметры которой определяются из экспериментов по микрорезанию образцов единичным зерном. Суммарная площадь, срезаемая внедрившимися зёрнами, учитывает форму модели зерна (конус с округлённой вершиной), количество одновременно работающих зёрен и их разновысотность, физико-механические свойства обрабатываемого материала.

Недостатками рассмотренной методики расчёта производительности шлифования, по нашему мнению, являются:

- использование для описания РПК функции распределения вершин зёрен относительно связки, в то время как для расчётов требуется использование обратной функции;

- использование эмпирических зависимостей, описывающих влияние на глубину внедрения зерна в обрабатываемый материал усилия поджима, полученных на базе экспериментов по микрорезанию единичным зерном;

– отсутствие учёта влияния на указанные эмпирические зависимости массы процесса резания зёрнами в реальных условиях;

– отсутствие учёта влияния времени обработки на производительность шлифования в результате изменения параметров закона распределения разновысотности и образования площадок износа на зёрнах.

В работе [34] при алмазном шлифовании сверхтвёрдых поликристаллических материалов (СТПМ) по упругой схеме изменение интенсивности шлифования во времени предложено описывать экспоненциальной зависимостью следующего вида:

$$Q = Q_{уст} + \Delta Q \cdot \exp(\beta_Q \cdot \tau), \quad (1.29)$$

где Q , $Q_{исх}$, $Q_{уст}$ – соответственно текущая, исходная, установившаяся интенсивность шлифования, мм³/с;

$\Delta Q = Q_{исх} - Q_{уст}$ – амплитуда снижения интенсивности, мм³/с;

β_Q – эмпирический коэффициент, 1/с;

τ – продолжительность шлифования, с.

Зависимость относительного расхода алмазов от продолжительности шлифования также предлагается аппроксимировать аналогичной экспоненциальной зависимостью [34]:

$$q = q_{уст} + \Delta q \cdot \exp(-\beta_q \cdot \tau), \quad (1.30)$$

где q , $q_{исх}$, $q_{уст}$ – соответственно текущее, исходное, установившееся значение фактического относительного расхода алмазов, мг/мм³;

$\Delta q = q_{исх} - q_{уст}$ – амплитуда снижения фактического относительного расхода алмазов, мг/мм³;

β_q – эмпирический коэффициент, 1/с.

Время шлифования СТПМ разделено на три периода: начальный, переходный и самоустановившийся, характеризующиеся существенным изменением значений величин, которые предлагается оценивать по зависимостям (1.29) и (1.30) (рис. 1.13).

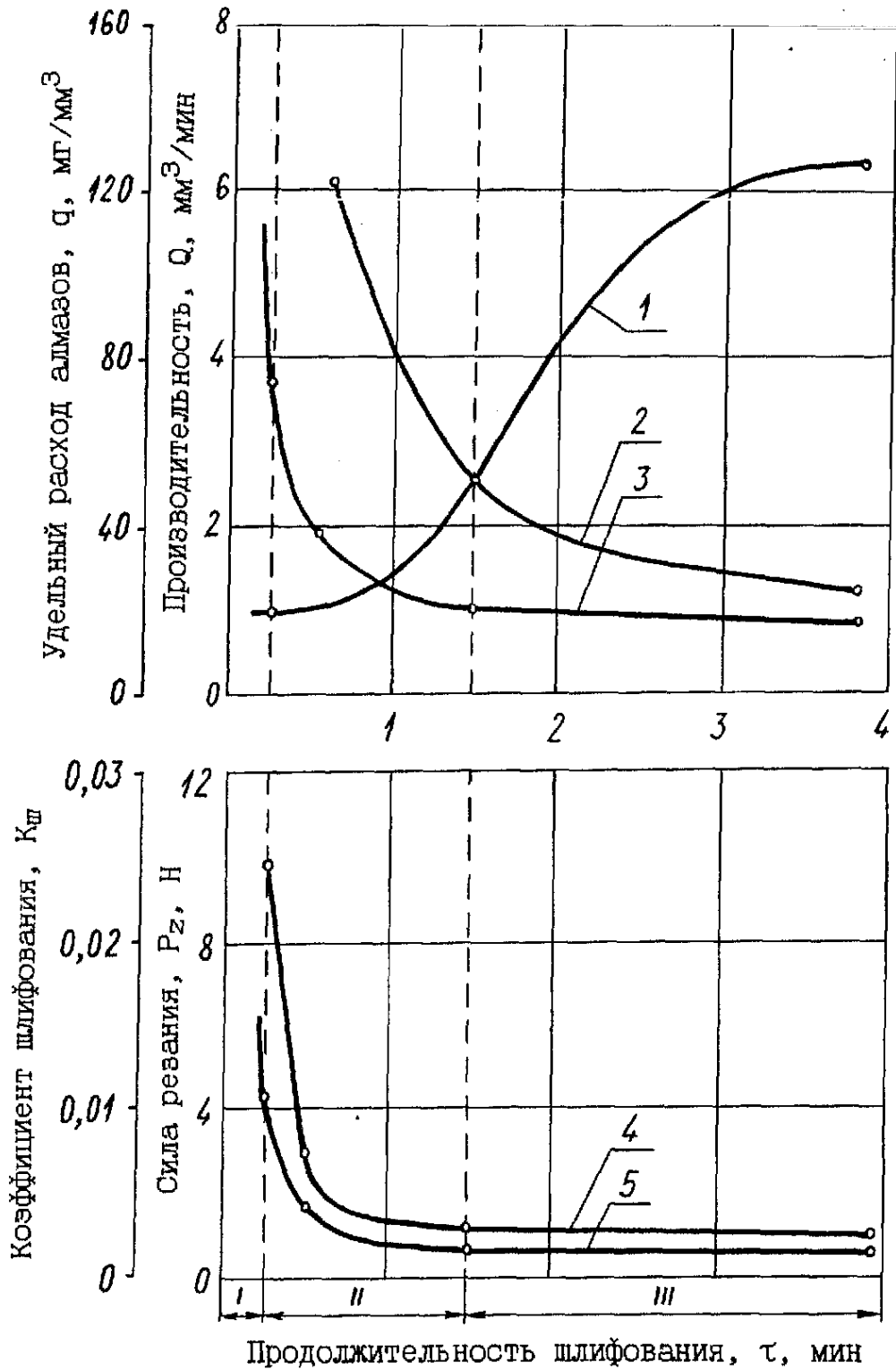


Рисунок 1.13 – Периоды алмазного шлифования СТПМ [34]

1 – фактический удельный расход q_f ; 2 – номинальный расход q_n ;

3 – производительность Q ;

4 – сила резания P_z ;

5 – коэффициент шлифования K_w

По данным А.И. Грабченко [34], в различные периоды шлифования (I, II и III) существенно изменяются также силы резания и коэффициент шлифования (см. рис. 1.13).

Предложенные в работе [34] зависимости описывают эволюцию подсистемы резания для условий, когда твёрдость обрабатываемого и инструментального материалов равны, в результате чего разрушение обрабатываемого материала происходит главным образом за счет динамического высокоскоростного воздействия элементарных выступов алмазных зёрен на обрабатываемую поверхность СТМ, т.е. соударения алмазных зёрен шлифовального круга с кристаллитами СТМ, а не за счёт резания. В силу этого они не могут количественно отражать эволюцию подсистемы резания в условиях удаления припуска резанием.

Вместе с тем выражения вида (1.29) и (1.30) по своей форме верно с качественной точки зрения отражают характер изменения интенсивности шлифования и относительного расхода алмазов во времени, которые в общем случае происходят не по линейной, а явно выраженной экспоненциальной зависимости.

Таким образом, на основе анализа литературных данных можно сделать вывод о том, что имеющиеся в технической литературе методики описания эволюции подсистемы резания при шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к кругу (шлифования по упругой схеме) получены для отдельных видов и способов обработки, и, соответственно, носят частный характер. В целом существующие математические модели шлифования абразивными кругами и кругами из СТМ основываются на двух принципиальных подходах:

1. Переходе от рассмотрения процесса работы шлифовального круга как стационарного процесса к его представлению в виде квазистационарного процесса или к учёту динамики изменения отдельных факторов в процессе работы круга.

2. Выделению такого показателя процесса алмазно-абразивной обработки, который бы комплексно характеризовал режущие свойства шлифовального круга с учетом конкретных условий обработки. Такой показатель преимущественно описывается формулами, полученными эмпирическим путём.

1.6 Использование шлифования с постоянной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга для определения фиксированных режимов обработки шлифованием

Как следует из п. 1.5.1 и 1.5.2, математическое описание процессов обработки и определение режимов шлифования выполнено для каждой из схем шлифования по отдельности.

В работах [89, 90] впервые предпринята попытка определения режимов для жесткой схемы, с использованием режимов шлифования по упругой схеме, кинематически аналогичной жесткой. В этом случае оптимальные режимы упругой схемы находятся экспериментально с использованием многофакторного эксперимента с поиском оптимума методом крутого восхождения. В качестве критерия оптимизации используется удельная себестоимость обработки, рассчитываемая по формуле:

$$C_{y\partial} = \frac{C_{c-ч}}{V}, \quad (1.31)$$

где $C_{c-ч}$ – себестоимость станко-часа обработки;

V – объём сошлифованного за один час материала.

В процессе поиска оптимума учитывается влияние следующих основных факторов процесса шлифования: среднего значения технологического тока I_{cp} , используемого для электроэрозионных воздействий в автономной зоне; радиальной составляющей силы резания P_y , Н; скорости шлифовального круга V_k , м/с; продольной скорости стола V_∂ , м/мин; величины поперечной подачи S_{non} , мм/ход.

После нахождения оптимальных режимов шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга переход к режимным параметрам при жёсткой схеме (фиксированным) осуществляется путём определения величины вертикальной подачи S_∂ из условия равенства удаляемых объёмов материала при упругой и жёсткой схемам обработки по следующей формуле:

$$S_\partial = \frac{V_{oy}}{T_m \cdot S_{non} \cdot 1000V_\partial}, \quad (1.32)$$

где V_{oy} – объём материала, подлежащий удалению при обработке, мм³;

T_m – машинное время обработки, мин;

S_{non} – поперечная подача, мм/ход;

V_d – продольная скорость стола, м/мин.

Остальные оптимальные режимы шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к РПК переносятся на жёсткую без изменений.

Недостатком предлагаемого способа определения режимов является то, что он не учитывает изменение режущей способности круга во время обработки, в результате чего удаляемый объём обрабатываемого материала в каждый момент времени обработки будет различным.

Нами предложена методика определения оптимальных режимов шлифования труднообрабатываемых ванадийсодержащих сталей по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к РПК, которая состоит из следующих этапов [60]:

- определение силы упругого поджима заготовки к РПК по температуре порога фазово-структурных изменений в поверхностном слое заготовки;
- описание изменения во времени фактической глубины шлифования, обусловленного совместным воздействием на режущую способность круга процессов засаливания межзёренного пространства и изнашивания зёрен;
- описание изменения во времени количества сошлифованного материала, обусловленного изменением режущей способности РПК;
- определение минимума удельной себестоимости станко-минуты.

В работе [60] предложено определять средний ток электроэрозионных воздействий для жёсткой схемы, исходя из равенства интенсивностей засаливания РПК и удаления продуктов засаливания из межзёренного пространства при шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к РПК.

Указанная выше методика, во-первых, основана на использовании только одного технического ограничения: температуры начала фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки, и, во-вторых, предложена для материалов, обработка которых сопровождается интенсивным засаливанием рабочей поверхности шлифовального круга заготовки.

1.7 Постановка цели и задач исследований

На основе проведенного анализа литературных источников по современным способам повышения эффективности шлифования кругами из СТМ можно сделать следующие выводы:

1. Три группы конструкционных и инструментальных материалов – инструментальные ванадиевые, молибденовые, вольфрамо-молибденовые стали; твердые сплавы и титановые сплавы – характеризуются низкой обрабатываемостью шлифовальным инструментом, что требует применения при их обработке дорогостоящих шлифовальных кругов из СТМ и способов обработки с высокими технико-экономическими показателями.

2. Высокоэффективным современным способом шлифования труднообрабатываемых материалов является шлифование алмазными кругами на металлической связке с поддержанием режущей способности РПК электроэрозионным способом, позволяющим обеспечить максимальное использование режущих свойств алмазов за счёт прочного закрепления зёрен в связке и исключения процессов засаливания межзёренного пространства с помощью управляющих электроэрозионных воздействий.

3. В производственной практике получили распространение способы шлифования с фиксированными режимами обработки (шлифование по жёсткой схеме) и шлифование с фиксированной силой поджима заготовки к РПК (шлифование по упругой схеме), которые исследованы и математически описаны как отдельные процессы.

4. Поиск оптимальных режимов шлифования осуществляется с использованием эмпирических зависимостей, многофакторного планирования, поиска оптимума с помощью различных методов: крутого восхождения, D-оптимального плана т.п. для каждой схемы в отдельности. Указанные методы поиска режимов обладают высокой трудоёмкостью, требуют проведения комплекса экспериментальных исследований и не учитывают нестационарности процесса обработки абразивно-алмазным инструментом.

4. Анализ существующих способов повышения эффективности шлифования кругами из СТМ позволил выделить две основные тенденции совершенствования методик определения режимов резания:

1) переход от рассмотрения процесса работы шлифовального круга как стационарного процесса к его представлению в виде квазистационарного процесса или к учёту динамики изменения отдельных факторов в процессе работы круга;

2) поиск такого показателя процесса алмазно-абразивной обработки, который бы комплексно характеризовал режущие свойства шлифовального круга с учетом конкретных условий обработки и учитывал бы технические ограничения, накладываемые на режимы шлифования совокупностью требований к изделию и шлифовальному кругу.

5. Первая попытка использовать достоинство упругой схемы шлифования, заключающееся в тесной корреляции выходных показателей обработки с режущей способностью РПК, для определения режимов шлифования по жесткой схеме базируется на использовании эмпирических методов поиска минимума себестоимости обработки при шлифовании по упругой схеме и основана на равенстве общего количества сошлифованного материала за одно и тоже время при обработке по жесткой и упругой схемам. При этом изменение режущих свойств РПК во время обработки не учитывается.

В связи с изложенным выше в работе ставятся следующие задачи:

1. Проанализировать современные способы повышения эффективности шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей и сплавов и определить приоритетные в настоящее время тенденции совершенствования методик определения режимов резания при шлифовании.

2. Разработать научные основы оптимизации режимных параметров шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей и сплавов кругами из СТМ с учётом нестационарности процесса обработки.

3. Разработать способы оптимизации режимов алмазного шлифования без управляющих воздействий и алмазного шлифования с периодическим восстанов-

лением режущих свойств РПК с помощью электроэрозионных управляющих воздействий с учётом нестационарности процесса.

4. Определить технико-экономические показатели алмазного шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей и сплавов при обработке без управляющих воздействий на рациональных режимах, а также при обработке с непрерывными и периодическими управляющими электроэрозионными воздействиями на оптимальных режимах.

5. Исследовать влияние характеристик обрабатываемых материалов на выходные показатели процесса обработки заготовок из труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей и сплавов шлифовальными кругами из СТМ, внедрить результаты исследований.

Кроме того, для решения общих необходимо решить ряд частных задач:

1. Выбрать способ шлифования для определения динамически изменяющейся максимальной режущей способности РПК в заданных условиях обработки, характеризующийся наибольшей степенью детерминированности параметров процесса и наибольшей полезной работой, выполняемой зёрнами инструментального материала.

2. Выбрать методики определения усилий поджима заготовки к РПК при обработке по схеме с фиксированной силой поджима, удовлетворяющей техническим ограничениям, налагаемым на режим резания температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое обработанной поверхности, температурой окисления алмазов и механической прочностью алмазных зерен.

3. Определить зависимость текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга и текущего расхода алмазов от времени обработки при плоском шлифовании труднообрабатываемых инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов при различных способах обработки и управления режущей способностью шлифовальных кругов.

4. Обосновать параметры обработки, обеспечивающие переход от схемы шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к кругу к схеме обработки с фиксированными режимами при идентичности условий обработки и опреде-

лить рациональные режимные параметры шлифования труднообрабатываемых инструментальных сталей, твердых и титановых сплавов по схеме с фиксированными режимами с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК.

5. Разработать методику определения напряжений сдвига в условиях шлифования для труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей и сплавов, основанную на применении термомеханических коэффициентов.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОБОРУДОВАНИЕ.
ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ИНСТРУМЕНТЫ.
МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1 Методология исследований

Одной из наиболее сложных проблемой при шлифовании кругами из СТМ является максимально полное использование режущих свойств зёрен сверхтвёрдого материала. Зёрна СТМ, прежде чем выпасть из связки круга и оказаться в шлифовальном шламе, должны совершить полезную работу по разрушению, диспергированию и отделению удаляемого при обработке слоя обрабатываемого материала. В связи с этим задача повышения эффективности процесса шлифования сводится к улучшению использования режущих свойств шлифовальных кругов из СТМ, к увеличению количества полезной работы, совершаемой отдельным зерном, к уменьшению непроизводительного расхода СТМ, непосредственно не связанного с процессом удаления припуска с обрабатываемой поверхности, к уменьшению затрат энергии, вызванных трением связки по обрабатываемой поверхности.

Представление процесса шлифования кругами из СТМ с непрерывным управлением параметрами рабочей поверхности круга как единой и целостной системы позволяет дифференцировать роль явлений, которые протекают в подсистемах шлифования и управления, и находить возможности восстановления параметров РПК, оптимизируя их значения в соответствии с заданными критериями оптимизации.

Для повышения эффективности процесса шлифования нами предлагается использовать обобщенный показатель процесса – текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга (ТЛРСШК), представляющую собой количество сошлифованного материала $Q = f(\tau)$ в любой момент времени шлифования с постоянной силой поджима заготовки к РПК, которая удовлетворяет ли-

митированному техническому ограничению, налагаемому на режимы обработки станком, инструментом и изделием. По изменению ТЛРСШК, которая в наибольшей мере коррелируется с максимально эффективным использованием режущих свойств СТМ, производится оптимизация режимов обработки и управляющих воздействий на рабочую поверхность круга.

Определение закономерности изменения ТЛРСШК во время обработки вида $Q = f(\tau)$ выполняется при врезном шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к РПК, где изменение режущих свойств шлифовального круга проявляется явным образом в виде изменения фактической глубины резания во времени ($t_{\phi} = f(\tau)$).

При шлифовании с фиксированными режимами обработки полученная закономерность $t_{\phi} = f(\tau)$ воспроизводится путём программирования величины подачи на врезание в соответствии с изменением глубины шлифования.

Структурно-логическая схема исследований представлена на рис. 2.1.

В исследованиях реализован системный подход и широко используются вербальные, физические и математические модели. Вербальные модели используются при описании сущности способов шлифования, их оптимизации, модернизации оборудования, устройств, методик измерений и расчётных методик.

Физическое моделирование используется при определении зависимостей ТЛРСШК и текущей фактической глубины резания от времени ($Q = f(\tau)$ и $t_{\phi} = f(\tau)$), закономерностей изменения режущей способности РПК в результате электроэрозионных управляющих воздействий и закономерностей расхода сверхтвёрдых материалов. Математическое моделирование используется при определении оптимального времени между электроэрозионными воздействиями по критерию минимальной удельной себестоимости обработки, определении составляющих силы резания и параметров шероховатости, сформированных на поверхности резания и обработанной поверхности.

Экспериментальные данные подвергаются статистическому анализу, выполняется проверка их достоверности, а также адекватности теоретических зависимостей по отношению к полученным экспериментальным данным.



Рисунок 2.1 – Структурно-логическая схема исследований

2.2 Применяемое оборудование

2.2.1 Модернизация плоскошлифовального станка модели 3Д711АФ11

Для осуществления алмазного шлифования твердых сплавов с управлением параметрами РПК электроэрозионным способом и формирования параметров РПК на стадии правки использовался модернизированный плоскошлифовальный станок модели 3Д711АФ11* (рис. 2.2). Модернизация плоскошлифовального станка (рис. 2.3) заключалась в установке на шпиндельный блок 8 устройства 1 для осуществления электроэрозионного воздействия на РПК в автономной зоне, электроизоляции алмазного круга от общей конструкции станка, обеспечении токоподвода к кругу 5.

Изоляцию шлифовального круга 1 от корпуса станка (рис. 2.4) обеспечивали с помощью диэлектрической пленки 5, установленной между посадочной поверхностью 3 неподвижного фланца 2 и посадочной поверхностью 4 шпинделя. Электроизоляция крепежного винта 6 была выполнена с использованием диэлектрической шайбы 7.

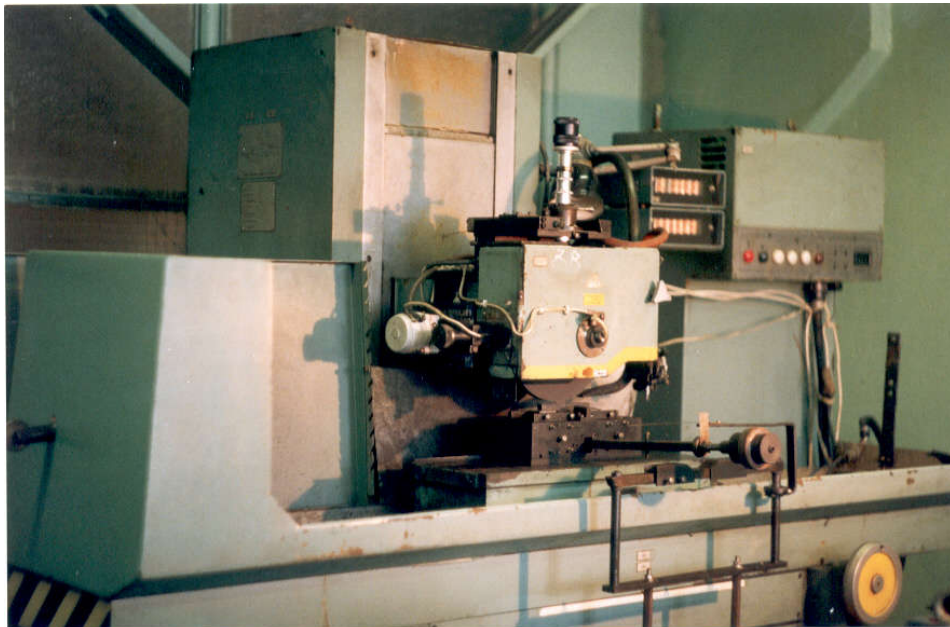


Рисунок 2.2 – Общий вид модернизированного плоскошлифовального станка модели 3Д711АФ11

* Модернизация станка 3Д711АФ11 выполнена В.Б. Стрелковым

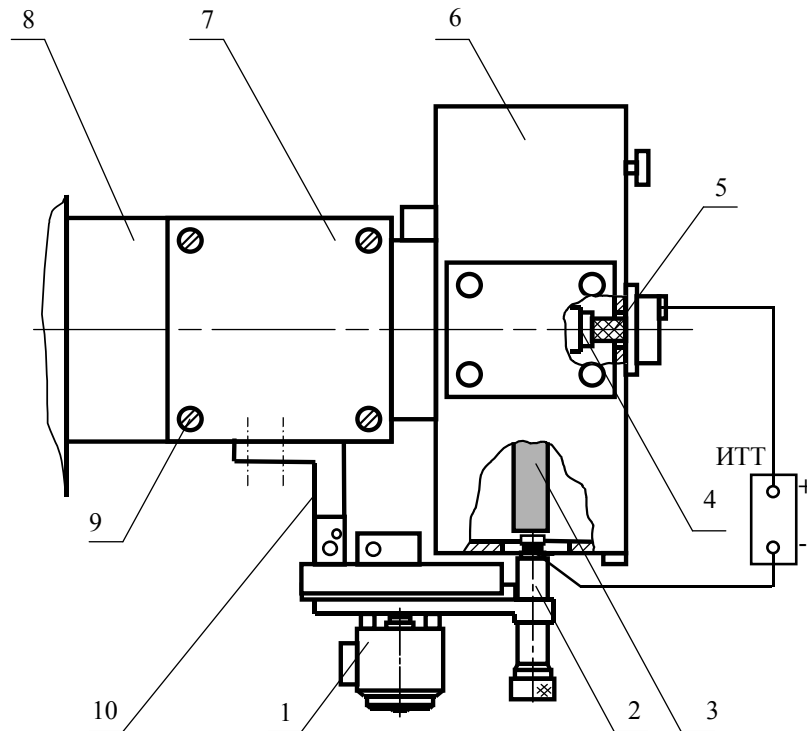


Рисунок 2.3 – Схема модернизации плоскошлифовального станка модели 3Д711АФ11

Технологический ток к инструменту от источника тока подводили через клемму 11, графитовую щетку 12, которая взаимодействовала с медным токо-съемником 13. Щетка 12 вместе с устройством её поджима помещена в диэлектрический стакан 14, который установлен в защитном кожухе 15 шлифовального круга 1.

Магнитная плита 8, на которой закреплялся обрабатываемый образец, изолировалась от стола станка 9 прокладкой 10. Крепежные болты и гайки также были выполнены из диэлектрика.

Конструкция стакана, через который обеспечивается подвод технологического тока к шлифовальному кругу, с установленными в нем прижимной пружиной и фиксирующим винтом показана на рис 2.5.

Стакан 5 крепится в кожухе 6 шлифовального круга винтами через переходную втулку. Подвод тока к кругу 8 осуществляется через провод 4 на графитовую щетку 1, имеющую призматическую форму, и медную заглушку 7, ввинченную во

фланец 9. Поджим щетки осуществляется пружиной 3, регулировка силы поджима осуществляется винтом 2.

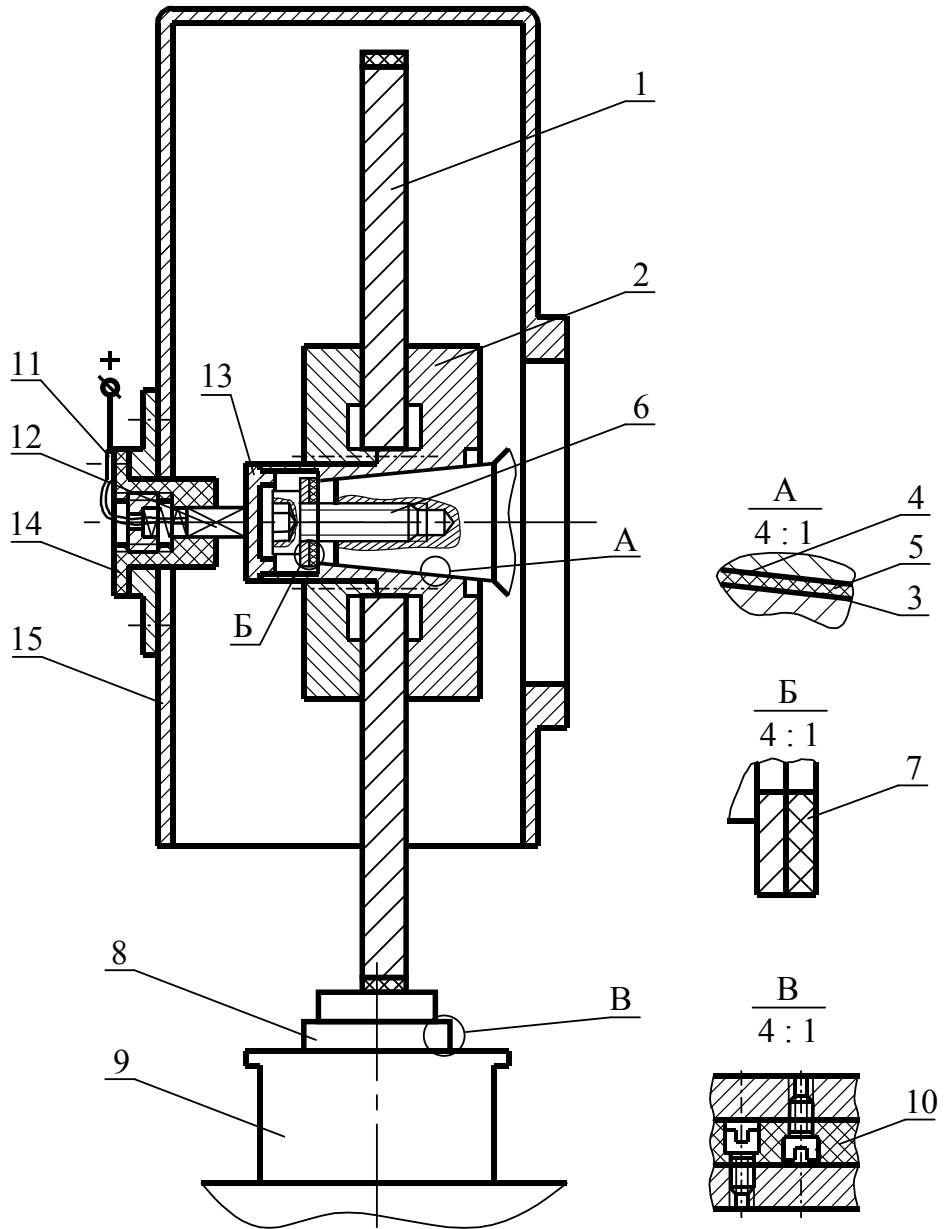


Рисунок 2.4 – Схема электрической изоляции шлифовального круга от шпинделя плоскошлифовального станка

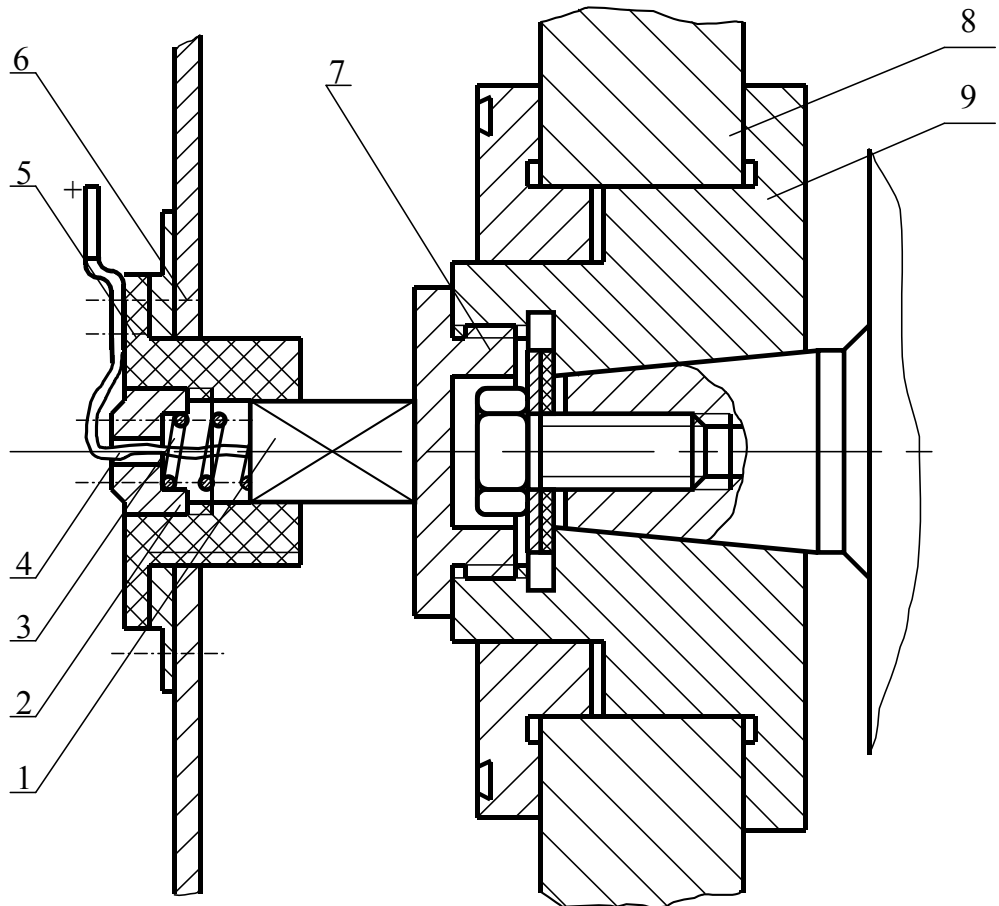


Рисунок 2.5 – Схема подвода технологического тока к шлифовальному кругу

В качестве источника технологической электроэнергии использовали блок электропитания модели ИТТ-35. Низковольтный источник технологического тока модели ИТТ-35 имеет следующие технологические характеристики:

- | | |
|--|--------------------------|
| – частота питающего напряжения | 50 Гц; |
| – частота выходных импульсов | $f = 50$ Гц; |
| – наибольшая потребляемая мощность | 1 кВт; |
| – диапазон регулирования выходного напряжения на холостом ходу: | |
| амплитудного | $U_{xx} = 27 - 75$ В; |
| среднего | 0,5 - 1 В; |
| – диапазон регулирования угла отсечки импульсов выходного напряжения | $85^\circ - 160^\circ$; |
| – максимальный средний ток | $I_{cp} = 35$ А. |

2.2.2 Модернизация плоскошлифовального станка модели 3Г71

Для осуществления алмазного шлифования ванадийсодержащих инструментальных сталей и титановых сплавов с управлением параметрами РПК электроэрозионным способом и формирования параметров РПК на стадии правки использовался модернизированный плоскошлифовальный станок модели 3Г71* (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Общий вид модернизированного плоскошлифовального станка модели 3Г71 с источником технологического тока ИТТ-35

Станок 3Г71 обеспечивает скорость резания 35 м/с при использовании шлифовальных кругов диаметром 250 мм, имеет бесступенчато регулируемую продольную подачу стола (5-20 м/мин) и автоматическую поперечную подачу (0,3-4,2 мм/ход).

* Модернизация станка 3Г71 выполнена В.П. Цокуром

Модернизация станка заключалась в обеспечении надежной изоляции шлифовального круга и магнитной плиты с закреплённым на ней обрабатываемым образцом от всей конструкции станка, установке на корпусе шпиндельной бабки станка специального устройства для осуществления электроэрозионных воздействий на РПК в автономной зоне и подводе технологического тока в зону резания либо автономную зону (см. рис. 2.3).

Изоляция шлифовального круга от корпуса станка и обрабатываемого образца от магнитного стола станка выполнялась аналогично станку 3Д711АФ11 (см. рис. 2.4, 2.5).

2.2.3 Подвод электрической энергии

На модернизированных станках моделей 3Д711АФ11 и 3Г71 в процессе правки шлифовального круга электроэрозионным способом по схеме плоского шлифования, шлифовальный круг подключался к положительному полюсу, а правящий электрод – к отрицательному полюсу источника технологического тока ИТТ-35.

Технологический ток к правящему электроду (катоде) при правке подводили через клемму на корпусе электрода, а к шлифовальному кругу (аноду) – через графитовую щетку и медную заглушку, ввинченную во фланец круга (см. рис. 2.5).

При электроэрозионных управляющих воздействиях на РПК в автономной зоне шлифовальный круг подключался к положительному полюсу ИТТ-35, а электрод-инструмент – к отрицательному полюсу источника технологического тока ИТТ-35.

В процессе управляющих электроэрозионных воздействий в автономной зоне анодом служил электрод-инструмент, расположенный на специальном устройстве, устанавливаемом на корпусе шлифовальной бабки (см. рис. 2.2, 2.6). Конструкция устройства позволяет осуществлять управляющие воздействия на РПК равномерно вдоль всей ширины шлифовального круга.

2.3 Применяемая оснастка

2.3.1 Устройство для электроэрозионных воздействий на РПК

в автономной зоне

Устройство для электроэрозионных воздействий на РПК в автономной зоне (рис. 2.7, 2.8) спроектировано и изготовлено таким образом, чтобы обеспечить его установку на кожух шлифовального круга.

Устройство (см. рис. 2.8) смонтировано на плите 1, в шариковые направляющие которой входят салазки 2. На салазках закреплен кронштейн 3, в крепежное отверстие которого установлен механизм радиальной подачи 4 электрода-инструмента 5, изолированного от общей конструкции станка. На кронштейне смонтирован электродвигатель РД-09 (с частотой вращения ротора $n = 10$ об/мин) 6. В корпусе закреплен порожек 7, который благодаря пружине 8 надежно прижимается к шарикоподшипнику 9, одетому на ось 10.

Ось 10 имеет эксцентриситет относительно оси электродвигателя. При вращении двигателя за счет смещения оси 10 салазки осуществляют перемещение вдоль оси круга с частотой десять двойных ходов в минуту и амплитудой 10 мм. За счет применения шариковых направляющих 11, 12 исключаются зазоры между плитой и салазками, что обеспечивает надежное базирование механизма радиальной подачи электрода-инструмента.

Описанная конструкция устройства для электроэрозионных воздействий на РПК в автономной зоне является универсальной, вследствие чего устройство может быть установлено на любом оборудовании для шлифования кругами из СТМ на металлической связке, подвергаемом модернизации. При необходимости установки на станок другой модели изменяется лишь конструкция кронштейна, предназначенного для крепления устройства к шлифовальной бабке станка. В кожухе шлифовального круга делается вырез для перемещения вдоль оси круга электрода-инструмента 5.

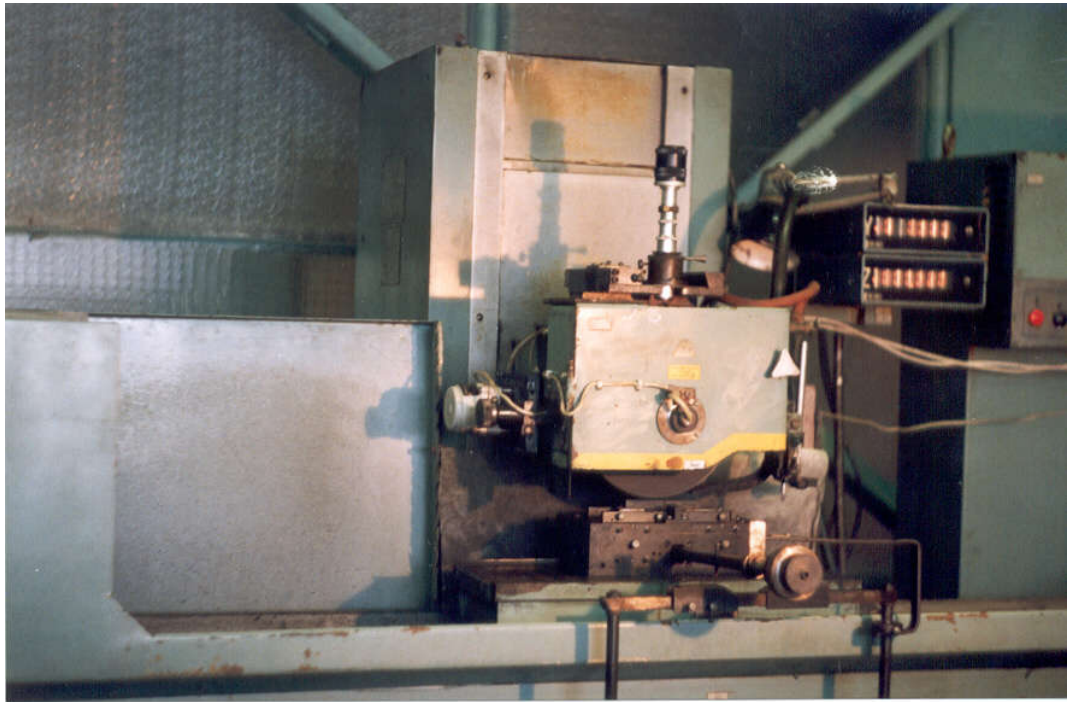


Рисунок 2.7 – Размещение устройства для электроэрозионных воздействий в автономной зоне на кожухе шлифовального круга

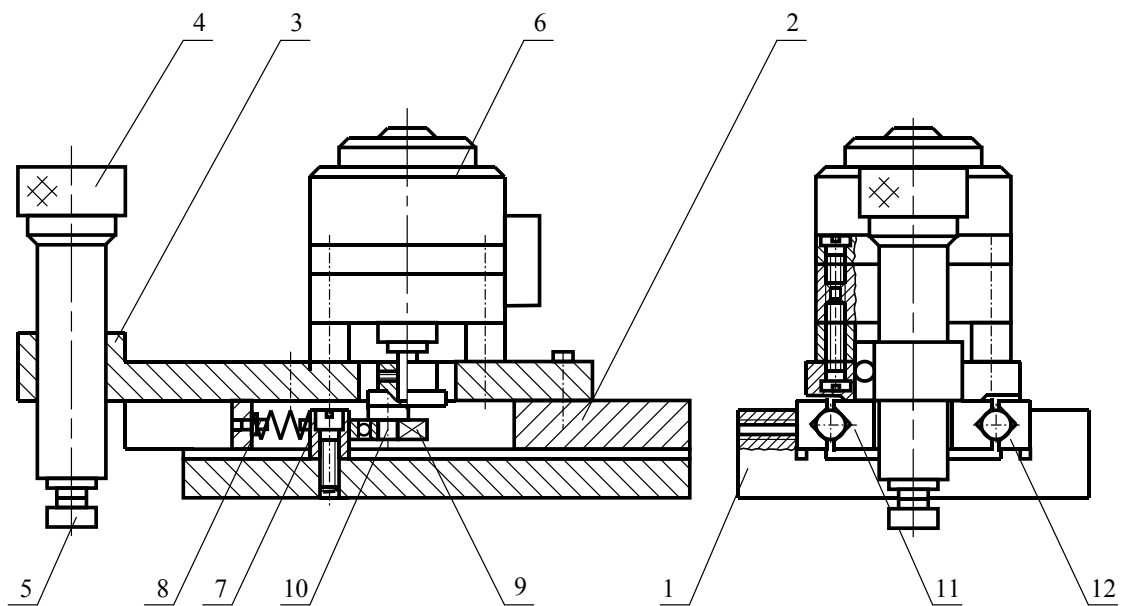


Рисунок 2.8 – Конструкция устройства для осуществления электроэрозионных воздействий на РПК в автономной зоне

2.3.2 Устройство для реализации шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга

Для осуществления плоского шлифования с фиксированной силой P_y было спроектировано и изготовлено специальное приспособление (рис. 2.9), устанавливаемое на магнитную плиту 1 плоскошлифовального станка.

Обрабатываемый образец 2 закреплен в струбчине 3, установленной на ползуне 4, который перемещается в корпусе 5 по роликовым направляющим 6. Для исключения намагничивания подвижных частей приспособления в нижней части корпуса имеется медная прокладка 7. Ползун опирается на подшипник 8, закрепленный на малом плече рычага 9. На большом плече рычага установлены грузы 10 для уравнивания подвижной части приспособления и грузы 11, обеспечивающие заданную силу поджима образца к шлифовальному кругу.

Для отвода образца от поверхности шлифовального круга в момент выхода его из зоны резания служат копиры 12, с которыми в этот момент начинает контактировать подшипник 13. Такое контактирование осуществляется за счет того, что корпус приспособления закреплен на магнитной плите стола станка, а копир посредством планки 14, стоек 15 и планки 16 – на крестовом суппорте 17 плоскошлифовального станка. При продольном перемещении стола подшипник 13 набегает на наклонную поверхность копира и опускает подшипник 8, поджимающий ползун 4 к шлифовальному кругу. В результате шлифуемый образец от РПК опускается вниз. Положения копиров можно регулировать как в горизонтальной плоскости путем смещения по планке 14, так и в вертикальной, опуская или поднимая планку 14 с помощью гаек 18.

В результате сошлифовывания образца по высоте положение подшипника 13 относительно поверхности копиров изменяется, что приводит к изменению момента врезания шлифовального круга в образец. Чтобы исключить влияние относительного положения нагружающих грузов на усилие поджима образца, копирное устройство снабжено кронштейном 19, а на рычаге 9 установлена линейка 20.

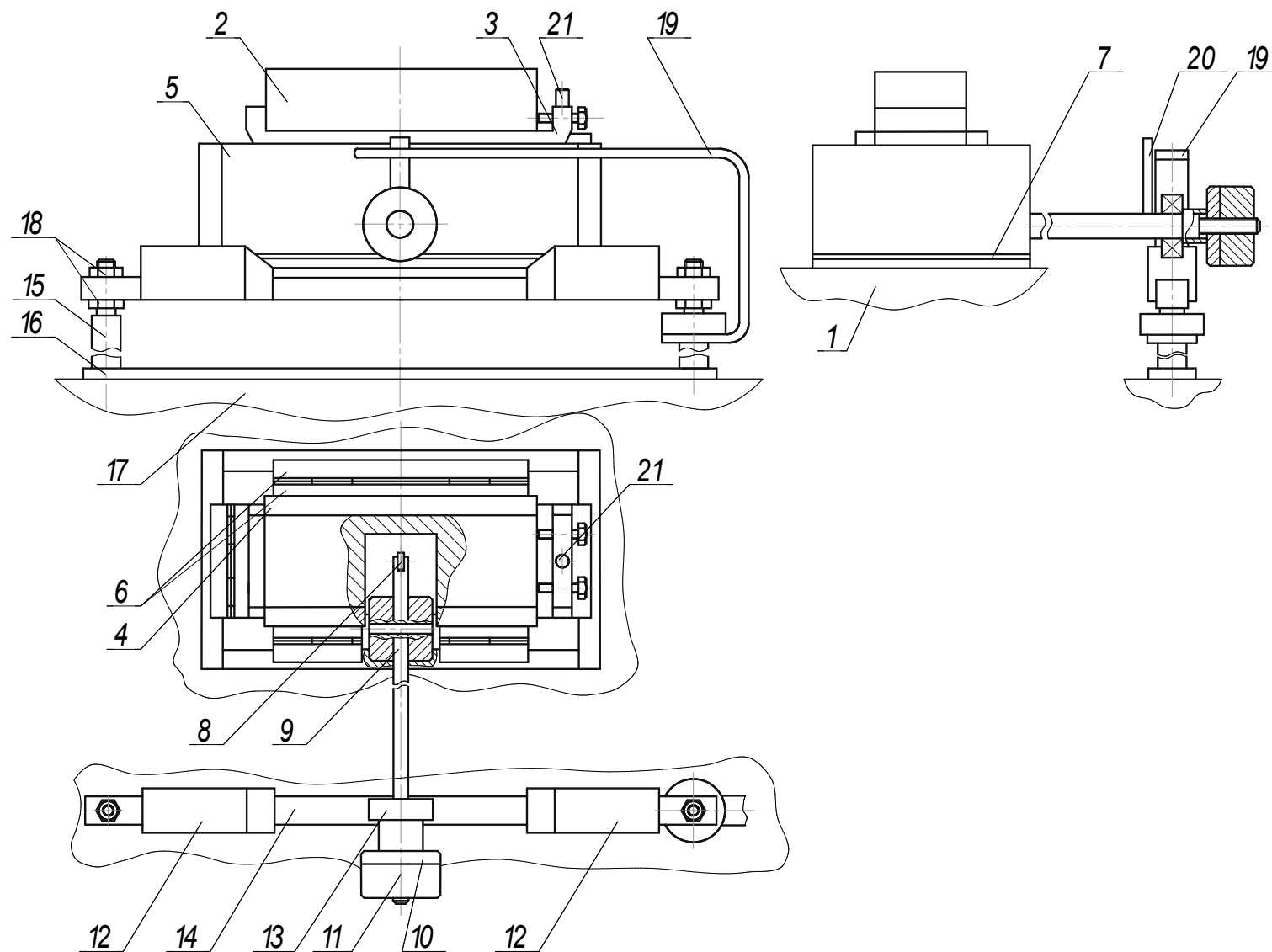


Рисунок 2.9 – Конструкция приспособления для плоского шлифования с постоянной силой поджима заготовки P_n

В процессе обработки постоянное относительное положение линейки 20 и кронштейна 19 поддерживается с помощью вертикальной подачи шлифовального круга.

Для повышения точности измерения объёма сошлифованного материала на струбине 3 установлен штифт 21, который служит базой при измерении образца до и после шлифования. Измерение образцов осуществляется в фиксированном нижнем положении ползуна.

Для защиты роликовых направляющих от попадания СОЖ корпус приспособления закрыт водонепроницаемой пленкой.

Основным достоинством рассматриваемого приспособления является то, что оно позволяет реализовать обработку по схеме с фиксированной силой P_y , сохраняя при этом кинематику плоского шлифования по схеме с фиксированными режимами.

2.3.3 Устройство для измерения расхода алмазов при шлифовании и визуального контроля состояния РПК

Для определения толщины износившегося при обработке зерносодержащего слоя, которая необходима для расчета расхода СТМ, было изготовлено специальное устройство (рис. 2.10), конструкция которого описана в работе [91].

Устройство смонтировано в корпусе 8, устанавливаемом на шлифовальной бабке 1 плоскошлифовального станка. Корпус содержит направляющие 3 типа “ласточкин хвост”. В направляющие установлен ползун 4, перемещаемый ножкой микрометра 5. На ползуне закреплен индикатор часового типа 6 с ценой деления 0,001 мм и лупа Бринелля 9. Для обеспечения доступа к рабочей поверхности кожух шлифовального круга имеет съёмную часть, которая убирается перед проведением измерения.

На торцовой поверхности круга нанесены шесть симметричных маркированных радиальных рисок, по которым с помощью шкалы на лупе Бринелля в радиальном направлении с высокой точностью устанавливаются исследуемые про-

дольные сечения РПК в измерительное положение. С помощью микрометра 4 измерительный наконечник индикатора выводится в точку с заданной координатой в осевом направлении вдоль оси круга, после чего ножка индикатора опускается на рабочую поверхность. Показания индикатора в заданной точке регистрируются.

С целью исключения влияния возникающих в процессе обработки вибраций на положение измерительной базы индикатора перед шлифованием ползун снимался с корпуса устройства.

Для контроля идентичности баз перед измерением в каждом сечении проводилась проверка базы индикатора (рис 2.11). Поверочное устройство состоит из плиты 1 и плоскопараллельной концевой меры 2, на которую опирается ножка 5 индикатора 4. Контрольная плита имеет высокоточную опорную поверхность 3, по которой базируется измерительный ползун при проверке базы индикатора.

Описанное устройство для измерения износа круга имеет следующие достоинства:

- надежность базирования измерительной плиты относительно РПК;
- достаточная точность воспроизведения координат точек поверхности круга при измерении (0,005 мм в направлении вдоль оси круга и 0,014 мм в поперечном направлении).

Для визуального контроля рабочей поверхности круга на ползун устройства для измерения расхода зерносодержащего слоя вместо индикатора устанавливали микроскоп МИР-2. Увеличение в 20 и 40 раз использовали при контроле всей поверхности круга, а увеличение в 100 раз – при исследовании контактных площадок на зернах. Фотографирование поверхности и контактных площадок на зернах (рис. 2.12) осуществлялось с помощью фотоаппарата 6, объективом которого служил микроскоп 8 модели МИР-2. Перемещение микроскопа вдоль оси круга осуществляли ножкой микрометра 5. При визуальном контроле и фотографировании рабочую поверхность круга освещали лампой 9.

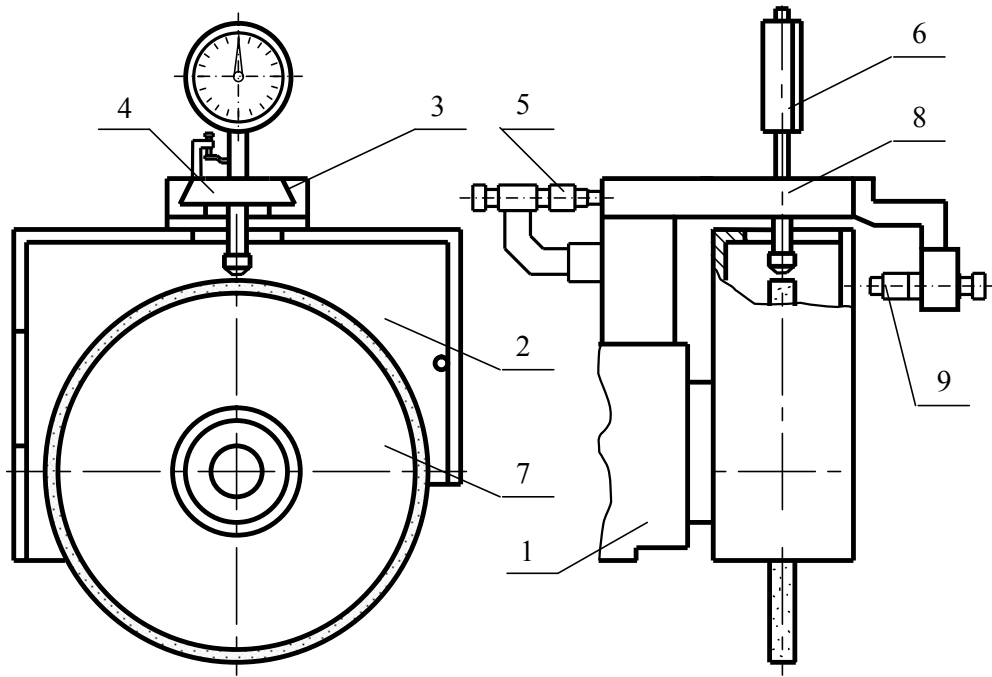


Рисунок 2.10 – Устройство для измерения удаленного зерносодержащего слоя на шлифовальном круге

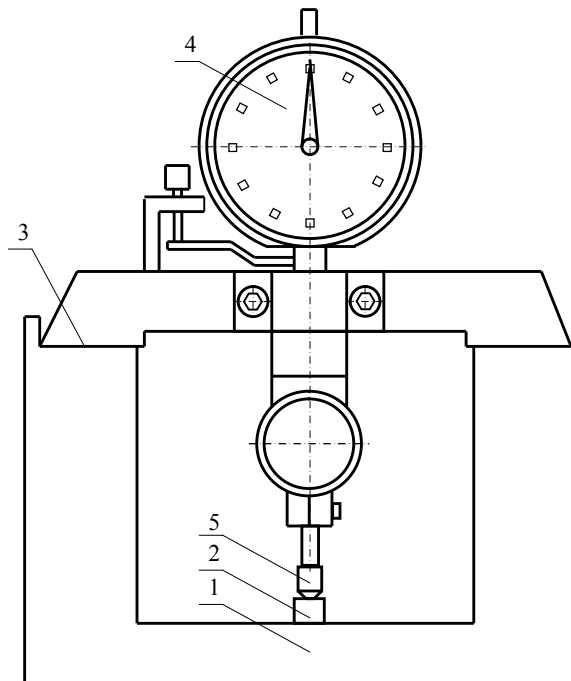


Рисунок 2.11 – Устройство для проверки базы индикатора при измерениях удаленного зерносодержащего слоя

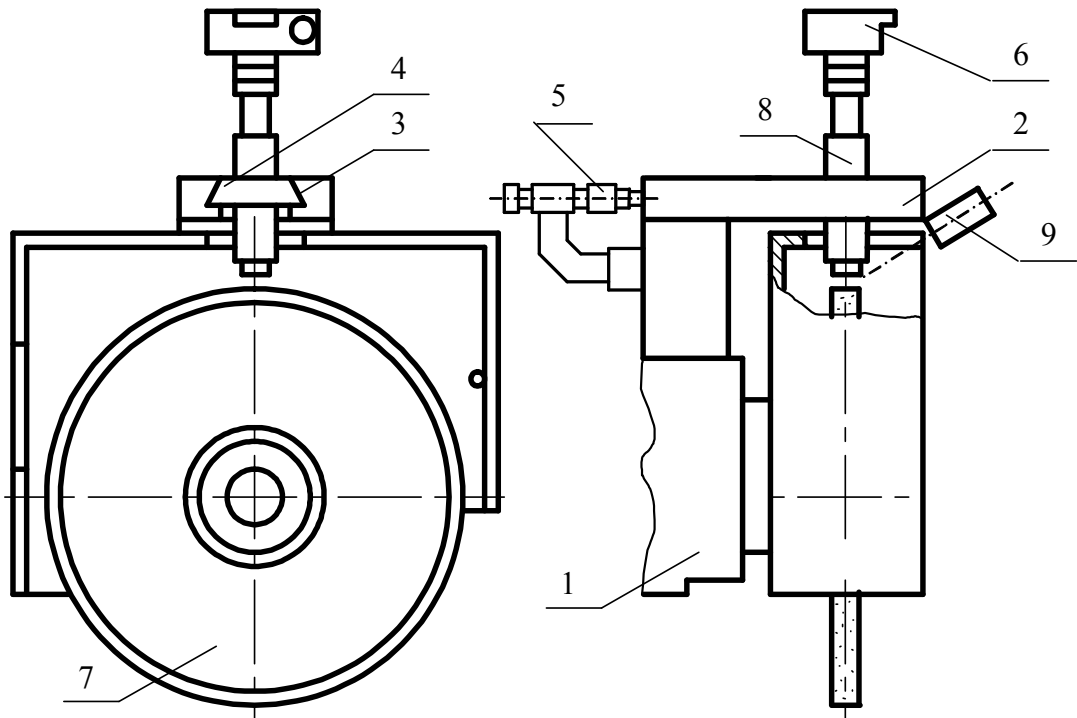


Рисунок 2.12 – Устройство для визуального исследования и фотографирования рабочей поверхности круга

2.4 Обрабатываемые и инструментальные материалы

2.4.1 Характеристики инструментальных сталей

Исследования процесса шлифования инструментальных сталей проводились при обработке труднообрабатываемых ванадийсодержащих сталей, к которым относятся инструментальные быстрорежущие стали марок 11P3AM3Φ2, P6AM5Φ3, P6M5Φ3, P12Φ3, P14Φ4, P18K5Φ2, P18M5Φ2 [92, 93] и инструментальные штамповые стали марок X12Φ4M, X12Φ1, X6BΦ, X6Φ4M, X6Φ3BM, X3Φ8, X3Φ12 [92, 94, 95]. Указанные стали характеризуются высокими красностойкостью, твёрдостью и износостойкостью, ударной вязкостью и прочностью [92, 96, 97]. Особенностью этих сталей является пониженная шлифуемость из-за наличия очень твердого карбида ванадия VC [92, 98].

В качестве материала – представителя группы инструментальных быстрорежущих сталей – использовалась ванадиевая быстрорежущая сталь марки Р6М5Ф3, а в качестве материала – представителя группы инструментальных штамповых сталей для холодного деформирования – штамповая сталь повышенной производительности Х12Ф4М. Химический состав этих сталей приведен в табл. 2.1, физико-механические свойства – в табл. 2.2.

Таблица 2.1 – Химический состав быстрорежущей стали Р6М5Ф3 [99] и штамповой стали Х12Ф4М [95]

Марка стали	Входящие в состав стали элементы, %					
	С	Cr	W	Mo	V	Si
Р6М5Ф3	0,95-1,05	3,8-4,3	5,7-6,7	4,8-5,3	2,3-2,7	–
Х12Ф4М	2,00-2,20	12,0-13,5	–	0,5-0,8	3,4-4,0	0,10-0,40

Таблица 2.2 – Физико-механические свойства быстрорежущей стали Р6М5Ф3 [92, 100] и штамповой стали Х12Ф4М [94, 95]

Наименование свойства	Марка стали	
	Р6М5Ф3	Х12Ф4М
Плотность, кг/м ³	8,1·10 ³	7,7·10 ³
Твердость после отжига, НВ	269	255
Твердость после отжига, HRC	64-66	62-64
Предел прочности при растяжении после закали, МПа	3300-3400	3000-3100
Предел прочности при изгибе, МПа	2700-3100	2900-3000
Ударная вязкость после закалки, Дж/м ²	4,8·10 ⁵	2,95·10 ⁵

После закалки и отпуска объёмная доля карбидных фаз в указанных сталях составляет 12-25 %, а основу фазового состава составляет отпущенный мартенсит [92].

Средняя величина напряжения сдвига τ_s по условной плоскости сдвига в температурно-скоростных условиях, характерных для шлифования, определялась с помощью модификации К. Макгрегора и И. Фишера [101, 102].

Влияние температурно-скоростных факторов на величину касательных напряжений при шлифовании быстрорежущих и штамповых высоколегированных сталей описывалось линейной зависимостью вида [102]

$$\tau_s = C - \alpha T, \quad (2.1)$$

параметры которой приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Значения коэффициентов C и α в уравнении (2.1) для быстрорежущих и штамповых инструментальных высоколегированных сталей

Обрабатываемый материал	Состояние сталей	C , МПа	α , МПа/К
Быстрорежущие стали P18, P18K5Ф2, P18M5Ф2, P14Ф4, P12Ф3, 11P3AM3Ф2, P6AM5Ф3, P6M5Ф3	Закалённые	1761	0,185
Штамповые стали X12Ф4М, X12М, X12ВМ, X12Ф1, 9X5Ф, X6ВФ, X6Ф4М, X6В3ФМ, X3Ф8, X3Ф12	Закалённые	1697	0,148

Близкие физико-механические свойства быстрорежущих и штамповых ванадиевых сталей (см. табл. 2.2) и небольшие различия (см. табл. 2.3) значений коэффициентов в зависимости (2.1), которая используется при математическом описании изменения механических свойств рассматриваемых материалов при их обработке шлифованием, позволяют объединить эти материалы в одну группу по обрабатываемости шлифованием и назначать для них одинаковые режимы обработки.

2.4.2 Характеристики твердых сплавов

Исследования производительности шлифования твердых сплавов проводились при обработке однокарбидных твердых сплавов марок ВК6, ВК8, ВК15. Физико-механические свойства компонентов указанных твердых сплавов [103] приведены в табл. 2.4.

Химический состав и основные физико-механические свойства вольфрамо-содержащих твердых сплавов [104, 105, 106] приведены в табл. 2.5, а более полные данные о физико-механических свойствах твердых сплавов группы ВК, необходимые для моделирования процесса шлифования этих материалов [22, 107], сведены в табл. 2.6.

Таблица 2.4 – Физико-механические свойства компонентов твердых сплавов [103]

Формула компонентов	Плотность $\cdot 10^{-3}$ г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Микротвердость, ГПа	Предел прочности		Теплопроводность, Вт/(м·градус)	Коэффициент линейного расширения $\cdot 10^6$, градус ⁻¹
					при сжатии, ГПа	при растяжении, ГПа		
WC	15-15,4	722	0,20	21	2,46	3,5	20,9	4,4
TiC	4,8-4,9	320, 460	0,17	28,5; 32	1,38	5,6-10,5	36,3	7,74±0,12
Co	8,8	215	0,32	17	1,25	7,8-8,8	69	14,2

Таблица 2.5 – Химический состав и основные физико-механические свойства твердых сплавов группы ВК [104, 105, 106]

Марка твердого сплава	Содержание основных компонентов порошков, %					Физико-механические характеристики			Размер основной массы зерен, мкм
	WC	TiC	TaC	VC	Co	Плотность, г/см ³	σ_b , МПа	Твердость, HRA	
ВК6	94	–	–	–	6	14,6-15,0	1500	88,5	1-2
ВК8	92	–	–	–	8	14,4-14,8	1700	87,5	1-2
ВК15	85	–	–	–	15	13,9-14,1	–	86,0	–

Таблица 2.6 – Физико-механические свойства твердых сплавов группы ВК [22, 107]

Марка сплава	Состав, %		Физические свойства				Механические свойства				
	WC	Co	Размер карбидных зерен, мкм	Коэф. линейного терм. расширения 10^6 , град $^{-1}$	Теплостойкость, °С	Коэффициент теплопроводности, кал/(см·с·град)	Предел прочности при растяжении, кгс/мм 2	Предел прочности при сжатии, кгс/мм 2	Твердость HV, кгс/мм 2	Модуль упругости, 10^3 , кгс/мм 2	Ударная вязкость, кгс·м/см 2
BK6	94	6	1	4,4	1050	0,16	73	491	1430	64,5	0,26
			1-2	4,9		0,15					
			2-5	4,7		0,13					
BK8	92	8	1-2	5,1	950	0,12	79	421	1240	61,0	0,30
			2-5	4,8		0,11					
BK15	85	15	1-2	6,0	–	0,16	134	365	1040	57,0	0,38

2.4.3 Характеристики титановых сплавов

Исследования производительности шлифования титановых сплавов проводились при обработке деформируемого титанового сплава средней прочности BT14.

Сплавы средней прочности (предел прочности в отожженном состоянии до 981 МПа) обладают удовлетворительной технологической пластичностью, а принадлежащий к этой группе сплав BT14 относится к двухфазным сплавам со структурой ($\alpha + \beta$), которая возникает при нагреве под закалку и фиксируется резким охлаждением. Двухфазные сплавы характеризуются существенным повышением прочности и незначительным снижением пластичности после закалки и старения [32].

Химический состав титанового сплава BT14 приведен в табл. 2.7, физико-механические свойства – в табл. 2.8.

Таблица 2.7 – Химический состав титанового сплава BT14 [32]

Марка сплава	Входящие в состав сплава элементы, %										
	Al	Mo	V	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	Прочие
BT14	3,5-6,3	2,5-3,8	0,9-1,9	0,1	0,3	0,15	0,3	0,15	0,05	0,015	0,3

Таблица 2.8 – Физико-механические свойства титанового сплава BT14 [32]

Наименование свойства	Значение
Плотность, кг/м ³	4,5·10 ³
Предел прочности, МПа	883-1030
Предел текучести, МПа	873
Предел пропорциональности, МПа	686
Предел выносливости, МПа	402
Ударная вязкость, Дж/м ²	4,0·10 ⁵

2.4.4 Характеристики шлифовальных кругов

При шлифовании образцов использовали круги из синтетических алмазов марки АС6 следующих характеристик:

1А1 250×76×15×5 АС6-100/80-4-М2-01;

1А1 250×76×15×5 АС6-160/125-4-М2-01;

1А1 250×76×15×5 АС6-250/200-4-М2-01.

Связка М2-01 обеспечивает прочное закрепление алмазных зёрен, имеет хорошую электропроводность и теплопроводность [108].

Перед установкой на плоскошлифовальный станок алмазные круги статически балансировались на ножах.

Рабочая среда при обработке – 0,3%-й водный раствор кальцинированной соды.

2.5 Методики исследований

2.5.1 Методика определения количества сошлифованного материала

Количество сошлифованного обрабатываемого материала в объёмных единицах определяли по объёму материала, удаленному за время эксперимента.

Измерение высоты сошлифованного слоя на образце до и после шлифования осуществляли с помощью цифрового индикатора с ценой деления 0,001 мм, имеющегося на приборной панели плоскошлифовального станка 3Д711АФ11 и показывающего вертикальное перемещение шлифовальной бабки. Механический индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм, закрепленный на кожухе станка, использовали для контроля установки образца в исходном положении.

Измерение высоты сошлифованного слоя на образце осуществлялось в два этапа. На первом этапе устанавливали образец в исходное положение с помощью механического индикатора (рис. 2.13). На втором – снимали показания цифрового индикатора 11 до и после эксперимента, которые соответствовали вертикальному перемещению шлифовального круга за время эксперимента, а, следовательно, высоте удаленного слоя на образце (рис. 2.14).

Перед обработкой стол станка с устройством поджима 10 образца к РПК (см. рис. 2.13) перемещали в положение, когда ножка 7 механического индикатора 3 опустится на поверхность базового штифта 9, который установлен в ползуне устройства поджима 10 (при этом ползун находится в корпусе устройства в крайнем нижнем положении). Стрелку механического индикатора 3, закрепленного на кожухе станка 1, совмещали с положением 0 на его шкале, перемещая шпиндель станка в вертикальном направлении. После этого цифровой индикатор 10 на приборной панели станка, показывающий положение шлифовальной бабки, обнулялся. Затем, арретиром ножку механического индикатора 3 отводили от базы и с помощью продольной и поперечной подач устанавливали над образцом. Шлифовальную бабку станка перемещали в вертикальном направлении до момента, когда стрелка механического индикатора станет в нулевое положение. В этот мо-

мент показанием цифрового индикатора 11 на приборной панели станка описывалось положение шлифовального круга перед экспериментом и, соответственно, положение обрабатываемой поверхности на образце перед экспериментом.

После эксперимента осуществлялась проверка базы (нулевое положение стрелки механического индикатора при касании ножкой индикатора поверхности базового штифта), затем ножка индикатора опускалась на обработанную поверхность, а шпиндель станка перемещался в вертикальном направлении вниз до нулевого показания на шкале механического индикатора 3. По цифровому индикатору 11 на приборной панели станка снималось значение, соответствующее положению обработанной поверхности после обработки.

Величина съема материала рассчитывалась через разность показаний цифрового индикатора 11 до и после обработки.

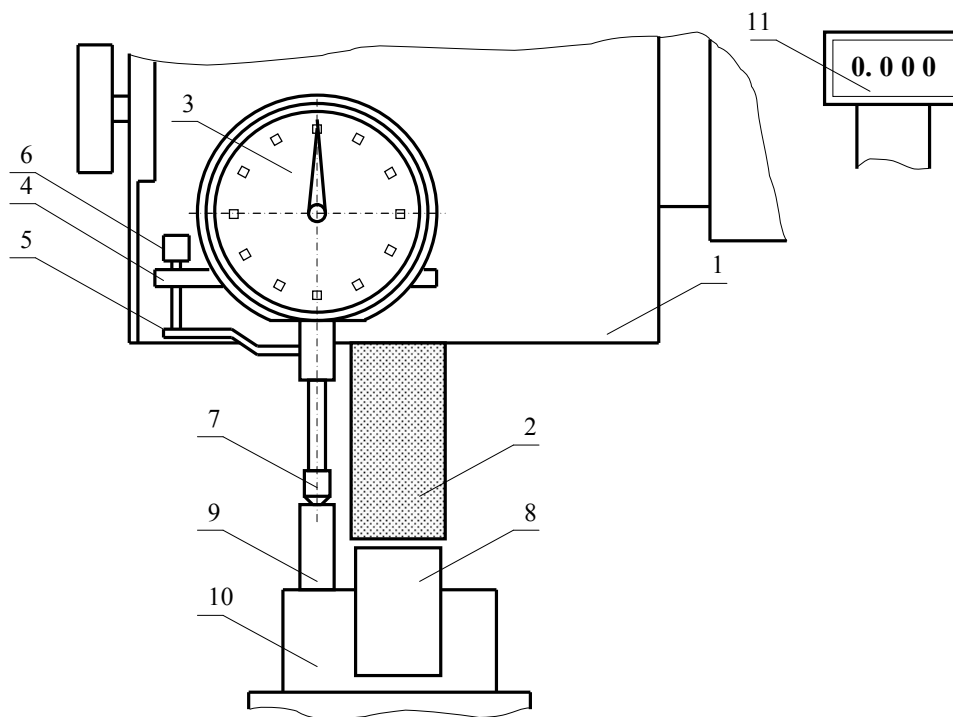


Рисунок 2.13 – Проверка исходного положения обрабатываемого образца с помощью механического индикатора

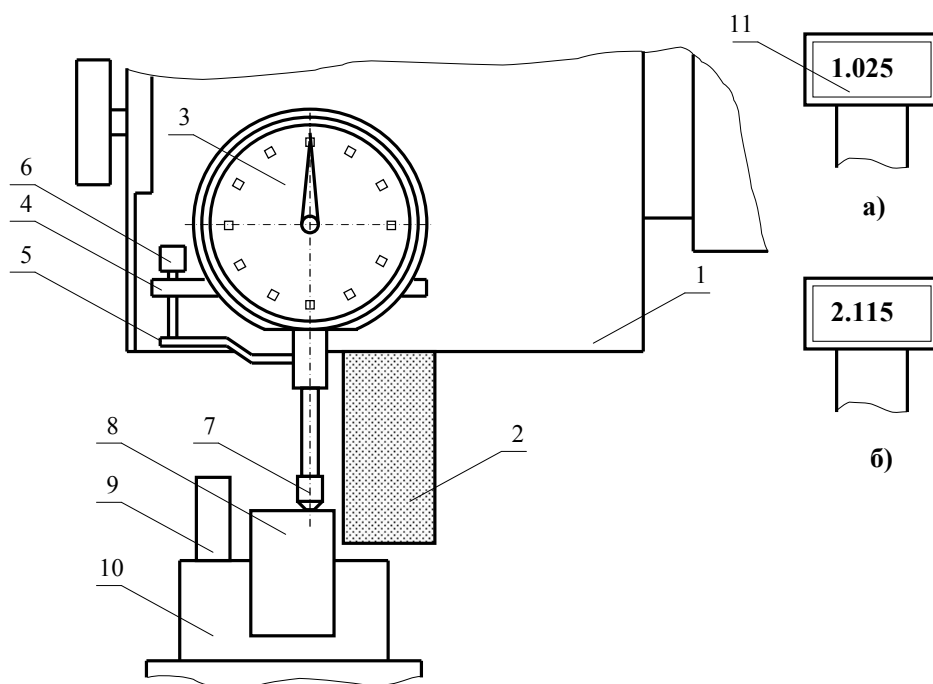


Рисунок 2.14 – Положение механического индикатора на образце до и после эксперимента и показания цифрового индикатора на приборной панели станка 3Д711АФ11 до (а) и после (б) шлифования

Измерения осуществляли в трех точках вдоль длины образца после 1, 3, 5, 15, 30, 45 минут обработки, рассчитывая каждый раз высоту сошлифованного материала.

Среднюю высоту сошлифованного материала определяли по формуле:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}, \quad (2.2)$$

где n – количество замеров;

h_i – высота сошлифованного слоя при каждом замере.

Для определения доверительных интервалов на среднее значение высоты сошлифованного материала \bar{h} определяли дисперсии и среднеквадратичное отклонение высоты h .

Среднеквадратичное отклонение высоты слоя сошлифованного материала рассчитывали по формуле:

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

а среднеквадратичное отклонение средней высоты слоя сошлифованного материала – по формуле:

$$S_{\bar{h}} = \frac{S_h}{m}, \quad (2.4)$$

где m – количество опытов.

Сошлифованный слой материала представляет собой параллелепипед с размерами $\bar{h} \times L_{об} \times B_{об}$, в связи с чем его объем равен:

$$V_{сош} = L_{об} \cdot B_{об} \cdot \bar{h}, \quad (2.5)$$

где $L_{об}$ – длина образца;

$B_{об}$ – ширина образца.

Используя формулу (2.5) с учетом (2.4), среднее квадратичное отклонение объема сошлифованного материала $V_{сош}$ рассчитывали по формуле:

$$S_{V_{сош}} = L_{об} \cdot B_{об} \cdot S_{\bar{h}}. \quad (2.6)$$

95%-ные доверительные интервалы на объем сошлифованного материала определяли по известным зависимостям:

$$\bar{V}_{сош} - t_{\alpha} S_{V_{сош}} \leq V_{сош} \leq \bar{V}_{сош} + t_{\alpha} S_{V_{сош}},$$

где t_{α} – значение критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$;

$\bar{V}_{сош}$ – среднее значение объема сошлифованного материала.

2.5.2 Методика определения расхода алмазов

Определение расхода алмазов при шлифовании основывалось на расчете объема изношенного алмазосодержащего слоя по данным измерения радиальных координат отдельных точек РПК [109] до и после проведения опыта (рис. 2.15).

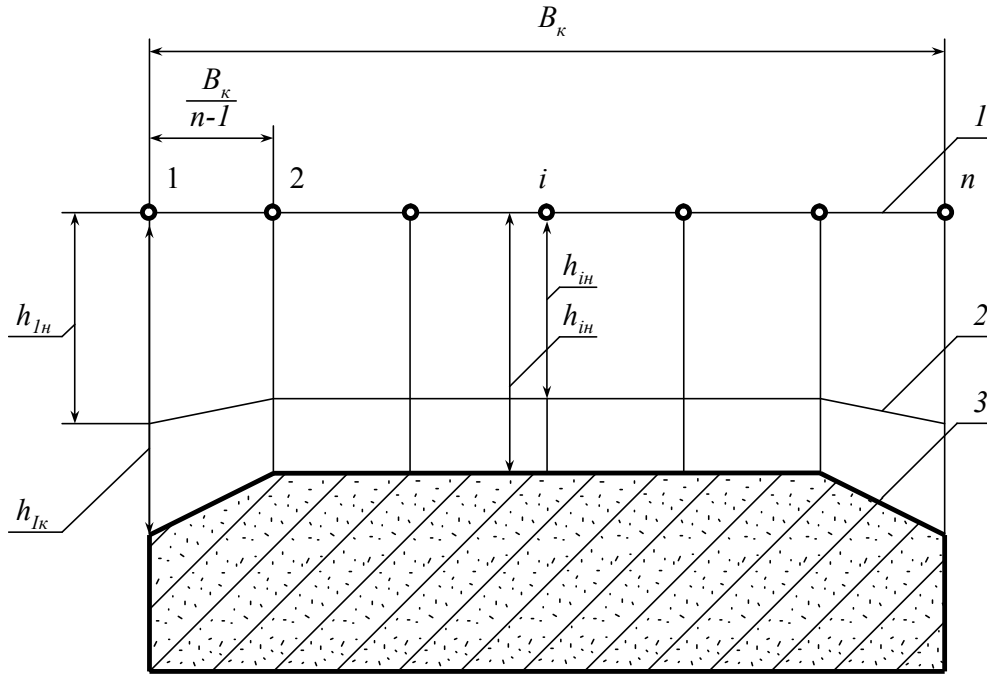


Рисунок 2.15 – Схема определения объема износившегося алмазного слоя в k -том сечении:

- 1 – начало отсчета; 2 – профиль круга до проведения опыта;
3 – профиль круга после проведения опыта

Объем износившегося либо удаленного в процессе электроэрозионных воздействий на РПК алмазного слоя оценивали по формуле

$$V_{ac} = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_k}{k} \cdot \pi \cdot D_{кр},$$

где F_1, F_2, \dots, F_k – площадь износившегося алмазного слоя в k -м сечении РПК в радиальном направлении, мм^2 ;

k – количество исследуемых сечений РПК в радиальном направлении;

$D_{кр}$ – средний диаметр рабочей поверхности круга, мм.

Площадь износившегося алмазного слоя в каком-либо сечении определяли по формуле

$$F_k = \left[\frac{\Delta h_1 + \Delta h_n}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} \Delta h_i \right] \cdot \frac{B_k}{n-1},$$

где Δh_i – разность радиальных координат отдельных точек РПК в осевом направлении, мм;

$\Delta h_1, \Delta h_n$ – разность радиальных координат крайних точек РПК, мм;

n – количество замеров радиальных координат в осевом сечении, включая крайние точки, B_k – высота круга.

Величину $D_{\text{ксп}}$ рассчитывали по формуле

$$D_{\text{ксп}} = \frac{2 \cdot \sum_{j=1}^{k/2} D_j}{k},$$

где D_j – диаметр рабочей поверхности круга в измеряемом сечении, мм.

Массу израсходованных алмазов рассчитывали, используя формулу

$$M_a = \frac{0,878 \cdot V_{ac} \cdot K}{100},$$

где 0,878 – масса алмазов в 1 мм³ алмазосодержащего слоя, мг;

K – относительная концентрация алмазов, %.

Среднее квадратичное отклонение массы израсходованных алмазов определяли по формулам, аналогичным формулам (2.3)-(2.4).

2.5.3 Методика определения высотного параметра шероховатости обработанной поверхности

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности R_a измерялось на профилометре модели 296 завода «Калибр». Параметры настройки при измерениях: длина трассы 3 мм, отсечка шага 0,8 мм, предел измерений 10 мкм.

Измерения на каждом материале образца выполнялись пять раз. При этом определялись:

– среднее значение высоты неровностей профиля

$$\bar{R}_a = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{ai}, \quad (2.8)$$

– доверительный интервал

$$\pm t_{\alpha} \sqrt{S_{Ra}^2} . \quad (2.9)$$

Результаты измерений подвергались дисперсионному анализу с помощью критерия Кохрана

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} \leq G_{\text{табл}} , \quad (2.10)$$

где S_{\max} – максимальное значение среднеквадратического отклонения в исследуемых выборках, мкм;

S_i – значение стандартного отклонения, мкм;

$G_{\text{табл}}$ – табличное значение критерия Кохрана;

n – количество выборок.

Проверка однородности двух дисперсий с различными степенями свободы осуществлялась по критерию Фишера

$$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}} ; \quad (2.11)$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_1^2}{S_2^2}, (S_1^2 > S_2^2) . \quad (2.12)$$

ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ВОЗМОЖНЫХ РЕЖИМОВ
ШЛИФОВАНИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССА

3.1 Исходные условия при оптимизации режимов
с учетом нестационарности процесса

Нестационарность процесса шлифования проявляется в изменении во время обработки режущей способности круга, оказывающей доминирующее влияние на выходные показатели процесса: производительность, качество обработки и ее себестоимость.

Для исследования и математического описания процесса шлифования как нестационарного процесса необходимо выполнение следующих условий:

1. Выбранный способ шлифования должен обеспечивать детерминированную либо максимально корреляционную связь между выходными показателями обработки и режущей способностью РПК, наибольшую нагрузку на абразивные зёрна или зёрна СТМ. При этом на протяжении исследуемого периода обработки показатели качества обработанной поверхности не должны ухудшаться.

2. Совокупность параметров РПК должна обеспечивать максимальную для данной характеристики круга его режущую способность.

3. Для оценки режущей способности круга с учетом нестационарности процесса шлифования следует использовать обобщённый показатель, отражающий изменение максимально возможной режущей способности круга во время обработки при удовлетворении всех требований, налагаемых на режим шлифования изделием, станком и инструментом.

Проанализируем возможность обеспечения выполнения перечисленных условий при соответствующем выборе способа и схемы реализации шлифования, а также способа достижения и поддержания высоких режущих свойств шлифовального круга.

3.2 Обоснование схемы врезного шлифования с постоянным усилием поджима заготовки к РПК

Первому условию удовлетворяет *схема шлифования с постоянным усилием поджима заготовки к РПК* (см. рис 1.2).

По мнению авторов П.Е. Дьяченко и Л.А. Глейзера, предложивших схему шлифования с постоянным радиальным давлением [43, 44], фактором, определяющим ход процесса шлифования, является радиальное давление круга на изделие, от которого зависят: наличие прижогов на шлифуемой поверхности; производительность, износ и затупление шлифовального круга. Шлифование с постоянным радиальным давлением представляет собой достаточно устойчивый процесс, обладающий большей степенью детерминированности [44]. Исследования этой схемы шлифования, которую назвали шлифованием по упругой схеме с заданной силой прижима P_n шлифовального круга к заготовке [45], выполненные в работах [17, 21, 45] показали, что эта схема шлифования позволяет «исключить влияние на температуру шлифования непостоянства припуска, нестабильности физико-механических свойств материала изделия и изменения режущей способности шлифовального круга за период его стойкости» [45], «снизить силовую и тепловую напряженность процесса, повысить точность и качество поверхностного слоя» [17], «дает возможность наиболее полно проявить высокие режущие свойства алмазных кругов» [21].

Наибольшую нагрузку на абразивные зерна и наибольшие высотные параметры шероховатости обеспечивает *схема врезного шлифования* [110]. В этом легко убедиться, анализируя результаты выполненных нами исследований по распределению нагрузки на шлифовальный круг в осевом направлении при шлифовании с поперечной подачей [111] (рис. 3.1).

В процессе плоского шлифования периферией круга с поперечной подачей круг 1 вращается со скоростью V_k , м/с, и перемещается в направлении своей оси дискретно на величину S_n , мм/ход.

Стол с закрепленной на нем заготовкой 2 осуществляет возвратно-поступательные движения со скоростью V_d , м/мин. Величина глубины резания t_ϕ , мм, устанавливается с помощью вертикальной подачи S_v .

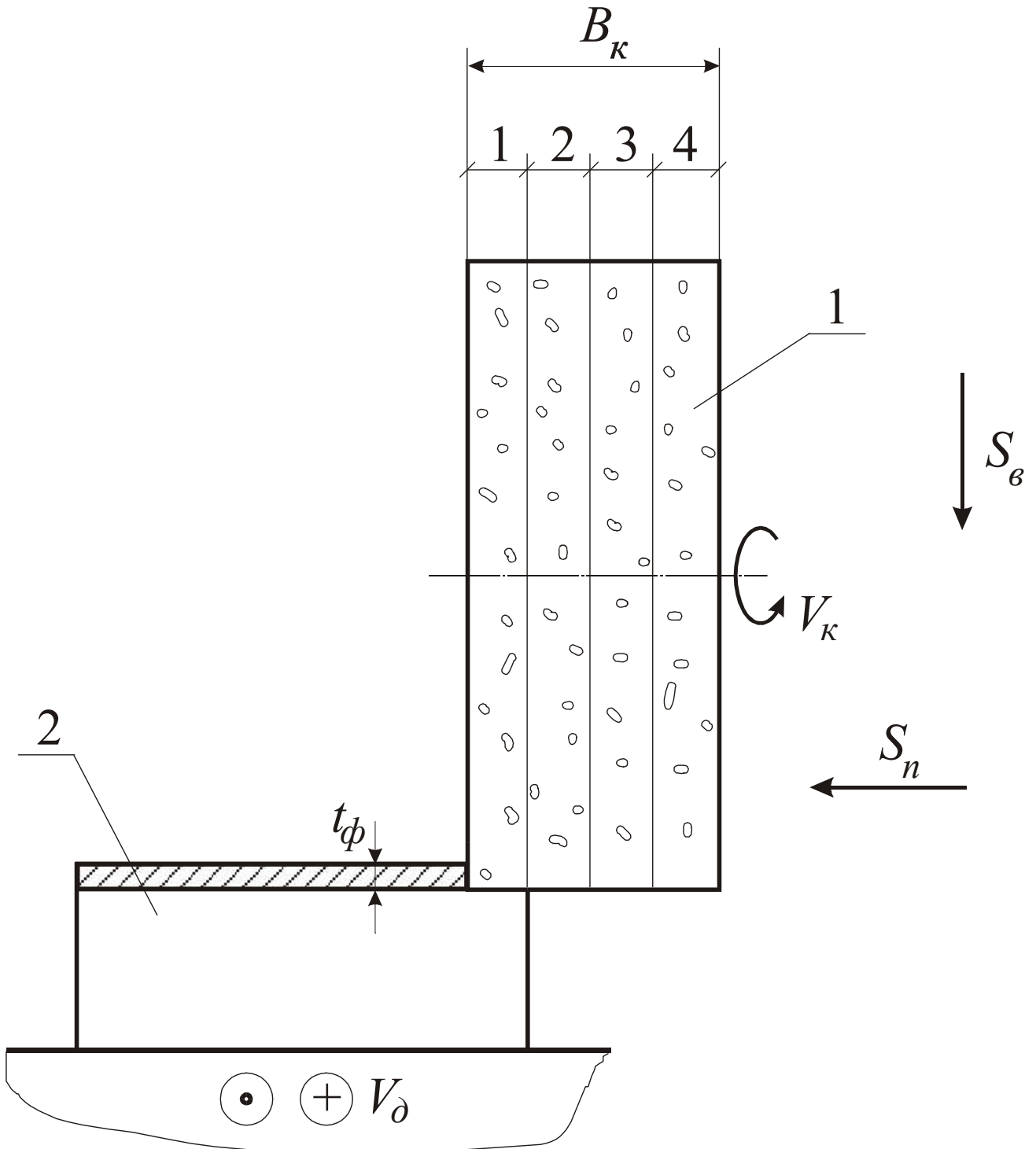


Рисунок 3.1 – Схема контактирования участков РПК с обрабатываемой заготовкой при плоском шлифовании с поперечной подачей [111]

Расчет нагрузки на отдельных участках рабочей поверхности вдоль оси круга выполним при следующих допущениях и положениях:

- осевой профиль РПК является прямолинейным и параллелен оси круга;
- технологическая система является абсолютно жёсткой;
- наиболее вероятная продольная форма единичного среза определяется отношением фактической глубины шлифования t_ϕ к высоте неровностей шлифованной поверхности R_z : при $t_\phi/R_z > 1$ образуется запятообразный срез, при $t_\phi/R_z \leq 1$ – сегментообразный.

Параметр шероховатости шлифованной поверхности рассчитаем в предположении, что профиль шлифованной поверхности формируется запятообразными срезами, поперечное сечение которых является копией режущей части модели алмазных зерен в виде конуса с округленной вершиной.

Расчеты были выполнены для плоского шлифования стали Р6М5Ф3 алмазным кругом 1А1 250×76×15×3 АС6 100/80-4-М2-01 на следующих режимах: скорость круга $V_k = 35$ м/с, скорость детали $V_d = 6$ м/мин, поперечная подача $S_n = 2,4$ мм/ход, глубина резания $t = 0,020$ мм. Параметры распределения Вейбулла, описывающего разновысотность зёрен: $m = 1,45$; $x_0 = 81,2$; коэффициент контактирования $K_k = 0,32$. Величина интервала расчета шероховатости $\Delta R = 0,2$ мкм.

Опуская методики выполненных расчетов, подробно изложенные в работе [111], рассмотрим результаты расчета параметра шероховатости R_z шлифованной поверхности, когда шероховатость сформирована после прохождения соответствующих осевых участков круга (рис. 3.2), а также составляющих сил резания на этих участках РПК (рис. 3.3).

Анализируя приведенные данные можно заключить, что наибольшие составляющие силы резания, а, следовательно, и нагрузки на режущие зерна, возникают на участке круга, первым врезающимся в обрабатываемую поверхность заготовки, при этом формируется параметр шероховатости R_z , имеющий наибольшие значения. Аналогичные условия обработки обеспечивает врезное шлифование.

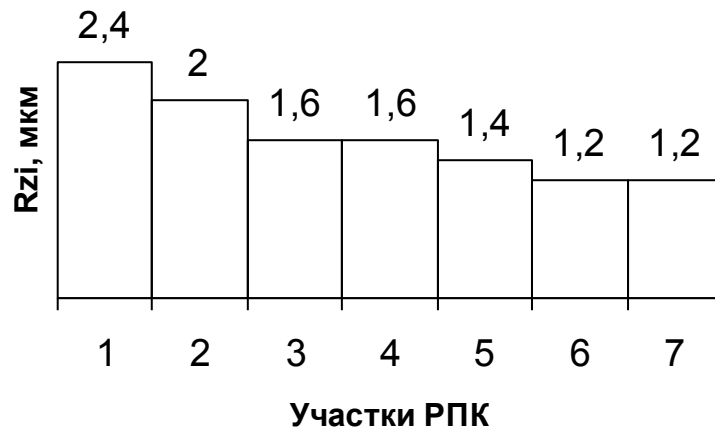
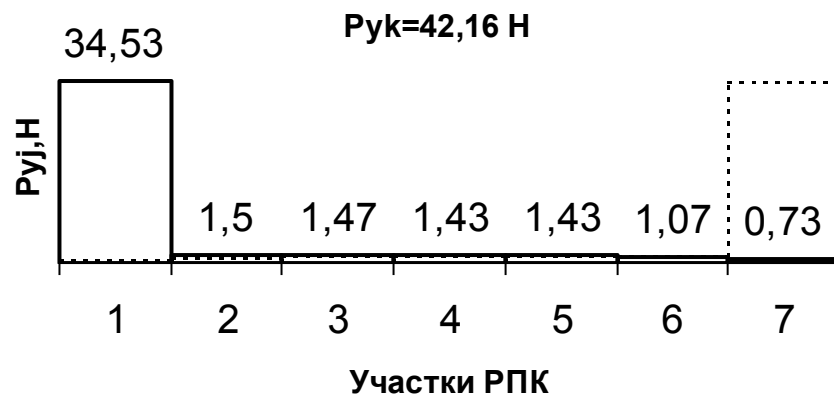
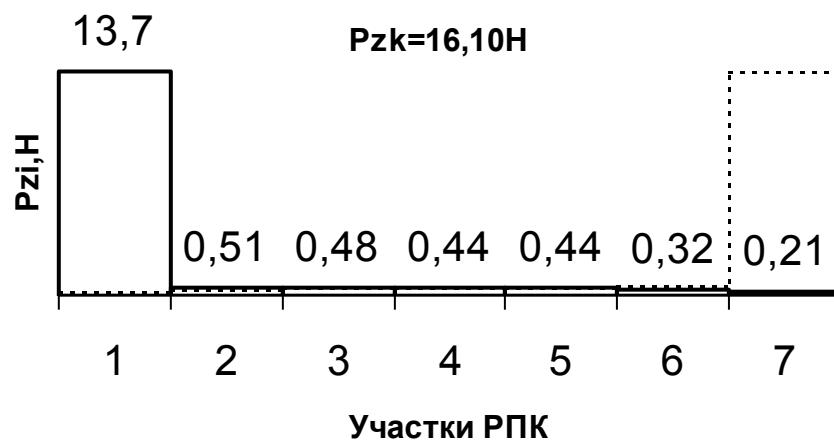


Рисунок 3.2 – Параметр шероховатости обработанной поверхности R_z , сформированный различными участками РПК вдоль оси круга [111]



a



б

Рисунок 3.3 – Распределение нагрузки по осевым участкам РПК при плоском шлифовании стали Р6М5Ф3 кругом АС6 100/80-4-М2-01 [111]

а) составляющая P_y

б) составляющая P_z

Оценки схемы шлифования с заданной силой прижима P_n шлифовального круга к заготовке, приведенные в работах [17, 21, 110], нашли полное подтверждение в выполненных нами исследованиях процесса алмазного шлифования с постоянным усилием поджима заготовки из ванадиевой инструментальной стали Р6М5Ф3 к рабочей поверхности круга 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01 (рис. 3.4) [112].

Результаты исследований, приведенные на рис. 3.4, позволяют сделать следующие выводы [112]:

- с увеличением времени обработки в связи с ухудшением режущей способности РПК текущая глубина шлифования t_{ϕ} уменьшается (кривая 1);
- температура на обработанной поверхности T в любой момент обработки (кривая 5) не превышает температуры порога фазово-структурных превращений $T_{кр}$ на обработанной поверхности (кривая 6);
- коэффициент шлифования $K_{ш} = P_z / P_y$ (кривая 4) уменьшается в соответствии с изменением составляющих силы резания P_z и P_y (кривые 2, 3).

Таким образом, для исследования показателей шлифования как нестационарного процесса необходимо использовать *схему врезного шлифования с постоянным усилием поджима заготовки к РПК*.

3.3 Выбор способа формирования параметров РПК с помощью электроэрозионной правки

Второе условие, в соответствии с которым параметры режущей поверхности круга должны обеспечивать максимальную для данной характеристики круга режущую способность, обеспечивают параметры рельефа рабочей поверхности круга, сформированные, в случае использования кругов на металлической связке, с помощью *электроэрозионной правки*.

Максимальная режущая способность шлифовального круга обеспечивается при наибольшей развитости рельефа его рабочей поверхности.

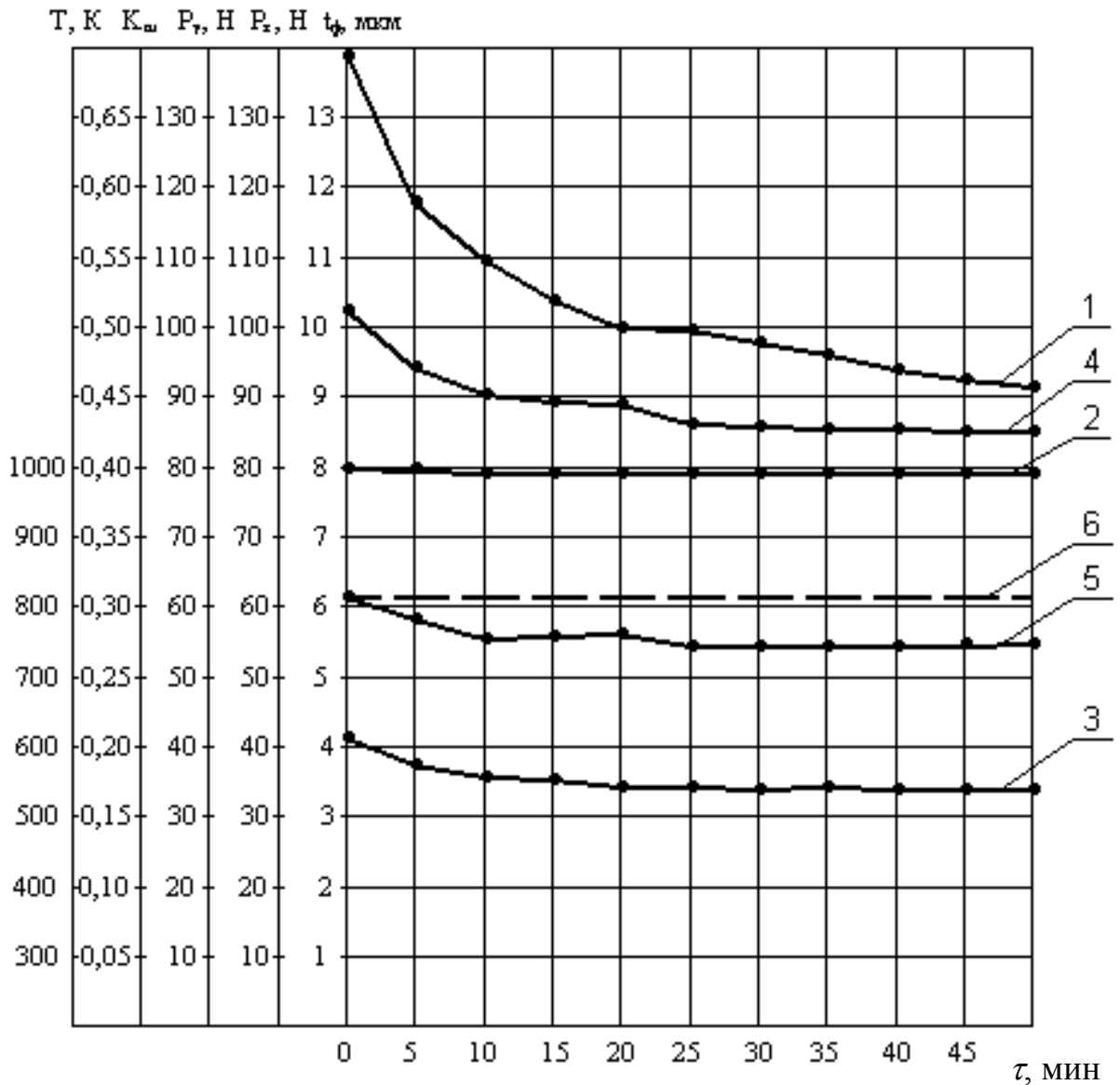


Рисунок 3.4 – Влияние времени на выходные параметры обработки при врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 с постоянной силой поджима заготовки к РПК ($P_n = [P_y] = 80$ Н) [112]:
 1 – изменение текущей глубины шлифования, t_{ϕ} ; 2 – составляющая силы резания P_y ; 3 – составляющая силы резания P_z ; 4 – коэффициент шлифования $K_{ш}$; 5 – температура на обработанной поверхности T ; 6 – температура порога фазово-структурных преобразований $T_{кр}$ в поверхностном слое заготовки

Покажем, что именно при электроэрозионной правке достигается наибольшая степень развитости рельефа РПК.

Действительно, значения моды разновысотности вершин алмазных зерен, под которой понимается расстояние вершин зерен от идеальной окружности, проведенной через три вершины наиболее выступающих из связки, измеренных в выборке определенного объема зерен и равное 35 мкм в 2,3 раза превышает значение моды разновысотности после 45 мин шлифования, которое равно 15 мкм (рис. 3.5) [113].

Большое значение моды разновысотности зерен на рельефе, сформированном электроэрозионной правкой, при постоянной силе поджима заготовки к РПК обеспечивает значительную величину заглупления вершин зерен в обрабатываемый материал, а большое количество режущих зерен – удаление материала сегментообразными срезами, что в итоге и приводит к высокой режущей способности рабочей поверхности круга после правки.

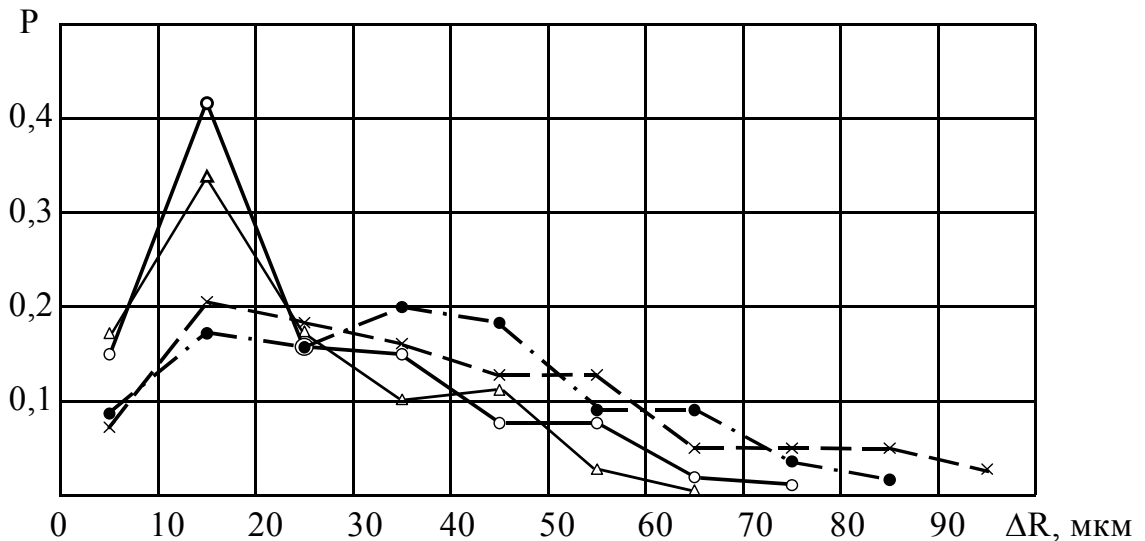


Рисунок 3.5 – Полигоны распределения разновысотности зерен круга АС6 160/125-4-М2-01 после правки (* – * – *) и алмазного шлифования штамповой инструментальной стали Х12Ф4М в течение 15 мин (- • - • -), 30 мин (- ° - ° -), 45 минут (- Δ - Δ -) [113]

3.4 Определение сопротивления деформации труднообрабатываемых сталей в условиях шлифования с помощью термомеханических коэффициентов

При расчёте силовых факторов процесса обработки, используемых для определения фиксированной силы поджима заготовки к шлифовальному кругу, необходимо учитывать отличие сопротивления деформации обрабатываемого материала в условиях шлифования от величины того же показателя, полученного в стандартных условиях механических испытаний.

Согласно теории А. Надаи, сопротивление металлов деформации σ описывается уравнением

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma_m}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_m}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_m}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \sigma_m}{\partial u} du, \quad (3.1)$$

где σ_m – предел текучести; T – температура; ε – относительная деформация; τ – время деформации; u – скорость деформации.

Слагаемые уравнения (3.1) учитывают влияние на сопротивление деформации температуры, наклепа (относительной деформации), разупрочнения во времени, изменения напряжений в зависимости от скорости деформации с учетом вязкости металла. На практике для определения σ чаще всего используют экспериментальные данные в виде конкретных дискретных значений для определенных условий деформирования и марок стали или зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные [114].

Скорости деформации, характерные для процесса механической обработки (при лезвийной обработке в зоне резания скорость деформации достигает 10^6 с^{-1} , а при шлифовании – 10^7 с^{-1}) при пластометрических испытаниях недостижимы. Поэтому для определения напряжений сдвига в условиях шлифования целесообразно использовать модификацию К. Макгрегора и И. Фишера (см. п.п. 2.4.1), однако получение зависимости вида (2.1) основано на использовании данных экспериментальных исследований механических характеристик, которые в необходимом для выполнения модификации объёме были выполнены не для всех обрабатываемых сталей и сплавов, особенно разработанных в последнее время.

По характеру наиболее значимых процессов, происходящих в металле, к резанию ближе всего холодная деформация при обработке давлением. Для этого вида обработки предложен ряд методов определения сопротивления металла деформации по данным пластометрических испытаний, из числа которых наиболее удобными при применении ЭВМ являются методы, основанные на использовании термомеханических коэффициентов [115, 116]. Применение термомеханических коэффициентов дает возможность расчленить многозначную функциональную зависимость $\sigma = f(\varepsilon, T, u)$ на ряд частных зависимостей между тремя переменными $k_T(T)$, $k_\varepsilon(\varepsilon)$, $k_u(u)$. Эти частные зависимости и носят название термомеханических коэффициентов.

Сущность метода термомеханических коэффициентов состоит в том, что сопротивление деформации определяют при средних значениях термомеханических параметров в области динамических испытаний, а затем при помощи термомеханических коэффициентов k_ε , k_T , k_u распространяют на всю исследуемую область динамических испытаний. Этот метод основан на усредненном значении степенного коэффициента k_ε (для $\varepsilon = const$) во всей области динамических испытаний.

Расчетное значение сопротивления деформации в зависимости от различных значений температуры, скорости и степени деформации В.И. Зюзиным предложено определять по следующей зависимости [115]

$$\sigma_m = \sigma_{0d} \cdot k_T \cdot k_\varepsilon \cdot k_u, \quad (3.2)$$

где σ_{0d} – среднее или базисное сопротивление деформации.

Среднее или базисное сопротивление деформации σ_{0d} в формуле (3.2) в работах [115, 116] в динамической области деформации принято при следующих параметрах: $T = 1000$ °С, $\varepsilon = 0,1$ и $u = 10$ с⁻¹. Для этих условий и даны значения k_T , k_ε , k_u .

Метод термомеханических коэффициентов дает возможность расчленить многозначную функциональную зависимость $\sigma(T, \varepsilon, u)$ на ряд зависимостей между тремя переменными $k_T(T)$, $k_\varepsilon(\varepsilon)$, $k_u(u)$. Для группы средне- и высоколегирован-

ных хромоникелевых сталей и сплавов зависимость сопротивления деформации от температуры, выраженная коэффициентом k_T , может быть представлена в экспоненциальной форме $k_T = A_1 e^{-m_1 T}$, а зависимости коэффициентов k_ε и k_u от степени и скорости деформации – в степенной форме $k_\varepsilon = A_2 \varepsilon^{m_2}$, $k_u = A_3 u^{m_3}$, где A_1 , A_2 , A_3 , m_1 , m_2 , m_3 – постоянные коэффициенты, зависящие от материала [116].

С учетом изложенного уравнение (3.2) представлено в работе [117] в следующем виде

$$\sigma_m = A_1 A_2 A_3 \cdot e^{-m_1 T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot u^{m_3} \cdot \sigma_{0d}. \quad (3.3)$$

Значения коэффициентов уравнения (3.3) для средне- и высоколегированных хромоникелевых сталей и сплавов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Значения постоянных коэффициентов для определения сопротивления деформации хромоникелевых сталей и сплавов по уравнению (3.3)

Марка стали	$A_1 A_2 A_3 \cdot \sigma_{0d}$, МПа	m_1	m_2	m_3
45	1330	0,0025	0,252	0,143
12ХН3А	2300	0,0029	0,252	0,143
40Х13	4300	0,0033	0,28	0,087
14Х17Н2	7050	0,0037	0,28	0,087
12Х18Н9Т	3250	0,0028	0,28	0,087
ХН78Т	8900	0,0032	0,35	0,098
ХН75МБТЮ	11000	0,0032	0,35	0,098
ХН70Ю	13300	0,0033	0,35	0,098
ХН50МКВЮ	15000	0,0032	0,35	0,098

Примечание. Значения термомеханических параметров таковы: $u = 0,1-100 \text{ с}^{-1}$; $\varepsilon = 0,05-0,40$ для сталей 45, 12ХН3А, 40Х13, 14Х17Н2, 12Х18Н9Т; $\varepsilon = 0,05-0,25$ для остальных сталей; $T = 1000-1200^\circ\text{C}$ для сталей 45 и ХН50МКВЮ и $T = 900-1200^\circ\text{C}$ для остальных сталей и сплавов.

Наибольшее расхождение значений σ_m , определенных по зависимости (3.3), с коэффициентами из табл. 3.1, составляет 8 % по сравнению с экспериментальными данными [118].

Зависимость (3.3) удобно использовать при расчете параметров процесса деформирования на ЭВМ. При определении силовых параметров прокатки зависимость (3.3) при использовании данных табл. 3.1 дает хорошие результаты, а возможность применения зависимости (3.3) для определения механических характеристик материалов при резании требует проведения дополнительных исследований и соответствующих уточнений.

Если в выражении (3.3) в качестве переменной величины оставить температуру, остальные термомеханические параметры принять постоянными, то после преобразования констант и постоянных коэффициентов получим

$$\sigma_m = A_{об} \cdot \exp(-m_1 \cdot T), \quad (3.4)$$

где $A_{об}$ – постоянная величина для данного материала, которая рассчитывается по формуле:

$$A_{об} = A_1 A_2 A_3 \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot u^{m_3} \cdot \sigma_{0д}. \quad (3.5)$$

Для учёта отличия термомеханических параметров при динамических испытаниях обрабатываемого материала и при его шлифовании, введем поправку на температурно-скоростные условия шлифования также в виде показательной зависимости от температуры [119]:

$$\Delta\sigma = b_\sigma \cdot m_\sigma^T, \quad (3.6)$$

где b_σ и m_σ – постоянные коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты в выражении (3.6) определяются методами регрессионного анализа на основе сравнения значений предела прочности обрабатываемого материала, определённого экспериментально для условий шлифования, и предела текучести, рассчитанного по формулам (3.3) или (3.4) на основе использования термомеханических коэффициентов, для температурного диапазона, соответствующего условиям шлифования [119].

Таким образом, на основе приведенных рассуждений при использовании метода термомеханических коэффициентов зависимость предела прочности стали или сплава от температуры при скорости деформации шлифованием можно представить в следующем виде:

$$\sigma_s = \sigma_m(T, \varepsilon, u) + \Delta\sigma, \quad (3.7)$$

где $\sigma_m(T, \varepsilon, u)$ – зависимость предела текучести стали соответственно от температуры, степени деформации и скорости деформации по данным динамических испытаний;

$\Delta\sigma$ – поправка, учитывающая отличие термомеханических параметров при динамических испытаниях материала и при его шлифовании.

Так как первое слагаемое в правой части выражения (3.7) соответствует уравнению (3.3), то, соответственно, с учётом зависимостей (3.4) и (3.6) формула (3.7) принимает вид:

$$\sigma_s = A_{\sigma\sigma} \cdot \exp(-m_1 \cdot T) + B_{\sigma} \cdot m_{\sigma}^T, \quad (3.8)$$

Используя известное соотношение между характеристиками материалов для перехода от предела прочности к касательному напряжению сдвига:

$$\tau_s = \sigma_s / \sqrt{3},$$

из формулы (3.8) получим выражение для определения касательного напряжения вдоль условной плоскости сдвига

$$\tau_s = \frac{A_{\sigma\sigma}}{\sqrt{3}} \exp(-m_1 \cdot T) + \frac{B_{\sigma}}{\sqrt{3}} m_{\sigma}^T. \quad (3.9)$$

При использовании зависимости (3.9) формулы (1.16) и (1.17) для сил резания на единичном зерне, трансформированные для произвольной формы зоны контакта задней поверхности зерна с деталью, примут вид:

$$P_z = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z b \cos \omega}{\sin \beta} + K_3 M f_z \mu \right) \left(\frac{A_{\sigma\sigma}}{\sqrt{3}} \exp(-m_1 \cdot T) + \frac{B_{\sigma}}{\sqrt{3}} m_{\sigma}^T \right); \quad (3.10)$$

$$P_y = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z b \sin \omega}{\sin \beta} + K_3 M f_z \mu \right) \left(\frac{A_{\sigma\sigma}}{\sqrt{3}} \exp(-m_1 \cdot T) + \frac{B_{\sigma}}{\sqrt{3}} m_{\sigma}^T \right), \quad (3.11)$$

где f_3 – площадь зоны контакта задней поверхности зерна с обрабатываемой поверхностью заготовки, мм²; в частности, для прямоугольной площадки контакта зерна $f_3 = b \cdot l_3$.

3.5 Выбор управляемого режимного параметра для обеспечения максимальной производительности обработки

Фактическая производительность процесса обработки при шлифовании является функцией режущей способности круга.

Выбор управляемого режима обработки обусловлен видом аналитической зависимости для расчёта производительности обработки при шлифовании. В общем случае производительность процесса алмазно-абразивной обработки определяется объёмом материала, сошлифованного в единицу времени [82]:

$$Q = V_m / \tau,$$

где V_m – объём материала, сошлифованного за время τ , мм³;

τ – время обработки, мин.

Объём сошлифованного материала при плоском шлифовании определяется по формуле [82]:

$$V_m = a b c, \quad (3.12)$$

где $a b$ – соответственно длина и ширина обрабатываемой поверхности, мм;

c – толщина сошлифованного слоя, мм.

Из формулы (3.12) видно, что в качестве управляемых режимных параметров могут быть выбраны только те, изменение которых влияет на значение множителей в правой части равенства (3.12). При плоском шлифовании в настоящее время для изменения производительности обработки управляют следующими режимами: скоростью стола V_d [47] и фактической глубиной шлифования t_ϕ [44].

Для определения параметра, управление которым позволяет обеспечить максимальную производительность процесса без снижения качества обработанной поверхности проанализируем аналитические зависимости, которые используются для расчёта производительности обработки при шлифовании по различным схемам [120].

Определение производительности шлифования по формуле (3.12) не вызывает затруднений для более распространённой в производственных условиях схе-

мы обработки с фиксированными режимами (когда величины в формуле (3.6) постоянны во времени τ), но имеет некоторые особенности для упругой схемы с фиксированной силой поджима заготовки к кругу.

При плоском врезном шлифовании с глубиной шлифования t_ϕ и скоростью стола V_∂ производительность обработки будет равна

$$Q = 1000 \cdot V_\partial \cdot B_\partial \cdot t_\phi, \quad (3.13)$$

где B_∂ – ширина обрабатываемой поверхности заготовки, мм.

Выразим скорость стола через длину заготовки и частоту ходов стола

$$V_\partial = \frac{L_\partial \cdot n_{cm}}{1000}, \quad (3.14)$$

где L_∂ – длина обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

n_{cm} – количество ходов стола в минуту (частота ходов стола), ход/мин.

После подстановки (3.14) в (3.13) получим

$$Q = B_\partial \cdot L_\partial \cdot n_{cm} \cdot t_\phi. \quad (3.15)$$

При шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к кругу, когда снижение режущих свойств РПК во время обработки компенсируется уменьшением глубины шлифования, фактическая производительность рассчитывается по формуле, являющейся обобщением выражения (3.15):

$$Q_{ф.у} = B_\partial \cdot L_\partial \cdot n_{cm} \cdot t_\phi(\tau), \quad (3.16)$$

где $t_\phi(\tau)$ – зависимость, описывающая влияние времени обработки τ на фактическую глубину шлифования t_ϕ .

Количество ходов стола в минуту связано с длиной обрабатываемой заготовки через время одного хода стола τ_x : $n_{cm} = 1/\tau_x$, которое составляет

$$\tau_x = \frac{L_\partial + 2l_{пер}}{1000V_\partial},$$

где $l_{пер}$ – величина перебега шлифовального круга, мм;

V_∂ – продольная скорость стола, м/мин.

Соответственно,

$$n_{cm} = \frac{1000V_{\partial}}{L_{\partial} + 2l_{nep}}. \quad (3.17)$$

После подстановки (3.17) в (3.16) получим

$$Q_{\phi.y} = \frac{B_{\partial} \cdot L_{\partial} \cdot 1000V_{\partial}}{L_{\partial} + 2l_{nep}} \cdot t_{\phi}(\tau). \quad (3.18)$$

При шлифовании с фиксированными режимами, когда фактическая глубина шлифования постоянна (т.е. по «жесткой» схеме), производительность рассчитывается по формуле, которая является частным случаем выражения (3.18)

$$Q_{\phi.ж} = \frac{B_{\partial} \cdot L_{\partial} \cdot 1000V_{\partial}}{L_{\partial} + 2l_{nep}} \cdot t_{\phi}. \quad (3.19)$$

В формулах (3.18) и (3.19) правая часть включает две группы величин: изменяемые во времени в процессе обработки (параметры V_{∂} и t_{ϕ}) и постоянные (параметры, обусловленные геометрией заготовки). Из этих формул видно, что фактическая производительность обработки при плоском врезном шлифовании в общем случае определяется по формуле, включающей отмеченные нами зависимости величин от времени обработки:

$$Q_{\phi} = \frac{1000 \cdot B_{\partial} \cdot L_{\partial}}{L_{\partial} + 2l_{nep}} \cdot V_{\partial}(\tau) \cdot t_{\phi}(\tau), \quad (3.20)$$

где $V_{\partial}(\tau)$ – зависимость, описывающая изменение во времени скорости стола шлифовального станка, м/мин.

Из формулы (3.20) непосредственно следуют три возможных способа управления производительностью шлифования при снижении режущей способности шлифовального круга за период его стойкости:

- 1) изменение во времени скорости стола V_{∂} ;
- 2) изменение во времени фактической глубины шлифования t_{ϕ} ;
- 3) одновременное изменение скорости стола V_{∂} и глубины t_{ϕ} .

Как указано ранее, первый и второй способы известны и могут быть реализованы на современных шлифовальных станках. Использование третьего (одновременного изменения скорости V_{∂} и глубины шлифования t_{ϕ}) ограничено воз-

возможностями существующего технологического оборудования и представляет интерес при проектировании новых конструкций шлифовальных станков с ЧПУ с увеличенным количеством программно управляемых параметров и режимов обработки.

Сопоставим целесообразность выбора одного из способов управления производительностью с точки зрения обеспечения требуемого качества обработанной поверхности. При первом способе путём изменения скорости стола V_0 поддерживается постоянной тангенциальная составляющая силы резания P_z , во втором – путём изменения глубины шлифования t_ϕ поддерживается постоянной радиальная составляющая силы резания P_y .

Как показали проведенные нами исследования [121], шлифование с постоянной тангенциальной силой P_z может привести к увеличению температуры поверхности резания и снижению качества обработки, а использование в качестве постоянного параметра обработки радиальной силы P_y обеспечивает отсутствие фазово-структурных превращений в материале заготовки. На этом основании предпочтительным способом согласования фактической производительности процесса шлифования с режущей способностью круга является изменение во времени фактической глубины шлифования t_ϕ .

Закономерность изменения во времени обработки τ глубины шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к кругу описывается экспоненциальным выражением вида

$$t_\phi(\tau) = t_{ycm} + \Delta t \cdot \exp(\alpha \tau), \quad (3.21)$$

где t_{ycm} – установившаяся глубина шлифования;

t_0 – исходная глубина шлифования рельефом, который сформирован после электроэрозионной правки круга;

$\Delta t = t_0 - t_{ycm}$ – амплитуда снижения глубины шлифования;

α – эмпирический коэффициент.

Эта закономерность, представленная уравнением (3.21), является проявлением экспоненциального характера снижения режущей способности алмазного шлифовального круга во время обработки (рис. 3.6).

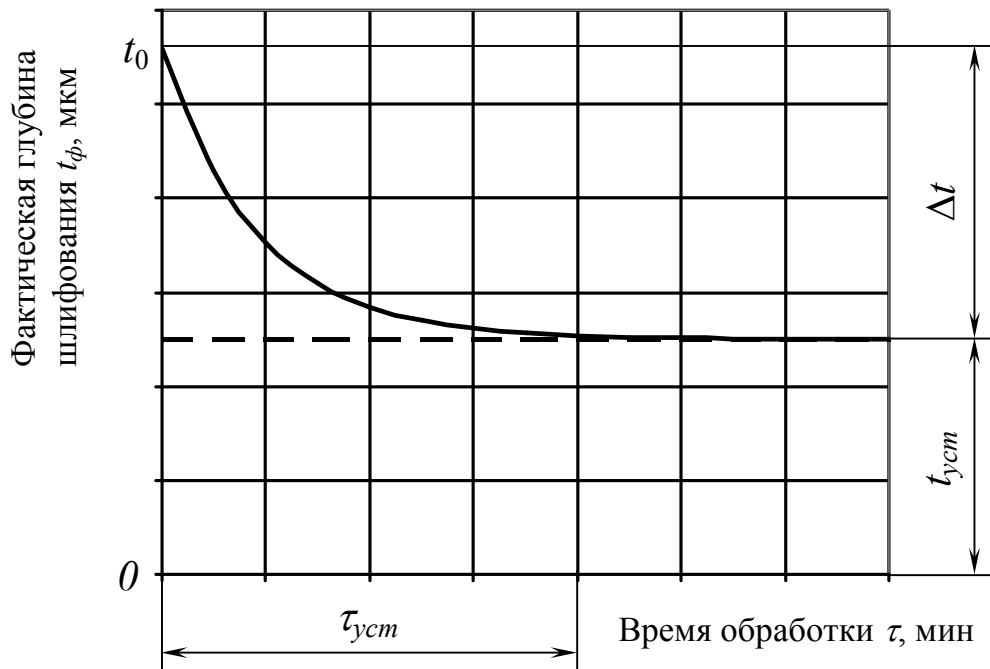


Рисунок 3.6 – Изменение фактической глубины шлифования во время обработки с фиксированной силой поджима заготовки к РПК

Стабилизация в процессе шлифования заготовки через определённый промежуток времени (период стабилизации $\tau_{уст}$) режущей способности круга на уровне, соответствующем установившейся глубине шлифования $t_{уст}$, вынуждает устанавливать в качестве режима обработки по жёсткой схеме именно это значение глубины резания. Даже незначительное его превышение по истечении времени обработки, равного $\tau_{уст}$, может привести к появлению фазово-структурных изменений в поверхностном слое заготовки (прижогов). Это приводит к существенному недоиспользованию режущей способности круга при $\tau < \tau_{уст}$ для случая обработки с постоянной глубиной резания.

3.6 Интегральное техническое ограничение на режим шлифования, обеспечивающее требуемые показатели качества обработанной поверхности и максимальную производительность обработки

Для оценки режущей способности круга при обработке с учетом ее нестационарности в качестве основного количественного показателя введем новое понятие «*текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга*» (ТЛРСШК), являющееся интегральным техническим ограничением на режим шлифования, обеспечивающим требуемые показатели качества обработанной поверхности и максимальную производительность обработки [122].

В настоящее время режущая способность круга, определяющая условия алмазного шлифования оценивается коэффициентом шлифования либо коэффициентом режущей способности. Коэффициент шлифования представляет собой отношение тангенциальной составляющей силы резания P_z к радиальной составляющей P_y и характеризует долю энергетических затрат на полезную работу в процессе резания. Коэффициент режущей способности характеризует количество материала, удаленного шлифованием в единицу времени при величине радиальной составляющей силы резания, равной единице. Он позволяет сравнить по эффективности различные способы шлифования, а также оценить изменение режущих свойств РПК в процессе обработки. С увеличением времени обработки коэффициенты шлифования и режущей способности уменьшаются, что вызвано ухудшением режущей способности рабочей поверхности круга, обусловленной образованием контактных площадок на алмазных зернах, засаливанием межзеренного пространства и микрорельефа контактных площадок на зернах. Эти явления, с одной стороны, способствуют уменьшению параметров шероховатости обработанной поверхности, с другой – увеличивают силы резания, что может привести к фазово-структурным изменениям в поверхностном слое заготовки. Ни коэффициент шлифования, ни коэффициент режущей способности непосредственно без дополнительных трудоёмких процедур не позволяют определить условия обработки, которые удовлетворяли бы техническим ограничениям по качеству об-

работанной поверхности на заготовке и обеспечивали бы максимальную производительность процесса.

В связи с изложенным выше, режущую способность круга предлагается характеризовать новым показателем – ТЛРСШК, которая представляет собой объем материала, удаленного шлифованием в единицу времени, при котором выполняются все технические ограничения, налагаемые на режим обработки качеством обработанной поверхности, инструментом и станком, например, параметрами шероховатости обработанной поверхности, температурой порога фазово-структурных превращений в поверхностном слое детали, температурой окисления алмаза, прочностью зерна, паспортными характеристиками станка [123].

Покажем, что ТЛРСШК обеспечивает не только заданные параметры качества обработки, но и максимально возможную для данных условий производительность обработки.

При врезном шлифовании с фиксированной силой поджима неподвижной заготовки к РПК производительность шлифования определяется по формуле [124]

$$Q = W \cdot B_{\delta} \cdot L_{\delta}, \quad (3.22)$$

где W – скорость врезания РПК в поверхность заготовки, мм/мин.

При плоском врезном шлифовании с глубиной шлифования t_{ϕ} и скоростью стола V_{δ} производительность обработки определяется по формуле (3.10), в которой произведение $B_{\delta} \cdot L_{\delta}$ – площадь обрабатываемого участка поверхности заготовки, мм², $n_{cm} \cdot L_{\delta}$ – скорость стола, мм/мин; произведение $n_{cm} \cdot t_{\phi}$, мм/мин, есть по своей сути переменная скорость врезания РПК в поверхность заготовки, которая в противоположность шлифованию с фиксированными режимами осуществляется не прерывисто, а непрерывно.

Аналогично можно показать, что формула (3.22) является справедливой для определения производительности при любом виде шлифования. Так, при круглом врезном шлифовании

$$Q = B_{\delta} \cdot \pi D_{\delta} \cdot n_{\delta} \cdot t_{\phi}, \quad (3.23)$$

где D_{δ} – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

n_{∂} – частота вращения заготовки, об/мин.

В формуле (3.17) $B_{\partial} \cdot \pi D_{\partial}$ – площадь обрабатываемой поверхности заготовки, а $n_{\partial} \cdot t_{\phi}$ – скорость погружения РПК в поверхность детали.

При плоском шлифовании с поперечной подачей производительность обработки определяется по формуле

$$Q = k B_{\kappa} \cdot 1000 \cdot V_{\partial} \cdot t_{\phi}. \quad (3.24)$$

Здесь B_{κ} – высота шлифовального круга, мм;

k – часть высоты круга, на которую осуществляется поперечная подача за ход стола ($k = 0,6-0,8$).

Выразим удалённый объём материала через количество проходов за одну минуту:

$$i = 1 / t_{\text{прох}}.$$

Время одного прохода $t_{\text{прох}}$ определим по ширине обрабатываемой поверхности заготовки B_{∂} , величине поперечной подачи и частоте ходов стола

$$t_{\text{прох}} = \frac{B_{\partial}}{n_{\text{см}} \cdot k B_{\kappa}},$$

и тогда количество проходов за одну минуту будет равно

$$i = \frac{n_{\text{см}} \cdot k B_{\kappa}}{B_{\partial}},$$

или, с учетом скорости продольного хода стола,

$$i = \frac{1000 V_{\partial} \cdot k B_{\kappa}}{L_{\partial} \cdot B_{\partial}}. \quad (3.25)$$

Подставим значение $1000 V_{\text{см}} \cdot k B_{\kappa}$ из формулы (3.25) в формулу (3.24), получим

$$Q = B_{\partial} \cdot L_{\partial} \cdot i \cdot t_{\phi}. \quad (3.26)$$

Таким же образом была получена формула для круглого шлифования с продольной подачей

$$Q = \pi D_{\partial} \cdot L_{\partial} \cdot i \cdot t_{\phi}. \quad (3.27)$$

В формулах (3.26) и (3.27), соответственно, $i \cdot t_{\phi}$ – скорость погружения РПК в поверхность заготовки, мм/мин, а $B_{\delta} \cdot L_{\delta}$ и $\pi D_{\delta} \cdot L_{\delta}$ – площадь участка поверхности заготовки, подвергаемого обработке, мм².

Из формул (3.16), (3.23), (3.26) и (3.27) видно, что наиболее удобным параметром режима шлифования, с помощью которого можно привести в соответствие производительность обработки и режущую способность круга, является фактическая глубина шлифования. Из этих же формул следует, что изменение фактической глубины шлифования при обработке с фиксированными режимами необходимо осуществлять дискретно через время, равное времени одного хода стола при плоском врезном шлифовании или времени одного оборота детали – при круглом, либо через кратное им время. При шлифовании с подачей фактическую глубину шлифования необходимо изменять через время одного прохода либо кратное ему.

При шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к РПК изменение ТЛРСШК однозначно определяет изменение текущей лимитированной фактической глубины шлифования (ТЛФГШ). Начальное значение ТЛФГШ определяется лимитирующим техническим ограничением – температурой порога фазово-структурных превращений в поверхностном слое заготовки, температурой окисления алмаза, прочностью зерна и т.п.

Как результат приведенных рассуждений, для реализации третьего условия математического описания процесса шлифования как нестационарного процесса *в качестве обобщенного показателя процесса шлифования используем текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга*. Назначение фактической глубины шлифования в соответствии с изменением ТЛРСШК обеспечивает не только условия шлифования, удовлетворяющие всем техническим ограничениям, налагаемым на режим шлифования, но и обработку с максимальной или же с достаточно близкой к максимальной для данных условий производительностью обработки.

3.7 Область возможных режимов шлифования при изменении режущей способности круга в процессе обработки

Рассмотрим область возможных режимов алмазного шлифования с фиксированным усилием поджима образца к РПК рельефом круга, сформированным правкой, в момент времени, соответствующий исходному состоянию рельефа РПК, в системе координат $t_{\phi}(P_n)v_{\partial}\tau$ (рис. 3.7). В этой системе координат в плоскости $t_{\phi}(P_n)v_{\partial}$ область возможных режимов очерчена кривыми, описываемыми уравнениями технических ограничений, налагаемых на режим шлифования станком ($v_{\partial \min}, v_{\partial \max}$); приспособлением для упругого поджима заготовки к РПК ($P_{n \min}, P_{n \max}$), где диапазон сил упругого поджима определяет диапазон мгновенных значений фактической глубины резания при шлифовании ($t_{\phi \min}(P_{n \min}) t_{\phi \max}(P_{n \max})$); изделием (ТИ1 – параметром шероховатости обработанной поверхности изделия R_a , ТИ2 – температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала); шлифовальным кругом (ТК1 – прочностью зёрен; ТК2 – температурой окисления алмазов) [125].

Заданному значению шероховатости обработанной поверхности соответствует скорость детали $v_{\partial \text{ТИ1}}$, а исходное значение фактической глубины шлифования определяется самой нижней из точек пересечения кривых технических ограничений с вертикалью $v_{\partial \text{ТИ1}}$ (точки 1 - 4). На рис. 3.7 такой точкой является точка 2 пересечения вертикали $v_{\partial \text{ТИ1}}$ с кривой ТИ2. В этой точке фактическая глубина шлифования принимает значение $t_{\phi 2}(P_{n2})$. Совокупность значений скорости детали $v_{\partial \text{ТИ1}}$ и фактической глубины шлифования $t_{\phi 2}(P_{n2})$ однозначно определяет мгновенную производительность обработки Q , мм³/мин.

В остальных точках пересечения кривых технических ограничений с вертикалью $v_{\partial \text{ТИ1}}$ заданное значение шероховатости обработанной поверхности будет достигнуто, но не выполнится одно или несколько из перечисленных выше технических ограничений.

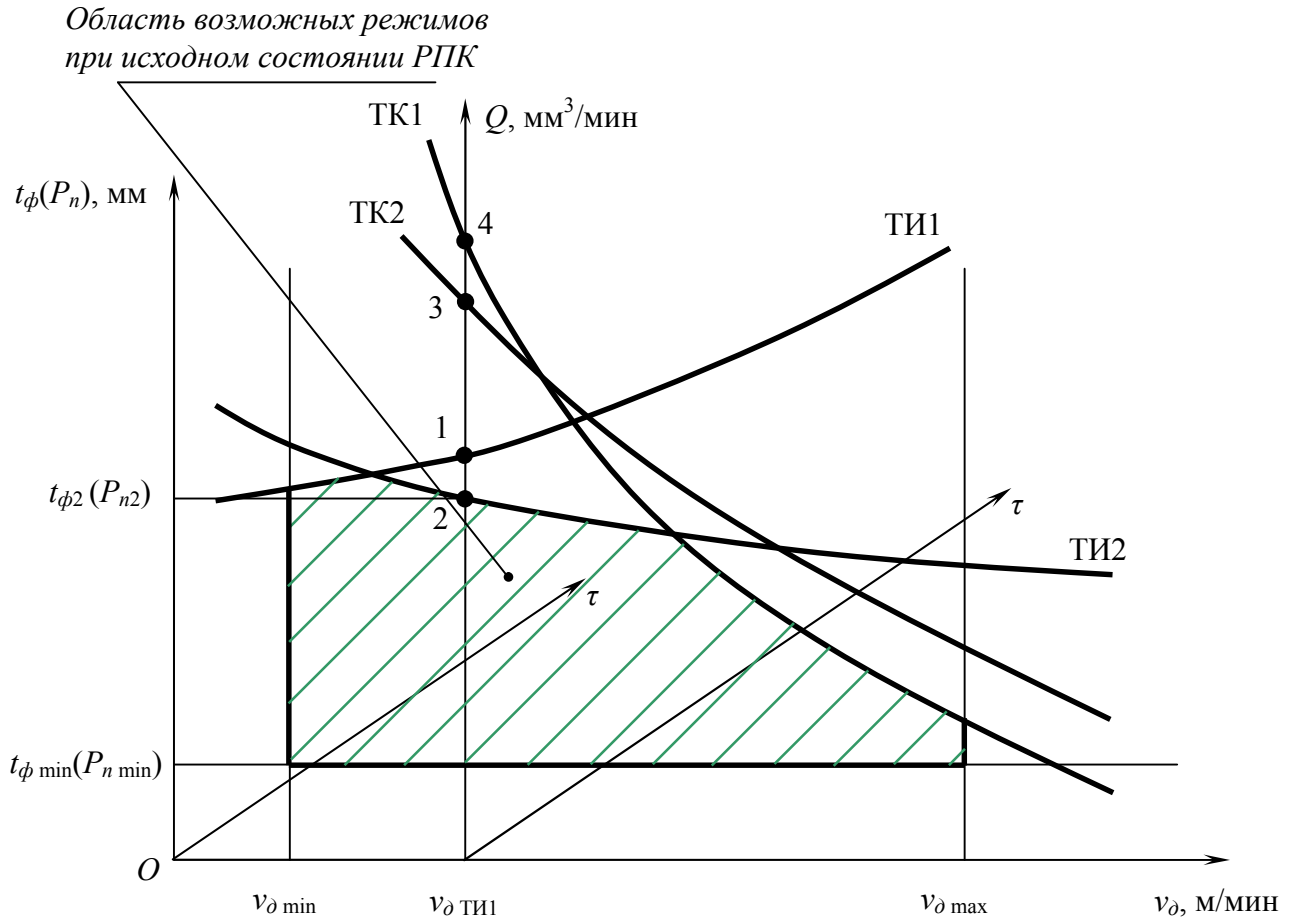


Рисунок 3.7 –Определение режимов шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к РПК по заданной шероховатости поверхности изделия для исходного состояния РПК

При изменении требуемой шероховатости обработанной поверхности скорость детали принимает значение $v'_d \text{ ТИ1}$ (рис. 3.8). При этом исходное значение фактической глубины шлифования также изменится и определится самой нижней из точек пересечения кривых технических ограничений с вертикалью $v'_d \text{ ТИ1}$ (точки 1' - 4'). На рисунке 8 такой точкой является точка 4' пересечения вертикали $v'_d \text{ ТИ1}$ с кривой ТК1. В этой точке фактическая глубина шлифования примет значение $t_{\phi 4'}(P_{n4'})$. Соответственно, изменится и мгновенная производительность обработки Q' , мм³/мин.

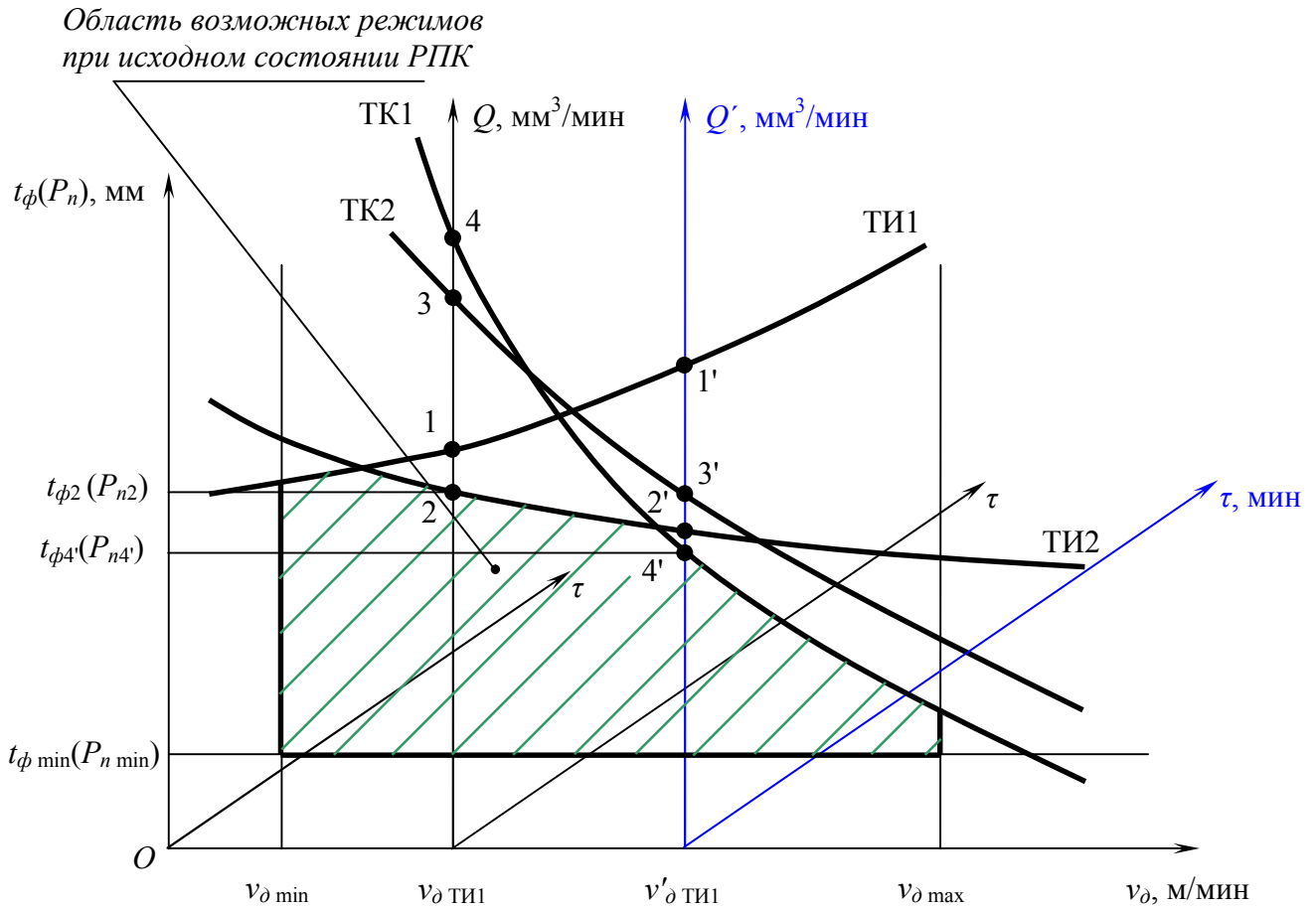


Рисунок 3.8 – Определение режимов шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к РПК при изменении заданной шероховатости поверхности изделия

Нестационарность процесса обработки учтём путём использования текущей лимитированной фактической глубины шлифования $t_\phi(\tau)$, полученной при делении ТЛРСШК на площадь обрабатываемой поверхности заготовки. График ТЛФГШ может быть расположен в плоскости $t_\phi(P_n) \tau$ в любой из точек диапазона $v_{\delta \min} - v_{\delta \max}$, в которой значение скорости детали v_δ обеспечивает требуемый параметр шероховатости R_a [126] (рис. 3.9).

Положение кривых технических ограничений ТИ2, ТК1 и ТК2 вдоль оси τ не изменяется, так как эти технические ограничения не зависят от времени обработки вследствие постоянства силы P_n . Изменение положения кривой ТИ2 можно не учитывать, поскольку в любой момент времени обработки высота микронеров-

ностей на обработанной поверхности не может быть выше, чем при обработке кругом после правки при исходном состоянии РПК.

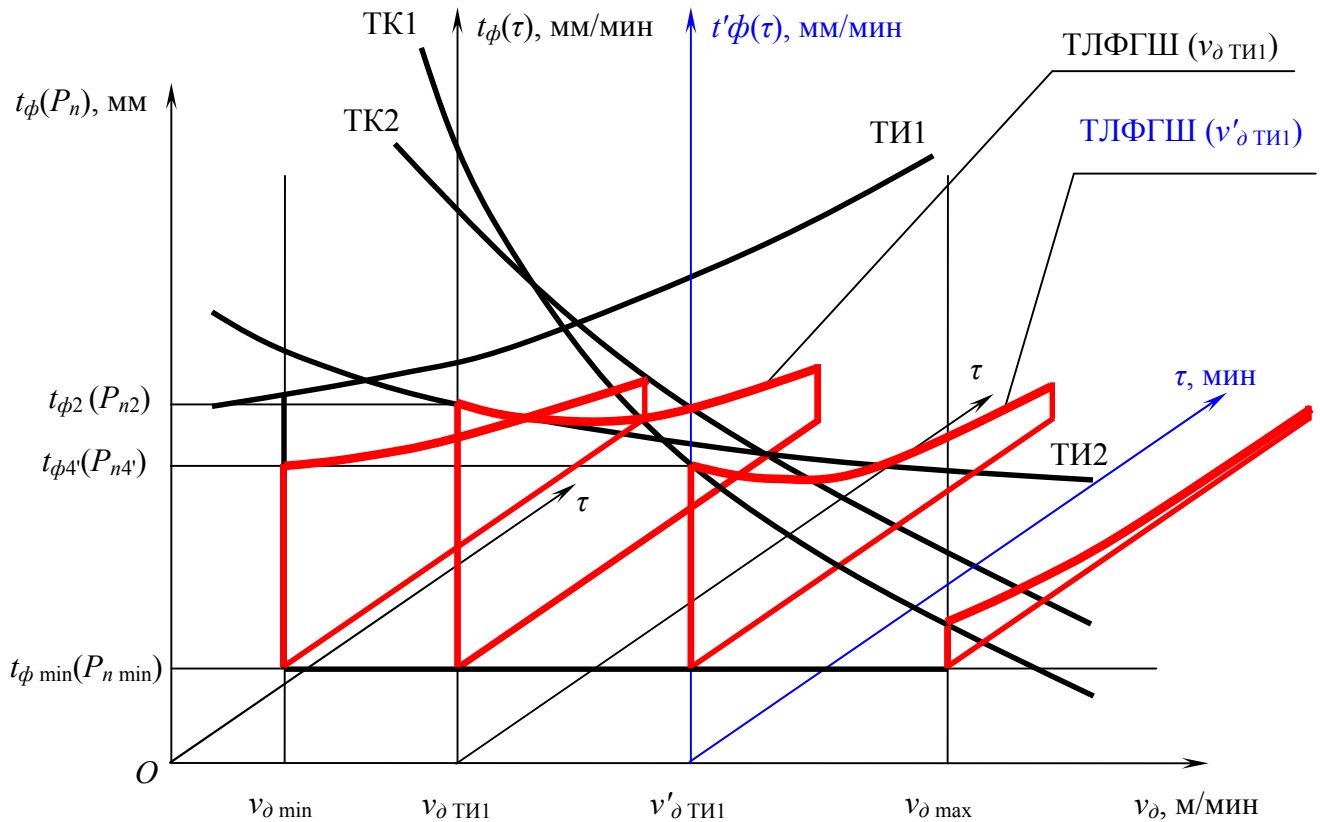


Рисунок 3.9 – Определение режимов шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к РПК при изменении режущей способности шлифовального круга во время обработки

Таким образом, область возможных режимов шлифования как нестационарного процесса представляет собой трехмерное пространство, ограниченное плоскостями, проходящими параллельно соответствующим координатным плоскостям через точки $v_{\delta \min}$ и $v_{\delta \max}$, $t_{\phi \min}(P_{n \min})$, а также семейством кривых, описывающих изменение ТЛФГШ в соответствующих точках диапазона $v_{\delta \min} - v_{\delta \max}$. В направлении оси τ область возможных режимов ограничена плоскостью, положение которой зависит от длительности эксперимента при определении закона изменения ТЛРСШК. Сечения описанной области, проходящие через вертикали $v_{\delta \min}$, $v_{\delta \text{ТИ1}}$, $v'_{\delta \text{ТИ1}}$, $v_{\delta \max}$, представлены на рис. 3.9.

3.8 Последовательность поиска рациональных режимов шлифования для схемы шлифования с фиксированными режимами с учетом нестационарности процесса

В настоящее время в промышленности шлифовальные станки, за исключением заточных и точильно-шлифовальных станков моделей 3Б632В, 3Б652, 3Б642 и ТШ-300, реализуют шлифование с режимами, устанавливаемыми механизмами станка («жесткая» схема с фиксированными режимами). Учитывая это, поиск оптимальных условий осуществления процесса обработки с максимальной производительностью или минимальной себестоимостью предлагается осуществлять для шлифования с фиксированными режимами, используя схему шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК как инструмент, обеспечивающий достижение поставленной цели с учетом нестационарности процесса [127]. Кроме того, шлифовальные станки без модернизации не позволяют осуществлять электроэрозионную правку и электроэрозионные управляющие воздействия на РПК с целью поддержания режущих свойств рабочей поверхности круга во время обработки без специальной модернизации. Соответственно, необходима разработка алгоритма оптимизации режимных параметров для шлифования без электроэрозионных воздействий на РПК кругами, заправленными электроэрозионным способом, и для шлифования с одновременными электроэрозионными воздействиями на РПК.

Оптимизацию режимов резания при шлифовании с фиксированными режимами схеме без электроэрозионных управляющих воздействий на РПК (см рис. 3.7) предлагается выполнять в следующей последовательности [128]:

- 1) рассчитать скорость заготовки, удовлетворяющую техническому ограничению, налагаемому на режим резания требуемой шероховатостью обработанной поверхности (точка 1 на кривой ТИ1);

- 2) рассчитать значения усилий поджима образца к РПК, удовлетворяющих техническим ограничениям, налагаемым на усилие поджима заготовки к РПК температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое заготовки

(точка 2 на кривой ТИ2), прочностью алмазных зерен (точка 3 на кривой ТК1) и температурой окисления алмазов (точка 4 на кривой ТК2);

3) определить лимитированное усилие поджима заготовки к кругу, при котором удовлетворяются все найденные в пункте 2 технические ограничения (на рис. 3.7 соответствует точке 2 на кривой ТИ2);

4) с помощью эксперимента, используя схему шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК, кинематика которой аналогична шлифованию по «жесткой» схеме с фиксированными режимами, определить закон изменения ТЛРСШК во время обработки;

5) найти закон изменения фактической глубины шлифования $t_{\phi} = f(Q, \tau)$ в соответствии с законом изменения ТЛРСШК;

6) величину подачи на врезание задать в соответствии с законом изменения ТЛФГШ, перенося остальные режимы резания шлифования с фиксированным усилием поджима образца к РПК на шлифование по «жесткой» схеме неизменными.

Описанная последовательность поиска режимов представлена на рис. 3.10; найденные по ней режимы шлифования по «жесткой» схеме обеспечат близкую к максимальной производительность обработки за счет рационального использования режущих свойств рабочей поверхности круга.

При оптимизации режимов шлифования по «жесткой» схеме с электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК последовательность поиска режимов следующая (см. рис. 3.10):

1) рассчитать скорость заготовки, удовлетворяющую техническому ограничению, налагаемому на режим резания требуемой шероховатостью обработанной поверхности (точка 1 на кривой ТИ1);

2) рассчитать значения усилий поджима образца к РПК, удовлетворяющих техническим ограничениям, налагаемым на усилие поджима заготовки к РПК температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое заготовки (точка 2 на кривой ТИ2), прочностью алмазных зерен (точка 3 на кривой ТК1) и температурой окисления алмазов (точка 4 на кривой ТК2);

3) определить лимитированное усилие поджима заготовки к кругу, при котором удовлетворяются все найденные в пункте 2 технические ограничения (на рис. 3.7 соответствует точке 2 на кривой ТИ2);

4) экспериментально определить закон изменения ТЛРСШК во время шлифования и периодических электроэрозионных воздействий на РПК, осуществляемых одновременно со шлифованием с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК, кинематика которого аналогична шлифованию по «жесткой» схеме;

5) определить режимы электроэрозионных управляющих воздействий на РПК, обеспечивающих минимальную удельную себестоимость обработки;

6) глубину шлифования задать асимптотой к кривой изменения ТЛФГШ при шлифовании с электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК на режимах, найденных в п. 5. Остальные режимы резания при шлифовании с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК перенести на шлифование по «жесткой» схеме неизменными.

Общая последовательность поиска режимов шлифования по схеме с фиксированными режимными параметрами с электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК и без таких воздействий, разработанная на основе учёта нестационарности процесса, представлена на рис. 3.10.

Определение режимных параметров процесса шлифования в соответствии с описанной последовательностью обеспечивает достаточно близкую к максимальной производительность обработки и, соответственно, близкую к минимальной её удельную себестоимость.

3.9 Выводы

1. Оптимизацию режимных параметров шлифования с учетом нестационарности процесса необходимо выполнять с использованием врезного шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК, кинематика которого аналогична шлифованию по жесткой схеме с фиксированными режимами.

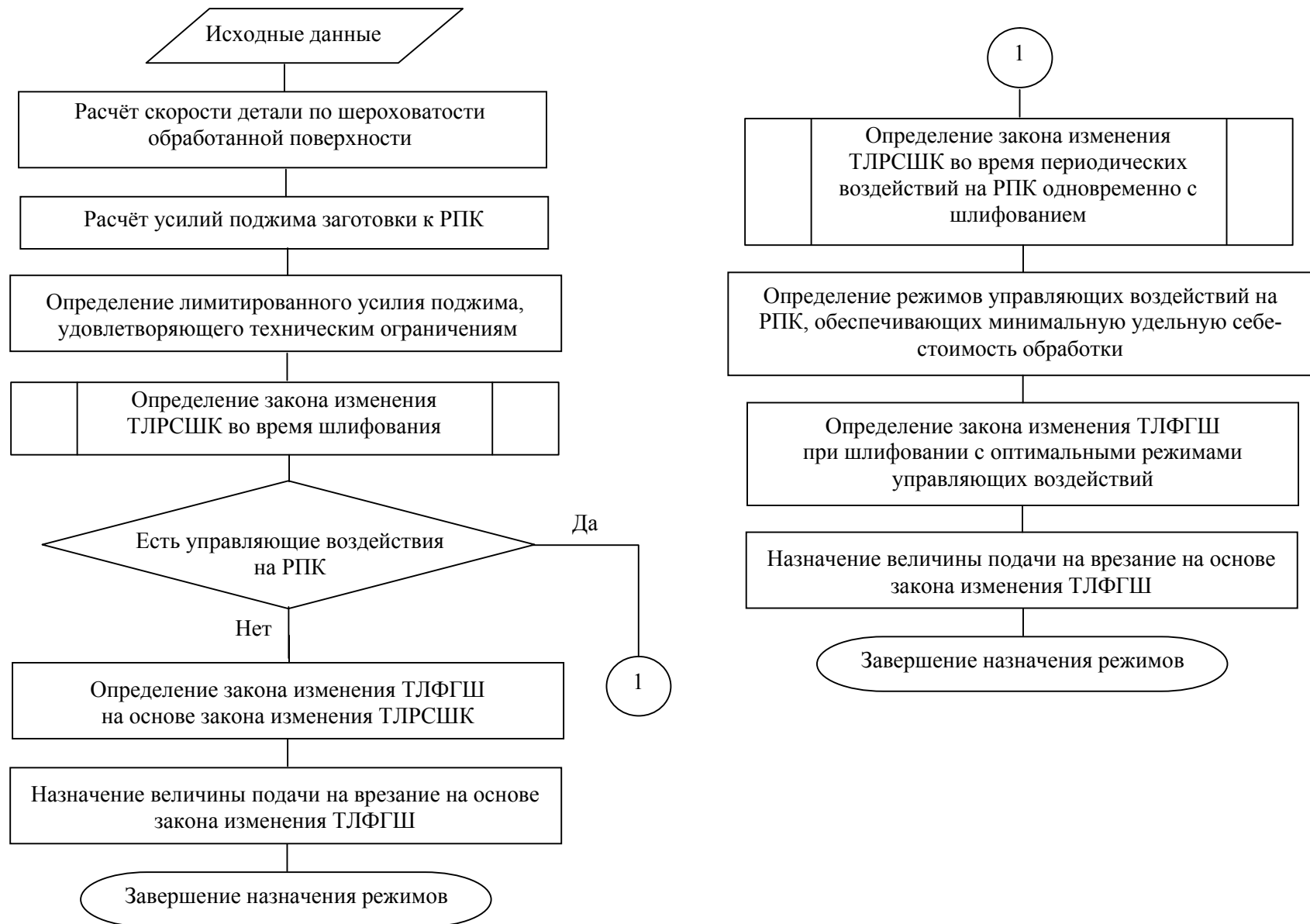


Рисунок 3.10 – Последовательность поиска режимов шлифования с учётом нестационарности процесса

2. При расчете технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и инструментом, необходимо использовать параметры РПК, сформированные в процессе правки.

3. Определение сопротивления деформации при обработке средне- и высоколегированных сталей может быть выполнено с использованием термомеханических коэффициентов путём введения поправок, учитывающих температурно-скоростные условия деформации при алмазно-абразивной обработке.

4. Текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга представляет собой интегральное техническое ограничение на режим шлифования, при использовании которого обеспечиваются требуемые показатели качества обработанной поверхности и достигается максимальная или близкая к максимальной (рациональная) производительность обработки.

5. Область возможных режимов шлифования как нестационарного процесса представляет собой трехмерное пространство, ограниченное плоскостями, проходящими параллельно координатным плоскостям в системе координат «фактическая глубина шлифования $t_{\phi}(P_n)$ – скорость заготовки v_{∂} – время обработки τ » через точки $v_{\partial \min}$, $v_{\partial \max}$, $t_{\phi \min}(P_{n \min})$, а также семейством кривых, описывающих изменение ТЛФГШ в соответствующих точках диапазона $v_{\partial \min} - v_{\partial \max}$, в которых значение скорости заготовки v_{∂} обеспечивает требуемый параметр шероховатости обработанной поверхности R_a . В направлении оси τ область возможных режимов ограничена плоскостью, положение которой зависит от длительности эксперимента при определении закона изменения ТЛРСШК во время обработки.

6. Предлагаемый алгоритм поиска режимов шлифования с учетом нестационарности процесса позволяет обеспечить близкую к максимальной производительность шлифования по жесткой схеме с фиксированными режимами и близкую к минимальной удельную себестоимость обработки при шлифовании по жесткой схеме с управляющими электроэрозионными воздействиями на РПК.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ,
НАЛАГАЕМЫХ НА РЕЖИМ ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЕМ
И ШЛИФОВАЛЬНЫМ КРУГОМ

4.1 Расчет скорости детали, ограниченной параметрами шероховатости
обработанной поверхности

Параметры шероховатости обработанной поверхности являются одним из показателей качества обработки, которые в значительной мере определяют эксплуатационные свойства деталей. Кроме того, параметры шероховатости на поверхности резания, изменяя толщину среза, влияют на силы на единичном зерне и условия образования стружки, изменяя значение коэффициента резания, представляющего собой отношение толщины среза к радиусу округления режущего выступа зерна.

Расчеты и исследования параметров шероховатости при алмазно-абразивной обработке и их влияние на эксплуатационные свойства машин были выполнены в работах Редько С.Г. и Королева А.В. [129, 130, 131, 132], Ящерицына П.И. [133], Маталина А.А. [134], Аврутина Ю.Д. [135, 136], Новоселова Ю.К. [137, 138], Матюхи П.Г. [86, 139, 140] и др. [109, 141, 142].

При расчете скорости детали, ограниченной параметрами шероховатости шлифованной поверхности, выбор базовой методики расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности, осуществим с учетом того, что она должна обеспечивать:

- а) расчет параметров РПК с использованием паспортных характеристик алмазноносного слоя;
- б) расчет высотных параметров шероховатости обработанной поверхности;
- б) расчет режимов шлифования по заданным высотным параметрам шероховатости обработанной поверхности;
- в) расчет высотных параметров шероховатости на поверхности резания.

Анализ методик расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности, приведенных в работах перечисленных выше авторов, позволяют заключить, что все они базируются на допущении, что формирование параметров шероховатости обработанной поверхности происходит за счет копирования геометрии режущих элементов, и выполнены, кроме работ [86, 139, 140], для случая чистового или тонкого шлифования абразивными кругами. Вместе с тем, они отличаются способом описания режущего рельефа шлифовального круга, а также учетом изменения рельефа круга во время обработки.

Так, в работах [86, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 137, 138, 139, 140, 141, 142] рельеф шлифовального круга описывается отдельными элементами, геометрические параметры которых при шлифовании абразивным кругом зависят от способа правки, а при шлифовании алмазным кругом на металлической связке, подвергнутым электроэрозионной правке, определяются размером, геометрическими параметрами алмазных зерен и законом распределения разновысотности вершин зерен. Неровности обработанной поверхности рассматриваются как копии неровностей режущего контура, который образуется путем проецирования на одну плоскость, перпендикулярную вектору скорости круга, зерен, находящихся на поверхности круга, длина которой равна длине дуги контакта круга с заготовкой. Определив количество зерен, оставивших след в рассматриваемом сечении заготовки при его выходе из зоны контакта заготовки с кругом, и считая, что следы этих зерен не перекрываются, а смещены относительно друг друга равномерно, с учетом формы поперечного сечения зерна, находят высоту неровностей профиля R_z . Изменение параметров рельефа круга во время обработки не учитывается.

В работах [109, 135, 136, 143] рельеф шлифовального круга описывается характеристиками элементарных режущих профилей (ЭРП) или приведенных режущих профилей (ПРП), найденных экспериментально по результатам профилографирования РПК вдоль оси круга. Образованный на детали профиль шероховатости считают отображением некоторого условного профиля круга (эффективного режущего профиля), который является огибающей всех наложенных ЭРП или ПРП, расположенных на дуге контакта круга с деталью. С учетом кинематики

процесса ПРП [135, 136] или ЭРП [109, 143] связываются с высотой эффективного режущего профиля, статистические характеристики которого считаются идентичными характеристикам профиля шероховатости шлифованной поверхности.

В работах [137, 138] процесс формообразования шлифованной поверхности при чистовом и тонком шлифовании абразивными кругами рассматривается не только в пространстве, но и во времени. В этом случае процесс шлифования представляется как динамическая нестационарная система, состояние которой изменяется за период обработки одной поверхности, стойкости инструмента и т.п.

При анализе процессов формообразования поверхности используются следующие допущения:

1. Рабочий слой абразивно-алмазного инструмента рассматривается однородным и изотропным.

2. Исходная поверхность шлифовального инструмента после правки может быть определена как нормальная стационарная эргодичная случайная функция или последовательность.

3. Износ режущих кромок на зёрнах происходит за счет истирания и образования на их гранях контактных износных площадок.

4. Форма режущих зёрен, их количество и распределение не изменяется за пределами зоны контакта заготовки с РПК.

Основываясь на принятых допущениях, в работе [138] получены расчетные зависимости, позволяющие рассчитать вероятность удаления материала, форму, число, плотность распределения единичных рисков. Это позволило аналитически определить все наиболее важные параметры шероховатости поверхности: относительную опорную длину профиля η , среднее арифметическое отклонение профиля R_a , наибольшую высоту неровностей R_{\max} и высоту неровностей профиля по десяти точкам R_z , средний шаг неровностей профиля в пределах базовой длины S .

В полной мере решению задачи определения скорости детали по заданным параметрам шероховатости удовлетворяет методика расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности при шлифовании алмазным кругом, заправ-

ленным электроэрозионным способом, изложенная в работе [139]. Учитывая это, остановимся более подробно на сути этой методики.

Исходными данными при расчете параметров шероховатости являются:

1) параметры рабочей поверхности круга – средневзвешенный кубический диаметр шаровой модели зерна $d_{ш}$, мм; угол при вершине режущего выступа ε , град; радиус округления режущей кромки зерна ρ , мм; параметры распределения разновысотности вершин по закону Вейбулла $F(t_{\phi})$;

2) режимы обработки – скорость круга $V_{к}$, м/с; скорость детали $V_{д}$, м/мин; фактическая глубина шлифования t_{ϕ} , мм;

3) геометрические размеры круга – радиус $R_{к}$, мм;

4) величина интервала расчета – ΔR , мкм.

Учитывая, что электроэрозионная правка оказывает влияние только на параметры разновысотности $F(t_{\phi})$ и не оказывает влияния на геометрические параметры зерна, которые рассчитываются по корреляционным зависимостям, отражающим влияние зернистости на средний кубический диаметр шаровой модели зерна, угол при вершине ε модели режущего выступа в форме конуса с округленной вершиной радиусом ρ , параметры РПК описываются с использованием паспортных характеристик алмазоносного слоя.

Расчет высотных параметров шероховатости выполнен при следующих допущениях:

1) поперечный профиль шлифованной поверхности является совокупностью следов отдельных зерен, расположенных на участке рабочей поверхности круга, оставленных в рассматриваемом поперечном сечении после его прохождения через зону контакта;

2) при $t_{\phi} > R_{\max}$ шероховатость обработанной поверхности формируется за один проход;

3) выступы неровностей шлифованной поверхности расположены на одной линии, так как формирование неровностей происходит в сплошном материале идеальной геометрической формы;

4) поперечное перекрытие срезов происходит при условии

$$\sum_i^{z_c} b'_i = B \cdot 10^3, \quad (4.1)$$

где z_c – количество зерен, участвующих в формировании поперечного профиля обработанной поверхности;

b'_i – ширина среза единичным зерном, мкм;

B – ширина шлифования, мм.

Так как $t_\phi > R_{\max}$, шероховатость обработанной поверхности в сечении AD (рис. 4.1) при его прохождении через зону контакта будет формироваться сегментообразными срезами. Чтобы учесть зависимость глубины царапины, оставленной зерном в сечении AD не только от разновысотного положения вершины зерна на РПК, но и от взаимного расположения сечения AD и этой вершины на дуге контакта круга с деталью, наибольшая высота неровностей профиля R_{\max} разбивается на ряд малых интервалов ΔR . Рабочая поверхность круга, участвующего в формировании неровностей в поперечном сечении, также разбивается на ряд слоев толщиной ΔR и определяются участки слоев поверхности круга, зерна которых оставят следы в соответствующих интервалах сечения детали.

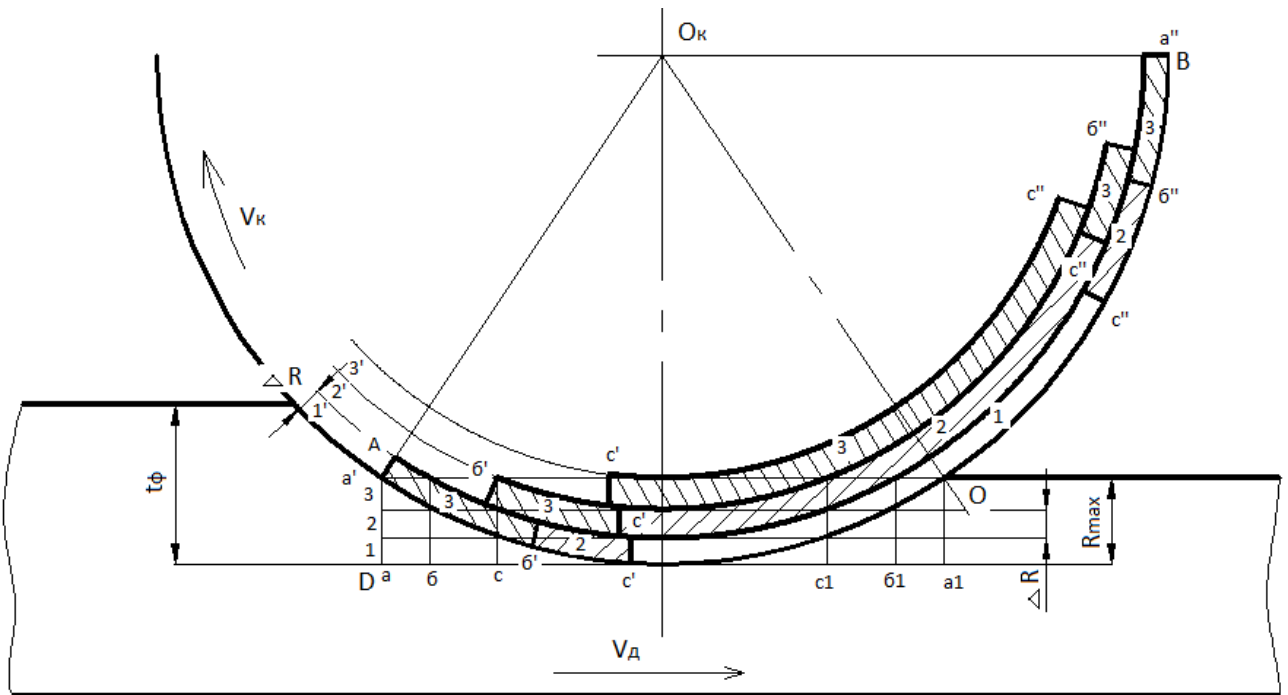


Рисунок 4.1 – Схема контактирования шлифовального круга со шлифуемой поверхностью при плоском врезном шлифовании [139]

На рис. 4.1 приняты следующие обозначения:

1, 2, 3 – нумерация интервалов в сечении AD и слоев на поверхности РПК, обрабатывающих соответствующие интервалы;

a, b, c и c_1, b_1, a_1 – обозначение характерных положений сечения AD после прохождения интервалов ΔR ;

a', b', c' и c'', b'', a'' – границы РПК, обрабатывающие интервалы сечения AD в его характерных положениях.

Сущность расчета высотного параметра R_z по данным о режимах V_k, V_d, t_ϕ и значениям параметров РПК сводится к последовательной проверке по формуле (4.1) интервалов ΔR , на которые разбита фактическая глубина шлифования (рис. 4.2), на заполнение базового участка шлифуемой поверхности срезами. Суммарная ширина среза в случае их перекрытия должна удовлетворять неравенству

$$\frac{120 \cdot V_k \sqrt{2R_k \Delta R \cdot 10^{-3}}}{V_d S_{3n}^2} \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^i (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - 1}) \cdot b'[(N - i - N_1 + 2) \cdot \Delta R] \geq 10^3, (4.2)$$

где S_{3n} – расстояние между зернами на РПК, мм;

N – номер интервала, на котором произошло перекрытие срезов;

i – номер интервалов, входящих в N ; $i=1, 2, \dots, N$;

N_1 – участок поверхности круга, обрабатывающий i -е интервалы, N_1 изменяется внутри i от 1 до $N - i + 1$;

$F(i\Delta R)$ – вероятность попадания вершин зерен в i -й интервал;

$b'(i\Delta R)$ – ширина среза на i -м интервале, мкм.

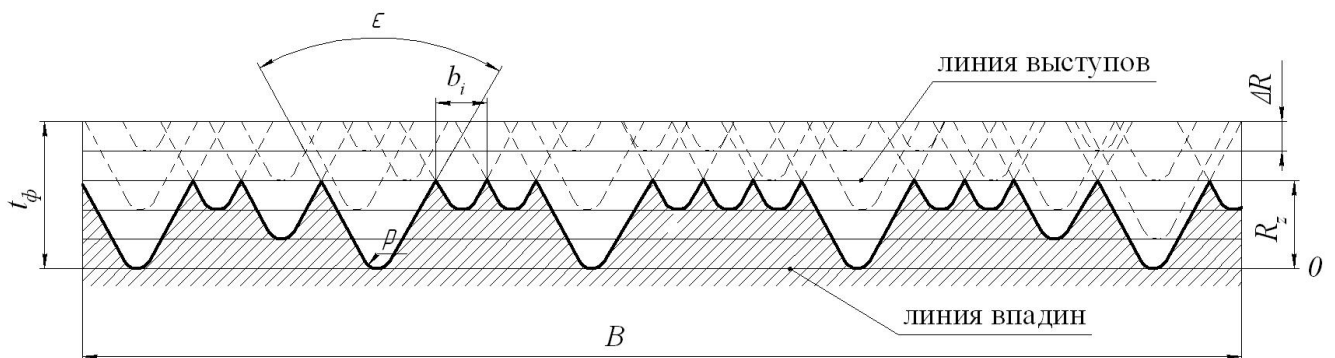


Рисунок 4.2 – Схема формирования неровностей на обработанной поверхности единичными срезами при $t_\phi > R_{\max}$ [139]

Расстояние между зернами на поверхности круга определяется по формуле

$$S_{zn} = \frac{K_1}{\sqrt[3]{0,044KN_z}}, \text{ мм},$$

где K – относительная концентрация алмазов, %;

N_z – среднее количество зерен в одном карате, шт;

K_1 – коэффициент, учитывающий критическую величину закрепления зерна в связке алмазоносного слоя.

Вероятность попадания вершины в i -й интервал рассчитывается по зависимости

$$F(i\Delta R) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\Delta R^m}{x_0}\right) & \text{при } i = 1 \\ \exp\left(-\frac{[(i-1)\Delta R]^m}{x_0}\right) - \exp\left(-\frac{(i\Delta R)^m}{x_0}\right) & \text{при } i > 1, \end{cases}$$

а ширина единичного среза – по формулам

$$b'[(N-i-N_1+2)\Delta R] = \begin{cases} 2\sqrt{2\rho[(N-i-N_1+2)\Delta R] - [(N-i-N_1+2)\Delta R]^2} & \text{при} \\ (N-i-N_1+2)\Delta R < a'_z; \\ 2\left[\sqrt{2\rho a'_z - a'^2_z} + [(N-i-N_1+2)\Delta R - a'_z] \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2}\right] & \text{при} \\ (N-i-N_1+2)\Delta R \geq a', \end{cases}$$

где a'_z – глубина сечения, соответствующая сегментообразному участку профиля, мкм;

$$a'_z = \rho(1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}),$$

где ε – угол профиля трапецеидального участка модели режущей части зерна, град;

ρ – радиус округления модели режущей части зерна, мкм.

Проверка начинается с одного интервала и заканчивается на интервале N , на котором произошло поперечное перекрытие срезов.

В этом случае $R_z = N\Delta R$, а с учетом соотношения $R_z = 4R_a$,

$$R_a = \frac{N\Delta R}{4}. \quad (4.3)$$

При расчете отношения $60V_{\kappa}/V_{\partial}$ номер слоя N , на котором должно произойти полное заполнение базового участка срезами, определяется по среднему арифметическому отклонению профиля R_a по следующей формуле (см. рис. 4.2):

$$N = \frac{4R_a}{\Delta R}. \quad (4.4)$$

Решая формулу (4.2) относительно скорости детали, получим расчетную зависимость для определения скорости детали, которая обеспечивает заданный параметр R_a при плоском врезном шлифовании

$$V_{\partial} = \frac{120V_{\kappa} \sqrt{2R_{\kappa} \Delta R \cdot 10^{-3}} \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^i (\sqrt{N_1} - \sqrt{N_1 - 1}) b'[(N - i - N_1 + 2)\Delta R]}{S_{\text{зн}}^2 \cdot 10^3}. \quad (4.5)$$

Формула (4.5) получена в предположении, что параметры шероховатости шлифованной поверхности формируются за счет геометрического фактора. Влияние пластических деформаций, наростообразования, а также хрупкого разрушения будем учитывать с помощью поправочного коэффициента K_m [144], который представляет собой отношение параметра $R_{a \text{ обр}}$, сформированного при обработке с учетом влияния перечисленных выше явлений, к параметру R_a , рассчитанному по формуле (4.3), т.е

$$K_m = \frac{R_{a \text{ обр}}}{R_a}. \quad (4.6)$$

Тогда в формулу для расчета количества интервалов N , необходимого при определении скорости детали, ограниченной параметром шероховатости, внесем поправку (4.6). Соответственно, формула (4.4) примет вид

$$N = \frac{4R_a}{\Delta R \cdot K_m}. \quad (4.7)$$

Описанная последовательность, используемая при расчете параметров шероховатости по методике, изложенной в работе [139], позволяет рассчитывать параметры шероховатости обработанной поверхности и поверхности резания при шлифовании с глубиной $t_{\phi} > R_{\text{max}}$.

4.2 Определение усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного температурой фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемого материала

Определение усилия поджима заготовки к РПК, ограниченной температурой фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки $T_{кр}$ при шлифования по упругой схеме с постоянной радиальной силой поджима заготовки к шлифовальному кругу P_n [112] выполним, используя те же исходные данные, которые необходимы для расчета высоты микронеровностей шлифованной поверхности (подраздел 4.1), дополненные физико-механическими и теплофизическими свойствами обрабатываемого материала в температурно-скоростных условиях, характерных для шлифования.

При расчете силы поджима заготовки к шлифовальному кругу P_n , которая должна уравнивать радиальную составляющую силы резания P_y , воспользуемся следующими допущениями:

1) влияние режимов обработки на силы резания при шлифовании с фиксированными режимами и шлифовании с постоянной радиальной силой поджима заготовки к шлифовальному кругу идентично, если их кинематика одинакова;

2) процесс теплообмена в зоне резания стационарный.

С учётом приведенных допущений определим предельное допустимое значение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу P_n .

Известно [145], что максимальная температура поверхности резания связана со значением тангенциальной составляющей силы резания P_z соотношением

$$T = \frac{4a \cdot 60V_k \sqrt{H} \cdot P_z}{\lambda V_\partial S \sqrt{\pi}}, \quad (4.8)$$

а радиальная составляющая силы P_y может быть выражена через тангенциальную с помощью коэффициента шлифования $K_{ш}$:

$$P_z = P_y \cdot K_{ш}. \quad (4.9)$$

Для определения составляющих силы резания при шлифовании с постоянным усилием поджима образца к РПК воспользуемся известными формулами (1.16), (1.17) для схемы обработки с фиксированными режимами.

В работе [60] эти формулы были трансформированы для произвольной формы зоны контакта задней поверхности зерна из СТМ с заготовкой:

$$P_z = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \cos \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \mu \right) z_p C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \cos \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \mu \right) z_p \alpha \frac{4a \cdot 60V_\kappa \sqrt{H} \alpha_\epsilon}{\lambda V_\delta S \sqrt{\pi}}}; \quad (4.10)$$

$$P_y = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \right) z_p \left(C - \alpha \frac{4a \cdot 60V_\kappa \sqrt{H} \alpha_\epsilon}{\lambda V_\delta S \sqrt{\pi}} P_z \right), \quad (4.11)$$

где f_3 – площадь зоны контакта задней поверхности зерна с заготовкой, мм².

В принятой модели зерна с прямоугольной площадкой контакта $f_3 = b \cdot l_z$.

Подставив формулу (4.10) в (4.11), а затем в (4.8), получим формулу для определения максимальной температуры на обработанной поверхности, которая имеет следующий вид:

$$T = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \right) z_p C \frac{4a \cdot 60V_\kappa \sqrt{H} \alpha_\epsilon}{\lambda V_\delta \sqrt{\pi}} K_{\text{ш}}}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M f_3 \right) z_p \alpha \frac{4a \cdot 60V_\kappa \sqrt{H} \alpha_\epsilon}{\lambda V_\delta S \sqrt{\pi}} K_{\text{ш}}}. \quad (4.12)$$

Величины, входящие в формулу (4.12), рассчитываются по зависимостям и методикам, описанным в подразделе 1.5.

Толщина единичного запятообразного среза a_z , входящая в формулу (4.12), оценивается фактической толщиной среза, которая в соответствии с формулами (1.18), (1.19) и (1.20) зависит от максимальной высоты неровностей на поверхности резания R_{max} , которая рассчитывается по методике, описанной в подразделе

4.1, фактической глубины шлифования t_ϕ и фактического расстояния между двумя последовательно контактирующими зернами l_ϕ , которое, как видно из выражения (1.21), также зависит от фактической глубины шлифования.

Так как при упругой схеме обработки фактическая глубина шлифования является переменной величиной, то критическое значение температуры $T_{кр}$, выше которого происходят фазово-структурные изменения в поверхностном слое обрабатываемого материала, будет достигнуто при определённом значении фактической глубины шлифования t_ϕ . Для этого конкретного значения глубины шлифования необходимо рассчитать значение радиальной составляющей силы резания, которое и будет определять предельное значение параметра обработки P_n .

Аналитически уравнение (4.12) относительно фактической глубины шлифования решить невозможно, так как оно является трансцендентным, а величина t_ϕ входит в данное уравнение в неявном виде. Поэтому для решения уравнения (4.12) относительно фактической глубины шлифования по заданной критической температуре $T_{кр}$ представим условие, обеспечивающее отсутствие фазово-структурных превращений в материале поверхностного слоя заготовки при шлифовании, в виде неравенства

$$0,98T_{кр} < T < 1,00T_{кр}. \quad (4.13)$$

При расчете силы поджима образца к РПК при шлифовании с постоянным усилием поджима заготовки к рабочей поверхности круга неравенство (4.13) с учетом (4.12) решается относительно глубины шлифования t_ϕ на ПЭВМ пошаговым методом по разработанной нами программе, с использованием параметров РПК, сформированных во время правки. Найденное значение t_ϕ является максимально возможной исходной глубиной шлифования t_0 , обеспечивающей отсутствие дефектов на поверхности заготовки в начале обработки.

Используя t_0 , рассчитывается допустимое значение радиальной составляющей силы резания $[P_y]$ по формуле (4.9) либо по формуле, полученной подстановкой в (4.11) выражений (4.8) и (4.9), которая имеет вид:

$$P_{y \cdot \phi c} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + K_3 M l_3 \right) z_p b C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + K_3 M l_3 \right) z_p b \alpha \frac{4a \cdot 60 V_k \sqrt{H} \alpha_e}{\lambda V_d \sqrt{\pi}} K_{ш}}. \quad (4.14)$$

Значение радиальной силы $P_{y \cdot \phi c}$, должно поддерживаться постоянным посредством упругого поджима заготовки к РПК $P_{n \cdot \phi c}$ на протяжении всего времени обработки, что гарантирует отсутствие фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемого материала.

Формула (4.14) и неравенство (4.13) позволяет исследовать влияние времени шлифования на фактическую глубину шлифования и определить вклад процесса изнашивания в изменение режущих свойств шлифовального круга, что реализовано в работе [60].

4.3 Определение усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного температурой окисления алмазных зёрен

Исходные данные при расчете усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного температурой окисления алмазных зёрен, аналогичны приведенным в подразделе 4.2, но дополняются теплофизическими свойствами компонентов шлифовального круга.

Шлифование труднообрабатываемых материалов алмазными кругами сопровождается высокими температурами, возникающими на контактных поверхностях алмазных зёрен. При этом нужно учитывать, что нагревание алмаза в контакте с железом (или сплавом на основе железа) выше температуры 750-800°C приводит к физико-химическому взаимодействию его с железом – графитизации [146, 147]. П.Н. Киселева [148], рассматривая вопрос разрушения алмаза при шлифовании сталей, основной причиной разрушения алмазных зёрен в процессе обработки называла графитизацию и окисление.

Для определения усилия поджима заготовки к РПК по температуре окисления алмаза рассмотрим модель теплообмена между единичным зерном и обрабатываемой заготовкой, в которой примем следующие допущения:

- 1) механическая энергия резания алмазным зерном полностью превращается в тепловую;
- 2) модели алмазных зёрен имеют одинаковую геометрическую форму;
- 3) контакт связки алмазного круга с поверхностью заготовки отсутствует;
- 4) процесс теплообмена в зоне резания стационарный.

При шлифовании кругом, заправленным электроэрозионным способом, контакт связки алмазного круга с поверхностью заготовки отсутствует, поэтому теплообмен с инструментом осуществляется через площадку контакта зерна с обрабатываемой поверхностью. Учитывая это, в начале расчета определим максимальное значение тангенциальной составляющей силы резания на единичном алмазном зерне, при которой отсутствует его окисление.

Для этого рассмотрим процесс теплообразования на единичном алмазном зерне в процессе шлифования алмазным кругом.

При определении допустимой силы резания, воспользуемся методикой А.Н. Резникова [149] и работы [150], позволяющей определить температуру на контактной поверхности алмазных зерен, используя размерности в системе СИ.

Пусть нам известна средняя тангенциальная нагрузка P_z , приходящаяся на каждое зерно. Неравномерность распределения удельных сил на зернах на площадке контакта заготовки с кругом учтем с помощью коэффициента неравномерности δ .

За один рез единичное зерно совершает работу:

$$A = \delta \cdot P_z \cdot l, \text{ Дж}, \quad (4.15)$$

где l – длина дуги контакта по направлению движения зерна, м;

P_z – среднее значение тангенциальной составляющей силы резания на зерне, Н.

С учётом того, что механическая энергия резания A полностью превращается в тепловую, определим количество теплоты, выделившееся за один рез:

$$Q = A, \text{ Дж.} \quad (4.16)$$

Среднюю интенсивность теплообразования q получим, отнеся количество теплоты Q к средней площади зоны контакта зерна с заготовкой f_3 и времени одного реза τ .

$$q = \frac{Q}{f_3 \cdot \tau}, \text{ Вт/м}^2, \quad (4.17)$$

где f_3 – средняя площадь зоны контакта задней поверхности алмазного зерна с заготовкой, м^2 ;

τ – время одного реза алмазного зерна, с.

Время одного реза определим по длине дуги контакта l и скорости резания V_k :

$$\tau = \frac{l}{V_k}. \quad (4.18)$$

После подстановки в (4.17) значения Q из (4.16) и с учетом (4.18) получим:

$$q = \frac{\delta \cdot P_z \cdot V_k}{f_3}, \text{ Вт/м}^2. \quad (4.19)$$

При теплофизическом анализе взаимодействия алмазных зёрен с поверхностью обрабатываемой заготовки ограничимся рассмотрением зёрен наиболее вероятного размера, представив каждое из них в виде цилиндра (рис. 4.3) с диаметром основания d и высотой h . Высоту цилиндра h примем равной диаметру основания.

Геометрические параметры цилиндрической модели зерна определим, приравняв объем шаровой модели зерна $V_{ш}$ к объему цилиндрической модели того же зерна $V_{ц}$.

Объем шаровой модели зерна $V_{ш}$

$$V_{ш} = \frac{\pi d_{ш}^3}{6}, \text{ м}^3, \quad (4.20)$$

где $d_{ш}$ – диаметр шаровой модели зерна, м.

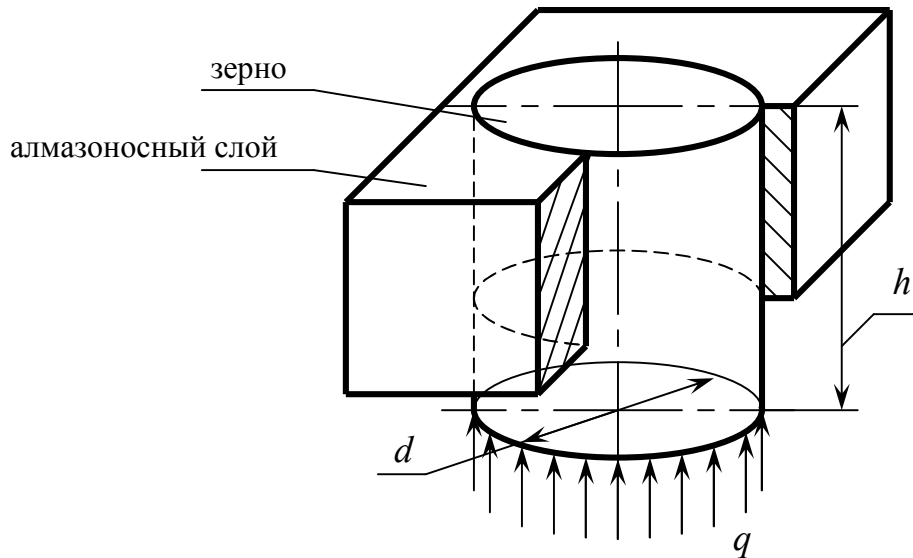


Рисунок 4.3 – Модель теплообмена между алмазным зерном и поверхностью резания

Диаметр шаровой модели зерна определяется по формуле:

$$d_{ш} = \frac{6090}{\sqrt[3]{N_z}}, \text{ м}, \quad (4.21)$$

где N_z – количество зерен в одном карате [151].

Объем цилиндрической модели зерна

$$V_{ц} = \frac{\pi d^2}{4} h, \text{ м}^3, \quad (4.22)$$

где d – диаметр основания цилиндрической модели зерна, м;

h – высота цилиндрической модели зерна, м.

Выразив из формулы (4.22) d , и с учетом равенства диаметра и высоты основания цилиндрической модели ($h = d$), получим:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{ц}}{\pi}}, \text{ м}. \quad (4.23)$$

Подставив в (4.23) значение $V_{ц}$, равное объему шаровой модели зерна $V_{ш}$ из (4.20), получим:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot d_{ш}^3}{6}}, \text{ м}. \quad (4.24)$$

Температура на зерне формируется вследствие подвода теплоты резания со стороны контактного торца и отвода части этой теплоты через поверхность соприкосновения зерна с массой алмазонасного слоя (см. рис. 4.3). Чтобы учесть нагрев зерна теплотой резания, применим формулу источника ПН2 (плоский источник интенсивностью q , Вт/м², на торце стержня ограниченной длины h , м, и произвольной формы сечения, действующий в течении времени τ , с). Тогда температура на торце зерна к концу реза в соответствии с [149]:

для рабочего торца зерна

$$T_1 = \frac{2 \cdot b^* \cdot q \cdot \sqrt{\omega_1 \tau}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot A_1, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (4.25)$$

для нерабочего

$$T_2 = \frac{2 \cdot b^* \cdot q \cdot \sqrt{\omega_1 \tau}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot A_2, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.26)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/(м·град);

ω_1 – коэффициент температуропроводности алмаза, м²/с;

b^* – доля теплоты в теле, по которому перемещается источник;

q – средняя интенсивность теплообразования, Вт/м²;

A_1 – безразмерная функция учитывающая температуру рабочего торца зерна;

A_2 – безразмерная функция учитывающая температуру нерабочего торца зерна.

Функции A_1, A_2 табулированы, а их значения приведены в работе [149].

Теплоотвод от зерна в массу круга учтем следующим образом. Цилиндр, погруженный в среду с коэффициентом теплопроводности λ_k и температурой T_k , отдает в эту среду количество теплоты в единицу времени:

$$Q_0 = \frac{(T_{cp} - T_k) \cdot 2\pi h \lambda_k}{\ln 4h/d}, \text{ Дж/с}, \quad (4.27)$$

где T_{cp} – средняя температура на поверхности цилиндра, °С;

T_k – средняя температура связки, °С;

λ_k – коэффициент теплопроводности связки, Вт/(м·град).

Полагая, что температура массы круга в процессе шлифования изменяется незначительно ($T_{\kappa} \approx 0$), получаем возможность рассчитать количество теплоты Q_0 , отданной зерном в круг, а затем снижение температуры зерна ΔT за один рез, возникающее как результат теплоотвода в массу круга:

$$\Delta T = \frac{Q_0 \cdot \tau}{c\rho_1 \cdot V_{\kappa}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.28)$$

где Q_0 – количество теплоты, отданной зерном в круг, Дж;

$c\rho_1$ – удельная теплоемкость алмаза, Дж/(м³·град).

Выразим удельную теплоемкость алмаза через коэффициент теплопроводности λ_1 и коэффициент температуропроводности ω_1 :

$$c\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\omega_1}, \text{ Дж/(м}^3\text{·град)}. \quad (4.29)$$

Подставив в (4.28) значение τ из (4.18), значение Q_0 из (4.27), значение V_{κ} из (4.22) и значение $c\rho_1$ из (4.29), после соответствующих преобразований получим:

$$\Delta T = \frac{8T_{cp} \cdot \lambda_{\kappa} \cdot \omega_1 \cdot l}{\ln 4h/d \cdot \lambda_1 \cdot d^2 \cdot V_{\kappa}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.30)$$

Для плоского шлифования периферией круга, длина дуги контакта единичного зерна с кругом

$$l = \sqrt{D_{\kappa} \cdot t}, \text{ м}, \quad (4.31)$$

где D_{κ} – диаметр круга, м;

t – глубина шлифования, м.

Введём в формулу (4.30) безразмерное время контакта зерна с кругом, представленное с помощью критерия Фурье F_0 , который для теплового процесса имеет вид:

$$F_0 = \frac{\omega_1 \cdot l}{V_{\kappa} \cdot d^2}. \quad (4.32)$$

С учетом (4.32) формула (4.30) для определения снижения температуры зерна за один рез, возникающего как результат отвода тепла в массу круга, будет иметь вид:

$$\Delta T = \frac{8T_{cp} \cdot \lambda_{\kappa} \cdot F_0}{\ln 4h/d \cdot \lambda_1}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.33)$$

В расчетную формулу (4.33) входит коэффициент теплопроводности алмазного слоя λ_{κ} . Для кругов на металлической связке значение коэффициента теплопроводности алмазного слоя определяется по формуле из [149]:

$$\lambda_{\kappa} = 0,41(\lambda_c + 0,098) \cdot K^{0,15}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}, \quad (4.34)$$

где K – относительная концентрация алмазов в %;

λ_c – коэффициент теплопроводности массы связки без алмазов, Вт/(м·град), рассчитываемый по формуле:

$$\lambda_c = \lambda_1^{p_1} \cdot \lambda_2^{p_2}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}. \quad (4.35)$$

В формуле (4.35) λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности компонентов алмазного слоя, p_1, p_2 – объемные концентрации каждой из составляющих компонентов алмазного слоя.

Объемные концентрации каждой из составляющих компонентов алмазного слоя определим через процентное отношение объемов:

$$p_{1,2} = \frac{W_{1,2}}{100W_a}, \quad (4.36)$$

где $W_{1,2}$ – объемы, занимаемые компонентами алмазного слоя, %;

W_a – объем, занимаемый алмазами, %.

В выражении (4.33) известны все величины, кроме T_{cp} . Примем в соответствии с данными работы [149], что

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2} - \Delta T, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.37)$$

где T_1 и T_2 – соответственно температуры торцов зерна, рассчитанные без учета теплоотвода в круг;

ΔT – снижение температуры, вызванное этим теплоотводом.

Тогда, подставив в выражение (4.33) значение T_{cp} из (4.37), значения T_1 и T_2 из (4.25) и (4.26) соответственно, получим снижение температуры зерна за один рез, возникающее как результат отвода тепла в массу круга ΔT :

$$\Delta T = \frac{8 \cdot \lambda_{\kappa} \cdot F_0}{\ln 4h/d \cdot \lambda_1} \cdot \frac{2b^* \cdot q \cdot \sqrt{\omega_1 \tau}}{\lambda_1 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(1 + \frac{8 \cdot \lambda_{\kappa} F_0}{\ln 4h/d \cdot \lambda_1}\right)} \cdot A_{cp}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.38)$$

где $A_{cp} = \frac{A_1 + A_2}{2}$ – функция, учитывающая среднюю температуру рабочего и нерабочего торцов зерна.

Для удобства расчета на ПЭВМ графики функций A_1 и A_{cp} были математически обработаны, в результате чего получены уравнения для определения выше-названных функций в зависимости от значения критерия Фурье:

При $Fo > 10$

$$A_1 = 0,977 + 0,718 \cdot Fo^{0,602},$$

$$A_{cp} = 1,041 \cdot Fo^{0,5};$$

при $Fo \leq 10$

$$A_1 = 1,033 + 0,576 \cdot Fo^{0,719},$$

$$A_{cp} = 1,075 \cdot Fo^{0,502},$$

где Fo – безразмерное время контакта зерна с кругом (критерий Фурье).

Применяя метод сравнения температур соприкасающихся тел, определим коэффициент b^* , учитывающий долю теплоты в теле, по которому перемещается источник.

$$b^* = \frac{1}{1 + 2,25 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_1} \cdot A^* \cdot \sqrt{F_0}}, \quad (4.39)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град).

Определим температуру рабочего торца алмазного зерна с учетом теплоотвода в массу круга:

$$T = T_1 - \Delta T = \frac{2b^* \cdot q \cdot \sqrt{\omega_1 \tau}}{\lambda_1 \sqrt{\pi}} A^*, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.40)$$

В формуле (4.40)

$$A^* = A_1 - \frac{8 \cdot \lambda_{\kappa} \cdot F_0}{\ln 4h/d\lambda_1} \cdot \frac{A_{cp}}{1 + \frac{8 \cdot \lambda_{\kappa} \cdot F_0}{\ln 4h/d\lambda_1}}. \quad (4.41)$$

Подставив в (4.40) выражения (4.39) и (4.41), получим формулу для расчета температуры на контактной поверхности зерна в форме цилиндра, у которого высота h равна диаметру основания d :

$$T = \frac{4,52}{\pi} \cdot \frac{A^*}{\lambda_1 + 2,25 \cdot \lambda \cdot A^* \cdot \sqrt{F_0}} \cdot \frac{P_z \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega_1 \cdot V_{\kappa} \cdot l}}{d^2}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.42)$$

Определим среднюю силу на единичном зерне, при которой окисление алмаза будет отсутствовать. Приняв допустимую температуру $T_{дон} = 0,95 \cdot T_{ок}$ и решив уравнение (4.42) относительно P_z , получим соответствующую зависимость для силы на единичном зерне

$$P_z = \frac{0,95 T_{ок} \cdot (\lambda_1 + 2,25 \cdot \lambda \cdot A^* \sqrt{F_0}) \cdot \pi \cdot d^2}{4,95 A^* \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega_1 V_{\kappa} l}}, \text{ Н}. \quad (4.43)$$

Сила резания на шлифовальном круге представляет собой сумму средних сил на отдельных режущих зернах, одновременно находящихся в контакте с поверхностью заготовки.

Количество режущих зерен на одном квадратном метре поверхности круга определим по формуле

$$n_p = \frac{1}{S_{3n}^2} \cdot F(a_z), \quad (4.44)$$

где a_z – толщина среза единичным зерном, мкм;

$F(a_z)$ – вероятность попадания вершин зерен в интервал величиной a_z .

Толщину среза a_z получим, просуммировав максимальную толщину запятообразного среза и среднюю высоту неровностей профиля на поверхности резания:

$$a_z = a_{z \max} + R_z \cdot K_{\mathcal{M}}, \text{ мкм}, \quad (4.45)$$

где R_z – высота неровностей профиля на поверхности резания, мкм, рассчитанная по 10 точкам;

K_m – коэффициент учитывающий влияние вида обрабатываемого материала на параметр шероховатости R_z .

Максимальная толщина среза определяется по формулам (1.19), (1.20).

Расстояние между двумя контактирующими зернами с учетом разновысотности и режимов шлифования [139]

$$l_\phi = S_{zp} \cdot k_1 \cdot k_c \cdot k_\delta, \quad (4.46)$$

где k_1 – среднее значение коэффициента, учитывающего закрепление зерна в связке на РПК, для данной марки алмаза;

k_c – коэффициент, учитывающий разновысотное положение зерен;

k_δ – кинематический коэффициент;

S_{zp} – расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, м.

Коэффициент, учитывающий разновысотное положение зерен,

$$k_c = \frac{1}{F(t_\phi)}, \quad (4.47)$$

где $F(t_\phi)$ – вероятность попадания вершин зерен в интервал, равный фактической глубине шлифования.

Для определения коэффициента k_c необходимо знать значение функции распределения Вейбулла $F(t_\phi)$, описывающей разновысотное расположение зерен на РПК относительно наиболее выступающего зерна.

Так как расстояние между зернами на рабочей поверхности шлифовального круга отличается от расстояния в сечении плоскостью за счет того, что поверхность круга имеет определенную высоту режущего профиля и часть зерен не будет удерживаться связкой, для расчета расстояния между зернами на поверхности круга вводим поправочный коэффициент k_1 , значения которого приведены в табл. 4.1 [19].

Таблица 4.1 – Значения коэффициента k_I для расчета расстояния между зернами на поверхности круга [19]

Марка алмазного шлифовального круга	Коэффициент, учитывающий закрепление зерна в связке k_{1i}	Среднее значение коэффициента $k_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{1i}$
АС6 250/200-4-М2-01	2,36	2,46
АС6 160/125-4-М2-01	2,45	
АС6 100/80-4-М2-01	2,59	

Если принять равномерное распределение зерен в объеме алмазоносного слоя, среднее расстояние между алмазными зернами в сечении плоскостью определится по формуле из работы [19]:

$$S_{zp} = \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4,4 \cdot K}{100} \cdot N_z}}, \text{ м.} \quad (4.48)$$

Влияние режимов обработки на среднее фактическое расстояние между контактирующими зернами учтем с помощью кинематического коэффициента k_δ :

$$k_\delta = \alpha + \beta \frac{60 \cdot V_\delta}{V_k}, \quad (4.49)$$

где α – свободный член регрессии;

β – коэффициент регрессии.

Тогда суммарная тангенциальная составляющая силы резания на шлифовальном круге P_{zk} определится по формуле

$$P_{zk} = P_z \cdot n_p \cdot B \cdot l, \text{ Н.} \quad (4.50)$$

Подставив в формулу (4.50) значение P_z из (4.43), получим значение тангенциальной составляющей силы резания P_{zk} на шлифовальном круге, ограниченную температурой окисления алмазных зёрен:

$$P_{зк\text{ок}} = \frac{0,95 \cdot T_{ок} \cdot (\lambda_1 + 2,25 \cdot \lambda \cdot A^* \cdot \sqrt{F_0}) \cdot \pi \cdot n_p \cdot d^2 \cdot \sqrt{l} \cdot b}{4,52 \cdot A^* \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega_1 \cdot V_k}}, \text{Н.} \quad (4.51)$$

Радиальную составляющую силы резания $P_{ук\text{ок}}$ определим по значению тангенциальной составляющей, рассчитанной по формуле (4.51) с помощью коэффициента шлифования $K_{ш}$

$$P_{ук\text{ок}} = P_{зк} / K_{ш}, \text{Н.} \quad (4.52)$$

Полученное из выражения (4.52) значение радиальной силы $P_{ук\text{ок}}$ является значением режимного параметра обработки с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК $P_{н\text{ок}}$, который ограничен температурой окисления алмазных зёрен шлифовального круга.

4.4 Определение усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного механической прочностью алмазных зёрен

Усилие поджима заготовки к РПК, ограниченное механической прочностью алмазных зерен, рассчитаем на основе методик, приведенных в работах [152, 153]. Это усилие определяется значением силы на единичном зерне, при которой происходит его разрушение:

$$P_k = P_{разр} \cdot z_{разр}, \quad (4.53)$$

где $P_{разр}$ – разрушающая сила на единичном зерне, Н;

$z_{разр}$ – количество зерен, находящихся в слое РПК такой толщины, что вероятность их разрушения на заданных режимах составляет не менее 0,95, шт.

Разрушающую силу на единичном зерне $P_{разр}$ примем равной динамической прочности алмазного зерна, приведенной в работе [61].

Учитывая, что динамическая прочность зерна в работе [61] определялась экспериментально только для зернистости 250/200 алмаза марки АС6 при шлифовании твердого сплава, динамическую прочность для других зернистостей определим, воспользовавшись параметрами моделей режущей части зерна для этих зернистостей, а также приняв следующие допущения:

- 1) физико-механические свойства зёрен различной зернистости идентичны;
- 2) давление обрабатываемого материала равномерно распределено на поверхности контакта единичного зерна с заготовкой;
- 3) разрушение зерна происходит при возникновении разрушающего давления обрабатываемого материала на поверхности контакта зерна с заготовкой;
- 4) разрушающее давление на поверхности контакта зерна с заготовкой для зёрен различных зернистостей формируется при одинаковых значениях переднего угла γ на режущей части зерна;
- 5) определение разрушающих нагрузок на зернах других зернистостей производится при идентичных режимах шлифования.

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного алмазного зерна с заготовкой найдем как частное от деления разрушающей силы на зерне на площадь поверхности контакта режущей части единичного зерна с обрабатываемым материалом

$$[p] = \frac{P_{разр}}{S_{нк1}}, \quad (4.54)$$

где $S_{нк1}$ – площадь поверхности контакта режущей части единичного зерна с обрабатываемым материалом, мм^2 .

Для определения площади поверхности контакта режущей части зерна с обрабатываемым материалом используем модель режущей части алмазного зерна в виде трапецеидальной призмы [154]. При этом величина $S_{нк1}$ определится как сумма площадей двух прямоугольных поверхностей (рис. 4.4):

$$S_{нк1} = b \cdot l_3 + b \cdot a_z \cdot \sin \gamma. \quad (4.55)$$

В соответствии с принятыми допущениями для определения разрушающего давления необходимо определить условие, когда резание единичными зёрнами различных зернистостей выполняется с одинаковым передним углом.

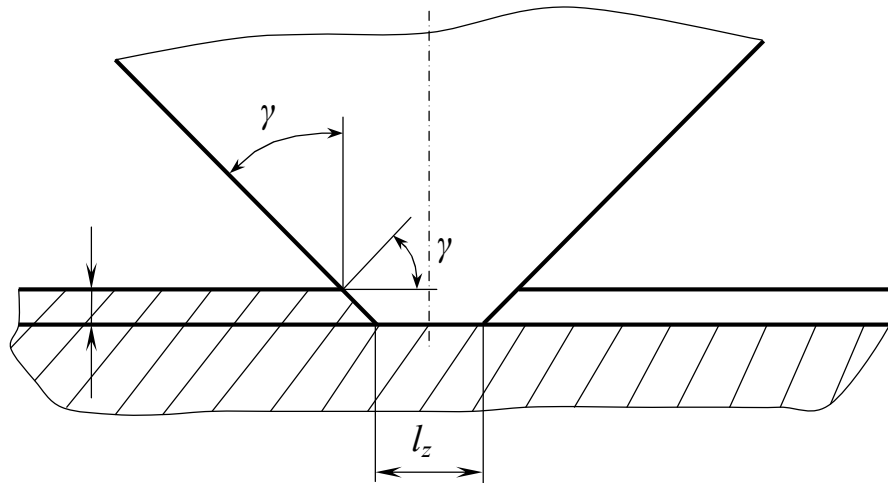


Рисунок 4.4 – Схема для определения площади контакта модели режущей части зерна с обрабатываемым материалом

Так как из-за сложной геометрической формы зёрен величина переднего угла является в общем случае переменной, то для формулирования указанного условия воспользуемся сферической моделью режущей части зерна (рис. 4.5).

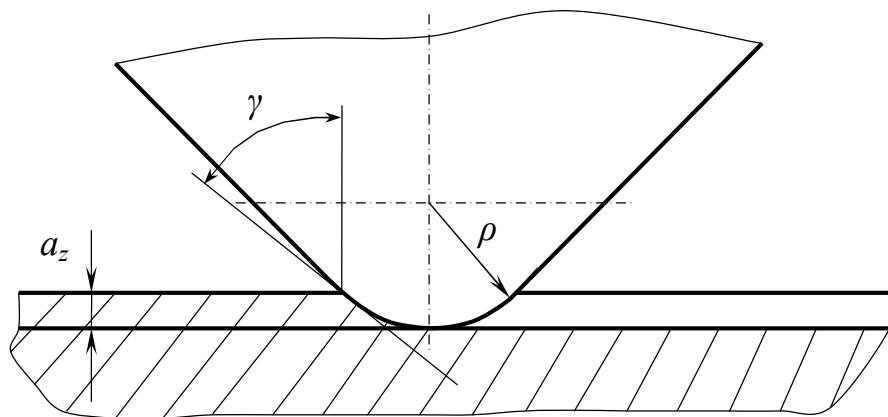


Рисунок 4.5 – Схема для определения переднего угла на сферической модели режущей части зерна при заданной толщине среза

Передний угол для сферической модели режущей части зерна определяется по следующей зависимости

$$\gamma = \arcsin\left(1 - \frac{a_z}{\rho}\right). \quad (4.56)$$

Из выражения (4.56) следует, что передний угол будет одинаковым, если отношение $\frac{a_z}{\rho} = const$. Соответственно, поскольку разрушение зерен происходит при достижении предельной толщины среза $a_z = a_{z np}$ [61], то и в этом случае при одинаковых передних углах на зёрнах различных зернистостей отношение $\frac{a_{z np}}{\rho}$ также должно быть постоянным. Тогда предельная толщина среза для алмазного зерна любой зернистости может быть найдена из соотношения:

$$\frac{a_{z np0}}{\rho_0} = \frac{a_{z np}}{\rho}, \quad (4.57)$$

где $a_{z np0}$ – предельная толщина среза для алмазных зёрен зернистости 250/200, мкм;

ρ_0 – радиус округления сферических режущих выступов алмазных зёрен зернистости 250/200, мкм;

ρ – радиус округления сферических режущих выступов алмазных зёрен заданной зернистости, мкм.

Таким образом, определив по равенству (4.54) разрушающее давление на поверхности контакта единичного алмазного зерна зернистости 250/200 с заготовкой, на основе приведенных рассуждений и принятых допущений можно рассчитать разрушающую силу на единичном зерне любой зернистости. Выражение для разрушающей силы на зерне как функции разрушающего давления и геометрических параметров среза получим из равенства (4.54) с учетом (4.55):

$$P_{разр} = [p] \cdot (b \cdot l_z + b \cdot a_{z np} \cdot \sin \gamma). \quad (4.58)$$

Для определения количества зерен, которые разрушаются при шлифовании заготовки на поверхностном слое РПК, рассмотрим схему припуска на поверхности резания, подлежащего удалению (рис. 4.6), который формируется следующим образом. Линия $A-A$ формируется срезами запятообразной формы в сплошном материале с максимальной толщиной среза $a_{z max}$ зёрнами, наиболее выступающими из связки, причём эти зёрна взяты за начало отсчета при определении закона распределения разновысотности зёрен (линия $O-O$). Линия $B-B$ ограничивает толщину

ну единичных срезов $a_{z np}$, превышение которой приводит к разрушению алмазного зерна. Линия $C-C$, соответствующая фактической глубине резания, получена путем заполнения впадин на поверхности резания вершинами неровностей на ней, а расстояние между линиями $C-C$ и $B-B$ равно половине значения высотного параметра шероховатости R_z на поверхности резания.

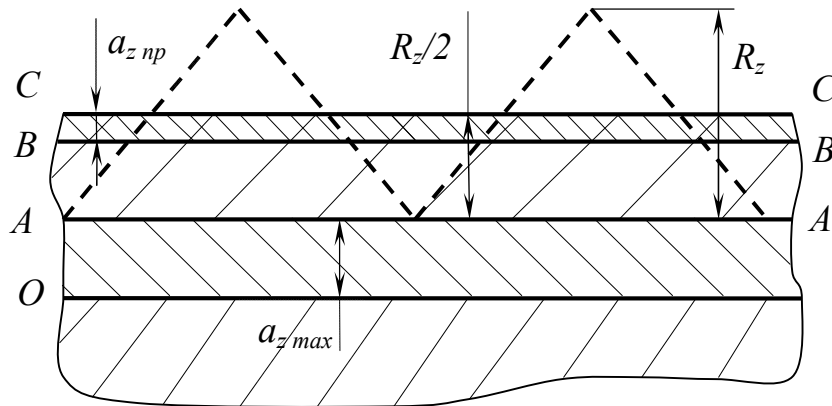


Рисунок 4.6 – Схема для определения толщин слоев обрабатываемого материала на поверхности резания, подлежащих удалению

Таким образом, вероятное количество зёрен, удаляющих срезы толщиной $a_{z max} + R_z/2$, определится значением функции распределения Вейбулла $F(a_{z max} + R_z/2)$, а вероятное количество зёрен, удаляющих срезы, при которых произойдёт разрушение зёрен, – значением $F(a_{z max} + R_z/2 - a_{z np})$.

Тогда количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, определится по формуле

$$z_{разр} = \frac{S}{S_{zn}^2} F\left(a_{z max} + \frac{R_z}{2} - a_{z np}\right). \quad (4.59)$$

где S – площадь зоны контакта заготовки со шлифовальным кругом, мм^2 ;

$$S = L \cdot B.$$

Подставив выражения (4.58) и (4.59) в формулу (4.53), получим предельное суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен:

$$P_{к р} = \frac{[p]S}{S_{3n}^2} (b \cdot l_3 + b \cdot a_{znp} \sin \gamma) F \left(a_{z \max} + \frac{R_z}{2} - a_{z np} \right). \quad (4.60)$$

Допустимую радиальную составляющую силы резания при шлифовании найдем по предельной суммарной результирующей силе $P_{кр}$, ограниченной прочностью алмазных зерен, и коэффициенту шлифования по следующей формуле:

$$P_{ук р} = \frac{P_{к р}}{\sqrt{1 + K_{и}^2}}. \quad (4.61)$$

Полученное из формулы (4.61) значение радиальной силы $P_{ук р}$ является значением режимного параметра обработки с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК $P_{н р}$, который определен из условия обеспечения механической прочности алмазных зёрен шлифовального круга.

4.5 Определение обобщенных режимов шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к рабочей поверхности круга

Усилие поджима заготовки к РПК при шлифовании, удовлетворяющее рассмотренным выше техническим ограничениям, налагаемым на режим резания температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое обработанной поверхности, температурой окисления алмазов и прочностью зёрен, является лимитирующим $P_{н \text{ лим}}$. Перечисленным требованиям удовлетворяет наименьшее значение из трёх рассмотренных ранее усилий поджима: $P_{н фс}$, $P_{н ок}$, $P_{н р}$, которые для трёх исследуемых групп труднообрабатываемых материалов определяются по исходным данным, приведенным в Приложении 1.

С учетом технического ограничения, налагаемого на режим резания требованиями к шероховатости обработанной поверхности, обобщенными режимами шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК будут скорость детали V_d (для плоского шлифования – скорость стола) и усилие поджима $P_{н \text{ лим}}$ [155]. С использованием указанных обобщенных режимов необходимо проводить эксперимент по определению закона изменения ТЛРСШК во время шлифования без электроэрозионных воздействий на РПК и при наличии таких воздействий.

Это обусловлено тем, что для схемы обработки с фиксированными режимами передаточной функцией, позволяющей обеспечить одинаковые условия работы зёрен, является закономерность изменения текущей лимитированной фактической глубины шлифования, полученная экспериментально на кинематически аналогичной схеме шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК, и отражающая непрерывное изменение режущей способности РПК в процессе обработки [155].

4.6 Выводы

1. При расчете скорости детали V_d , ограниченной высотным параметром шероховатости обработанной поверхности, на основе геометрической модели формирования неровностей, когда профиль риски является копией профиля режущей части зерна, влияние пластических деформаций, наростообразования, а также хрупкого разрушения на параметры шероховатости учитывается корректировкой количества интервалов расчета в геометрической модели с помощью поправочного коэффициента K_m .

2. Лимитирующим усилием поджима заготовки к РПК $P_{n \text{ лим}}$ при шлифовании с фиксированным усилием поджима, является наименьшее из усилий, найденных из условий, исключающих фазово-структурные превращения в поверхностном слое обработанной поверхности $P_{n \text{ фс}}$, окисление алмазов $P_{n \text{ ок}}$ и механическое разрушение алмазных зёрен $P_{n \text{ р}}$.

3. Обобщенными режимами резания при экспериментальном определении закона изменения ТЛРСШК во время шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК будут скорость детали V_d и усилие поджима $P_{n \text{ лим}}$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

5.1 Выбор способа управления характеристиками инструмента в технологической системе шлифования кругами из сверхтвердых материалов

Главной задачей управления технологической системой механической обработки является обеспечение невыхода значений управляемых параметров процесса за пределы допустимой области в пространстве состояний. Пространство состояний в процессе функционирования технологической системы механической обработки включает 4 группы параметров [156]:

- физико-механические свойства обрабатываемого материала;
- технические характеристики металлообрабатывающего оборудования;
- режимы обработки;
- характеристики инструмента.

Первые две группы параметров в большинстве случаев выбираются до начала обработки, в процессе обработки не управляются и в системах стабилизации качества практически не используются.

Наибольшей степенью управляемости характеризуются режимные параметры процесса обработки, которые чаще всего выступают в качестве субъекта управления при механической обработке.

Характеристики инструмента в общем случае относятся к управляемым параметрам, но степень управляемости ими сильно зависит от периода времени, когда осуществляются управляющие воздействия. Таких периодов можно выделить два: предварительная подготовка инструмента к обработке и собственно процесс обработки.

При лезвийной обработке характеристики инструмента могут быть отнесены к малоуправляемым или частично управляемым параметрам, так как осуществление управляющих воздействий для изменения или стабилизации характери-

стик инструмента одновременно с процессом обработки трудно реализуемо на практике.

Значительно большие возможности для повышения степени управляемости свойствами инструмента открывает алмазно-абразивное шлифование. Для кругов из СТМ эффективное использование возможно лишь при условии предварительной подготовки (правки) их рабочей поверхности применительно к требованиям данной шлифовальной операции [157]. Такая подготовка представляет собой управление параметрами инструмента до начала обработки.

В процессе шлифования управление характеристиками инструмента сводится к поддержанию требуемой режущей способности шлифовального круга с использованием в ходе процесса обработки совмещения во времени технологических воздействий на обрабатываемую деталь и управляющих воздействий на обрабатывающий инструмент (шлифовальный круг).

Наибольшую стойкость кругов из сверхтвёрдых материалов обеспечивают металлические связки – в 5-10 раз более стойкие, чем органические. Металлические связки превосходят также полимерные и керамические связки прочностью, пластичностью, абразивоудержанием и теплопроводностью [158]. В связи с этим задача управления режущей способностью круга в течение его периода стойкости особенно актуальна для кругов из СТМ на металлической связке.

Методы управления характеристиками шлифовального инструмента в процессе обработки разделяются по характеру воздействия на:

- механические;
- электрохимические;
- электрофизические.

Механические воздействия на шлифовальный круг из СТМ могут осуществляться алмазными карандашами, свободным абразивом, гибкими щётками из полимерных материалов с алмазным напылением и специальными устройствами для активизации рабочей поверхности кругов. Эти воздействия преимущественно используются для алмазных шлифовальных кругов, у зёрен которых и при правке, и в процессе обработки формируются контактные площадки на задних поверхно-

стях. В результате высокоскоростного ударного взаимодействия алмазного зерна с активизирующим элементом на площадках контакта происходят микроразрушения и значительно увеличивается развитость микрорельефа.

При взаимодействии рабочей поверхности круга (РПК) с алмазными карандашами и гибкими щетками с напылением микроразрушения на поверхностях алмазных зерен происходят вследствие того, что твердости контактирующих объектов одинаковы или близки. В специальных устройствах для активизации алмазных зерен используют те естественные явления, которые сопровождают процессы шлифования и правки, например, нагрев контактных поверхностей, адгезионное схватывание алмаза и металла, а также вибрацию за счет автоколебаний или вынужденных колебаний [159, 160].

При механических воздействиях с наложением вибрационных полей (рис. 5.1) природа активизации режущих кромок алмазного зерна связана с тем, что при колебаниях контактирующих тел резко изменяются нормальные и касательные напряжения, а также фактические глубины и силы резания.

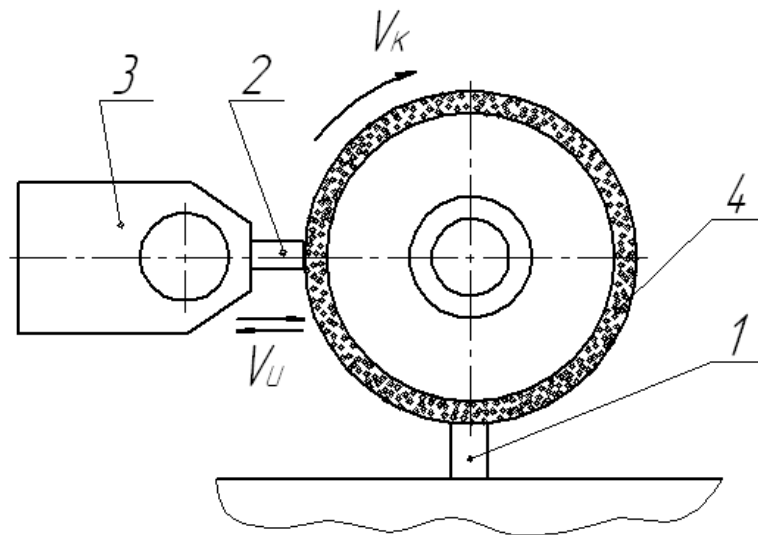


Рисунок 5.1 – Активизация рабочей поверхности алмазного шлифовального круга металлическим инструментом, совершающим колебательные движения [159]:

- 1 – обрабатываемая заготовка, 2 – активизирующий инструмент,
3 – упругий элемент или вибратор, 4 – шлифовальный круг

После активизации алмазных зерен с использованием энергии автоколебаний или наложения внешних вибрационных полей не происходит растрескивания и сколов на зернах и в то же время существенно развивается их микрорельеф [159].

К тому же виду механических управляющих воздействий можно отнести и разработанный в ИСМ НАН Украины им. В.Н. Бакуля метод интенсификации процессов шлифования на базе использования направленной гармонизации вибраций от динамической нагрузки и прецессионного перемещения шлифовального инструмента для удвоения производительности процесса механической обработки без повышения мощности станка на основе управляемой кинематики контактирования шлифовального круга с изделием [161].

Объектом управления в случае механических воздействий на РПК с применением алмазов или специального инструмента с наложением вибраций является зерно СТМ. Связка управляющим воздействиям или вообще не подвергается, или подвергается незначительно по сравнению с зёрнами.

Напротив, для обеспечения заданной величины выступления зёрен СТМ над связкой используют механические воздействия свободным абразивом, который может подаваться к рабочей поверхности круга всухую, в виде абразивной суспензии или в составе правящего инструмента, корпус которого играет роль притира.

Воздействия на РПК потоком свободных абразивных частиц имеют низкую эффективность, так как процесс характеризуется низкой управляемостью и большим расходом абразивного материала. Более эффективным является воздействие на круг с использованием притира [162]. Сущность этого способа заключается в следующем:

К вращающемуся шлифовальному кругу подводят до касания притир, продольная ось которого наклонена под углом α в пределах от 20 до 60° к вектору скорости круга в точке касания его с притиром. Притиру задают возвратно-поступательное движение вдоль образующей инструмента. В зону контакта круга с притиром подают свободный абразив, который захватывается шлифовальным

кругом и затормаживается или шаржируется в притире. Путем перекачивания по поверхности контакта в направлении вектора скорости свободный абразив вышлифовывает материал притира и связки шлифовального инструмента. В результате формируется рабочий зазор между кругом и притиром, который автоматический поддерживается на определенном уровне путем назначения соответствующей подачи притира в процессе воздействий.

Интенсивность шлифования связки круга и материала притира определяется размером подаваемых абразивных частиц и величиной зазора между инструментом и притиром. Свободный абразив берут размером, равным 0,6-0,9 размера зерен СТМ, и подают его в виде суспензии, которая содержит в себе глину и воду в следующем отношении компонентов масс: абразив – 46,0-50,0 %; глина – 23,0-27,0 %; вода – остальное.

Способ механических воздействий свободным абразивом с притиром характеризуется хорошей управляемостью, относительно меньшим расходом абразивного материала и требует небольших затрат энергии. Объектом управления является преимущественно связка, воздействие на зёрна СТМ незначительно. Вместе с тем при данном способе воздействий абразивные зерна неизбежно будут попадать на обработанную поверхность заготовки и шаржироваться в неё. В этом состоит главное ограничение метода механических управляющих воздействий свободным абразивом.

Для повышения режущей способности шлифовальных кругов из СТМ на металлических связках хорошо зарекомендовали себя методы, основанные на использовании электрохимических и электрофизических процессов.

Электрохимические методы управляющих воздействий, которые достаточно просто могут быть реализованы при предварительной подготовке шлифовального инструмента к работе, имеют ряд существенных ограничений для использования в процессе обработки:

- сложность изоляции зоны обработки заготовки от зоны управляющих воздействий на шлифовальный круг;
- неизбежное загрязнение рабочей жидкости продуктами обработки;

- необходимость учитывать взаимодействие рабочей жидкости с обработанной поверхностью;

- недопустимость использования агрессивных электролитов при шлифовании многих видов материалов и др.

Объектом управления в случае электрохимических воздействий на РПК является связка, так как зерна алмаза и кубического нитрида бора не принимают участия в электрохимических процессах.

Перечисленные ограничивающие факторы и обусловленные ими трудности технической реализации электрохимических управляющих воздействий на РПК в процессе обработки не дают возможность высоко оценивать перспективность электрохимических методов в повышении управляемости режущей способностью шлифовальных кругов из СТМ на металлической связке.

Среди электрофизических методов воздействий на РПК нашли применение анодно-механическая, алмазно-катодная, электроконтактная и электроэрозионная обработка. Анодно-механические и алмазно-катодные процессы требуют применения электролитов, вследствие чего они имеют те же ограничения и сложности использования для осуществления управляющих воздействий в процессе обработки, что и электрохимические процессы.

Электроконтактный метод воздействий основывается на использовании вращающегося гибкого электрода, который для обеспечения высокой плотности тока выполняется в виде круговой щетки, набранной из проволочных, радиально расположенных, гибких элементов (рис. 5.2). Эти элементы способны проникать в межзеренное пространство и взаимодействовать со связкой круга как механически, так и электрофизически, обуславливая возникновение электрических разрядов в процессе прерывистого электрического контакта с материалом связки.

Диаметр проволочных электродов выбирается таким образом, чтобы они свободно проникали в межзеренное пространство для контактирования со связкой круга. Оптимальная разность линейных скоростей шлифовального круга и правящей щетки составляет 0,1-1, 0 м/с.

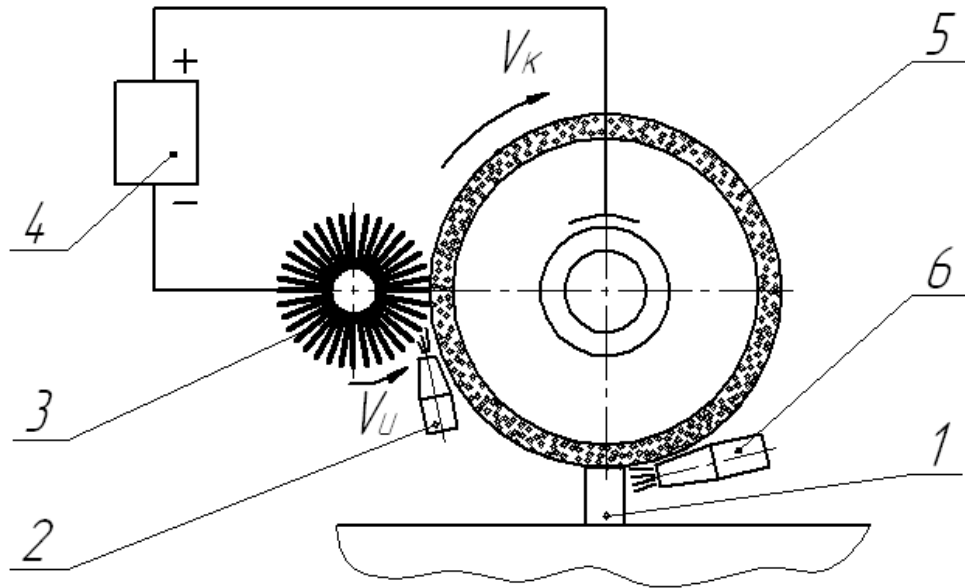


Рисунок 5.2 – Плоское шлифование с электроконтактными управляющими воздействиями на РПК с помощью круглой щетки из гибких элементов [159]^
 1 – обрабатываемая заготовка, 2 – сопло для подачи рабочей среды в межэлектродный промежуток, 3 – вращающаяся щетка из гибких электродов, 4 – источник технологического тока, 5 – шлифовальный круг, 6 – сопло для подачи рабочей среды в зону резания

Механическое воздействие проволочек и доступ СОЖ в зону воздействий обеспечивают надежное удаление шлама с РПК и высокую термическую стойкость электродов при большой плотности тока. Управляющие воздействия проводятся при напряжениях от 5 до 60 В и плотности тока от 5 до 600 А/см². Широкий диапазон электрических параметров процесса позволяет использовать в качестве рабочей среды не электролиты, а обычные СОЖ.

Электроэрозионные методы воздействий (рис. 5.3) показали свою высокую эффективность при поддержании режущей способности кругов из СТМ на металлической связке в процессе обработки [112]. Это обусловлено специфическими особенностями электроэрозионного процесса, среди которых можно выделить несколько наиболее значимых:

– наличие зазора между поверхностями круга и электрода-инструмента, что позволяет осуществлять воздействия с минимальным усилием подачи электрода и незначительным его износом;

– высокая избирательность и дискретность воздействий;

– термический характер электрической эрозии позволяет применять метод для токопроводных связок с различными физико-механическими свойствами.

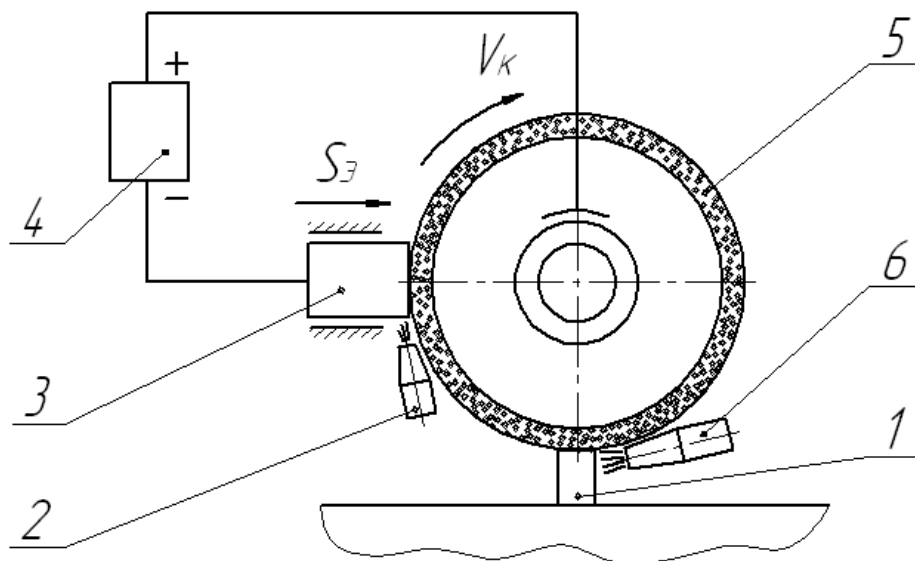


Рисунок 5.3 – Плоское шлифование с электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК с помощью электрода-инструмента в автономной зоне: 1 – обрабатываемая заготовка, 2 – сопло для подачи рабочей среды в межэлектродный промежуток, 3 – электрод-инструмент, 4 – источник технологического тока, 5 – шлифовальный круг, 6 – сопло для подачи рабочей среды в зону резания

Объектом управления в электрофизических методах является токопроводная связка. Вместе с тем экспериментально установлено, что при электроэрозионной обработке могут возникать условия, когда на поверхности нетокопроводного алмазного зерна создаётся электропроводный слой из продуктов пиролиза рабочей среды и обрабатываемого материала [159] или же формируются токопроводные мостики из элементов стружки между связкой и слоем обрабатываемого материала на контактных площадках зерен [163].

Такие условия приводят к термохимическому воздействию электрической эрозии на зерна СТМ [164] и инициированию электрического разряда непосредственно на зерно. Вследствие этого при использовании электроэрозионных процессов управляющим воздействиям подвергаются, кроме материала связки, также и зерна сверхтвердого материала, что приводит к их частичному разрушению и развитию микрорельефа.

Результаты анализа рассмотренных методов реализации управляющих воздействий на рабочую поверхность шлифовальных кругов из СТМ в процессе обработки с целью выделения в них управляемых элементов структуры круга и относительной оценки сложности технической реализации сведен в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Объекты управления и относительные показатели сложности реализации методов управляющих воздействий на шлифовальные круги из СТМ с металлической связкой в процессе обработки

Методы управляющих воздействий	Объекты управления		Сложность технической реализации (относительный показатель)
	Зерна СТМ	Связка круга	
Механические:			
Инструментом без наложения вибраций	+	–	Низкая
Инструментом с наложением вибраций	+	–	Средняя
Свободным абразивом	+	+	Средняя
Электрохимические	–	+	Высокая
Электрофизические методы:			
Анодно-механический	–	+	Высокая
Алмазно-катодный	–	+	Высокая
Электроконтактный	–	+	Средняя
Электроэрозионный	+	+	Средняя

На основании анализа данных табл. 5.1 можно сделать вывод, что механические методы воздействий в основном направлены на зерна СТМ, методы с использованием свободного абразива и электрохимические – на связку, электрофизические могут воздействовать на оба компонента. Если объектом управления является зерно СТМ, то наибольшую интенсивность обеспечивают управляющие воздействия, связанные с механическим воздействием на зерно, или механические воздействия с наложением колебаний.

Если объектом управления является связка, то для шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов на металлической токопроводящей связке наиболее эффективными являются воздействия с использованием электрической энергии или комбинации электрической энергии с другими её видами.

Таким образом, управление характеристиками инструмента электроэрозионным методом обладает наибольшим потенциалом для повышения степени управляемости технологической системой шлифования кругами из СТМ на металлической связке [165] и принимается нами в качестве основного метода обеспечения и поддержания высоких режущих свойств рабочей поверхности шлифовальных кругов.

5.2 Определение рациональных режимов при шлифовании без электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга

При шлифовании без электроэрозионных управляющих воздействий с целью поддержания режущих свойств круга, задача оптимизации сводится к нахождению режимов резания, обеспечивающих максимальную производительность обработки. В этом случае максимальной производительности, удовлетворяющей заданным показателям качества, можно достигнуть только за счет полного использования режущих свойств рабочей поверхности круга.

Для этого воспользуемся законом изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга во время обработки $Q(\tau)$, найденном экспериментально при шлифовании с фиксированным усилием поджима заготов-

ки к РПК на следующих режимах: скорость детали (скорость стола) V_d , лимитированное усилие поджима заготовки к рабочей поверхности круга $P_{n \text{ лим}}$. Используя $Q(\tau)$, найдем закон изменения текущей лимитированной фактической глубины шлифования $t_\phi(\tau)$, которая изменяется в результате ухудшения режущей способности РПК:

$$t_\phi(\tau) = \frac{Q(\tau)}{F(\tau)}, \quad (5.1)$$

где $F(\tau)$ – площадь обработанной поверхности на момент τ , мм²;

τ – время, для которого находится значение текущей лимитированной фактической глубины шлифования, мин.

Площадь обработанной поверхности на момент времени τ при плоском шлифовании равна

$$F(\tau) = n_{cm} B L \tau. \quad (5.2)$$

После подстановки (5.2) в (5.1), получим

$$t_\phi(\tau) = \frac{1}{n_{cm} B \cdot L \cdot \tau} Q(\tau). \quad (5.3)$$

С учетом выражения (3.11) из (5.3) получим

$$t_\phi(\tau) = \frac{L + 2l_{nep}}{1000V_d B \cdot L \cdot \tau} Q(\tau). \quad (5.4)$$

Как видно из формулы (5.4) при плоском врезном шлифовании по схеме с продольным перемещением стола фактическая глубина шлифования (величина вертикальной подачи) зависит не только от скорости стола, размеров обрабатываемой поверхности и момента времени в периоде обработки, но и от величины перебега, влияние которой тем больше, чем больше величина перебега.

Задаваясь периодом дискретизации времени обработки $\tau = \tau_{disc}$, получим дискретные значения переменной фактической глубины шлифования, которая будет изменяться в соответствии с изменением ТЛРСШК при шлифовании. Период дискретизации рекомендуется выбирать равным машинному времени, необходи-

тому для выполнения операции либо кратным ему. Минимальное значение периода дискретизации при плоском шлифовании равно времени одного продольного хода стола [166].

Полученные дискретные значения переменной фактической глубины шлифования представляют собой рациональные режимы обработки для схемы с фиксированными режимными параметрами, так при их назначении будет достигаться близкое к максимальному использование режущих свойств рабочей поверхности шлифовального круга и, соответственно, близкая к максимальной в данных условиях производительность обработки.

5.3 Определение оптимальных режимов при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга

5.3.1 Способы стабилизации режущей способности рабочей поверхности круга

Задача оптимизации при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга сводится к определению по критерию минимальной удельной себестоимости обработки оптимальных режимов электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга, осуществляемых на режимах резания, обеспечивающих максимальную производительность обработки при заданном качестве. В этом случае максимальная производительность обработки достигается как режимами резания, обеспечивающими максимальную производительность обработки при удовлетворении заданных на чертеже показателей качества, так и поддержанием высокой режущей способности круга во время обработки за счет дополнительных управляющих электроэрозионных воздействий, осуществляемых одновременно со шлифованием. Управляющие электроэрозионные воздействия на РПК способствуют превращению нестационарного процесса в квазистационарный, когда режущая способность круга и производительность обработки стабилизируются во времени.

Учитывая, что при обработке различных материалов ухудшение режущей способности круга определяется различными явлениями, было предложено несколько подходов, позволяющих уравновесить интенсивности процессов, ухудшающих режущие свойства РПК и интенсивность его обновления за счет управляющих электроэрозионных воздействий [112, 167, 168].

В случае, когда в процессе шлифования явления засаливания межзеренного пространства отсутствует, образование новой рабочей поверхности круга должно происходить за счет удаления из связки наиболее выступающих зерен, которые, как правило, имеют наибольшие размеры контактных площадок на зернах. При этом параметры РПК будут находиться в квазистационарном состоянии, если время τ_y удаления объема связки, достаточного для перевода зерен из наибольших размерами контактных площадок на задних поверхностях зерен из устойчивого состояния в неустойчивое с помощью управляющих воздействий на РПК, будет равно времени $\tau_{кр}$ образования критических размеров контактных площадок в процессе шлифования [112], т.е.

$$\tau_y = \tau_{кр}. \quad (5.5)$$

Время образования критических размеров площадок контакта на задних поверхностях зерен находится по формуле

$$\tau_{кр} = \sqrt{\frac{T_{кр} \cdot \lambda \cdot V_d \cdot S}{4aV_k(C - \alpha T_{кр})bz_p} \sqrt{\frac{\pi}{H} \frac{\sqrt{1 + M^2 a_z \cos \omega}}{\sin \beta}}}, \quad (5.6)$$

где $T_{кр}$ – температура, исключая фазово-структурные превращения на обработанной поверхности;

C_1 – коэффициент в уравнении, описывающем влияние времени обработки на длину площадки контакта на задней поверхности зерна.

Известно, что устойчивое состояние зерна обеспечивается при его заглублении в связку на $2/3$ диаметра шаровой модели зерна, а неустойчивое – при заглублении на $1/3$ диаметра. В этом случае, чтобы перевести зерно из устойчивого состояния в неустойчивое, достаточно удалить следующий объем связки

$$V_c = \left(1 - \frac{P_v K}{100}\right) \cdot \frac{dB_k \pi D_k}{3}, \quad (5.7)$$

где V_c – объем удаляемой связки;

P_v – объемная доля алмазов в алмазоносном слое при 100%-ной относительной концентрации алмазов;

K – относительная концентрация алмазов, %;

d – диаметр модели зерна в форме шара;

B_k, D_k – соответственно высота и диаметр шлифовального круга.

Объем удаляемой электрическими разрядами связки определяется по формуле [19]

$$V_c = c \cdot I_{cp} U_{sm}, \quad (5.9)$$

где I_{cp} – средняя сила тока электроэрозионных воздействий на РПК;

c – коэффициент, который учитывает влияние энергии импульса на интенсивность удаления продуктов засаливания;

U_{sm} – расчетная величина электрического напряжения в дуге разряда.

Приравняв объемы связки, которые находятся по формулам (5.7) и (5.8), с учетом времени образования критических размеров контактных площадок, которое определяется по формуле (5.6) определим среднее значение силы тока при удалении связки объемом V_c за счет электроэрозионных управляющих действий

$$I_{cp} = \frac{\frac{d \pi D_k B_k}{3} \left(1 - \frac{P_v K}{100}\right)}{\tau_{kp} c U_{sm}}. \quad (5.9)$$

Если в ухудшении режущей способности РПК преобладают процессы засаливания, то перевести нестационарное состояние рельефа круга в квазистационарный возможно, если приравнять интенсивности явлений засаливания и удаления продуктов засаливания с помощью электроэрозионных воздействий. В этом случае среднюю величину силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий находят по формуле [167]

$$I_{cp} = \frac{10^{-3} \cdot (-x_0 \ln 0,05)_{\frac{1}{m}} \cdot \pi D_{\kappa} B_{\kappa} \left(1 - \frac{P_v}{2} \cdot \frac{K}{100}\right)}{\tau_3 c U_{sm}}, \quad (5.10)$$

где x_0, m – параметры закона Вейбулла, которые описывают распределение зерен по высоте в условиях стабилизации рельефа РПК;
 τ_3 – время, за которое РПК потеряла режущую способность вследствие засаливания зерен.

При ухудшении режущей способности РПК в результате изнашивания зерен, а также засаливания межзеренного пространства и микрорельефа зерен, определение условий, при которых интенсивность ухудшения режущей способности рабочей поверхности круга и ее восстановления с помощью электроэрозионных воздействий равны, предлагается выполнять на основе закономерностей, которые описывают изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга при шлифовании без электроэрозионных воздействий и в процессе восстановления режущей способности с помощью периодических ЭЭВ, осуществляемых одновременно со шлифованием образца на максимальных для используемого источника технологического тока режимах. В этом случае цикл обработки заготовки состоит из периодов «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» (рис. 5.4), а шлифование с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК представляет собой чередование таких циклов.

Как видно из рис. 5.4, шлифование без электроэрозионных воздействий на РПК на протяжении времени $\tau = T$ приводит к снижению режущей способности от величины Q_0 , которая была обеспечена электроэрозионной правкой, до установившейся величины $Q_{уст}$, обусловленной износом зерен и засаливанием межзеренного пространства. За время $\tau = \tau_{\text{ээв}}$ режущая способность РПК может быть повышена до уровня Q_{np} , когда рельеф рабочей поверхности будет характеризоваться высокой режущей способностью при приемлемом расходе алмазов. Таким образом, сущность оптимизации сводится к нахождению такой длительности периодов цикла T и $\tau_{\text{ээв}}$, а также величины τ_{np} , при которых удельная себестоимость цикла шлифования была бы минимальной.

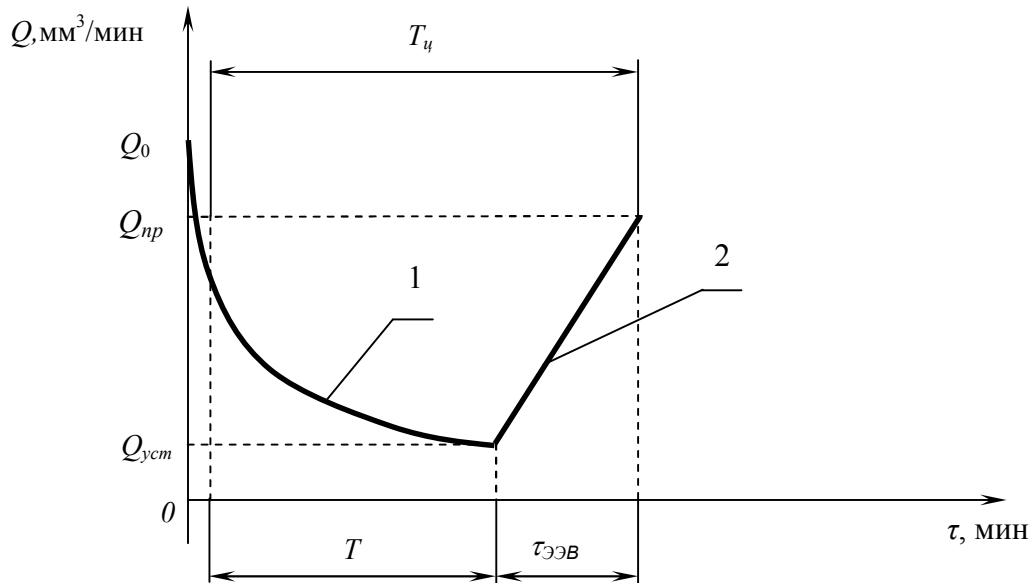


Рисунок 5.4 – Периоды, составляющие цикл «шлифование без ЭЭВ (1) – шлифование с ЭЭВ (2)»

В этом случае, используя условие равенства энергий в процессе периодических и непрерывных электроэрозионных воздействий [168], а также величины периодов T и $\tau_{\text{ЭЭВ}}$, можно найти среднее значение силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий.

Энергия W_n , израсходованная при периодических электроэрозионных воздействиях на РПК, за время периода восстановления режущих свойств

$$W_n = U_{sm} I_{cpn} \tau_{\text{ЭЭВ}}, \quad (5.11)$$

где I_{cpn} – среднее значение силы тока периодических воздействий (ограничено техническими возможностями источника технологического тока);

$\tau_{\text{ЭЭВ}}$ – время периода восстановления режущих свойств РПК при периодических ЭЭВ, мин.

Энергия ЭЭВ W_n , расходуемая при непрерывных воздействиях за время цикла, составляет

$$W_n = U_{sm} I_{cpn} (\tau_{\text{ЭЭВ}} + T), \quad (5.12)$$

где T – время периода шлифования без ЭЭВ, мин.

Приравняв (5.11) и (5.12), получим среднюю силу тока непрерывных электроэрозионных воздействий из условия равенства энергий в процессе периодических и непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК

$$I_{cpn} = I_{cpn} \frac{\tau_{\text{ЭЭВ}}}{T + \tau_{\text{ЭЭВ}}}. \quad (5.13)$$

5.3.2 Определение оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки

Удельная себестоимость шлифования с периодическими электроэрозионными воздействиями представляет собой отношение себестоимости шлифования за время цикла $T_{ц}$ к объему материала V_m , удаленного с поверхности заготовки за это же время:

$$C_{уд}(T_{ц}) = \frac{C_{шл}(T_{ц})}{V_m(T_{ц})}, \quad (5.14)$$

где $C_{шл}$ – себестоимость цикла шлифования, для которого осуществляется расчет

$C_{уд}$, руб;

V_m – объем материала, удаляемого с поверхности заготовки за цикл обработки

$T_{ц}$, мм³.

Расчет количества удаленного материала выполняется с использованием экспериментально определяемых законов изменения ТЛРСШК в периоды шлифования без ЭЭВ и шлифования с ЭЭВ.

При определении оптимальной длительности цикла (периодов шлифования без ЭЭВ и периода восстановления режущих свойств РПК) используют два подхода [169, 170].

При первом подходе [169] определение оптимального периода между электроэрозионными воздействиями базируется на представлении процесса шлифования с периодическими электроэрозионными воздействиями как очередности повторяющихся в течение станко-часа циклов «шлифование без ЭЭВ – шлифование

с ЭЭВ», описываемых экспоненциальным законом изменения ТЛРСШК $Q_{шл}(\tau)$ при шлифовании без ЭЭВ и линейным законом $Q_{шл+ЭЭВ}(\tau)$ при шлифовании с одновременными электроэрозионными воздействиями на РПК. При этом расход алмазов за минуту шлифования с ЭЭВ Q_{1a} рассчитывался по величине удаляемого объема связки, необходимого для обновления режущей способности РПК без учета влияния силовых факторов, сопровождающих восстановление режущих свойств круга, одновременно со шлифованием. При расчете используются допущения об отсутствии влияния состояния РПК, с которого начинается восстановление режущей способности круга электроэрозионными воздействиями на длительность времени ее восстановления и на объем удаляемой связки с целью восстановления режущих свойств; не учитываются затраты на расход алмазов при шлифовании без электроэрозионных воздействий на РПК. Оптимизация периода между электроэрозионными воздействиями осуществляется по единственному параметру – времени шлифования τ .

В работе [170] поиск минимума удельной технологической себестоимости шлифования был выполнен на основе данных об изменении ТЛРСШК $Q(\tau)$ за соответствующие периоды одного цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», а также расхода сверхтвердых материалов $M(\tau)$ в эти же периоды цикла. Оптимизация осуществлялась по двум параметрам – времени шлифования без электроэрозионных воздействий T и времени формирования режущей способности РПК, до которой необходимо вести восстановление режущих свойств с помощью электроэрозионных воздействий, τ_{np} . В этом случае целевая функция удельной себестоимости шлифования имеет вид

$$C_{удц}(\tau_{np}, T) = \frac{C_u(\tau_{np}, T)}{V_{мц}(\tau_{np}, T)} \rightarrow \min, \quad (5.15)$$

где $C_u(\tau_{np}, T)$ – технологическая себестоимость цикла, руб;

$V_{мц}(\tau_{np}, T)$ – объем удаленного материала за цикл обработки, мм³.

Расчет технологической себестоимости цикла выполняется при допущении, что состояние РПК, с которого начинается восстановление режущей способности круга электроэрозионными воздействиями, не влияет на расход алмазов, а интен-

сивность расхода алмазов на этапе шлифования с ЭЭВ является постоянной и оценивается средней величиной M_{cp} .

Рассмотрим алгоритм оптимизации удельной себестоимости обработки, в котором учитывается как зависимость расхода алмазов от состояния РПК, с которого начинается восстановление режущей способности, так и закон изменения интенсивности расхода алмазов в процессе восстановления режущих свойств электроэрозионными воздействиями на РПК (рис. 5.5, а, б).

В системе координат $Q O \tau$ снижение режущей способности при шлифовании без электроэрозионных воздействий (кривая 1 на рис. 5.5, а) описывается уравнением

$$Q = Q_{уст} + \Delta Q \exp(\beta_Q (\tau - \tau_{исх})), \quad (5.16)$$

где $\Delta Q = (Q_{исх} - Q_{уст})$ – амплитуда снижения значения ТЛРСШК при шлифовании до квазипостоянного значения, мм³/мин;

$Q, Q_{уст}, Q_{исх}$ – соответственно значения текущей, установившейся и исходной ТЛРСШК, мм³/мин;

β_Q – эмпирический коэффициент, мин⁻¹;

$\tau_{исх}$ – момент времени, при котором экспериментально определялась $Q_{исх}$, ($\tau_{исх} \approx 1$ мин).

Уравнение, описывающее восстановление режущей способности РПК в системе координат $Q_2 O_2 \tau_2$ при совпадении ее начала с началом системы координат $Q_1 O \tau_1$ имеет вид прямой (прямая 2 на рис. 5.5, а)

$$Q_2 = K_Q \tau. \quad (5.17)$$

В точке Q_T , с которой начинается восстановление режущих свойств РПК, в результате переноса начала системы координат $Q_2 O_2 \tau_2$ в эту точку, уравнение (5.17) примет вид

$$Q_2 = Q_{шл+ЭЭВ} = K_Q \cdot \tau + (K_Q T - Q_T). \quad (5.18)$$

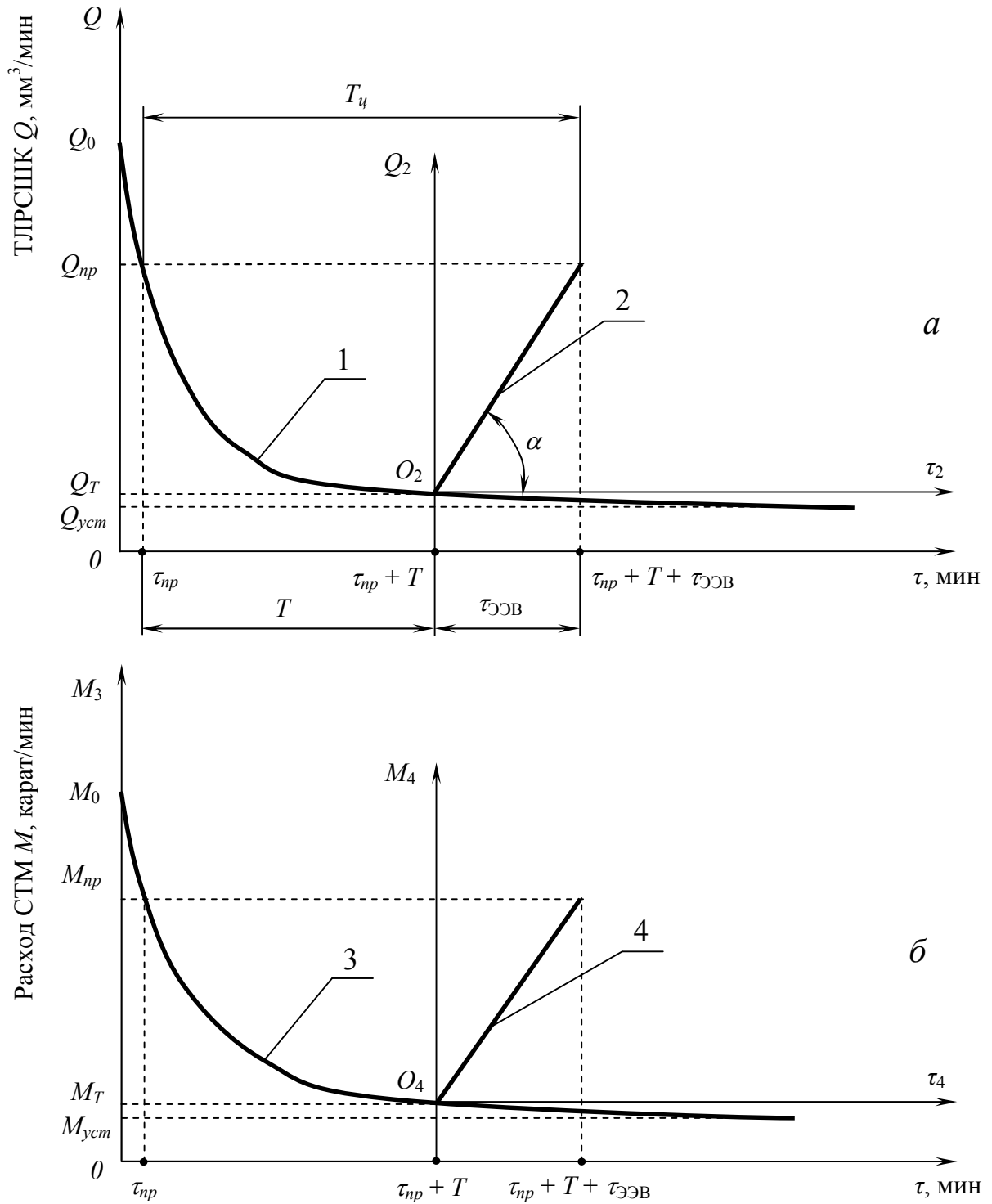


Рисунок 5.5 – Изменение ТЛРСШК (а) и расхода алмазов (б) при шлифовании без ЭЭВ (линии 1, 3) и с электроэрозионными воздействиями на РПК (линии 2, 4) в периоды цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ»

Аналогично, уравнение, описывающее расход алмазов в системе координат $M O \tau$ (кривая 3 на рис. 5.5, б) имеет вид

$$M = M_{уст} + \Delta M \exp(\beta_M (\tau - \tau_{исх})), \quad (5.19)$$

где $\Delta M = (M_{исх} - M_{уст})$ – амплитуда снижения расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ, карат/мин;

$M, M_{уст}, M_{исх}$ – соответственно значения текущего, установившегося и исходного расхода алмазов, карат/мин;

β_M – эмпирический коэффициент, мин^{-1} ;

$\tau_{исх}$ – момент времени, при котором экспериментально определялся $M_{исх}$, ($\tau_{исх} \approx 1$ мин).

В точке M_T , с которой начинается восстановление режущих свойств РПК, в результате переноса начала системы координат $M_4 O_4 \tau_4$ в эту точку, уравнение (5.19) примет вид

$$M_4 = M_{штл+\text{ЭЭВ}} = K_M \cdot \tau + (K_M T - M_T). \quad (5.20)$$

Определим по критерию минимальной удельной себестоимости обработки оптимальную длительность периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», в отличие от ранее рассмотренных подходов, с учетом влияния состояния РПК, с которого начинается восстановление режущей способности круга с помощью электроэрозионных воздействий, на расход алмазов, а также с учетом экспериментально определяемого закона изменения расхода алмазов на этапе шлифования с ЭЭВ $M(\tau)$.

Опишем влияние параметров оптимизации τ_{np}, T на технологическую себестоимость цикла, являющуюся числителем в выражении (5.15). Исходными данными при описании функции $C_u = f(\tau_{np}, T)$ являются: режимы резания – скорость круга V_k , скорость стола $V_{ст}$ и сила поджима заготовки к РПК P_n ; режимы ЭЭВ – напряжение холостого хода $U_{хх}$, максимальный ток периодических ЭЭВ I_n ; паспортные данные станка и источника технологического тока, затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования, стоимость алмазов, величина средней номинальной заработной платы станочника.

При расчете технологической себестоимости станко-минуты будем учитывать следующие составляющие себестоимости станко-часа [171, 172, 173, 174, 175]:

$$C_{сч} = Z_o + A + P_m + \mathcal{E} + И, \quad (5.21)$$

где Z_o – часовая заработная плата шлифовщика, руб;

A – амортизация производственного оборудования, руб;

P_m – затраты на текущий ремонт и содержание оборудования, руб;

\mathcal{E} – затраты на технологическую электроэнергию, руб;

$И$ – возмещение затрат на износ алмазного инструмента, руб.

Зарботную плату станочника за минуту $Z_{ом}$, руб/мин, определим с учетом рекомендаций работы [176]

$$Z_{ом} = \frac{Z_{мес}}{\Phi_{рв}}, \quad (5.22)$$

где $Z_{мес}$ – месячная заработная плата станочника, которая рассчитывается как средняя заработная плата по отрасли, руб;

$\Phi_{рв}$ – месячный фонд рабочего времени станочника при односменной работе, мин.

Величину амортизационных отчислений, приходящихся на 1 минуту работы оборудования A_m , руб/мин, определим по формуле

$$A_m = \frac{Ц H_a}{F_{\partial} K_{заг}}, \quad (5.23)$$

где $Ц$ – первоначальная стоимость оборудования, руб;

H_a – норма амортизации;

F_{∂} – номинальный фонд времени работы оборудования, мин;

$K_{заг}$ – коэффициент загрузки оборудования по времени [177].

Поскольку шлифование осуществляется с ЭЭВ, то стоимость оборудования должна учитывать первоначальные стоимости станка и источника технологического тока

$$Ц = Ц_{ст} + Ц_{истм}, \quad (5.24)$$

где $C_{ст}$ – первоначальная стоимость станка, руб;

C_{umm} – первоначальная стоимость источника технологического тока, руб.

Годовой фонд времени работы оборудования F_{∂} , мин, рассчитывается с учетом его работы в две смены

$$F_{\partial} = 60N_{\partial}N_cN_q, \quad (5.25)$$

где N_{∂} – количество рабочих дней в году ($N_{\partial} = 300$);

N_c – количество рабочих смен за сутки ($N_c = 2$);

N_q – количество рабочих часов в смене ($N_q = 8$).

Затраты на текущий ремонт и содержание оборудования P_{mm} , руб/мин, приходящиеся на 1 минуту работы, равны

$$P_{mm} = \frac{Z_{1м}K_m + Z_{1э}K_э}{60}, \quad (5.26)$$

где K_m – категория ремонтной сложности механической части оборудования [177];

$K_э$ – категория ремонтной сложности электрической части оборудования [177];

$Z_{1м}$ – средние затраты на текущий ремонт и содержание оборудования на единицу ремонтной сложности механической части за час работы, руб/час;

$Z_{1э}$ – средние затраты на текущий ремонт и содержание оборудования, приходящиеся на единицу ремонтной сложности электрической части за час работы, руб/час.

Затраты на технологическую электроэнергию за время полного цикла состоит из затрат на электрическую энергию в течение шлифования без ЭЭВ и затраты на электрическую энергию при шлифовании с ЭЭВ:

– затраты на электроэнергию в период шлифования без ЭЭВ, руб,

$$\mathcal{E}_{шл} = \frac{C_{1кВтч}}{60} \int_{\tau_{np}}^{T+\tau_{np}} \left(\frac{N_p}{\eta_{гд}} + N_z + N_o \right) d\tau; \quad (5.27)$$

– затраты на электроэнергию в период шлифования с ЭЭВ, руб,

$$\mathcal{E}_{шл+ээв} = \frac{C_{1кВтч}}{60} \int_0^{\tau_{ээв}} \left(\frac{N_p}{\eta_{гд}} + N_z + N_o + N_{ээв} \right) d\tau. \quad (5.28)$$

В формулах (5.27) и (5.28):

N_p – мощность резания, кВт;

$\eta_{эд}$ – КПД главного привода;

N_z – мощность двигателя насоса гидропривода продольной подачи стола плоскошлифовального станка, кВт;

N_o – мощность двигателя насоса подачи СОТС в зону резания, кВт;

$N_{эв}$ – мощность ЭЭВ, кВт;

$C_{1кВтч}$ – стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч).

В соответствии с рис. 5.5, а, время периодических ЭЭВ для восстановления режущих свойств РПК, определяется выражением

$$\tau_{эв}(\tau_{np}, T) = (Q_{np} - Q_T) \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{K_Q} (Q_{np} - Q_T), \quad (5.29)$$

где α – угол наклона прямой 2 к оси абсцисс.

Воспользовавшись уравнением, описывающим изменения ТЛРСШК при шлифовании без ЭЭВ, найдем зависимости для расчета количества сошлифованного материала в период приработки и момент $\tau_{np} + T$,

$$Q_{np} = Q_{уст} + \Delta Q \exp(\beta_Q (\tau_{np} - \tau_{усх})), \quad (5.30)$$

$$Q_T = Q_{уст} + \Delta Q \exp(\beta_Q (T + \tau_{np} - \tau_{усх})). \quad (5.31)$$

После подстановки выражений (5.30) и (5.31) в (5.29) длительность периода ЭЭВ на РПК $\tau_{эв}$, как функции от τ_{np} и T будет равна

$$\tau_{эв}(\tau_{np}, T) = \frac{\Delta Q [\exp(\beta_Q (\tau_{np} - \tau_{усх})) - \exp(\beta_Q (T + \tau_{np} - \tau_{усх}))]}{K_Q}. \quad (5.32)$$

Мощность резания N_p , кВт, при шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к РПК определим по зависимости

$$N_p = \frac{P_{zk} V_k}{10^3} = \frac{P_n K_{ш} V_k}{10^3}, \quad (5.33)$$

где P_n – сила поджима заготовки к РПК, Н;

$K_{ш}$ – коэффициент шлифования.

Мощность ЭЭВ на РПК $N_{\text{ээв}}$, кВт, определяется по формуле [178]

$$N_{\text{ээв}} = \frac{U_{\text{ср}} I_n}{10^3}, \quad (5.34)$$

где $U_{\text{ср}}$ – напряжение на межэлектродном промежутке (МЭП), В, ($U_{\text{ср}} = 4,5$ В);

I_n – сила тока при периодических электроэрозионных воздействиях на РПК, А, ($I_n = 10$ А).

Тогда затраты на электроэнергию за отдельные периоды цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» определяются по формулам

$$\mathcal{E}_{\text{шл}}(T) = \frac{C_{1\text{кВтч}}}{60} \left(\frac{N_p}{\eta_{\text{зд}}} + N_z + N_o \right) T, \quad (5.35)$$

$$\mathcal{E}_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) = \frac{C_{1\text{кВтч}}}{60} \left(\frac{N_p}{\eta_{\text{зд}}} + N_z + N_o + N_{\text{ээв}} \right) \tau_{\text{ээв}}(\tau_{\text{нр}}, T). \quad (5.36)$$

Затраты, связанные с расходом инструмента I , состоят из затрат на расход алмазов при шлифовании без ЭЭВ $I_{\text{шл}}$, руб,

$$I_{\text{шл}}(\tau_{\text{нр}}, T) = C_{\text{алм}} \int_{\tau_{\text{нр}}}^{T+\tau_{\text{нр}}} M(\tau) d\tau, \quad (5.37)$$

и затрат на расход алмазов при шлифовании с ЭЭВ на РПК $I_{\text{шл+ЭЭВ}}$, руб,

$$I_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) = C_{\text{алм}} \int_{\tau_{\text{нр}}+T}^{T+\tau_{\text{нр}}+\tau_{\text{ээв}}} M_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau) d\tau. \quad (5.38)$$

В формулах (5.37) и (5.38):

$M(\tau)$ и $M_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau)$ – функции, описывающие расход алмазов соответственно при шлифовании без ЭЭВ и с ЭЭВ, карат/мин;

$C_{\text{алм}}$ – стоимость карата алмазов, руб/карат.

После подстановки выражения (5.19) в формулу (5.37) и её преобразования, она примет вид

$$I_{\text{шл}}(\tau_{\text{нр}}, T) = C_{\text{алм}} \left[M_{\text{уст}} T - \frac{\Delta M}{\beta_M} \left(\exp(\beta_M (\tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}})) - \exp(\beta_M (T + \tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}})) \right) \right]. \quad (5.39)$$

После подстановки выражения (5.20) в формулу (5.38) и ее преобразования, затраты на расход алмазов при шлифовании с одновременными ЭЭВ будут равны

$$I_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) = C_{\text{алм}} \cdot \left[(K_M T - M_T) \tau_{\text{ЭЭВ}} + K_M \frac{\tau_{\text{ЭЭВ}}^2}{2} \right], \quad (5.40)$$

или, с учетом соотношения $\tau_{\text{ЭЭВ}} = \frac{1}{K_M} (M_{\text{нр}} - M_T)$,

$$I_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) = C_{\text{алм}} \cdot \left[(K_M T - M_T) \frac{1}{K_M} (M_{\text{нр}} - M_T) + \frac{(M_{\text{нр}} - M_T)^2}{2K_M} \right]. \quad (5.41)$$

Тогда технологическая себестоимость одной станко-минуты обработки определится по зависимости

$$C_{\text{ц}}(\tau_{\text{нр}}, T) = (Z_{\text{ом}} + A_{\text{м}} + P_{\text{тл}})(T + \tau_{\text{ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T)) + \mathcal{E}_{\text{шл}}(T) + I_{\text{шл}}(\tau_{\text{нр}}, T) + \mathcal{E}_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) + I_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T). \quad (5.42)$$

Объем удаленного материала за время цикла $V_{\text{мц}}(\tau_{\text{нр}}, T)$, состоит из объемов удаленного материала за период шлифования без ЭЭВ $V_{\text{мшл}}$ и за период шлифования с ЭЭВ $V_{\text{мшл+ЭЭВ}}$, мм³.

Соответственно

$$V_{\text{мц}}(\tau_{\text{нр}}, T) = V_{\text{мшл}}(\tau_{\text{нр}}, T) + V_{\text{мшл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T). \quad (5.43)$$

Объем удаленного материала за период шлифования без ЭЭВ определяется путем интегрирования уравнения (5.16) на отрезке времени от $\tau_{\text{нр}}$ до $\tau_{\text{нр}} + T$:

$$V_{\text{мшл}}(\tau_{\text{нр}}, T) = \int_{\tau_{\text{нр}}}^{T+\tau_{\text{нр}}} Q_{\text{уст}} + \Delta Q \exp(\beta_Q(\tau - \tau_{\text{исх}})) d\tau. \quad (5.44)$$

После интегрирования (5.44) получим

$$V_{\text{мшл}}(\tau_{\text{нр}}, T) = Q_{\text{уст}} T - \frac{\Delta Q}{\beta_Q} \left(\exp(\beta_Q(\tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}})) - \exp(\beta_Q(T + \tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}})) \right). \quad (5.45)$$

Объем удаленного материала за период ЭЭВ определим интегрированием выражения, описывающего изменение ТЛРСШК при шлифовании с одновременным электроэрозионным воздействием на РПК

$$V_{\text{мшл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) = \int_{\tau_{\text{нр}}+T}^{T+\tau_{\text{нр}}+\tau_{\text{ЭЭВ}}} Q_{\text{мшл+ЭЭВ}}(\tau) d\tau. \quad (5.46)$$

С учетом (5.18), после решения интеграла, формула (5.46) примет вид

$$V_{\text{мшл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) = (K_Q T - Q_T) \frac{1}{K_Q} (Q_{\text{нр}} - Q_T) + \frac{(Q_{\text{нр}} - Q_T)^2}{2K_Q}. \quad (5.47)$$

Общий объем удаленного материала за цикл обработки «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» определяется путем суммирования выражений (5.45) и (5.47):

$$V_{\text{мц}}(\tau_{\text{нр}}, T) = Q_{\text{уст}} T - \frac{\Delta Q}{\beta_Q} (\exp(\beta_Q (\tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}})) - \exp(\beta_Q (T + \tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}}))) + \\ + (K_Q T - Q_T) \frac{1}{K_Q} (Q_{\text{нр}} - Q_T) + \frac{(Q_{\text{нр}} - Q_T)^2}{2K_Q}. \quad (5.48)$$

После подстановки в уравнение (5.15) числителя (5.42) и знаменателя (5.48), целевая функция оптимизации примет вид

$$C_{\text{удц}}(\tau_{\text{нр}}, T) = \frac{(Z_{0\text{м}} + A_{\text{м}} + P_{\text{тм}})(T + \tau_{\text{ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T)) + \\ + \mathcal{E}_{\text{шл}}(T) + I_{\text{шл}}(\tau_{\text{нр}}, T) + \mathcal{E}_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T) + I_{\text{шл+ЭЭВ}}(\tau_{\text{нр}}, T)}{Q_{\text{уст}} T - \frac{\Delta Q}{\beta_Q} (\exp(\beta_Q (\tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}})) - \exp(\beta_Q (T + \tau_{\text{нр}} - \tau_{\text{исх}}))) +} \\ + (K_Q T - Q_T) \frac{1}{K_Q} (Q_{\text{нр}} - Q_T) + \frac{(Q_{\text{нр}} - Q_T)^2}{2K_Q}. \quad (5.49)$$

Минимум функции (5.49) отыскивается численными методами с помощью математических пакетов.

При шлифовании по схеме с фиксированными режимными параметрами значения фактической глубины находятся по формуле (5.4) с использованием установившегося значения режущей способности шлифовального круга в процессе шлифования по схеме фиксированной силой поджима заготовки к РПК с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК. Остальные механические режимы резания переносятся на схему с фиксированными режимными параметрами.

рами без изменений. Значение среднего тока непрерывных электроэрозионных воздействий рассчитывается по формуле (5.13).

5.4 Выводы

1. Если объектом управления в технологической системе шлифования кругами из сверхтвердых материалов является связка, то для шлифовальных кругов на металлической токопроводящей связке наиболее эффективными являются воздействия с использованием электрической энергии или комбинации электрической энергии с другими её видами.

2. Управление характеристиками шлифовального инструмента электроэрозионным методом обладает наибольшим потенциалом для повышения степени управляемости технологической системой шлифования кругами из СТМ на металлической связке.

3. Передаточной функцией от схемы шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК к шлифованию по схеме с фиксированными режимными параметрами, отслеживающей изменение режущей способности круга, является переменная фактическая глубина шлифования.

4. Оптимальная средняя сила тока непрерывных электроэрозионных воздействий определяется соотношением периодов цикла обработки «»шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ при условии равенства энергий периодических и непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК.

5. При шлифовании по схеме с фиксированными режимными параметрами значения фактической глубины резания находится по наименьшему значению режущей способности, до которого допускается ее снижение из условия обеспечения минимальной удельной себестоимости обработки в процессе шлифования по схеме с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ,
ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

6.1 Определение режимов плоского шлифования инструментальных
ванадиевых сталей

6.1.1 Определение коэффициента, учитывающего влияние пластических свойств
материала на параметры шероховатости шлифованной поверхности
для стали Р6М5Ф3

Исследуемая инструментальная ванадиевая сталь Р6М5Ф3 является представителем целой группы инструментальных сталей – Р18, Р18К5Ф2, Р18М5Ф2, Р14Ф4, Р12Ф3, 11Р3АМ3Ф2, Р6АМ5Ф3, так как их физико-механические свойства в температурно-скоростных условиях, характерных для шлифования, описываются одним и тем же уравнением (см. табл. 2.3).

При расчете параметров шероховатости по методике, описанной в работе [139] которая базируется на преобладании геометрического фактора в формировании неровностей шлифованной поверхности, в работах [139, 140] были выполнены экспериментальные проверки результатов расчета при шлифовании сталей Х12Ф4М и Р6М5Ф3 алмазными кругами АС6 100/89-4-М2-01, АС6 160/125-4-М2-01, которые позволили установить, что расчетные значения параметров шероховатости попадают в 95% - ный доверительный интервал на средние величины параметров, определенные экспериментально. Это позволяет сделать вывод о совпадении расчетных и экспериментальных данных и принять для стали Р6М5Ф3 значение коэффициента K_m равным единице, а материал Р6М5Ф3 считать эталонным при определении поправочного коэффициента K_m для других обрабатываемых материалов.

6.1.2 Расчет технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и шлифовальным кругом

Исходными данными при расчете скорости детали, ограниченной заданным параметром шероховатости R_a , для стали Р6М5Ф3 являются скорость шлифовального круга V_k , обусловленная паспортными данными станка либо допустимой скоростью шлифовального круга, а также параметры рабочей поверхности, определяемые паспортными характеристиками шлифовального круга (табл. 6.1).

Таблица 6.1 – Параметры РПК, используемые при расчете технических ограничений на режимы резания

Шлифовальный круг	Диаметр шаровой модели зерна d_{cp} , мкм	Параметры модели резущей части зерна		Расстояние между зернами на РПК S_{zn} , мм	Параметры закона Вейбулла	
		Радиус округления вершины ρ , мкм	Угол при вершине ε , град		m	x_0
АС6 100/80-4-M2-01	131,2	6,69	91	0,30	2,23	2946
АС6 160/125-4-M2-01	198,0	9,56	98	0,45	2,03	2820
АС6 200/160-4-M2-01	299,5	9,91	100	0,68	1,70	710

Используя приведенные в табл. 6.1 параметры РПК для кругов исследуемых характеристик, по методике, изложенной в подразделе 4.1, по заданным параметрам шероховатости R_a (табл. 6.2), была рассчитана скорость детали, обеспечивающая получением этого параметра при врезном шлифовании стали Р6М5Ф3 с фиксированными режимами. Условия обработки: скорость шлифовального круга $V_k = 35$ м/с, фактическая глубина шлифования $t_\phi = 0,015$ мм, интервал расчета $\Delta R = 0,2$ мкм, радиус шлифовального круга $R_k = 125$ мм.

Таблица 6.2 – Скорость детали, обеспечивающая заданные параметры шероховатости R_a при врезном шлифовании стали Р6М5Ф3

Шлифовальный круг	Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Базовая длина $l_{баз}$, мм	Скорость детали V_d , м/мин
АС6 100/80-4-М2-01	0,40	0,8	6
АС6 160/125-4-М2-01	0,54		
АС6 200/160-4-М2-01	0,57		

В табл. 6.2 параметры шероховатости R_a заданы таким образом, чтобы режимы резания при шлифовании кругами различных характеристик были идентичными, что обеспечит одинаковые условия обработки с максимальной производительностью и позволит исследовать влияние зернистости шлифовальных кругов на производительность шлифования и расход алмазов.

Лимитированное значение силы поджима заготовки к РПК найдем как наименьшую величину из сил поджима заготовки к РПК, ограниченных температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое обработанной поверхности заготовки, температурой окисления алмазов и механической прочностью алмазных зерен. Расчеты перечисленных ограничивающих сил поджима заготовки к РПК при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазными кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 на связке М2-01 выполним по методикам, изложенным в подразделах 4.2 - 4.4 с использованием математического пакета MathCAD (Приложение 2) по исходным данным, приведенным в табл. 6.3.

Результаты расчета составляющих сил резания, ограниченных изделием и шлифовальным кругом (тримя указанными выше условиями) приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.3 – Исходные данные для расчета усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных изделием и шлифовальным кругом, при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазными кругами 1А1 250×76×15×5 АС6-100/80-4-М2-01 различной зернистости

Группа параметров	Наименование параметра, размерность	Числовое значение
1	2	3
Режимы обработки	Скорость круга V_k , м/с	35
	Продольная скорость стола $V_{ст}$, м/мин	6
Параметры быстрорежущей стали Р6М5Ф3	Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$0,41 \cdot 10^{-6}$
	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·град	19,5
	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале μ	0,2
	Коэффициент продольной усадки стружки K_1	1,35
	Значения свободного члена и коэффициента уравнения регрессии, описывающего изменение касательных напряжений сдвига в условной плоскости сдвига, МПа и МПа/К соответственно	$C = 1761$ $\alpha = 0,185$
	Температура начала фазово-структурных изменений T_{max} , К	815
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	0,31
	Коэффициент, учитывающий влияние пластических свойств материала на параметры шероховатости шлифованной поверхности	1

Таблица 6.4 – Допустимые значения тангенциальной P_z , и радиальной P_y составляющих силы резания при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 на связке М2-01 различной зернистости в зависимости от технических ограничений

Техническое ограничение	100/80		160/125		200/160	
	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н
Температура начала фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки	42,8	79,2	45,3	85,4	44,0	81,2
Температура окисления алмазных зёрен	33,7	108,6	32,5	104,9	48,9	157,7
Механическая прочность алмазных зёрен	108,0	372,5	164,8	531,7	103,5	333,9

Как видно из табл. 6.4, при шлифовании стали Р6М5Ф3 лимитированной силой поджима заготовки к РПК является сила, обусловленная температурой начала фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. Таким образом, обобщенными режимами плоского врезного шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК будут скорость стола $V_{cm} = 6$ м/мин и силы поджима заготовки к РПК: для круга зернистостью 100/80 – $P_n = 79,2$ Н, зернистостью 160/125 – $P_n = 85,4$ Н, а для зернистости 200/160 – $P_n = 81,2$ Н. На указанных режимах будут проведены эксперименты по исследованию влияния зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности шлифовального круга.

6.1.3 Влияние зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга при шлифовании стали Р6М5Ф3

Исследование текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга осуществляли экспериментально с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК на плоскошлифовальном станке модели 3Г71, модернизированном для электроэрозионных воздействий на РПК.

Плоское врезное шлифование с фиксированной силой поджима заготовки к РПК выполняли при помощи специального устройства для шлифования с постоянной силой поджима заготовки к РПК (см. рис. 2.9).

Перед началом эксперимента круг правили электроэрозионным способом до полного обновления РПК. В качестве источника технологического тока использовали блок питания ИТТ-35. Охлаждение осуществляли 0,3%-ным водным раствором кальцинированной соды. Электроэрозионную правку РПК осуществляли чугуном электродом на режимах: скорость круга $V_k = 35$ м/с, скорость стола $V_{cm} = 6$ м/мин, подача на врезание $S_g = 5$ мкм/проход, средняя сила тока $I_{cp} = 10$ А, напряжение холостого хода $U_{xx} = 60$ В.

Для экспериментальных исследований использовали образцы из стали Р6М5Ф3, которые имели размер обрабатываемой поверхности 15×115 мм [179].

В процессе исследований измеряли расход алмазоносного слоя после 1, 5, 10, 15, 30, 45, 60 мин обработки. Количество сошлифованного материала на заготовке находили с помощью замеров толщины слоя удаленного материала индикатором часового типа в пяти точках по длине образца по методике, описанной в п. 2.5.1, а текущий расход алмазных зёрен определяли по методике, изложенной в п. 2.5.2.

Обработку выполняли кругами из синтетических алмазов АС6, прямого профиля 1А1 $250 \times 76 \times 15$, на металлической связке М2-01, 100%-й концентрации зерен, трех зернистостей 100/80, 160/125 и 200/160. Учитывая значения лимитированных усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое заготовки (см. п. 6.1.2) эксперименты, с целью получения сопоставимых результатов, выполняли с усилием поджима заготовки к РПК, равном 80 Н. Скорость круга назначали максимальной для плоскошлифовального станка модели 3Г71, равной $V_k = 35$ м/с. Продольная скорость стола для всех зернистостей составляла $V_{cm} = 6$ м/мин.

По данным эксперимента были построены графики зависимостей текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ от времени шлифования, а также выведены соответствующие уравнения регрессии в виде выражений (5.16) и (5.18).

За исходные значения текущей режущей способности $Q_{исх}$ и текущего расхода алмазов $M_{исх}$ принимали соответствующие значения в начальный момент шлифования. За установившиеся текущую режущую способность $Q_{уст}$ и текущий расход $Q_{уст}$ – значения этих величин на последних минутах обработки [179]. Аппроксимация экспериментальных данных была проведена методом наименьших квадратов. Параметры уравнений (5.16) и (5.18) приведены в табл. 6.5, а соответствующие графики – на рис. 6,1 а, б.

Таблица 6.5 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК во времени $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов во времени $M(\tau)$, мг/мин
АС6 100/80-4-М2-01	$Q(\tau) = 30 + 721 e^{-0,11\cdot\tau}$	$M(\tau) = 2 + 183 \cdot e^{-0,15\cdot\tau}$
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 32 + 834 e^{-0,15\cdot\tau}$	$M(\tau) = 5 + 159 \cdot e^{-0,20\cdot\tau}$
АС6 200/160-4-М2-01	$Q(\tau) = 81 + 897 e^{-0,13\cdot\tau}$	$M(\tau) = 8 + 185 \cdot e^{-0,15\cdot\tau}$

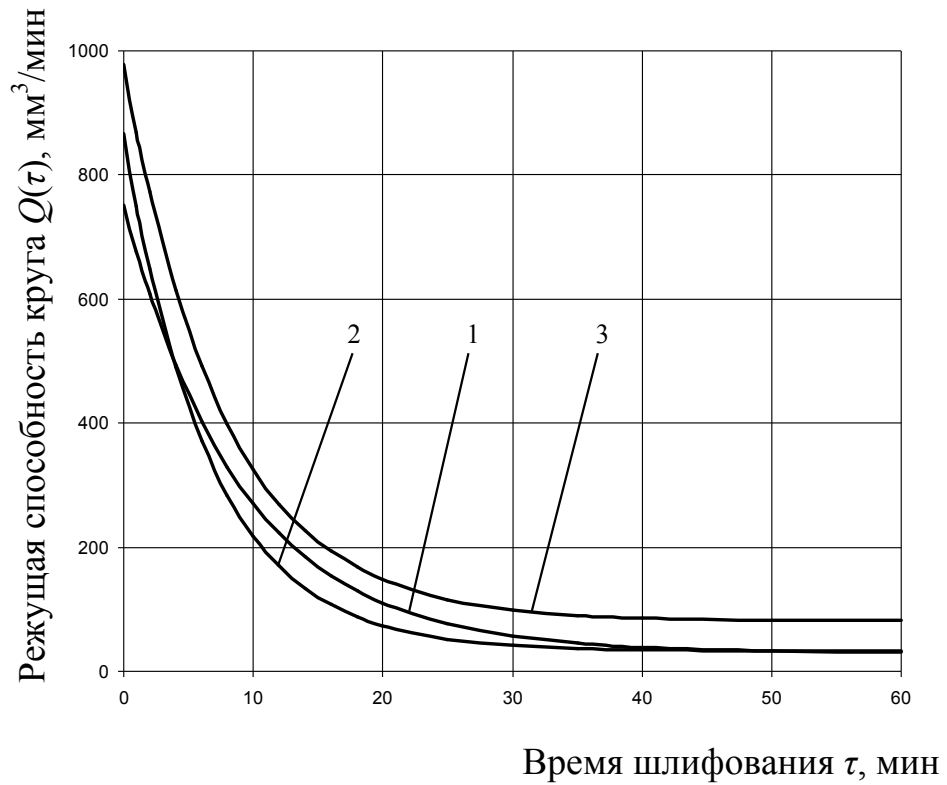
Как видно из приведенных графиков, а также характера полученных уравнений (см. табл. 6.5), первые десять минут обработки характеризуются резким снижением ТЛРСШК. Это объясняется процессами засаливания межзеренного пространства РПК, а так же микрорельефа контактных площадок на зернах.

Кроме того, уменьшение режущей способности в начале обработки обусловлено интенсивным выпадением наиболее выступающих зерен, в результате чего количество одновременно режущих зерен увеличивается, что приводит к уменьшению объема межзеренного пространства и фактической глубины шлифования при постоянном усилии поджима заготовки к РПК [179].

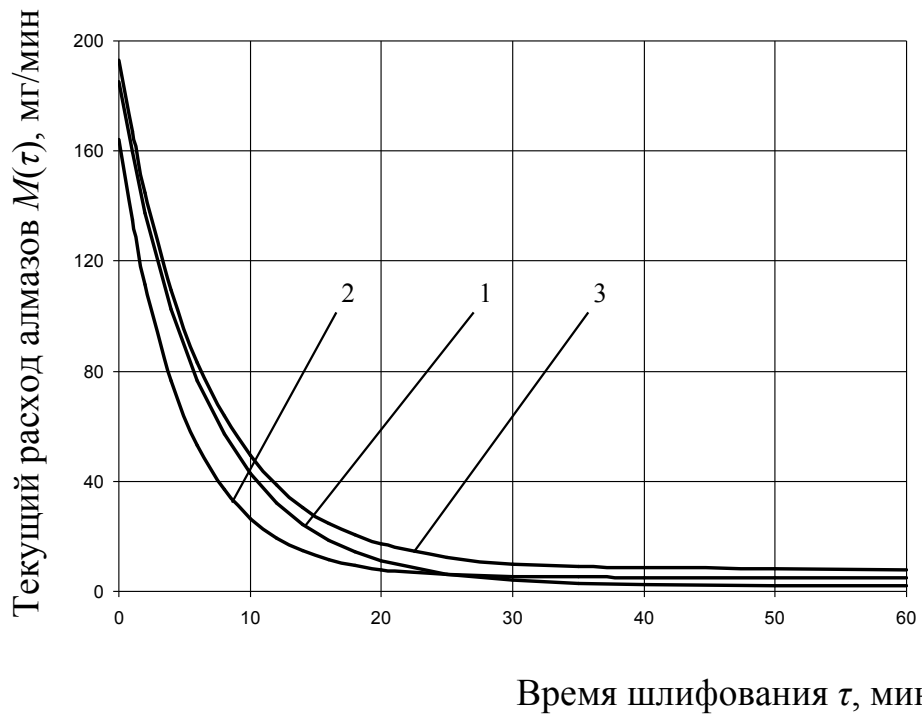
Интенсивное выпадение зерен из связки подтверждается увеличенным расходом алмазов на первых 10 минутах шлифования.

В период 20 - 60 минут обработки ТЛРСШК и расход алмазов стабилизируются. Так, режущая способность круга зернистостью 100/80 стабилизируется на значении 29 мм³/мин, а для круга зернистостью 200/160 – на значении 86 мм³/мин.

На интенсивность уменьшения режущей способности кругов во время обработки оказывают влияние зернистость и расход алмазов, определяющие объем межзеренного пространства, заполняемого в процессе шлифования, а также интенсивность засаливания.



а



б

Рисунок 6.1 – Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании заготовки из стали Р6М5Ф3 с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК:

- 1 – круг 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01,
- 2 – круг 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01,
- 3 – круг 1А1 250×76×15×5 АС6 200/160-4-М2-01

6.1.4 Определение рациональных режимов шлифования стали Р6М5Ф3 при отсутствии электроэрозионных воздействий на РПК

Используя уравнения, описывающие изменение ТЛРСШК во время обработки $Q(\tau)$ (см. табл. 6.5), зависимость, описывающую изменение фактической глубины шлифования t_ϕ при обработке заготовки из стали Р6М5Ф3 с размерами обрабатываемой поверхности 15×150 мм при величине перебега 10 мм, найдем по формуле, которая выводится из формулы (3.14) [180]:

$$t_\phi(\tau) = \frac{Q_{усм}}{n_{см} \cdot B_\partial \cdot L_\partial} + \frac{\Delta Q}{n_{см} \cdot B_\partial \cdot L_\partial} \cdot \exp(-\beta_Q \cdot \tau), \quad (6.1)$$

где B_∂ , L_∂ – соответственно ширина и длина обрабатываемой заготовки ($B_\partial = 15$ мм, $L_\partial = 150$ мм).

Частота ходов стола равна

$$n_{см} = \frac{1000V_{см}}{L_\partial + 2l_{неп}},$$

где $l_{неп}$ – величина перебега ($l_{неп} = 10$ мм).

$$n_{см} = \frac{1000 \cdot 6}{150 + 2 \cdot 10} = 35 \text{ ход/мин.}$$

Уравнения вида (6.1), описывающие изменение фактической глубины шлифования, выведем в результате обработки экспериментальных данных, полученных при шлифовании заготовки из стали Р6М5Ф3 при отсутствии ЭЭВ на РПК на режимах, приведенных в п. 6.1.3. Полученные методом наименьших квадратов уравнения сведены в табл. 6.6.

Для конкретных размеров заготовки по уравнениям, приведенным в табл. 6.6, определяется переменная фактическая глубина шлифования в соответствии с длительностью периода дискретизации глубины. Скорости круга и обрабатываемой детали переносится на схему шлифования с фиксированными режимными параметрами без изменений.

Таблица 6.6 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной фактической глубины шлифования (ТЛФГШ) t_ϕ в процессе шлифования заготовки из стали Р6М5Ф3 размером 15×150 мм

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛФГШ во времени $t_\phi(\tau)$, мм
АС6 100/80-4-М2-01	$t(\tau) = 1,3 \cdot 10^{-5} (30 + 721 e^{-0,11 \cdot \tau})$
АС6 160/125-4-М2-01	$t(\tau) = 1,3 \cdot 10^{-5} (32 + 834 e^{-0,15 \cdot \tau})$
АС6 200/160-4-М2-01	$t(\tau) = 1,3 \cdot 10^{-5} (81 + 897 e^{-0,13 \cdot \tau})$

6.1.5 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании стали Р6М5Ф3 с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК

Определение оптимальных режимов шлифования с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК выполняется экспериментальным путем с использованием шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к РПК, когда электроэрозионные воздействия на рабочую поверхность круга осуществляются периодически с известной величиной вводимой электрической энергии одновременно с процессом обработки. В процессе эксперимента определяются:

- закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования без ЭЭВ (см. табл. 6.5);
- закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ (см. табл. 6.5);
- закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК;
- закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК.

Эксперименты с целью определения законов изменения текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК проводили на режимах $V_k = 35$ м/с, $V_{cm} = 6$ м/мин и силе поджима заготовки к РПК $P_n = 80$ Н.

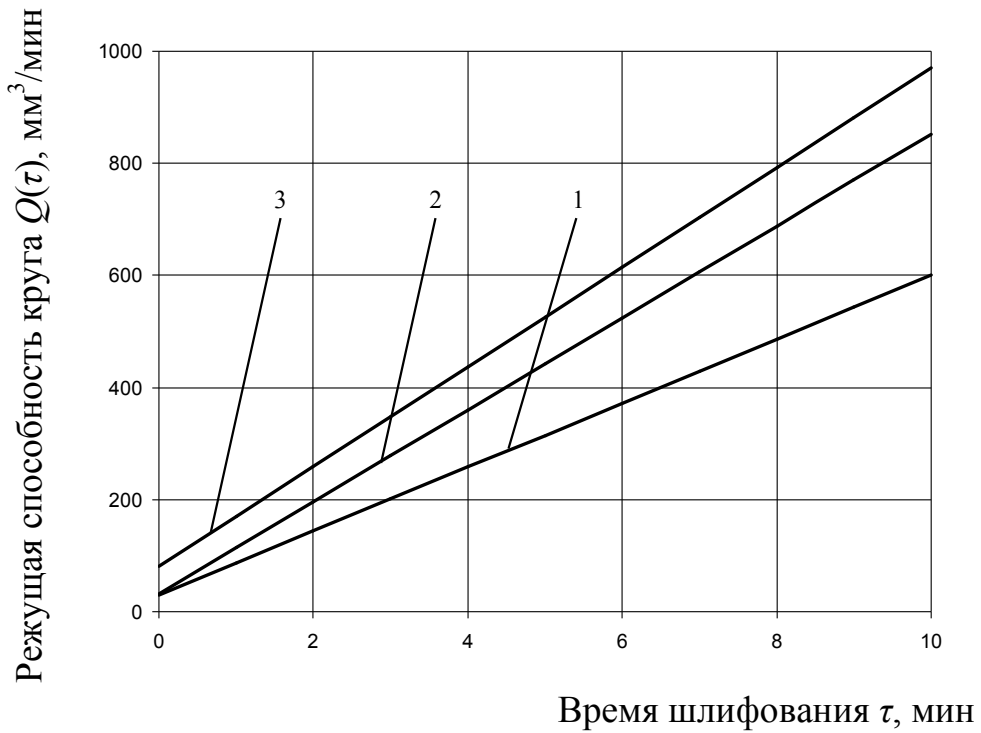
Электроэрозионную правку круга осуществляли аналогично правке, описанной в п. 6.1.3. Электроэрозионные воздействия на РПК с целью восстановления режущей способности круга выполняли с величиной среднего тока $I_{cp} = 10$ А при напряжении холостого хода $U_{xx} = 60$ В. Рабочая среда – 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды.

Как показал анализ экспериментальных данных, изменение текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК с целью восстановления режущих свойств рабочей поверхности круга, описывается уравнениями прямых (табл. 6.7), графики которых приведены на рис. 6.2.

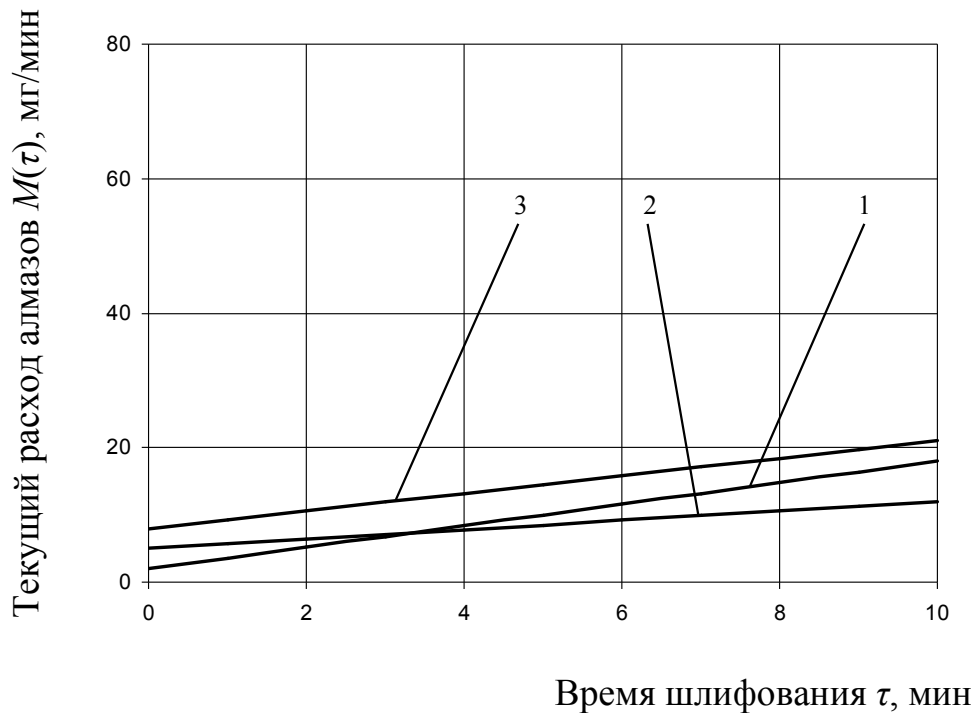
Таблица 6.7 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК во время периодических электроэрозионных воздействий

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов $M(\tau)$, мг/мин
АС6 100/80-4-М2-01	$Q(\tau) = 30 + 57 \cdot \tau$	$M(\tau) = 2 + 1,6 \cdot \tau$
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 32 + 82 \cdot \tau$	$M(\tau) = 5 + 0,7 \cdot \tau$
АС6 200/160-4-М2-01	$Q(\tau) = 81 + 89 \cdot \tau$	$M(\tau) = 8 + 1,3 \cdot \tau$

Расчет оптимальных значений периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» выполняли на ПЭВМ по критерию минимальной удельной себестоимости по специально разработанной программе, реализующей методики, описанные в п. 5.3.2. В качестве исходных данных использовали данные таблиц 6.5, 6.7 и элементы себестоимости (табл. 6.8) [181].



а



б

Рисунок 6.2 – Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании стали Р6М5Ф3 с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК

во время периодических электроэрозионных воздействий:

- 1 – круг 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01,
- 2 – круг 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01,
- 3 – круг 1А1 250×76×15×5 АС6 200/160-4-М2-01

Таблица 6.8 – Исходные данные для расчета технологической себестоимости при шлифовании стали Р6М5Ф3

Группа параметров	Наименование параметра, размерность	Числовое значение
1	2	3
Элементы себестоимости	Средняя заработная плата в отрасли Z_o , руб/месяц	6876
	Номинальный фонд рабочего времени Φ_{pv} , мин/месяц	10560
	Начальная стоимость станка C_{cm} , руб	222400
	Начальная стоимость ИТТ-35 C_{umm} , руб	10000
	Номинальный фонд рабочего времени оборудования в 2-е смены по 8 часов при 300 рабочих днях в году Φ_o , мин	288000
	Коэффициент загрузки оборудования $K_{заг}$	0,7
	Норма годовой амортизации H_a	0,15
	Категория ремонтной сложности механической части оборудования K_M	12,5
	Средние затраты на текущий ремонт и содержание оборудования на единицу ремонтной сложности механической части за час работы $Z_{1м}$, руб/час	0,058
	Категория ремонтной сложности электрической части оборудования $K_э$	12
	Средние затраты на текущий ремонт и содержание оборудования на единицу ремонтной сложности электрической части за час работы $Z_{1э}$, руб/час	0,068
	Стоимость 1кВтч электрической энергии $C_{1кВтч}$, руб/кВтч	1,6
	Мощность двигателя насоса гидропривода продольной подачи стола станка N_2 , кВт	0,55
	Мощность двигателя насоса подачи СОТС N_o , кВт	0,15
	КПД главного привода η_{zn}	0,8
	Стоимость алмаза зернистостью 100/80 C_a , руб/карат	1,44
	Стоимость алмаза зернистостью 160/125 C_a , руб/карат	1,64
	Стоимость алмаза зернистостью 200/160 C_a , руб/карат	1,82

Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазными кругами различных зернистостей показано на графиках, приведенных на рис. 6.3 - 6.5.

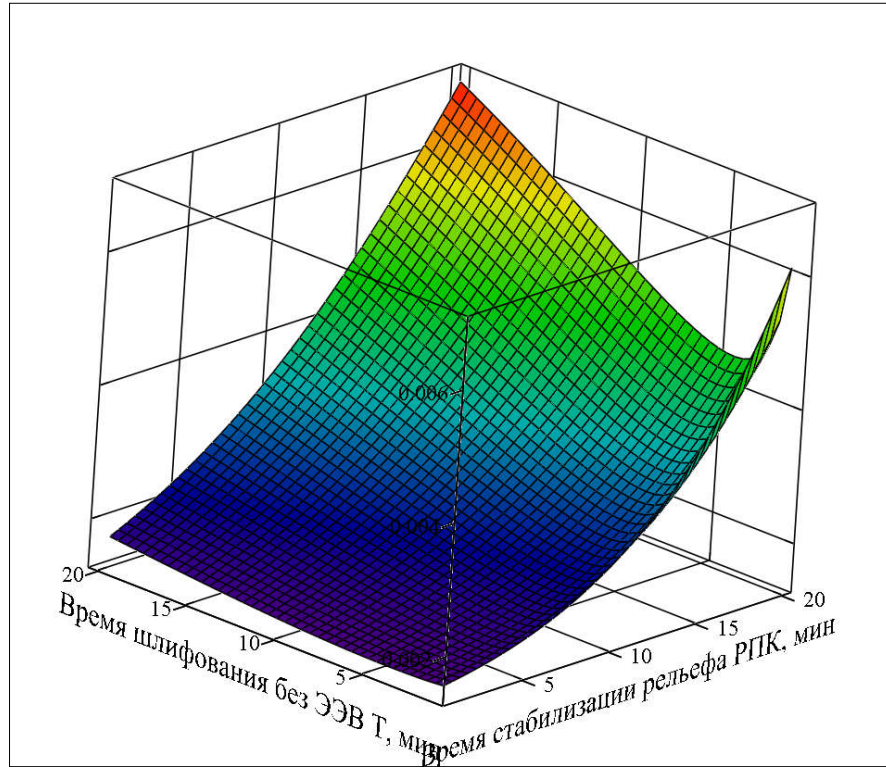


Рисунок 6.3 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01

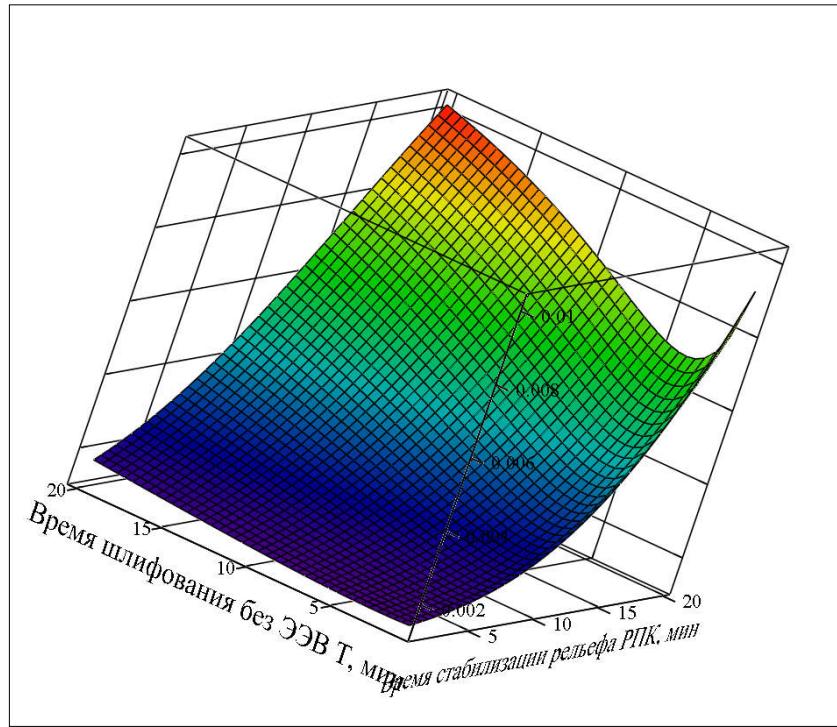


Рисунок 6.4 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 160/125-4-М2-01

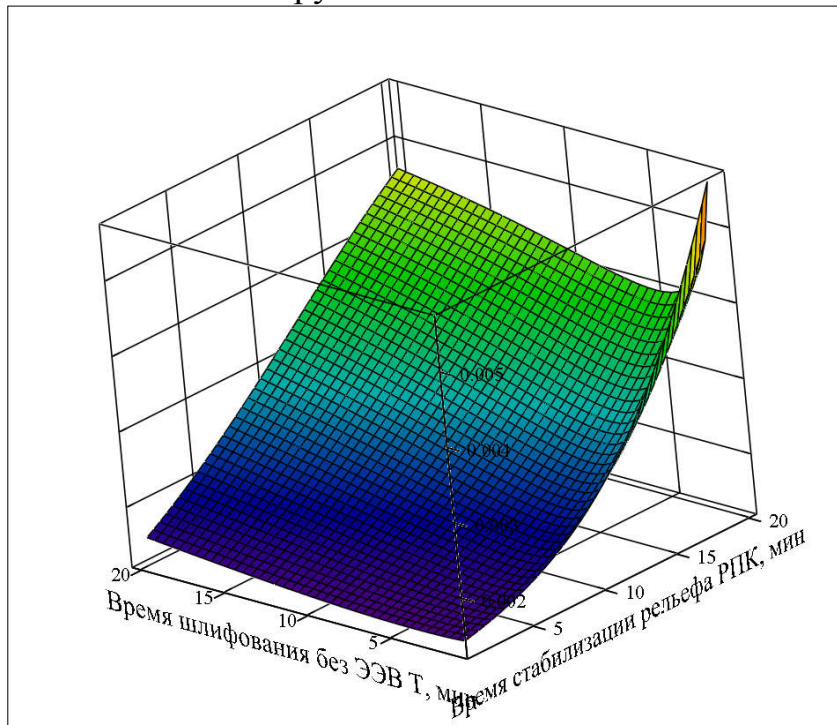


Рисунок 6.5 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 200/160-4-М2-01

В результате решения задачи оптимизации найдены оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», которые приведены в табл. 6.9.

Таблица 6.9 – Оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей

Наименование периода	Зернистость		
	100/80	160/125	200/160
Время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , мин	0,01	0,01	0,01
Время шлифования без ЭЭВ, T , мин	5,41	4,28	5,54
Время шлифования с ЭЭВ, $\tau_{ЭЭВ}$, мин	5,66	5,48	5,16

При этом минимальная удельная себестоимость шлифования с периодическими ЭЭВ на РПК быстрорежущей стали Р6М5Ф3 составила:

- для круга зернистостью 100/80 $C_{y\partial \min} = 0,00276 \text{ руб/мм}^3$;
- для круга зернистостью 160/125 $C_{y\partial \min} = 0,00240 \text{ руб/мм}^3$;
- для круга зернистостью 200/160 $C_{y\partial \min} = 0,00254 \text{ руб/мм}^3$.

Из табл. 6.9 следует, что время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , пренебрежимо мало по сравнению со временем периода шлифования без ЭЭВ, T , и временем шлифования с ЭЭВ, осуществляемыми одновременно с обработкой, $\tau_{ЭЭВ}$. Следовательно, при оптимизации периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» это время можно не учитывать.

6.1.6 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании с фиксированными режимными параметрами стали Р6М5Ф3 с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК

Используя данные табл. 6.9, по формуле (5.13) были рассчитаны средние значения силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК, осуществляемых одновременно со шлифованием. Результаты расчетов при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 приведены в табл. 6.10.

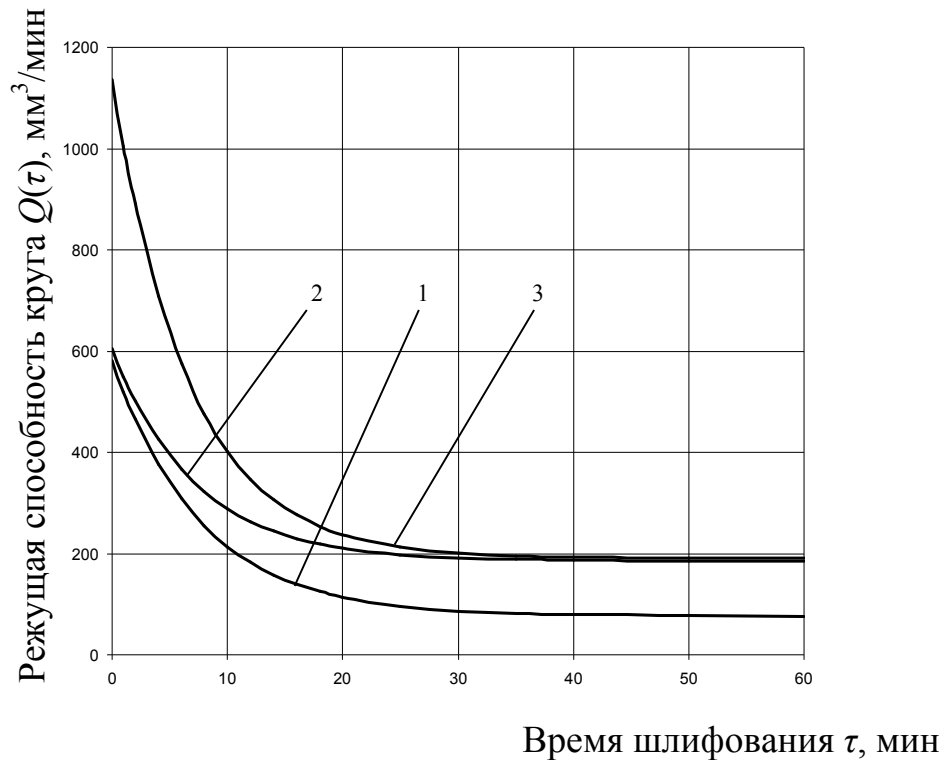
Таблица 6.10 – Оптимальные значения средней силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей

Наименование элемента режима	Зернистость		
	100/80	160/125	200/160
Средняя сила тока электроэрозионных воздействий $I_{срн}, А$	5,11	5,61	4,82

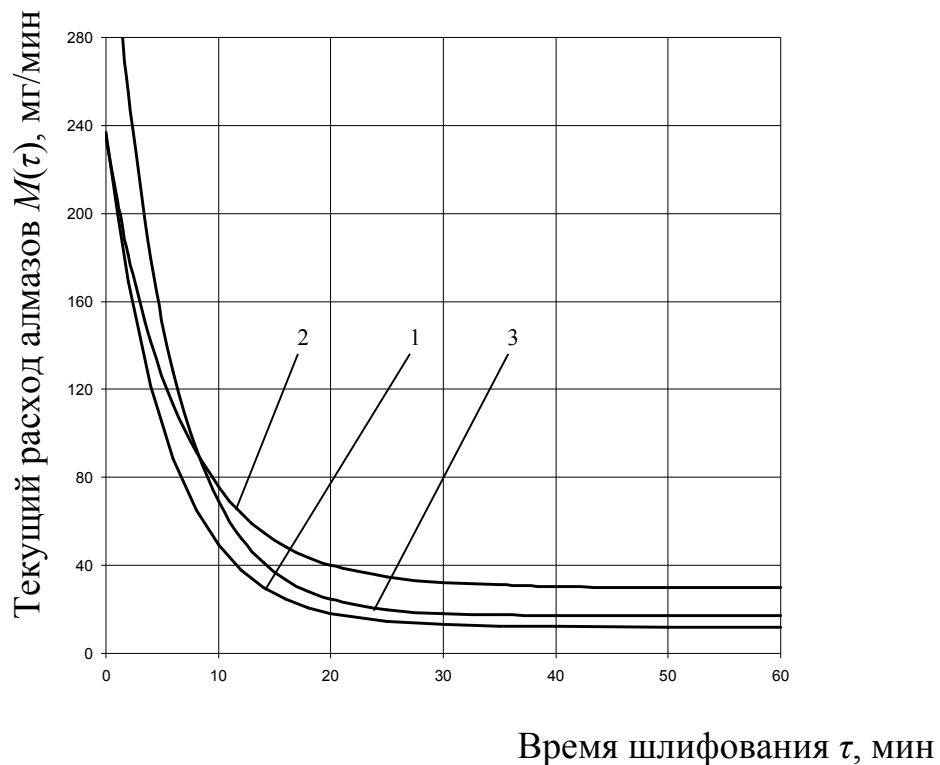
На указанных в табл. 6.10 электрических режимах непрерывных воздействий на РПК было осуществлено шлифование стали Р6М5Ф3 по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к РПК, имея целью определение законов изменения ТЛРСШК и текущего расхода алмазов во время шлифования с непрерывными ЭЭВ (рис. 6.6). Параметры уравнений, описывающие эти законы изменения, приведены в табл. 6.11.

Фактическую глубину (величину вертикальной подачи S_g) при шлифовании по схеме с фиксированными режимами заготовки с размерами $B_d \times L_d = 15 \times 100$ мм рассчитаем по установившемуся значению режущей способности $Q(\tau)_{уст}$ (см. табл. 6.11, 2-й столбец) в процессе шлифования по схеме с фиксированной силой поджима с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК по формуле

$$t_\phi = \frac{L_d + 2l_{неп}}{1000V_{см}B_d \cdot L_d} Q(\tau)_{уст}. \quad (6.2)$$



а



б

Рисунок 6.6 – Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании заготовки из стали Р6М5Ф3 с фиксированным усилием поджима заготовки при непрерывных электроэрозионных воздействиях на РПК:
 1 – круг АС6 100/80-4-М2-01; 2 – круг АС6 160/125-4-М2-01;
 3 – круг АС6 200/160-4-М2-01

Таблица 6.11 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования стали Р6М5Ф3 с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК при непрерывных электроэрозионных воздействиях на РПК

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК во времени $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов во времени $M(\tau)$, мг/мин
1	2	3
АС6 100/80-4-М2-01	$Q(\tau) = 76 + 506 e^{-0,13 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 12 + 225 \cdot e^{-0,18 \cdot \tau}$
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 185 + 420 e^{-0,14 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 30 + 204 \cdot e^{-0,15 \cdot \tau}$
АС6 200/160-4-М2-01	$Q(\tau) = 190 + 946 e^{-0,15 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 17 + 348 \cdot e^{-0,19 \cdot \tau}$

Результаты расчета t_{ϕ} (подачи на врезание) по формуле (6.2) и рациональные режимы плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 по схеме с фиксированными режимными параметрами при непрерывных электроэрозионных воздействиях приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12 – Рациональные режимы плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 по схеме с фиксированными режимными параметрами с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК для алмазных кругов различных зернистостей

Шлифовальный круг	Установившееся значение ТЛРСШК $Q(\tau)_{уст}$, мм ³ /мин	Режимы обработки			
		S_{ϕ} , мм/ход	V_{κ} , м/с	$V_{ст}$, м/мин	$I_{ср н}$, А
АС6 100/80-4-М2-01	76	0,0010	35	6	5
АС6 160/125-4-М2-01	185	0,0024			
АС6 200/160-4-М2-01	190	0,0025			

6.1.7 Проверка оптимальности найденных значений средней силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий

Для подтверждения того, что найденное значение силы тока обеспечивает минимум удельной себестоимости обработки, воспользуемся экспериментальными данными В.В. Габитова [181]. В процессе эксперимента обрабатывали образец размерами 15×100 мм из стали Р6М5Ф3 на режимах: $V_k = 35$ м/с, $V_{cm} = 6$ м/мин, сила поджима заготовки к РПК 80 Н. Силу тока непрерывных электроэрозионных воздействий изменяли от 2 А до 8 А с шагом 2 А (табл. 6.13).

Таблица 6.13 – Влияние силы тока непрерывных ЭЭВ на текущую лимитированную режущую способность круга $Q(\tau)$ и текущий расход алмазов $M(\tau)$ при шлифовании стали Р6М5Ф3

Шлифовальный круг	Сила тока ЭЭВ I_n , А	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода СТМ $M(\tau)$, мг/мин
АС6 100/80-4-М2-01	Без ЭЭВ	$Q(\tau)=13,7+650,4 e^{-0,17\tau}$	$M(\tau)=1,7+175,6\cdot e^{-0,3\tau}$
	2	$Q(\tau)=33,0+572 e^{-0,19\tau}$	$M(\tau)=4,1+327,4\cdot e^{-0,4\tau}$
	4	$Q(\tau)=38,6+627,4 e^{-0,15\tau}$	$M(\tau)=7,0+328,9\cdot e^{-0,4\tau}$
	6	$Q(\tau)=67,3+514,4 e^{-0,14\tau}$	$M(\tau)=14,0+223,0\cdot e^{-0,45\tau}$
	8	$Q(\tau)=97,0+607,0 e^{-0,3\tau}$	$M(\tau)=36,0+254,0\cdot e^{-0,45\tau}$

С использованием приведенных в табл. 6.13 зависимостей, описывающих изменение ТЛРСШК и текущего расхода алмазов во время обработки, проанализируем влияние силы тока непрерывных ЭЭВ на среднюю производительность обработки, средний расход алмазов и удельную себестоимость обработки за станко-час шлифования стали Р6М5Ф3 кругом АС6 100/80-4-М2-01. Результаты расчетов соответствующих величин, выполненных с применением методик, изложенных в п. 5.3.2, приведены в табл. 6.14.

Таблица 6.14 – Влияние силы тока непрерывных ЭЭВ на РПК на среднюю производительность, средний расход алмазов и удельную себестоимость обработки за станко-час шлифования стали Р6М5Ф3 кругом АС6 100/80-4-М2-01

Шлифовальный круг	Сила тока ЭЭВ I_n , А	Средняя производительность $Q_{ср}$, мм ³ /мин	Средний расход алмазов $M_{ср}$, мг/мин	Себестоимость шлифования C , руб/час	Уд. себестоимость $C_{уд}$, руб/мм ³	Изменение уд. себестоимости, %
АС6 100/80-4- М2-01	Без ЭЭВ	77,5	11,5	190,8	0,0410	0
	2	83,2	17,7	207,6	0,0416	+ 1,5 %
	4	108,3	20,7	208,8	0,0322	– 21,5 %
	6	128,5	22,3	209,6	0,0272	– 33,7 %
	8	130,7	45,4	219,6	0,0280	– 31,7 %

Как видно из табл. 6.14, минимум удельной себестоимости соответствует силе тока непрерывных ЭЭВ 6 А, а удельная себестоимость обработки при силе тока 8 А отличается на от себестоимости при силе тока 6 А на 2 %. Полученные результаты подтверждают правильность определения средней силы тока воздействий с использованием оптимальных длительностей периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ».

6.1.8 Техничко-экономические показатели шлифования стали Р6М5Ф3 различными способами

Проведенные исследования позволили определить следующие технико-экономические показатели процесса шлифования стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК (табл. 6.15):

- объём сошлифованного материала, мм³;
- массу израсходованных алмазов, карат;
- себестоимость станко-часа шлифования, руб/час;
- удельную себестоимость шлифования, руб/мм³.

Таблица 6.15 – Техничко-экономические показатели шлифования стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК исследованными способами и алмазными кругами различной зернистости

Зернистость круга	Способ шлифования	Объем сошлифованного материала, мм ³	Масса израсходованных алмазов, карат	Себестоимость шлифования, руб/час	Удельная себестоимость шлифования руб/мм ³
100/80	Без ЭЭВ	8346	1340	59,58	0,00714
	С периодическими ЭЭВ	34860	6428	96,26	0,00276
	С непрерывными ЭЭВ	8451	1970	64,16	0,00760
160/125	Без ЭЭВ	7479	1095	59,04	0,00790
	С периодическими ЭЭВ	39490	5448	94,78	0,00240
	С непрерывными ЭЭВ	14100	3160	76,00	0,00540
200/160	Без ЭЭВ	11760	1713	65,54	0,00558
	С периодическими ЭЭВ	43960	6808	111,94	0,00254
	С непрерывными ЭЭВ	17710	2852	75,92	0,00428

Данные, приведенные в табл. 6.15, показывают, что для всех трёх исследованных зернистостей алмазных шлифовальных кругов минимальную удельную себестоимость обработки обеспечивает шлифование с периодическими ЭЭВ на рабочую поверхность круга для восстановления её высоких режущих свойств. При этом удельная себестоимость шлифования без ЭЭВ выше в 2,2-3,4 раза, а удельная себестоимость шлифования с непрерывными ЭЭВ выше в 1,7-2,8 раза, чем удельная себестоимость шлифования с периодическими ЭЭВ, что позволяет рекомендовать этот способ обработки для шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей.

6.2 Определение режимов плоского шлифования твердых сплавов группы ВК

6.2.1 Определение коэффициента, учитывающего влияние особенностей разрушения материала на параметры шероховатости шлифованной поверхности для твердого сплава группы ВК

Аналитическая модель формирования параметров шероховатости обработанной поверхности, предложенная в работе [139], основана на допущениях о том, что геометрический фактор в этом процессе доминирует, а обрабатываемый материал является однородным и изотропным. К твердым сплавам эти допущения не применимы, поэтому параметры шероховатости при их обработке приходится определять экспериментально, что является весьма трудоемкой задачей. Для упрощения решения задачи определения средней высоты неровностей профиля обработанной поверхности изделий из твердых сплавов влияние неоднородности материала и наличия элементов хрупкого разрушения будем учитывать с помощью поправочного коэффициента (4.6). Соответственно, за эталонный материал примем быстрорежущую сталь Р6М5Ф3; при этом средняя высота неровностей профиля обработанной поверхности R_a при шлифовании твердого сплава определится по следующей зависимости:

$$R_{a\text{ тв.с}} = R_{a\text{ Р6М5Ф3}} \cdot K_{\text{тв.с}}, \quad (6.3)$$

где $R_{a\text{ тв.с}}$ – среднеарифметическое отклонение высоты профиля шлифованной поверхности заготовок из твердого сплава;

$R_{a\text{ Р6М5Ф3}}$ – рассчитанное аналитически среднеарифметическое отклонение высоты профиля шлифованной поверхности стали Р6М5Ф3;

$K_{\text{тв.с}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий отличие параметра R_a при шлифовании твердого сплава по сравнению с эталонным материалом.

Поправочные коэффициенты $K_{\text{тв.с}}$ определим экспериментально при врезном шлифовании образцов из твердых сплавов ВК6, ВК8, ВК15 и быстрорежущей стали Р6М5Ф3 на плоскошлифовальном станке модели ЗД711АФ11, модернизи-

рованном для осуществления электроэрозионной правки и шлифования с электроэрозионными воздействиями на РПК (см. рис. 2.2).

Крепление образцов из твердых сплавов и быстрорежущей стали Р6М5Ф3 осуществлялось в струбцине, которая устанавливалась на магнитную плиту стола станка модели 3Д711АФ11 (рис. 6.7).

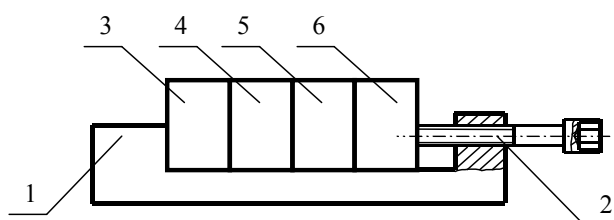


Рисунок 6.7 – Схема закрепления образцов в струбцине для установки на стол плоскошлифовального станка:

1 – струбцина; 2 – крепёжный винт; 3 – эталонный образец из быстрорежущей стали Р6М5Ф3; 4, 5, 6 – образцы из твердых сплавов марок, соответственно, ВК15, ВК8, ВК6

Источник технологического тока – блок электропитания модели ИТТ-35, рабочая среда – 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды. Обработку образцов вели алмазным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01. Перед экспериментом круг правили электроэрозионным способом на медном электроде из меди М1. Режимы правки: скорость круга $V_k = 35$ м/с, продольная скорость стола $V_{cm} = 6$ м/мин; поперечная подача $S_n = 2,5$ мм/ход, глубина резания $t = 2 - 5$ мкм; напряжение холостого хода $U_{xx} = 60$ В, средняя сила тока $I = 5-8$ А.

Параметр шероховатости R_a измеряли с помощью профилометра модели 296 на образцах, обработанных врезным шлифованием кругом с рельефом, сформированным электроэрозионным способом, и со стабилизировавшимся рельефом рабочей поверхности на следующих режимах: $V_k = 35$ м/с, $t = 15$ мкм, $V_{cm} = 3, 6, 9$ и 12 м/мин. Для стабилизации рельефа РПК перед обработкой экспериментальных образцов производилась приработка рабочей поверхности круга на твердом спла-

ве ВК6 в течение 15 мин. На образце из каждого материала проводилось не менее 6 измерений параметра шероховатости R_a .

Среднеарифметическая высота неровностей обработанной поверхности стали Р6М5Ф3 после шлифования рельефом рабочей поверхности круга, сформированным электроэрозионным способом, составила $R_{a \text{ Р6М5Ф3}} = 1,90 \pm 0,029$ мкм, а при шлифовании сплава ВК6 – $R_{a \text{ вк.с}} = 2,73 \pm 0,057$ мкм. Таким образом, величина поправочного коэффициента при шлифовании рельефом рабочей поверхности круга, сформированным электроэрозионным способом, $K_{\text{вк.с}} = 1,43$ [144].

Влияние скорости стола на параметр шероховатости R_a при обработке различных марок твердых сплавов кругом со стабилизировавшимся рельефом РПК показано на рис. 6.8.

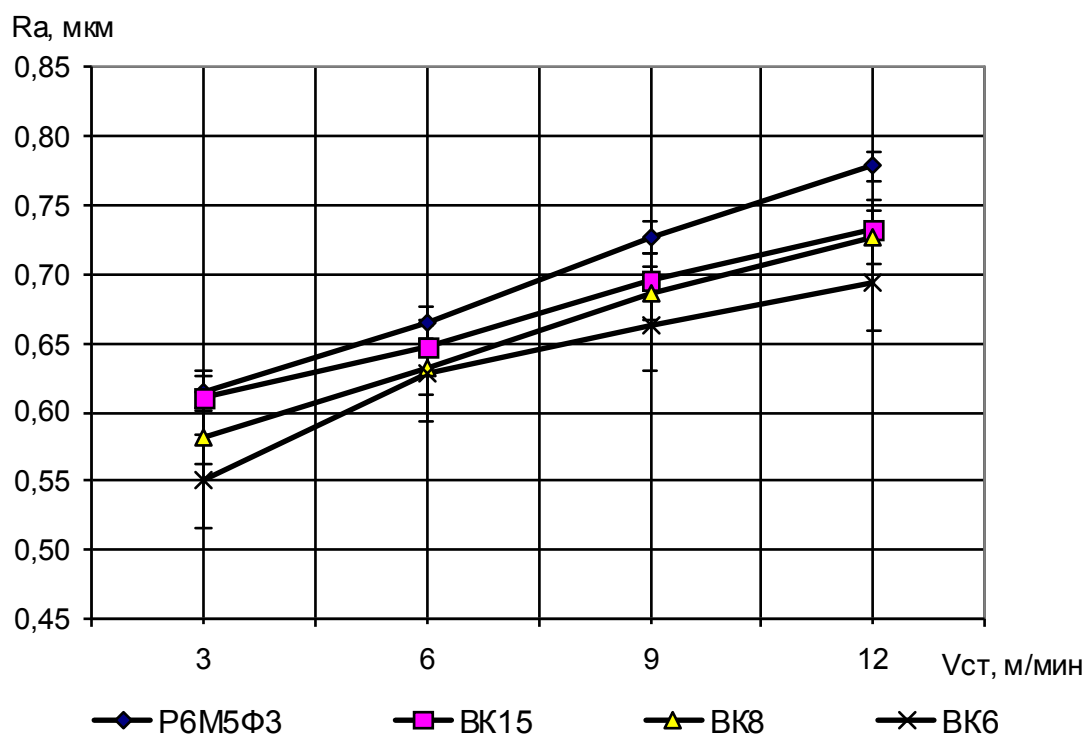


Рисунок 6.8 – Влияние скорости стола плоскошлифовального станка на шероховатость обработанной поверхности образцов из твёрдых сплавов различных марок

Используя данные рис. 6.8, по средним значениям параметров шероховатости $R_{a \text{ Р6М5Ф3}}$ при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и твердых сплавов на

основании формулы (6.3) были определены значения коэффициентов $K_{mv.c}$ (табл. 6.16).

Таблица 6.16 – Значения коэффициента $K_{mv.c}$, отражающего соотношение параметров шероховатостей, сформированных при обработке твёрдых сплавов группы ВК и быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01 со стабилизировавшимся рельефом РПК

Обрабатываемые материалы		Значения коэффициента $K_{mv.c}$ при скорости продольного хода стола V_d , м/мин				
		3	6	9	12	$K_{mv.c\text{ ср}}$
Р6М5Ф3	ВК6	0,894	0,945	0,913	0,891	0,91
	ВК8	0,946	0,950	0,945	0,934	0,94
	ВК15	0,992	0,972	0,956	0,942	0,97

Как следует из табл. 6.16, значения коэффициента $K_{mv.c}$ при шлифовании с различной скоростью стола находятся в пределах 0,91-0,97 и возрастают по мере увеличения содержания кобальта в составе твёрдого сплава, приближаясь к единице. При шлифовании кругом, рельеф которого сформирован электроэрозионной правкой, значение $K_{mv.c} = 1,43$ объясняется неоднородностью структуры твердых сплавов, влияние которой проявляется сильнее на более высоких значениях параметра шероховатости R_a [144].

6.2.2 Расчет технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и шлифовальным кругом

Исходными данными при расчете скорости детали, ограниченной заданным параметром шероховатости R_a , для твердых сплавов группы ВК являются скорость шлифовального круга V_k , обусловленная паспортными данными станка либо допустимой скоростью шлифовального круга, а также параметры рабочей по-

верхности, определяемые паспортными характеристиками шлифовального круга (см. табл. 6.1).

Используя приведенные в табл. 6.1 параметры РПК для кругов исследуемых характеристик, по методике, изложенной в подразделе 4.1, по заданным параметрам шероховатости R_a (табл. 6.17) с учётом поправочных коэффициентов из табл. 6.16 была рассчитана скорость детали, обеспечивающая получение необходимого значения этого параметра при врезном шлифовании твердых сплавов марок ВК15, ВК8, ВК6 с фиксированными режимами. Условия обработки: скорость шлифовального круга $V_k = 35$ м/с, фактическая глубина шлифования $t_{\phi} = 0,015$ мм, интервал расчета $\Delta R = 0,2$ мкм, радиус шлифовального круга $R_k = 125$ мм.

Таблица 6.17 – Скорость детали, обеспечивающая заданные параметры шероховатости R_a при врезном шлифовании твердых сплавов марок ВК15, ВК8, ВК6

Шлифовальный круг	Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Базовая длина $l_{баз}$, мм	Скорость детали V_d , м/мин
АС6 100/80-4-M2-01	2,3	0,8	6
АС6 160/125-4-M2-01	3,2		
АС6 200/160-4-M2-01	3,2		

Аналогично п. 6.1.2 в табл. 6.17 параметры шероховатости R_a заданы таким образом, чтобы режимы резания при шлифовании кругами различных характеристик были идентичными, что обеспечит одинаковые условия обработки с максимальной производительностью.

Лимитированное значение силы поджима заготовок из твердых сплавов марок ВК15, ВК8, ВК6 к РПК найдем как наименьшую величину из сил поджима заготовки к РПК, ограниченных температурой окисления алмазов и прочностью алмазных зерен. Так как теплонапряженность шлифования твердых сплавов ниже,

чем шлифования ранее рассмотренных материалов, а теплостойкость твердых сплавов выше, чем у этих материалов, то учитывать в качестве технического ограничения на силу поджима заготовки температуру фазово-структурных превращений в обрабатываемом материале нет необходимости. Расчеты ограничивающих сил поджима заготовки к РПК выполним по методикам, изложенным в подразделах 4.2 - 4.4 с использованием математического пакета MathCAD (Приложение 3) по исходным данным, приведенным в табл. 6.18.

Таблица 6.18 – Исходные данные для расчета усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных изделием и шлифовальным кругом, при плоском врезном шлифовании твердых сплавов марок ВК15, ВК8, ВК6 алмазными кругами 1А1 250×76×15×5 АС6-4-М2-01 различной зернистости

Группа параметров	Наименование параметра, размерность	Числовое значение
1	2	3
Режимы обработки	Скорость круга V_k , м/с	35
	Продольная скорость стола V_{cm} , м/мин	6
Параметры твердых сплавов ВК15, ВК8, ВК6	Коэффициент температуропроводности WC , a , м ² /с	$0,20 \cdot 10^{-6}$
	Коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК6, Вт/м·град	62,8
	Коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК8 λ , Вт/м·град	50,2
	Коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК15 λ , Вт/м·град	67,0
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	0,29

Результаты расчета допустимых значений составляющих сил резания, ограниченных изделием и шлифовальным кругом (для двух условий), при плоском врезном шлифовании твердых сплавов марок ВК15, ВК8, ВК6 кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 на связке М2-01 различной зернистости приведены в табл. 6.19. Как видно из табл. 6.19, при шлифовании твердых сплавов группы ВК лимитированной силой поджима заготовки к РПК является сила, определенная по температуре окисления алмазных зёрен.

Таблица 6.19 – Допустимые значения тангенциальной P_z , и радиальной P_y составляющих силы резания при плоском врезном шлифовании твердых сплавов марок ВК15, ВК8, ВК6 кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 на связке М2-01 различной зернистости в зависимости от технических ограничений

Техническое ограничение	100/80		160/125		200/160	
	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н
Температура окисления алмазных зёрен (твердый сплав ВК6)	32,1	100	30,7	95,8	46,3	145
Температура окисления алмазных зёрен (твердый сплав ВК8)	32,9	103	31,5	98	47,3	148
Температура окисления алмазных зёрен (твердый сплав ВК15)	36,5	114	34,1	107	54	169
Механическая прочность алмазных зёрен	51,4	177,3	56,9	196	101	349

Таким образом, обобщенными режимами плоского врезного шлифования твердого сплава ВК6 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК будут скорость стола $V_{cm} = 6$ м/мин и силы поджима заготовки к РПК: для круга зернистостью 100/80 – $P_n = 100$ Н, зернистостью 160/125 – $P_n = 95,8$ Н, зернистостью 200/160 – $P_n = 145$ Н; плоского врезного шлифования твердого сплава ВК8 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК – скорость стола $V_{cm} = 6$ м/мин и силы поджима заготовки к РПК: для круга зернистостью 100/80 $P_n = 103$ Н, зернистостью 160/125 – $P_n = 98$ Н, зернистостью 200/160 – $P_n = 148$ Н; плоского врезного шлифования твердого сплава ВК15 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК – скорость стола $V_{cm} = 6$ м/мин и силы поджима заготовки к РПК: для круга зернистостью 100/80 – $P_n = 114$ Н, зернистостью 160/125 – $P_n = 107$ Н, зернисто-

стью 200/160 – $P_n = 169$ Н. На указанных режимах будут проведены эксперименты по исследованию влияния зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга.

6.2.3 Влияние зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга при шлифовании твердого сплава ВК8

Исследование влияния зернистости алмазов на текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга осуществляли экспериментально с постоянным усилием поджима заготовки к РПК на плоскошлифовальном станке модели 3Д711АФ11, модернизированном для осуществления электроэрозионных воздействий на РПК (см. рис. 2.2).

Как было установлено, изменение производительности обработки, и, соответственно, режущей способности алмазного круга при плоском врезном шлифовании твердых сплавов марок ВК15, ВК8, ВК6 статистически незначительно [183], вследствие чего эксперимент может быть проведен для любой из указанных марок, а его результаты будут справедливы для всех сплавов группы ВК.

Плоское врезное шлифование выполняли кругами из синтетических алмазов АС6 прямого профиля 1А1 250×76×15 на металлической связке М2-01, 100%-й концентрации зерен, трех зернистостей 100/80, 160/125 и 200/160. Учитывая значения лимитированных усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных температурой окисления алмазных зёрен, с целью получения сопоставимых результатов шлифование выполняли с усилием поджима заготовки к РПК, равном $P_n = 100$ Н. Скорость круга назначали максимальной для плоскошлифовального станка модели 3Д711АФ11: $V_k = 35$ м/с. Продольная скорость стола для всех зернистостей составляла $V_{cm} = 6$ м/мин.

По данным эксперимента были построены графики зависимостей текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ [184] и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ от времени шлифования, а также выведены соответствующие уравнения

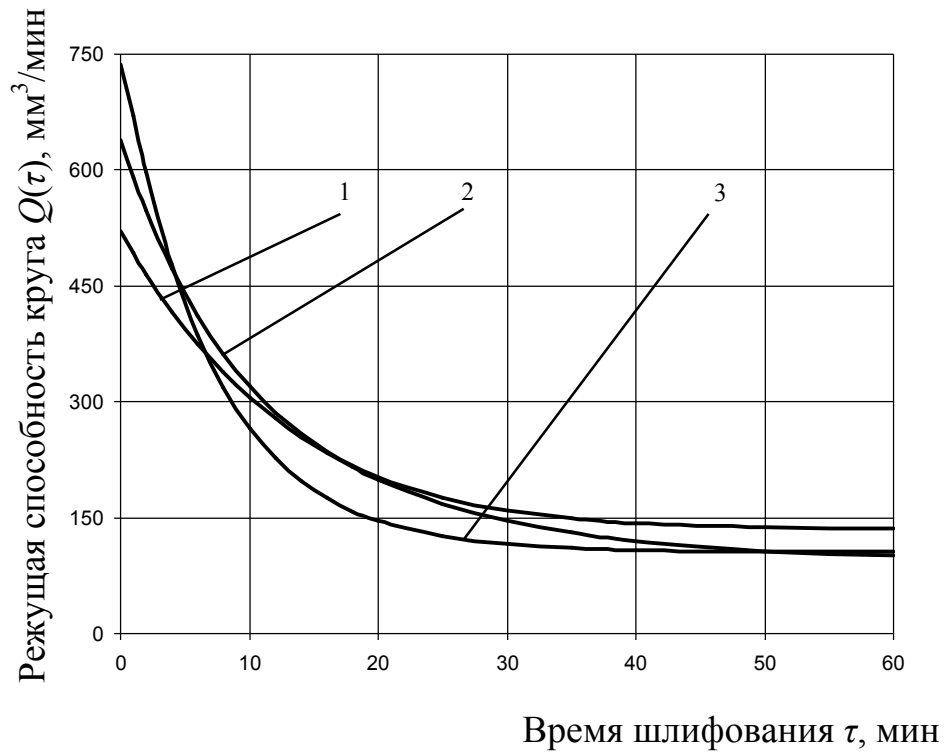
регрессии в виде выражений (5.16) и (5.18). Параметры уравнений приведены в табл. 6.20, а графики – на рис. 6.9 а, б.

Таблица 6.20 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования твердого сплава ВК8 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК

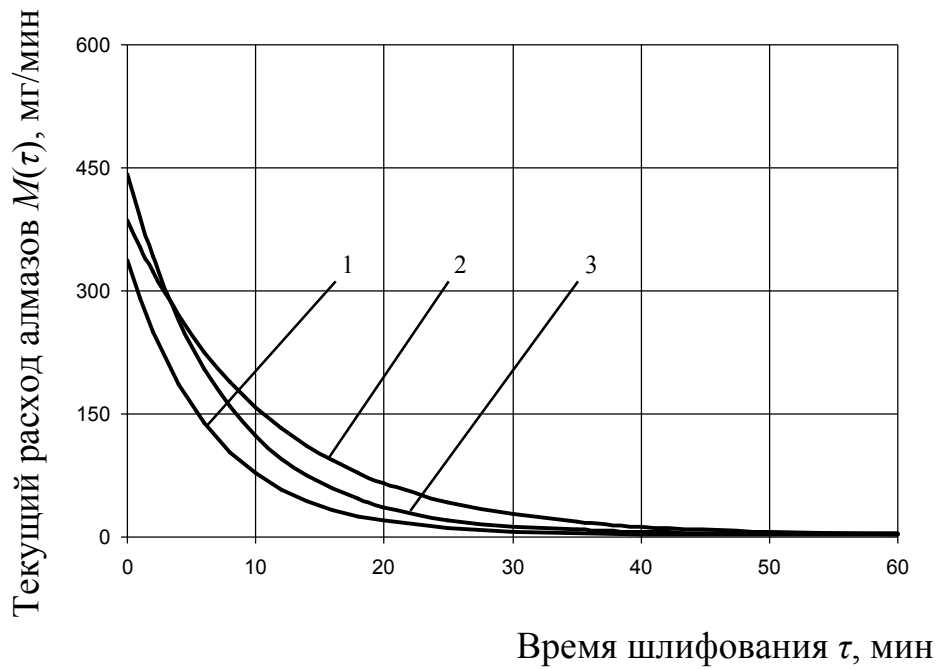
Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК во времени $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов во времени $M(\tau)$, мг/мин
АС6 100/80-4-М2-01	$Q(\tau) = 94 + 327 e^{-0,07 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 3 + 334 \cdot e^{-0,15 \cdot \tau}$
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 134 + 505 e^{-0,10 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 2 + 384 \cdot e^{-0,09 \cdot \tau}$
АС6 200/160-4-М2-01	$Q(\tau) = 106 + 631 e^{-0,14 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 4 + 438 \cdot e^{-0,13 \cdot \tau}$

Как видно из приведенных графиков, а также характера полученных уравнений (см. табл. 6.20), первые 30 минут обработки характеризуются интенсивным снижением ТЛРСШК, а затем снижение режущей способности практически прекращается. Режущая способность кругов при обработке твердого сплава ВК8 стабилизируется на существенно более высоком уровне, чем при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3. Это подтверждает визуально наблюдаемое незначительное засаливание межзеренного пространства РПК и микрорельефа контактных площадок на зернах при шлифовании заготовок из твердых сплавов группы ВК.

Аналогично обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 уменьшение режущей способности круга в начале обработки обусловлено интенсивным выпадением наиболее выступающих зерен, в результате чего количество одновременно режущих зерен увеличивается, что приводит к уменьшению фактической глубины шлифования при постоянном усилии поджима заготовки к РПК. Так же, как и при обработке стали Р6М5Ф3, интенсивное выпадение зерен из связки подтверждается резко увеличенным расходом алмазов на первых 30 минутах шлифования.



а



б

Рисунок 6.9 – Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании заготовки из твердого сплава ВК8 с постоянным усилием поджима заготовки к РПК:

- 1 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-01,
- 2 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 160/125-4-M2-01,
- 3 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 200/160-4-M2-01

6.2.4 Определение рациональных режимов шлифования твердого сплава ВК8 при отсутствии электроэрозионных воздействий на РПК

Используя уравнения, описывающие изменение ТЛРСШК во время обработки $Q(\tau)$ (см. табл. 6.20), уравнение, отражающее изменение фактической глубины шлифования t_ϕ при обработке заготовки из твердого сплава ВК8 с размерами обрабатываемой поверхности 14×50 мм при величине перебега $3,5$ мм, выведем по формуле (6.1).

Частота ходов стола при обработке указанной заготовки

$$n_{cm} = \frac{1000 \cdot 6}{50 + 2 \cdot 3,5} = 105 \text{ ход/мин.}$$

Уравнения вида (6.1), описывающие изменение фактической глубины шлифования, выведем в результате обработки экспериментальных данных, полученных при шлифовании заготовки из твердого сплава ВК8 при отсутствии ЭЭВ на РПК на режимах, приведенных в п. 6.2.3. Полученные методом наименьших квадратов уравнения сведены в табл. 6.21.

Таблица 6.21 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной фактической глубины шлифования (ТЛФГШ) t_ϕ в процессе шлифования заготовки из твердого сплава ВК8 размером 14×50 мм

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛФГШ во времени $t_\phi(\tau)$, мм
АС6 100/80-4-М2-01	$t_\phi(\tau) = 1,36 \cdot 10^{-5} (94 + 327 e^{-0,07 \cdot \tau})$
АС6 160/125-4-М2-01	$t_\phi(\tau) = 1,36 \cdot 10^{-5} (134 + 505 e^{-0,10 \cdot \tau})$
АС6 200/160-4-М2-01	$t_\phi(\tau) = 1,36 \cdot 10^{-5} (106 + 631 e^{-0,14 \cdot \tau})$

Для конкретных размеров заготовки по уравнениям, приведенным в табл. 6.21, определяется переменная фактическая глубина шлифования в соответствии с

длительностью периода дискретизации глубины. Скорости круга и обрабатываемой детали переносятся на схему шлифования с фиксированными режимными параметрами без изменений.

6.2.5 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании твердого сплава ВК8 с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК

Определение оптимальных режимов шлифования с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК выполняется экспериментальным путем с использованием шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к РПК, когда электроэрозионные воздействия на рабочую поверхность круга осуществляются периодически с известной величиной вводимой электрической энергии одновременно с процессом обработки. В процессе эксперимента определяются:

- закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования без ЭЭВ (см. табл. 6.20);
- закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ (см. табл. 6.20);
- закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК;
- закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК.

Эксперименты проводили на режимах: $V_k = 35$ м/с, $V_{cm} = 6$ м/мин и силе поджима заготовки к РПК $P_n = 100$ Н. Электроэрозионную правку круга осуществляли аналогично правке, описанной в п. 6.2.1. Электроэрозионные воздействия на РПК с целью восстановления режущей способности круга выполняли с величиной среднего тока $I_{cp} = 10$ А при напряжении холостого тока $U_{xx} = 60$ В. Рабочая среда – 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды.

В соответствии с экспериментальными данными изменения текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования с одновременными периодическими электроэрозионными воздейст-

виями на РПК с целью восстановления режущих свойств рабочей поверхности круга, описываются уравнениями прямых [184] (табл. 6.22), графики которых приведены на рис. 6.10.

Таблица 6.22 – Изменение текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования твердого сплава ВК8 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК во время периодических электроэрозионных воздействий

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов $M(\tau)$, мг/мин
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 51 + 37 \cdot \tau$	$M(\tau) = 18 + 18 \cdot \tau$

Сопоставив изменение текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК быстрорежущей стали Р6М5Ф3 (см. рис. 6.2) и твердого сплава ВК8 (см. рис. 6.10) для одинаковой зернистости круга 160/125, можно сделать два вывода:

1) ТЛРСШК при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК примерно в 2 раза превышает ТЛРСШК при обработке твердого сплава ВК8;

2) текущий расход алмазов при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК на порядок ниже, чем текущий расход алмазов при обработке твердого сплава ВК8.

Первый вывод объясняется более высокими механическими характеристиками твердых сплавов и более высоким содержанием карбидов, чем в стали Р6М5Ф3, а второй обусловлен отсутствием явления засаливания, вследствие чего электроэрозионные воздействия практически в полном объеме направлены на связку алмазоносного слоя круга, а не на продукты засаливания.

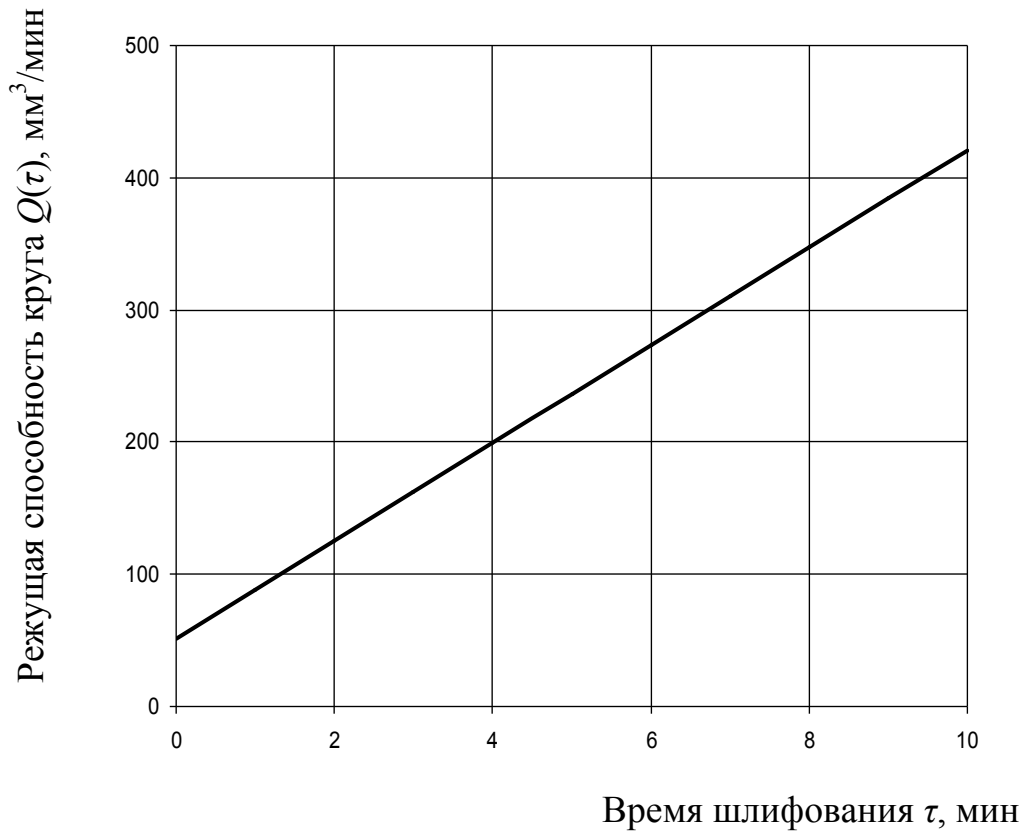
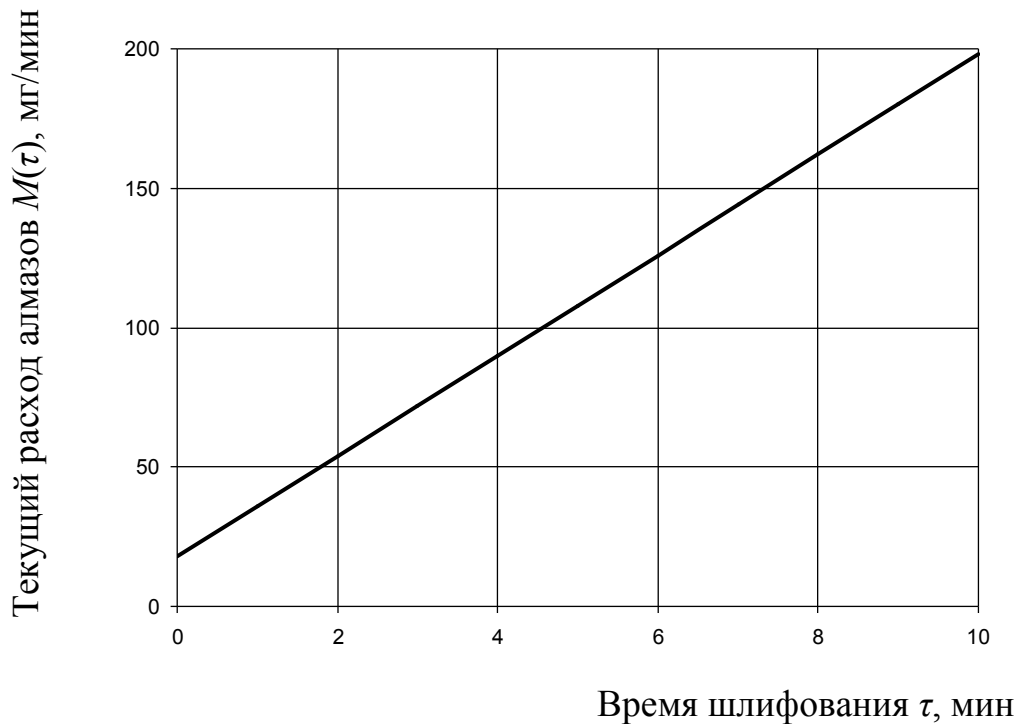
*a**б*

Рисунок 6.10 – Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании твердого сплава ВК8 алмазным кругом 1A1 250×76×15×5 AC6 160/125-4-M2-01 с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК во время периодических электроэрозионных воздействий

Расчет оптимальных значений периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» выполняли на ПЭВМ по критерию минимальной удельной себестоимости по специально разработанной программе, реализующей методику, описанную в п. 5.3.2. В качестве исходных данных использовали данные таблиц 6.20, 6.22 и элементы себестоимости (см. табл. 6.8) [181].

Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость шлифования твердого сплава ВК8 алмазными кругами различных зернистостей приведены на рис. 6.11 - 6.13.

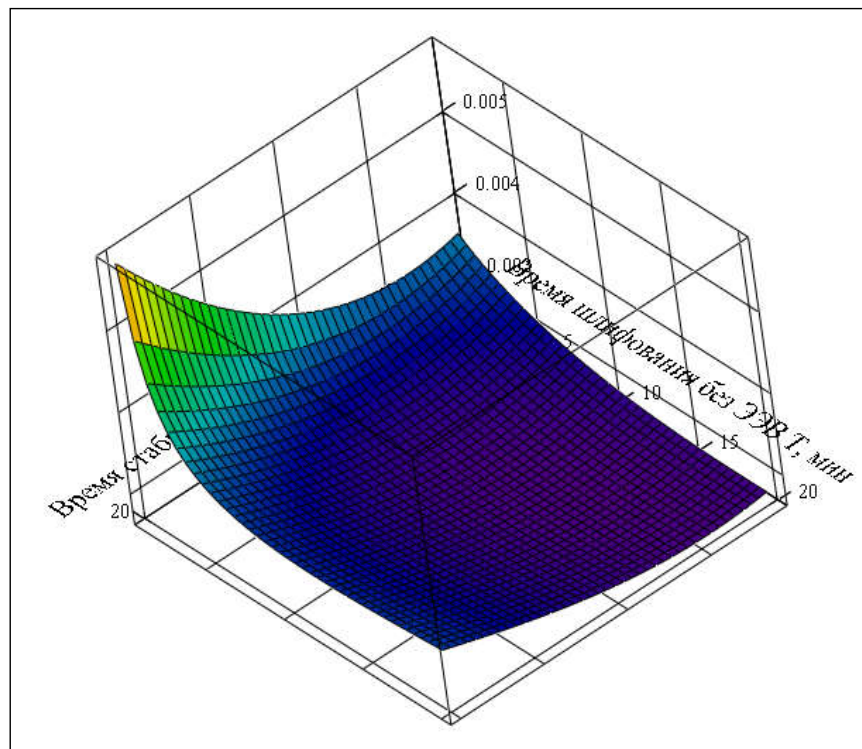


Рисунок 6.11 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования твердого сплава ВК8 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01

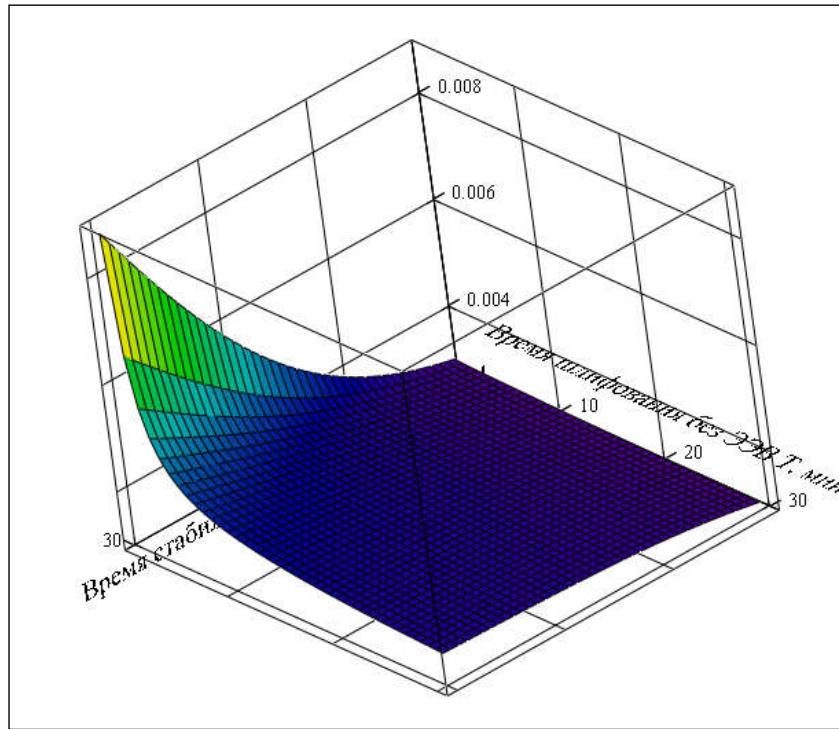


Рисунок 6.12 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, $\tau_{пр}$, и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования твердого сплава ВК8 алмазным кругом АС6 160/125-4-М2-01

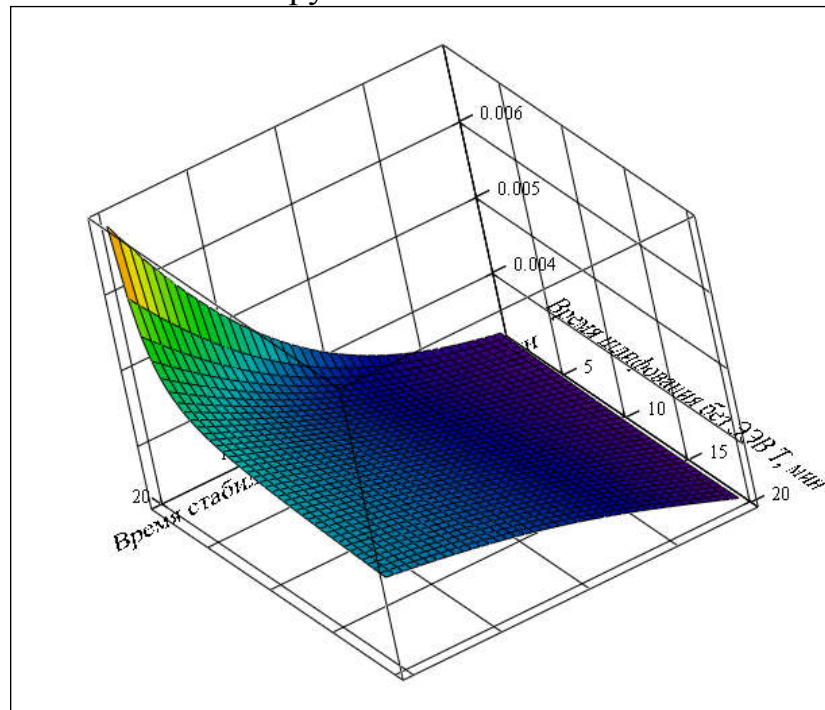


Рисунок 6.13 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, $\tau_{пр}$, и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования твердого сплава ВК8 алмазным кругом АС6 200/160-4-М2-01

В результате решения задачи оптимизации найдены оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», которые приведены в табл. 6.23. Полученное значение длительности шлифования без ЭЭВ T достаточно близко к значению оптимального интервала времени между ЭЭВ на РПК, полученному при однопараметрической оптимизации режимов ЭЭВ для алмазного круга АС6 100/80-4-М2-01 [185].

Таблица 6.23 – Оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» при обработке твердого сплава ВК8 кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей

Наименование периода	Зернистость		
	100/80	160/125	200/160
Время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , мин	1	0,01	0,01
Время шлифования без ЭЭВ, T , мин	18,8	31,2	16,8
Время шлифования с ЭЭВ, $\tau_{ЭЭВ}$, мин	6,03	13,1	15,4

Как видно из рис. 6.11 - 6.13 и табл. 6.23, для кругов зернистостью 160/125 и 200/160 время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, незначительно и его можно игнорировать при назначении режимов ЭЭВ. Для всех зернистостей время шлифования без ЭЭВ и время шлифования с воздействиями превышают аналогичные значения для случая обработки стали Р6М5Ф3. Это является подтверждением значительно меньшего влияния эффекта засаливания рабочей поверхности на снижение режущей способности алмазных кругов при обработке твердых сплавов группы ВК по сравнению с обработкой быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

Для приведенных в табл. 6.23 значений времени шлифования с ЭЭВ $\tau_{ЭЭВ}$ удельная себестоимость шлифования твердого сплава ВК8 с периодическими ЭЭВ на РПК составила:

- для круга зернистостью 100/80 $C_{уд \min} = 0,00558 \text{ руб/мм}^3$;
- для круга зернистостью 160/125 $C_{уд \min} = 0,00612 \text{ руб/мм}^3$;
- для круга зернистостью 200/160 $C_{уд \min} = 0,00654 \text{ руб/мм}^3$.

6.2.6 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании твердого сплава ВК8 с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК и назначение глубины шлифования по схеме с фиксированными режимными параметрами

Используя данные табл. 6.23, по формуле (5.13) были рассчитаны средние значения силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК, осуществляемых одновременно со шлифованием. Результаты расчетов при обработке твердого сплава ВК8 приведены в табл. 6.24.

Таблица 6.24 – Оптимальные значения средней силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий при обработке твердого сплава ВК8 кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей

Наименование элемента режима	Зернистость		
	100/80	160/125	200/160
Средняя сила тока электроэрозионных воздействий $I_{ср \text{ н}}, \text{ А}$	2,4	2,9	4,7

Переменную глубину шлифования при обработке заготовки из твердого сплава ВК8 по схеме с фиксированными режимными параметрами назначаем на основании данных табл. 6.21, задавшись предварительно величиной периода дискретизации, по истечении которого будет изменяться глубина шлифования (т.е. подача на врезание шлифовального круга).

Для шлифования алмазным кругом АС6 160/125-4-М2-01 принимаем период дискретизации 5 мин; соответствующие этому периоду значения фактической глубины шлифования при обработке заготовки из твердого сплава ВК8 приведены в табл. 6.25.

Таблица 6.25 – Назначение фактической глубины шлифования при шлифовании заготовки из твердого сплава ВК8 по схеме с фиксированными режимными параметрами при рациональном использовании режущей способности алмазного шлифовального круга АС6 160/125-4-М2-01

№ п/п	Время обработки, мин	Глубина шлифования t , мкм	Подача на врезание S_g , мм/ход
1	1-5	6	0,006
2	6-10	5	0,005
3	11-15	3,5	0,0035
4	16-20	3	0,003
5	21-25	2,5	0,0025
6	26-30	2,5	0,0025
7	31-35	2	0,002
8	36-40	2	0,002
9	41-45	2	0,002

6.2.7 Техничко-экономические показатели шлифования твердого сплава ВК8 различными способами

Проведенные исследования позволили определить следующие технико-экономические показатели шлифования твердого сплава ВК8 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК (табл. 6.26):

- объём сошлифованного материала, мм³;
- массу израсходованных алмазов, карат;
- себестоимость станко-часа шлифования, руб/час;

– удельную себестоимость шлифования, руб/мм³.

Таблица 6.26 – Техничко-экономические показатели шлифования твердого сплава ВК8 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК исследованными способами и алмазными кругами различной зернистости

Зернистость круга	Способ шлифования	Объем сошлифованного материала, мм ³	Масса израсходованных алмазов, карат	Себестоимость шлифования, руб/час	Удельная себестоимость шлифования руб/мм ³
100/80	Без ЭЭВ	10240	2406	67,66	0,00660
	С периодическими ЭЭВ	15970	5524	88,98	0,00558
	С непрерывными ЭЭВ	–	–	–	–
160/125	Без ЭЭВ	13080	4367	86,14	0,00658
	С периодическими ЭЭВ	17120	6906	104,86	0,00612
	С непрерывными ЭЭВ	–	–	–	–
200/160	Без ЭЭВ	10870	3608	84,28	0,00776
	С периодическими ЭЭВ	19910	5024	130,26	0,00654
	С непрерывными ЭЭВ	–	–	–	–

Данные, приведенные в табл. 6.26, показывают, что для всех трёх исследованных зернистостей алмазных шлифовальных кругов удельная себестоимость шлифования с периодическими ЭЭВ на рабочую поверхность круга для восстановления её высоких режущих свойств меньше, чем удельная себестоимость обработки без управляющих воздействий, на 10-20%. Таким образом, для алмазного шлифования твердых сплавов положительный эффект от использования периодических ЭЭВ на рабочую поверхность круга не настолько велик, как для труднообрабатываемых сталей, но явно проявляется для всех исследованных зернистостей кругов.

6.3 Определение режимов плоского шлифования титанового сплава ВТ14

6.3.1 Определение коэффициента, учитывающего влияние пластических свойств материала на параметры шероховатости шлифованной поверхности

для титанового сплава ВТ14

Рассмотрим определение средней высоты неровностей профиля обработанной поверхности при врезном шлифовании титановых сплавов, у которых геометрический фактор не может считаться доминирующим при формировании параметров шероховатости.

Определение параметров шероховатости обработанной поверхности с учётом влияния пластических явлений и образования нароста будем выполнять на основе расчёта высоты неровностей, базирующегося на доминировании геометрического фактора, а влияние наростообразования и пластических искажений профиля обработанной поверхности будем учитывать с помощью поправочного коэффициента.

Среднюю высоту неровностей профиля обработанной поверхности для титанового сплава ВТ14, шлифование которого сопровождается интенсивным налипанием обрабатываемого материала на шлифовальный круг и задирами на обработанной поверхности [186], определим с учётом расчёта параметров шероховатости для быстрорежущей стали Р6М5Ф3, которая принята за эталонный материал.

Рассчитанные по программе, которая реализует методику, изложенную в подразделе 4.1, значения средней высоты неровностей профиля по десяти точкам R_z и средней высоты неровностей профиля в пределах базовой длины R_a для условий плоского врезного шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 с режимными параметрами, указанными в п. 6.1.2, приведены в табл. 6.27. Значения параметров шероховатости определены для двух состояний РПК: непосредственно после электроэрозионной правки и для стабилизировавшегося после 30-45 минут обработки рельефа РПК.

Таблица 6.27 – Высота неровностей профиля шлифованной поверхности при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3, полученная расчётом с использованием математической модели формирования шероховатости обработанной поверхности

Шлифовальный круг	Значение параметра шероховатости			
	после электроэрозионной правки		при стабилизировавшемся рельефе РПК	
	R_z , мкм	R_a , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм
АС6 100/80-4-М2-01	6,4	1,6	2,4	0,6
АС6 160/125-4-М2-01	8,8	2,2	4,0	1,0
АС6 250/200-4-М2-01	8,8	2,2	4,0	1,0

Среднюю высоту неровностей профиля обработанной поверхности R_a при шлифовании титанового сплава ВТ14 определим с использованием поправочного коэффициента, полученного экспериментально при обработке этого материала на режимах, аналогичных указанным в п. 6.1.2, по следующей зависимости:

$$R_{a\text{ ум}} = R_{a\text{ Р6М5Ф3}} \cdot K_{\text{ум}}, \quad (6.4)$$

где $R_{a\text{ ум}}$ – среднеарифметическое отклонение высоты профиля шлифованной поверхности заготовок из титанового сплава;

$R_{a\text{ Р6М5Ф3}}$ – рассчитанное аналитически среднеарифметическое отклонение высоты профиля шлифованной поверхности стали Р6М5Ф3;

$K_{\text{ум}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий отличие параметра R_a при шлифовании титанового сплава по сравнению с эталонным материалом.

Поправочные коэффициенты $K_{\text{ум}}$ определим экспериментально для условий плоского врезного шлифования на плоскошлифовальном станке 3Г71, модернизированного для осуществления электроэрозионной правки и шлифования с электроэрозионными воздействиями на РПК [172]. Источник технологического тока – блок электропитания модели ИТТ-35, рабочая среда – 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды. Для шлифования образцов из эталонного мате-

риала Р6М5Ф3 и титанового сплава ВТ14 использовали алмазные круги 1А1 250×76×15×3 трёх зернистостей.

Круги правили электроэрозионным способом на электроде из меди М1 длиной 30 мм на режимах: скорость круга $V_k = 35$ м/с, поперечная подача $S_n = 0,72$ м/мин, глубина резания $t = 2-5$ мкм, напряжение холостого хода $U_{xx} = 60$ В, величина среднего тока $I_{cp} = 8-10$ А, величина среднего напряжения на межэлектродном промежутке $U_{cp} = 3,5$ В [172].

Измерение параметра R_a выполнялись с помощью профилометра модели 283 после плоского врезного шлифования образцов на следующих режимах: скорость круга $V_k = 35$ м/с, глубина резания $t = 15$ мкм, скорость детали $V_{cm} = 6$ м/мин. Среднюю величину параметра шероховатости рассчитывали по шести измерениям (95%-ный доверительный интервал составил $\pm 0,018$ мкм) после правки, 15, 30, 45 и 60 мин обработки.

Значения параметра R_a при плоском врезном шлифовании образцов из быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и титанового сплава ВТ 14 приведены в табл. 6.28. В скобках указаны средние значения параметра R_a за период 15-60 мин обработки. В последней колонке табл. 6.28 приведены результаты расчёта по экспериментальным данным поправочного коэффициента K_{mut} для состояния РПК после правки и стабилизировавшегося за период 15-60 мин шлифования состояния РПК [187].

Из табл. 6.28 видно, что на значение поправочного коэффициента K_{mut} оказывает влияние состояние РПК в процессе обработки и зернистость алмазного круга. Для зернистостей 100/80 и 160/125 поправочный коэффициент при состоянии РПК после правки незначительно отличается от единицы, что говорит о незначительном проявлении в начале работы после правки кругами указанных зернистостей эффектов наростообразования и адгезионного схватывания титанового сплава ВТ14. При стабилизировавшемся состоянии РПК после 15-60 мин обработки эти эффекты проявляют себя в полной мере, что ведёт к росту высоты неровностей профиля обработанной поверхности в 2,5-4 раза по сравнению с обработкой быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

Таблица 6.28 – Параметр шероховатости R_a при плоском врезном алмазном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и титанового сплава ВТ14 в различные периоды обработки

Шлифовальный круг	Состояние РПК после	Параметр R_a , мкм		Поправочный коэффициент K_{mut}
		Быстрорежущая сталь Р6М5Ф3	Титановый сплав ВТ14	
АС6 100/80-4-М2-01	правки	1,75	1,60	0,91
	15 мин шлиф.	0,40	1,40	3,70
	30 мин шлиф.	0,35(0,33)	1,13 (1,20)	
	45 мин шлиф.	0,30	1,13	
	60 мин шлиф.	0,25	1,14	
АС6 160/125-4-М2-01	правки	1,75	2,10	1,20
	15 мин шлиф.	0,60	1,12	2,38
	30 мин шлиф.	0,45 (0,61)	1,13 (1,45)	
	45 мин шлиф.	0,60	1,75	
	60 мин шлиф.	0,80	1,80	
АС6 250/200-4-М2-01	правки	1,75	3,13	1,79
	15 мин шлиф.	0,80	2,77	3,43
	30 мин шлиф.	0,80 (0,76)	2,59 (2,61)	
	45 мин шлиф.	0,75	2,59	
	60 мин шлиф.	0,70	2,50	

Для зернистости 250/200 адгезионные процессы на алмазных зёрнах проявляются уже в первые секунды обработки, что приводит к росту высотных параметров шероховатости в 1,8 раза. В дальнейшем эти процессы развиваются и усиливаются, вследствие чего высота неровностей профиля обработанной поверхности у титанового сплава ВТ14 при стабилизировавшемся состоянии РПК после 15-60 мин обработки в 3,5 раза выше, чем у быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

С увеличением времени обработки быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и титанового сплава ВТ14 параметр шероховатости R_a уменьшается для всех зернистостей, но интенсивность такого снижения у титанового сплава ВТ14 существенно меньше, чем у стали Р6М5Ф3.

Рассчитанные по формуле (6.4) на основе данных таблиц 6.27 и 6.28 значения среднеарифметической высоты неровностей профиля R_a для титанового сплава ВТ14 для состояния рельефа РПК после электроэрозионной правки и стабилизировавшегося после 15-60 минут шлифования состояния рельефа РПК приведены в табл. 6.29 [187].

Таблица 6.29 – Высота неровностей профиля шлифованной поверхности при плоском врезном шлифовании титанового сплава ВТ14

Шлифовальный круг	Параметр шероховатости R_a , мкм, для состояния РПК	
	после электроэрозионной правки	стабилизировавшегося после 15-60 мин шлифования
АС6 100/80-4-М2-01	1,46	2,22
АС6 160/125-4-М2-01	2,64	2,38
АС6 250/200-4-М2-01	3,94	3,43

Для подтверждения полученных результатов расчётов были проведены измерения параметра R_a , полученного при врезном шлифовании образцов из быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и титанового сплава ВТ14 на плоскошлифовальном станке модели 3Г71 с использованием алмазного круга 1А1 250×76×15×3 АС6 160/125-4-М2-01.

Обработку шлифованием проводили на следующих режимах: скорость круга $V_k = 35$ м/с, скорость детали $V_{cm} = 6$ м/мин, глубина резания $t = 20$ мкм. Для образцов из быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и титанового сплава ВТ14 выполнялось по 4-6 параллельных опытов на различных участках поверхности образцов. Со-

стояние РПК – после электроэрозионной правки на чугунном электроде в течение 20 минут.

Измерения параметра шероховатости R_a выполняли на профилометре модели 296. Для выполнения статистического анализа экспериментальных данных на каждом участке поверхности измерения параметра R_a повторялись 16 раз.

Рассчитанные по формуле (6.4) и экспериментально измеренные значения среднеарифметической высоты неровностей профиля R_a с 99%-м доверительным интервалом приведены в табл. 6.30. Доверительный интервал определялся с учётом среднеквадратического отклонения высоты неровностей профиля R_a , рассчитанного по данным 64-х измерений, в предположении о нормальном законе распределения среднеарифметической высоты неровностей профиля R_a .

Таблица 6.30 – Высота неровностей профиля шлифованной поверхности при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и титанового сплава ВТ14 алмазным кругом 1А1 250×76×15×3 АС6 160/125-4-М2-01 после электроэрозионной правки

Обрабатываемый материал	Расчётное значение параметра шероховатости R_a , мкм	Поправочный коэффициент	Экспериментальное значение параметра шероховатости R_a , мкм	Погрешность расчёта параметра шероховатости R_a , %
Быстрорежущая сталь Р6М5Ф3	2,20	1,00	2,43±0,32	9
Титановый сплав ВТ14	2,64	1,20	3,14±1,25	16

Из табл. 6.30 следует, что рассчитанные по рассмотренной выше методике значения среднеарифметической высоты неровностей профиля R_a для обработанной поверхности образца из титанового сплава ВТ14 при шлифовании алмазным кругом 1А1 250×76×15×3 АС6 160/125-4-М2-01 после электроэрозионной правки

попадают в доверительный интервал экспериментально измеренных значений этого же параметра, а средневероятностная погрешность расчёта составляет 16 %.

Таким образом, значения поправочных коэффициентов K_{mum} , приведенные в табл. 6.30, могут использоваться для расчёта средней высоты неровностей профиля обработанной поверхности при шлифовании титановых сплавов, а для определения скорости заготовки, обеспечивающей необходимый высотный параметр шероховатости обработанной поверхности на поверхности деталей из титанового сплава ВТ14, необходимо использовать поправочный коэффициент K_{mum} , соответствующий обработке рельефом, параметры которого сформированы в процессе правки.

6.3.2 Расчет технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и шлифовальным кругом

Исходными данными при расчете скорости детали, ограниченной заданным параметром шероховатости R_a , для титанового сплава ВТ14 являются скорость шлифовального круга V_k , обусловленная паспортными данными станка либо допустимой скоростью шлифовального круга, а также параметры рабочей поверхности, определяемые паспортными характеристиками шлифовального круга (см. табл. 6.1).

Используя приведенные в табл. 6.1 параметры РПК для кругов исследуемых характеристик, по методике, по методике, изложенной в подразделе 4.1, по заданным параметрам шероховатости R_a (табл. 6.31) с учётом поправочных коэффициентов из табл. 6.30 была рассчитана скорость детали, обеспечивающая получение необходимого значения этого параметра при врезном шлифовании титанового сплава ВТ14. Условия обработки: скорость шлифовального круга $V_k = 35$ м/с, фактическая глубина шлифования $t_\phi = 0,015$ мм, интервал расчета $\Delta R = 0,2$ мкм, радиус шлифовального круга $R_k = 125$ мм.

Таблица 6.31 – Скорость детали, обеспечивающая заданные параметры шероховатости R_a при врезном шлифовании титанового сплава ВТ14

Шлифовальный круг	Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Базовая длина $l_{баз}$, мм	Скорость детали V_d , м/мин
АС6 100/80-4-M2-01	1,5	0,8	6
АС6 160/125-4-M2-01	2,7		
АС6 200/160-4-M2-01	4,0		

Аналогично п. 6.1.2 и п. 6.2.2 в табл. 6.31 параметры шероховатости R_a заданы таким образом, чтобы режимы резания при шлифовании кругами различных характеристик были идентичными, что обеспечит одинаковые условия обработки с максимальной производительностью и позволит исследовать влияние зернистости кругов на производительность шлифования и расход алмазов при обработке различных труднообрабатываемых материалов.

Лимитированное значение силы поджима заготовки из титанового сплава ВТ14 к РПК найдем как наименьшую из сил поджима заготовки к РПК, ограниченных температурой полиморфного превращения в поверхностном слое обработанной поверхности заготовки, температурой окисления алмазов и прочностью алмазных зерен. Так как теплопроводность титановых сплавов существенно зависит от температуры, то расчёты проведём для коэффициентов теплопроводности сплава ВТ14 при двух температурах, в интервале между которыми может находиться температура поверхности резания при шлифовании, – при 20°C и при 700°C. Расчёты ограничивающих сил поджима заготовки к РПК выполним по методикам, изложенным в подразделах 4.2 - 4.4 с использованием математического пакета MathCAD (Приложение 4) по исходным данным, приведенным в табл. 6.32.

Таблица 6.32 – Исходные данные для расчета усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных изделием и шлифовальным кругом, при плоском врезном шлифовании титанового сплава ВТ14 алмазными кругами 1А1 250×76×15×5 АС6-4-М2-01 различной зернистости

Группа параметров	Наименование параметра, размерность	Числовое значение
1	2	3
Режимы обработки	Скорость круга V_k , м/с	35
	Продольная скорость стола $V_{ст}$, м/мин	6
Параметры титанового сплава ВТ14	Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$9,1 \cdot 10^{-6}$
	Коэффициент теплопроводности при 20°С λ , Вт/м·град	8,9
	Коэффициент теплопроводности при 700°С λ , Вт/м·град	16,8
	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале μ	0,3
	Коэффициент продольной усадки стружки K_1	1,2
	Значения свободного члена и коэффициента уравнения регрессии, описывающего изменение касательных напряжений сдвига в условной плоскости сдвига, МПа и МПа/К соответственно	$C = 671$ $\alpha = 0,236$
	Температура полиморфного превращения T_{max} , К	1213
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	0,42

Результаты расчета допустимых значений составляющих сил резания, ограниченных изделием и шлифовальным кругом (для трёх условий и при разных температурах), при плоском врезном шлифовании титанового сплава ВТ14 кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 на связке М2-01 различной зернистости приведены в табл. 6.33.

Таблица 6.33 – Допустимые значения тангенциальной P_z , и радиальной P_y составляющих силы резания при плоском врезном шлифовании титанового сплава ВТ14 кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 на связке М2-01 различной зернистости в зависимости от технических ограничений

Техническое ограничение	100/80		160/125		200/160	
	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н
Температура полиморфного превращения в поверхностном слое обрабатываемой заготовки (теплопроводность при 20°C)	20,7	38,0	21,5	35,9	20,8	31,8
Температура полиморфного превращения в поверхностном слое обрабатываемой заготовки (теплопроводность при 700°C)	40,6	75,1	44,0	74,2	44,3	67,7
Температура окисления алмазных зёрен (теплопроводность при 20°C)	24,4	81,4	42,2	141	92,5	308
Температура окисления алмазных зёрен (теплопроводность при 700°C)	25,0	83,4	42,9	143	93,5	312
Механическая прочность алмазных зёрен	33,1	110	69,0	230	236	787

Как видно из табл. 6.33, при шлифовании титанового сплава ВТ14 лимитированной силой поджима заготовки к РПК является сила, определенная по температуре полиморфных превращений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки, если температура основного объема материала заготовки существенно не

изменилась (коэффициент теплопроводности сплава ВТ14 принимается при 20°C). Таким образом, обобщенными режимами плоского врезного шлифования титанового сплава ВТ14 с постоянной силой поджима заготовки к РПК будет скорость стола $V_{cm} = 6$ м/мин и силы поджима заготовки к РПК: для круга зернистостью 100/80 – $P_n = 38,0$ Н, зернистостью 160/125 – $P_n = 35,9$ Н, а для зернистости 200/160 – $P_n = 31,8$ Н. На указанных режимах будут проведены эксперименты по исследованию влияния зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга.

6.3.3 Влияние зернистости алмазов на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга при шлифовании титанового сплава ВТ14

Исследование влияния зернистости алмазов на текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга осуществляли экспериментально с постоянным усилием поджима заготовки к РПК на плоскошлифовальном станке на плоскошлифовальном станке модели 3Д711АФ11, модернизированном для осуществления электроэрозионных воздействий на РПК (см. рис. 2.2).

Плоское врезное шлифование выполняли кругами из синтетических алмазов АС6 прямого профиля 1А1 250×76×15, на металлической связке М2-01, 100%-й концентрации зерен, трех зернистостей 100/80, 160/125 и 200/160. Учитывая значения лимитированных усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных температурой полиморфных превращений в поверхностном слое заготовки, которые были определены в п. 6.3.2, с целью получения сопоставимых результатов шлифование выполняли с усилием поджима заготовки к РПК, равном $P_n = 38$ Н. Скорость круга назначали максимальной для плоскошлифовального станка модели 3Д711АФ11: $V_k = 35$ м/с. Продольная скорость стола для всех зернистостей составляла $V_{cm} = 6$ м/мин.

По экспериментальным данным были построены графики зависимостей текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода ал-

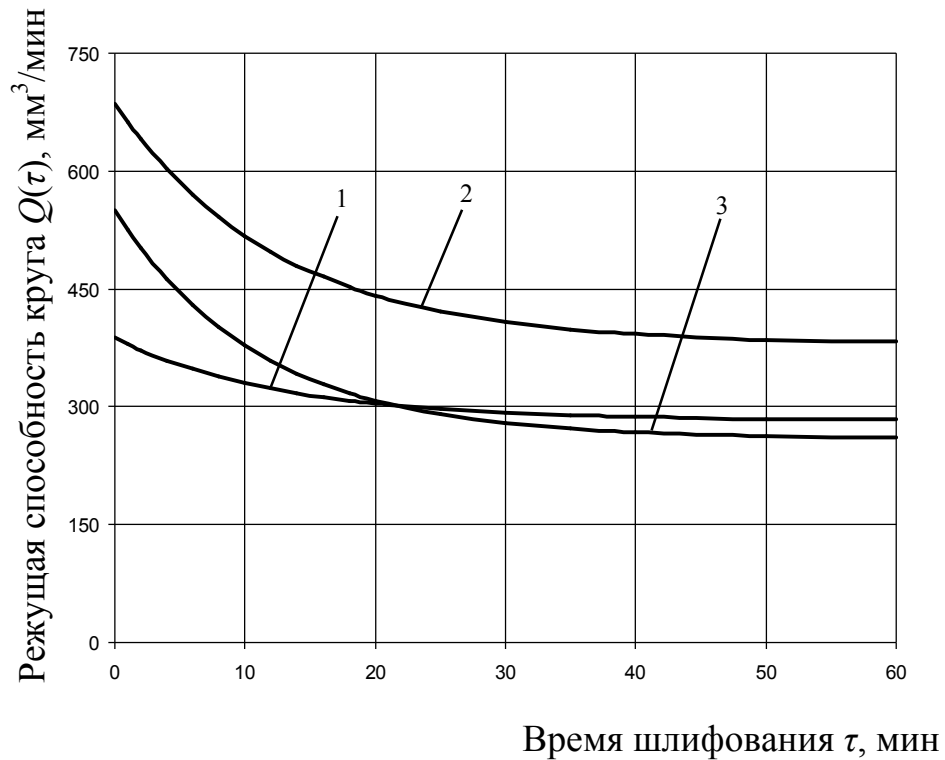
мазов $M(\tau)$ от времени шлифования, а также выведены соответствующие уравнения регрессии в виде выражений (5.16) и (5.18). Параметры уравнений приведены в табл. 6.34, а графики – на рис. 6.14 а, б.

Таблица 6.34 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования титанового сплава ВТ14 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК

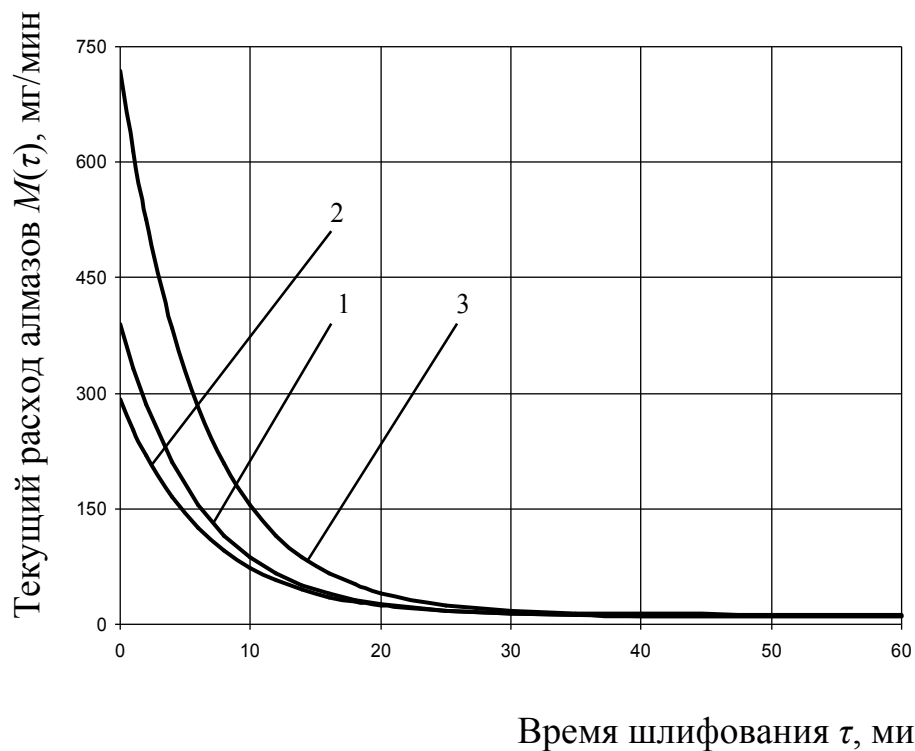
Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК во времени $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов во времени $M(\tau)$, мг/мин
АС6 100/80-4-М2-01	$Q(\tau) = 283 + 105 e^{-0,08 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 10 + 379 \cdot e^{-0,16 \cdot \tau}$
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 380 + 306 e^{-0,08 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 10 + 282 \cdot e^{-0,15 \cdot \tau}$
АС6 200/160-4-М2-01	$Q(\tau) = 260 + 290 e^{-0,09 \cdot \tau}$	$M(\tau) = 12 + 707 \cdot e^{-0,16 \cdot \tau}$

Как видно из приведенных графиков, а также характера полученных уравнений (см. табл. 6.34), первые 20 минут обработки характеризуются достаточно интенсивным снижением ТЛРСШК, а затем снижение режущей способности становится близким к линейному. Это объясняется быстрым развитием процесса засаливания межзренного пространства РПК, а так же микрорельефа контактных площадок на зернах, на протяжении этих 20 минут шлифования. В дальнейшем состояние РПК стабилизируется на новом, качественно отличающемся от первоначального, уровне.

Аналогично обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 резкое уменьшение режущей способности круга в начале обработки обусловлено интенсивным выпадением наиболее выступающих зерен, в результате чего количество одновременно работающих зёрен увеличивается, что приводит к уменьшению объема межзренного пространства и фактической глубины шлифования при постоянном усилии поджима заготовки к РПК.



а



б

Рисунок 6.14 – Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании заготовки из сплава ВТ14 с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК:

- 1 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-01,
- 2 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 160/125-4-M2-01,
- 3 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 200/160-4-M2-01

Интенсивное выпадение зерен из связки в начале обработки титанового сплава ВТ14 подтверждается резко увеличенным расходом алмазов на первых 10-20 минутах шлифования.

6.3.4 Определение рациональных режимов шлифования титанового сплава ВТ14 при отсутствии электроэрозионных воздействий на РПК

Используя уравнения, описывающие изменение ТЛРСШК во время обработки $Q(\tau)$ (см. табл. 6.34), уравнение, отражающее изменение фактической глубины шлифования t_ϕ при обработке заготовки из титанового сплава ВТ14 с размерами обработанной поверхности 113×15 мм при величине перебега 3,5 мм, выведем по формуле (6.1).

Частота ходов стола при обработке указанной заготовки

$$n_{ст} = \frac{1000 \cdot 6}{113 + 2 \cdot 3,5} = 50 \text{ ход/мин.}$$

Уравнения вида (6.1), описывающие изменение фактической глубины шлифования, выведем в результате обработки экспериментальных данных, полученных при шлифовании заготовки из титанового сплава ВК8 при отсутствии ЭЭВ на РПК на режимах, приведенных в п. 6.3.3; уравнения сведены в табл. 6.35.

Таблица 6.35 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной фактической глубины шлифования (ТЛФГШ) t_ϕ в процессе шлифования заготовки из титанового сплава ВТ14 размером 113×15 мм

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛФГШ во времени $t_\phi(\tau)$, мм
АС6 100/80-4-М2-01	$t_\phi(\tau) = 1,18 \cdot 10^{-5} (283 + 105 e^{-0,08 \cdot \tau})$
АС6 160/125-4-М2-01	$t_\phi(\tau) = 1,18 \cdot 10^{-5} (380 + 306 e^{-0,08 \cdot \tau})$
АС6 200/160-4-М2-01	$t_\phi(\tau) = 1,18 \cdot 10^{-5} (260 + 290 e^{-0,09 \cdot \tau})$

Для конкретных размеров заготовки по уравнениям, приведенным в табл. 6.35, определяется переменная фактическая глубина шлифования в соответствии с длительностью периода дискретизации глубины. Скорости круга и обрабатываемой детали переносятся на схему шлифования с фиксированными режимными параметрами без изменений.

6.3.5 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании титанового сплава ВТ14 с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК

Определение оптимальных режимов шлифования с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК выполняется экспериментальным путем с использованием шлифования с фиксированной силой поджима заготовки к РПК, когда электроэрозионные воздействия на рабочую поверхность круга осуществляются периодически с известной величиной вводимой электрической энергии одновременно с процессом обработки. В процессе эксперимента определяются:

- закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования без ЭЭВ (см. табл. 6.34);
- закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ (см. табл. 6.34);
- закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК;
- закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК.

Эксперименты проводили на режимах: $V_k = 35$ м/с, $V_{cm} = 6$ м/мин и силе поджима заготовки к РПК $P_n = 40$ Н. Электроэрозионную правку круга осуществляли аналогично правке, описанной в п. 6.1.3. Электроэрозионные воздействия на РПК с целью восстановления режущей способности шлифовального круга выполняли с величиной среднего тока $I_{cp} = 10$ А, при напряжении холостого тока $U_{xx} = 60$ В. Рабочая среда – 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды.

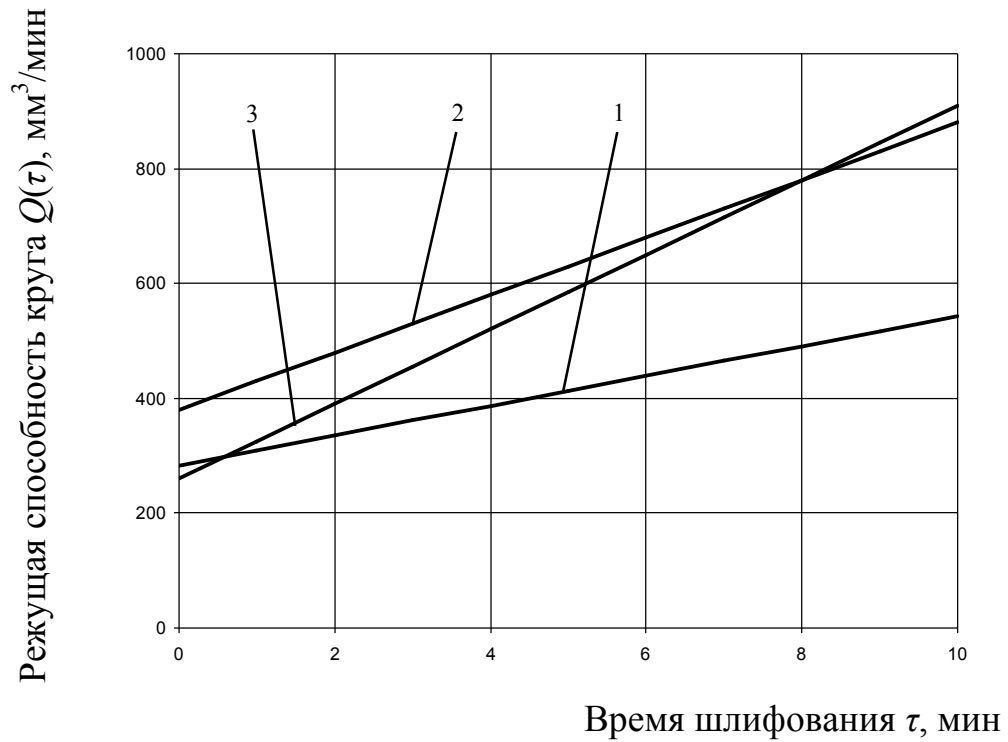
В соответствии с экспериментальными данными изменения текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК с целью восстановления режущих свойств рабочей поверхности круга, описываются уравнениями прямых (табл. 6.36), графики которых приведены на рис. 6.15.

Таблица 6.36 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования титанового сплава ВТ14 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК во время периодических электроэрозионных воздействий

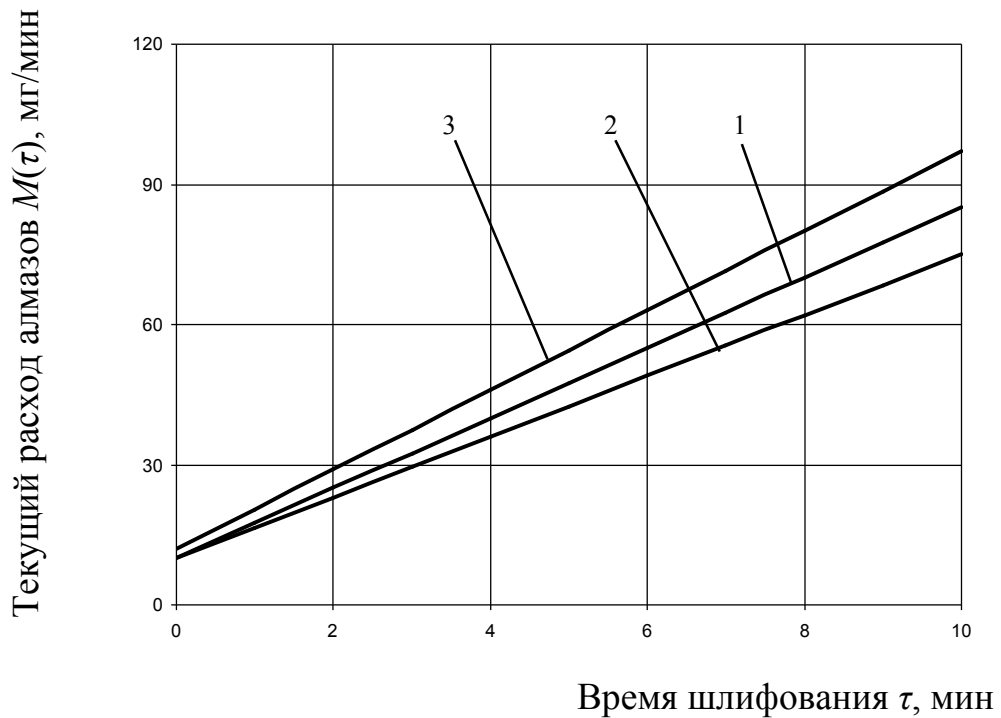
Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов $M(\tau)$, мг/мин
АС6 100/80-4-М2-01	$Q(\tau) = 283 + 26 \cdot \tau$	$M(\tau) = 10 + 7,5 \cdot \tau$
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 380 + 50 \cdot \tau$	$M(\tau) = 10 + 6,5 \cdot \tau$
АС6 200/160-4-М2-01	$Q(\tau) = 260 + 65 \cdot \tau$	$M(\tau) = 12 + 8,5 \cdot \tau$

Из сопоставления изменения текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК быстрорежущей стали Р6М5Ф3 (см. рис. 6.2), твердого сплава ВК8 для зернистости 160/125 (см. рис. 6.10) и титанового сплава ВТ14 (см. рис. 6.15) следует:

1) ТЛРСШК при обработке титанового сплава ВТ14 с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК через 10 минут воздействий стабилизируется примерно на таком же уровне, на котором стабилизируется ТЛРСШК при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3;



а



б

Рисунок 6.15 – Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании титанового сплава BT14 с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК

во время периодических электроэрозионных воздействий:

- 1 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-01,
- 2 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 160/125-4-M2-01,
- 3 – круг 1A1 250×76×15×5 AC6 200/160-4-M2-01

2) восстановление ТЛРСШК при обработке титанового сплава ВТ14 с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК начинается на уровне, на порядок превышающем уровень, с которого начинается восстановление ТЛРСШК при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3;

3) текущий расход алмазов при обработке титанового сплава ВТ14 с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК в 5-6 раз выше, чем текущий расход алмазов при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3, и в 2 раза ниже, чем текущий расход алмазов при обработке твердого сплава ВК8.

Первый вывод свидетельствует о том, что в ухудшении режущей способности алмазного круга при обработке титанового сплава ВТ14 процессы засаливания межзёренного пространства на РПК и микрорельефа зёрен играют такую же роль, что и при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3, вследствие чего электроэрозионные воздействия на продукты засаливания на идентичных режимах приводят к восстановлению ТЛРСШК до практически одинакового уровня для обоих обрабатываемых материалов.

Второй вывод подтверждает известный факт, состоящий в том, что эффекты интенсивного наростообразования и адгезионного схватывания титановых сплавов имеют принципиальное значение при их алмазно-абразивной обработке и могут оказывать положительное влияние на поддержание высокой режущей способности шлифовального круга.

Одновременно с этим указанные выше эффекты проявляются также, в соответствии с третьим выводом, в более высоком текущем расходе алмазов при обработке титанового сплава ВТ14 с одновременными периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК, чем при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3. Это свидетельствует о том, что контактные явления при шлифовании титанового сплава ВТ14 обуславливают не менее значимые воздействия на состояние РПК, чем электроэрозионные, осуществляемые одновременно со шлифованием. Вместе с тем влияние указанных явлений на расход алмазов всё же меньше, чем влияние более высоких механических характеристик твердых сплавов.

Расчет оптимальных значений периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» выполняли на ПЭВМ по критерию минимальной удельной себестоимости по специально разработанной программе, реализующей методику, описанную в п. 5.3.2. В качестве исходных данных использовали данные таблиц 6.34, 6.36 и элементы себестоимости (см. табл. 6.8) [181].

Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость шлифования титанового сплава BT14 алмазными кругами различных зернистостей приведены на рис. 6.16 - 6.18.

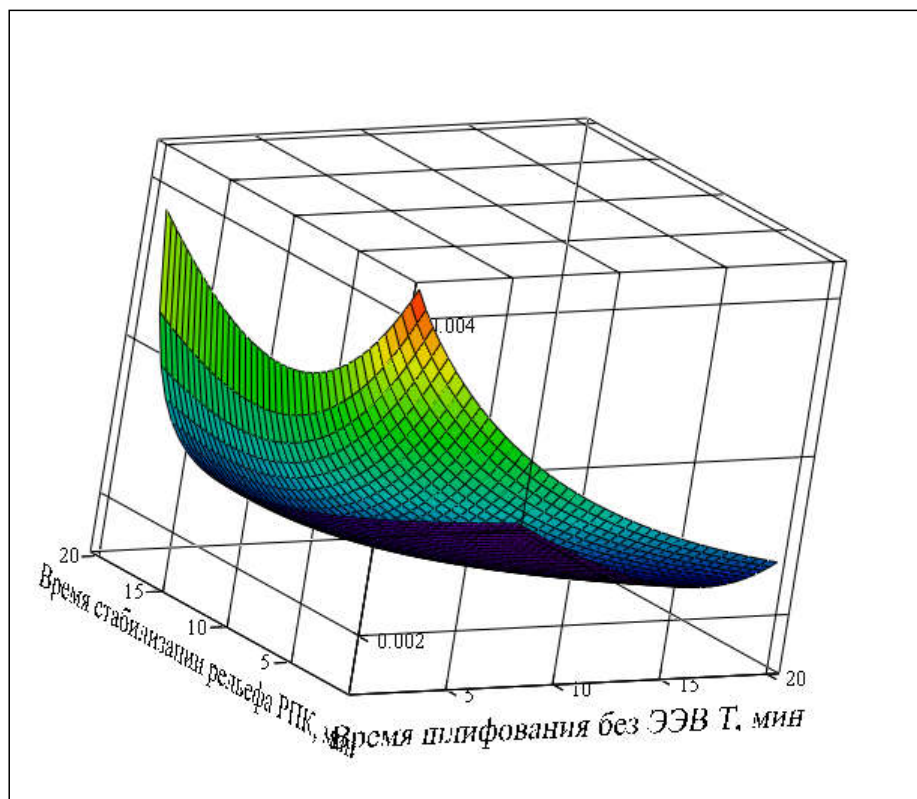


Рисунок 6.16 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования титанового сплава BT14 алмазным кругом AC6 100/80-4-M2-01

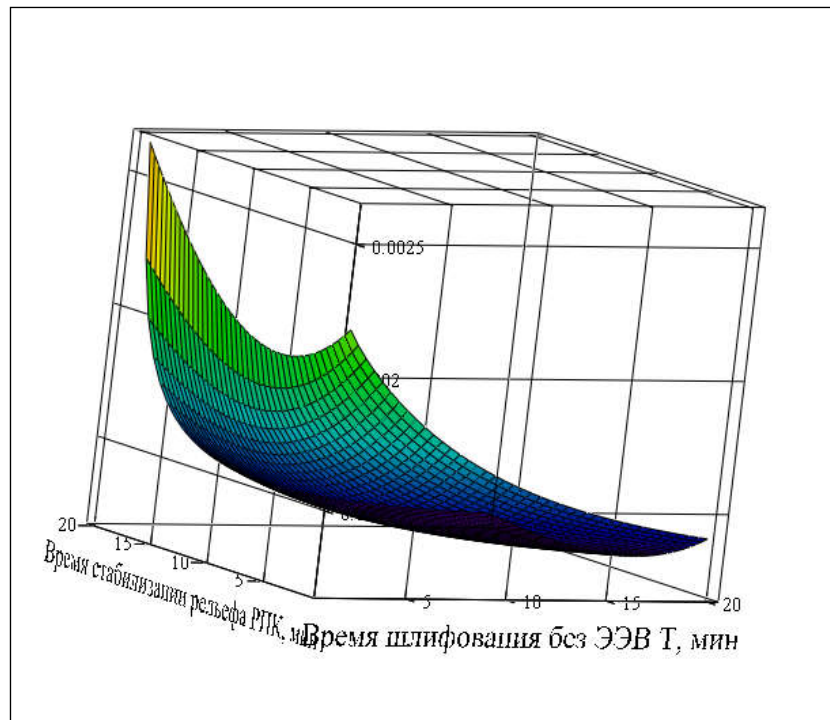


Рисунок 6.17 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования титанового сплава BT14 алмазным кругом AC6 160/125-4-M2-01

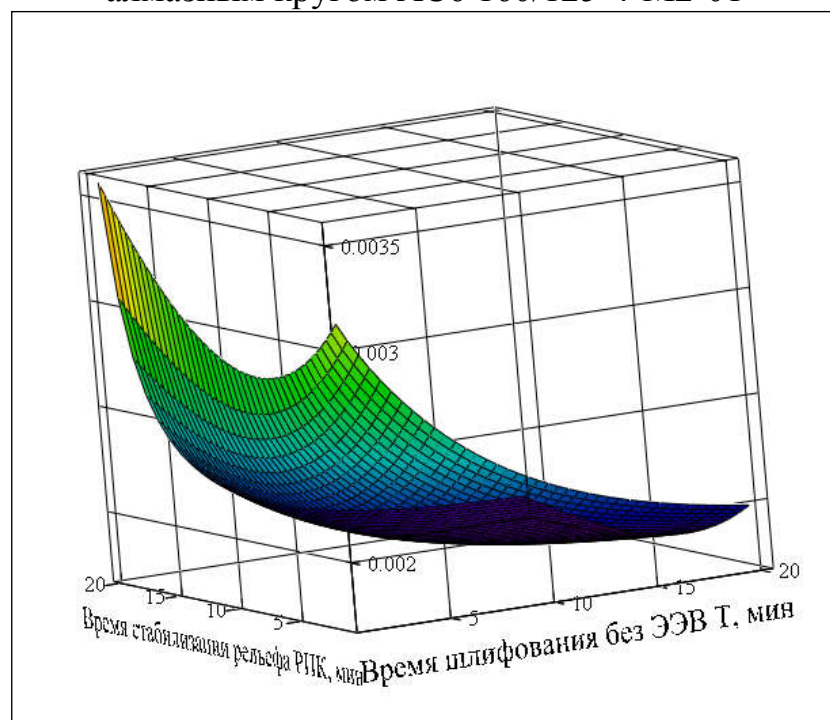


Рисунок 6.18 – Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования титанового сплава BT14 алмазным кругом AC6 200/160-4-M2-01

Для кругов исследованных зернистостей зависимость удельной себестоимости шлифования титанового сплава ВТ14 от длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» не имеет экстремума на протяжении недельной трёхсменной непрерывной работы станка.

Поэтому для нахождения локального экстремума функции удельной себестоимости шлифования время формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, зафиксировали на уровне $\tau_{np} = 1$ мин, так как этого времени вполне достаточно для выпадения слабо закрепленных в связке и наиболее выступающих зёрен. Тем самым исключили влияние на полученные результаты оптимизации случайных погрешностей, обусловленных флуктуациями параметров, характеризующих исходное состояние РПК.

Локальные оптимумы периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», полученные на основе изложенного выше допущения, приведены в табл. 6.37.

Таблица 6.37 – Оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» при обработке титанового сплава ВТ14 кругами из синтетических алмазов АСб различных зернистостей

Наименование периода	Зернистость		
	100/80	160/125	200/160
Время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , мин	1	1	1
Время шлифования без ЭЭВ, T , мин	34110	30710	32040
Время шлифования с ЭЭВ, $\tau_{ЭЭВ}$, мин	3,72	5,65	5,90

Как видно из табл. 6.37, для кругов всех исследованных зернистостей значения времени шлифования без ЭЭВ чрезвычайно велики по сравнению со временем обработки одной детали и намного превышают аналогичные значения для быстрорежущей стали Р6М5Ф3 (см. табл. 6.9). На основании этого можно утверждать, что осуществление периодических электроэрозионных воздействий для поддержания высокой режущей способности алмазных кругов при обработке титанового сплава ВТ14 экономически необоснованно, а периодическая правка круга должна производиться исходя из иных предпосылок (например, для восстановления геометрической формы РПК).

Для приведенных в табл. 6.37 значений времени шлифования с ЭЭВ $\tau_{ЭЭВ}$ минимальная удельная себестоимость с периодическими ЭЭВ на РПК титанового сплава ВТ14 составила:

- для круга зернистостью 100/80 $C_{y\partial \min} = 0,00320 \text{ руб/мм}^3$;
- для круга зернистостью 160/125 $C_{y\partial \min} = 0,00240 \text{ руб/мм}^3$;
- для круга зернистостью 200/160 $C_{y\partial \min} = 0,00362 \text{ руб/мм}^3$.

6.3.6 Определение оптимальных режимов обработки при шлифовании с фиксированными режимными параметрами титанового сплава ВТ14 с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК

Средние значения силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК, осуществляемых одновременно со шлифованием титанового сплава ВТ14, были приняты минимально возможными из условия инициирования управляющих электрических разрядов в межэлектродном промежутке и составили $I_{срн} = 2 \text{ А}$.

На принятых режимах непрерывных воздействий на РПК было осуществлено шлифование титанового сплава ВТ14 по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к РПК с целью определения закона изменения ТЛРСШК и текущего расхода алмазов во время шлифования (рис. 6.17). Параметры уравнений, описывающих эти изменения, приведены в таблице 6.38.

Таблица 6.38 – Влияние зернистости алмазного шлифовального круга на изменение текущей лимитированной режущей способности круга $Q(\tau)$ и текущего расхода алмазов $M(\tau)$ в процессе шлифования титанового сплава ВТ14 с фиксированным постоянным усилием поджима заготовки к РПК при непрерывных электроэрозионных воздействиях на РПК

Шлифовальный круг	Уравнение, описывающее изменение ТЛРСШК во времени $Q(\tau)$, мм ³ /мин	Уравнение, описывающее изменение текущего расхода алмазов во времени $M(\tau)$, мг/мин
1	2	3
АС6 100/80-4-М2-01	$Q(\tau) = 240 + 150 e^{-0,09\cdot\tau}$	$M(\tau) = 25 + 351 \cdot e^{-0,17\cdot\tau}$
АС6 160/125-4-М2-01	$Q(\tau) = 390 + 274 e^{-0,11\cdot\tau}$	$M(\tau) = 23 + 495 \cdot e^{-0,16\cdot\tau}$
АС6 200/160-4-М2-01	$Q(\tau) = 350 + 559 e^{-0,09\cdot\tau}$	$M(\tau) = 12 + 366 \cdot e^{-0,17\cdot\tau}$

Фактическую глубину (величину вертикальной подачи S_g) при шлифовании по фиксированными режимными параметрами заготовки из титанового сплава ВТ14 с размерами $B_d \times L_d = 113 \times 15$ мм рассчитаем по установившемуся значению режущей способности $Q(\tau)_{уст}$ (см. табл. 6.38, столбец 2) в процессе шлифования по схеме с фиксированной силой поджима с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК по формуле (6.2).

Результаты расчета фактической глубины шлифования t_ϕ и рациональные режимы плоского врезного шлифования титанового сплава ВТ14 по схеме с фиксированными режимными параметрами при непрерывных электроэрозионных воздействиях на РПК приведены в табл. 6.39. Средняя сила тока непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК, осуществляемых одновременно со шлифованием титанового сплава ВТ14, как указывалось ранее, была принята минимально возможной из условия иницирования управляющих электрических разрядов.

Таблица 6.39 – Рациональные режимы плоского врезного шлифования титанового сплава ВТ14 по схеме с фиксированными режимными параметрами с непрерывными электроэрозионными воздействиями на РПК

Шлифовальный круг	Установившееся значение ТЛРСШК $Q(\tau)_{уст}$ мм ³ /мин	Режимы обработки			
		$S_{в}$ мм/ход	$V_{к}$, м/с	$V_{ст}$ м/мин	$I_{ср н}$, А
АС6 100/80-4-М2-01	240	0,0031	35	6	2
АС6 160/125-4-М2-01	390	0,0051			
АС6 200/160-4-М2-01	350	0,0046			

6.3.7 Техничко-экономические показатели шлифования титанового сплава ВТ14 различными способами

Проведенные исследования позволили определить следующие технико-экономические показатели процесса шлифования титанового сплава ВТ14 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК (табл. 6.40):

- объём сошлифованного материала, мм³;
- массу израсходованных алмазов, карат;
- себестоимость станко-часа шлифования, руб/час;
- удельную себестоимость шлифования, руб/мм³.

Обращаем внимание на следующее: несмотря на то, что для всех трёх исследованных зернистостей алмазных кругов минимальную удельную себестоимость обработки обеспечивает шлифование с периодическими ЭЭВ на рабочую поверхность круга для восстановления её режущих свойств, этот результат не имеет практического значения, так как получен в предположении о недельной трёхсменной непрерывной работе шлифовального станка, что труднодостижимо в производственных условиях. Поэтому технико-экономические показатели шлифования с периодическими ЭЭВ приведены в табл. 6.40 в качестве справки.

Таблица 6.40 – Техничко-экономические показатели шлифования титанового сплава BT14 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК исследованными способами и алмазными кругами различной зернистости

Зернистость	Способ шлифования	Объем сошлифованного материала, мм ³	Масса использованных алмазов, карат	Себестоимость шлифования, руб/час	Удельная себестоимость шлифования, руб/мм ³
100/80	Без ЭЭВ	18280	2969	71,32	0,00390
	С периодическими ЭЭВ	16700	2951	53,30	0,00320
	С непрерывными ЭЭВ	16060	3565	75,62	0,00470
160/125	Без ЭЭВ	26590	2480	70,38	0,00264
	С периодическими ЭЭВ	22420	2952	54,00	0,00240
	С непрерывными ЭЭВ	25360	4474	86,76	0,00342
200/160	Без ЭЭВ	21020	3251	79,46	0,00378
	С периодическими ЭЭВ	15340	3543	55,50	0,00362
	С непрерывными ЭЭВ	21180	2867	76,04	0,00360

В то же время данные табл. 6.40 показывают, что для зернистостей алмазных шлифовальных кругов 100/80 и 160/125 удельная себестоимость обработки титанового сплава BT14 без электроэрозионных воздействий меньше на 10-20 % удельной себестоимости шлифования с непрерывными ЭЭВ, а для зернистости 200/160 различие удельной себестоимости для различных способов обработки статистически незначимо.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что непрерывные управляющие воздействия, осуществляемые одновременно со шлифованием, не оказывают заметного влияния на удельную себестоимость обработки титанового сплава BT14, а необходимость их применения в производственной практике должна определяться не экономическими, а техническими соображениями.

1. При шлифовании стали Р6М5Ф3 параметры шероховатости формируются непрерывными в осевом направлении сегментообразными срезами, образуемыми путем копирования геометрии режущих элементов зерен при прохождении исследуемого сечения РПК через зону контакта заготовки со шлифовальным кругом. Влияние неоднородности материала, наличия элементов хрупкого разрушения, явления наростообразования и пластических искажений профиля обработанной поверхности учитывается с помощью поправочного коэффициента, характеризующего отличие параметра R_a при шлифовании исследуемого обрабатываемого материала по сравнению с эталонным материалом – сталью Р6М5Ф3.

2. При алмазном шлифовании стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК лимитированной силой поджима является сила, обусловленная температурой начала фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки; при алмазном шлифовании твердых сплавов группы ВК – сила, определенная по температуре окисления алмазных зёрен; при алмазном шлифовании титанового сплава ВТ14 – сила, определенная по температуре полиморфных превращений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки, при условии, если температура основного объёма материала заготовки существенно не изменилась.

3. При алмазном шлифовании стали Р6М5Ф3 круги большей зернистости обеспечивают большую режущую способность и меньшую интенсивность ее снижения в результате большего межзеренного пространства, сформированного во время электроэрозионной правки, что приводит к большему заглублению зерен в обрабатываемый материал. В период 20 - 60 минут обработки ТЛРСШК и расход алмазов стабилизируются.

4. Первые 30 минут шлифования твердых сплавов группы ВК характеризуются интенсивным снижением ТЛРСШК, а затем снижение режущей способности практически прекращается. Режущая способность алмазных кругов при обработке

твердого сплава ВК8 стабилизируется на существенно более высоком уровне, чем при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

5. Первые 20 минут шлифования титанового сплава ВТ14 характеризуются интенсивным снижением ТЛРСШК, а затем снижение режущей способности становится близким к линейному. В дальнейшем состояние РПК стабилизируется на новом, качественно отличающемся от первоначального, уровне, при котором ТЛРСШК на порядок превышает уровень стабилизовавшейся ТЛРСШК при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

6. Изменение текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования ванадиевых инструментальных сталей, твердых сплавов группы ВК и двухфазных титановых сплавов со структурой $(\alpha + \beta)$ без ЭЭВ описываются экспоненциальными кривыми, а при шлифовании с одновременными ЭЭВ на РПК – уравнениями прямых.

7. При шлифовании по схеме с фиксированными режимными параметрами без ЭЭВ приблизиться к максимальной для данных условий производительности обработки возможно за счет переменной глубины резания (подачи на врезание), назначаемой в соответствии с изменением текущей лимитированной режущей способности РПК.

8. При алмазном шлифовании ванадиевых сталей и твердых сплавов группы ВК для всех трёх исследованных зернистостей шлифовальных кругов минимальную удельную себестоимость обработки обеспечивает шлифование с периодическими ЭЭВ на рабочую поверхность круга. При обработке титанового сплава ВТ14 осуществление периодических электроэрозионных воздействий для поддержания режущей способности алмазных кругов экономически необоснованно, а непрерывные управляющие воздействия, осуществляемые одновременно со шлифованием, не оказывают заметного влияния на удельную себестоимость обработки титанового сплава ВТ14.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВЫХОДНЫЕ
ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ.
ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

7.1 Влияние обрабатываемых материалов на установившиеся значения текущей лимитированной режущей способности и текущего расхода алмазов алмазных шлифовальных кругов из синтетических алмазов АСб различных зернистостей

Сопоставим установившиеся после стабилизации параметров РПК во время обработки значения текущей лимитированной режущей способности алмазных шлифовальных кругов из синтетических алмазов АСб различных зернистостей и текущего расхода алмазов при шлифовании без управляющих воздействий по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к РПК. Соответствующие величины, сформировавшиеся при обработке труднообрабатываемых ванадиевых инструментальных сталей, твердых сплавов группы ВК и двухфазных титановых сплавов со структурой ($\alpha + \beta$) приведены в табл. 7.1.

Анализируя данные табл. 7.1, можно сделать вывод что из трёх исследованных групп труднообрабатываемых материалов наименьшие значения текущей лимитированной режущей способности алмазных шлифовальных кругов из синтетических алмазов АСб и текущего расхода алмазов формируются при обработке ванадиевых инструментальных сталей, наибольшие – при обработке двухфазных титановых сплавов со структурой ($\alpha + \beta$). При этом установившаяся ТЛРСШК при обработке двухфазных титановых сплавов превышает этот же показатель при обработке ванадиевых инструментальных сталей на порядок. По нашему мнению, такое большое различие рассмотренных величин обусловлено выраженным положительным воздействием на сохранение высокой режущей способности шлифовального круга эффектов интенсивного наростообразования и адгезионного схватывания при шлифовании титановых сплавов.

Таблица 7.1 – Влияние обрабатываемых материалов на установившиеся значения текущей лимитированной режущей способности алмазных шлифовальных кругов из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей и текущего расхода алмазов при обработке по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к РПК

Обрабатываемый материал	Установившееся значение текущей режущей способности шлифовального круга из синтетических алмазов АС6 $Q_{уст}$, мм ³ /мин, для зернистости			Установившееся значение текущего расхода алмазов шлифовального круга из синтетических алмазов АС6 $M_{уст}$, мг/мин, для зернистости		
	100/80	160/125	200/160	100/80	160/125	200/160
Инструментальная быстрорежущая сталь Р6М5Ф3	30	32	81	2	5	8
Твердый сплав ВК8	94	134	106	3	2	4
Титановый сплав ВТ14	283	380	260	10	10	12

Вместе с тем установившееся значение текущего расхода алмазов при обработке двухфазных титановых сплавов также превышает этот же показатель при обработке ванадиевых инструментальных сталей в 2-3 раза. Это означает, что указанные выше эффекты проявляются также и в более сильном воздействии на прочность удержания алмазных зёрен в связке при обработке титанового сплава ВТ14.

Установившаяся ТЛРСШК при обработке твердых сплавов группы ВК значительно больше, чем при обработке ванадиевых инструментальных сталей. В первую очередь, это вызвано практическим отсутствием процессов засаливания межзёренного пространства на РПК и микрорельефа зёрен при шлифовании твердых сплавов.

7.2 Влияние обрабатываемых материалов на удельную себестоимость шлифования алмазными шлифовальными кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей с периодическими электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК

Удельная себестоимость шлифования алмазными шлифовальными кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей при обработке труднообрабатываемых ванадиевых инструментальных сталей и твердых сплавов группы ВК при периодических ЭЭВ на РПК сведена в табл. 7.2.

Таблица 7.2 – Удельная себестоимость шлифования алмазными шлифовальными кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей при обработке ванадиевых инструментальных сталей и твердых сплавов группы ВК с периодическими электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК

Обрабатываемый материал	Удельная себестоимость шлифования с периодическими ЭЭВ на РПК, руб/мм ³ , для зернистости		
	100/80	160/125	200/160
Инструментальная быстрорежущая сталь Р6М5Ф3	0,00276	0,00240	0,00274
Твердый сплав ВК8	0,00558	0,00612	0,00654

Из табл. 7.2 видно, что удельная себестоимость шлифования твердого сплава ВК8 для всех трёх исследованных зернистостей в 2 - 2,5 раза превышает удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3. Это объясняется в основном тем, что текущий расход алмазов при обработке твердого сплава ВК8 в первые 30 минут шлифования в 2 - 3 раза больше, чем при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3 при сопоставимой производительности в этот же период.

7.3 Выбор способа управления режущей способностью шлифовальных кругов на основе кубического нитрида бора

Наряду со шлифовальным инструментом на основе синтетических алмазов, для обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов используют шлифовальные круги, в которых в качестве абразивного материала используются плотные модификации кубического нитрида бора (эльбор, кубонит, гексанит, боразон). Такие круги широко применяются при шлифовании нескольких групп труднообрабатываемых материалов:

- сложнолегированных сталей с HRC 55 и выше;
- твердых сплавов;
- композиций конструкционных сталей с труднообрабатываемыми материалами, в частности, с твердыми сплавами.

Наибольшая эффективность применения кругов из эльбора и других модификаций кубического нитрида бора (КНБ) достигается в двух областях: при заточке металло- и деревообрабатывающего инструмента, а также при шлифовании заготовок из указанных выше групп материалов [157].

Заточка инструмента эльборовыми кругами характеризуется относительно небольшой длительностью контакта круга с обрабатываемой заготовкой, малым числом ходов, небольшим объемом снимаемой стружки в единицу времени. При этом круги обладают высокой стойкостью, работают, как правило, в режиме самозатачивания и практически не требуют повторных правок.

При шлифовании заготовок из труднообрабатываемых заготовок условия работы кругов из эльбора значительно сложнее и характеризуются высокой интенсивностью и изменчивостью во времени параметров физико-механических, физико-химических и теплофизических процессов в зоне резания.

Несмотря на то, что наибольшую стойкость шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов обеспечивают металлические связки, существует ряд проблем в применении металлических связок при изготовлении кругов из КНБ. В частности, вюрцитный нитрид бора BN_v (основная фаза гексанита-А) термодинами-

чески неустойчив при повышенных температурах и претерпевает обратное фазовое превращение вюрцитной модификации BN_v в графитоподобную BN_г, начиная с температуры $T = 600^{\circ}\text{C}$ по мартенситному механизму. Графитоподобная фаза в гексаните-А (более 2 % фазы BN_г по объему) резко ухудшает режущие свойства абразивного материала [188].

В связи с этим возникает задача управления характеристиками шлифовального инструмента с целью предотвращения выхода температурных параметров процесса обработки за допустимые границы. Решение указанной задачи сводится к поддержанию требуемой режущей способности шлифовального круга с помощью управляющих воздействий на его рабочую поверхность.

Механические воздействия на шлифовальные круги преимущественно используются для алмазных шлифовальных кругов, у зёрен которых и при правке, и в процессе обработки формируются контактные площадки на задних поверхностях. В результате высокоскоростного ударного взаимодействия алмазного зерна с активизирующим элементом на площадках контакта происходят микроразрушения и значительно увеличивается развитость микрорельефа.

В отличие от алмазных шлифовальных кругов, для кругов из КНБ нет необходимости в принудительном развитии микрорельефа зёрен, так как при обработке непрерывно происходят микросколы зёрен КНБ и, соответственно, развитость микрорельефа практически не снижается.

Поэтому в производственной практике механические воздействия на шлифовальные круги из КНБ применяют для обеспечения или поддержания требуемой макрогеометрии круга. Для придания кругу требуемой формы используется ряд способов с применением подвижных и неподвижных алмазных правящих инструментов, например алмазные карандаши типа 04 – с неориентированным расположением алмазов. Запатентован способ правки эльборовых кругов молибденовым стержнем. При этом способе одновременно достигается и требуемая точность формы рабочей поверхности круга, и требуемая ее режущая способность [157].

Объектом управления в случае механических воздействий на РПК с применением алмазов или специального инструмента с наложением вибраций является

зерно КНБ. Связка управляющим воздействиям или вообще не подвергается, или подвергается незначительно по сравнению с зёрнами. Для обеспечения заданной величины выступления зёрен СТМ над связкой используют механические воздействия свободным абразивом.

Объектом управления при воздействии свободного абразива является преимущественно связка, воздействие на зёрна СТМ незначительно. Основные практические сложности при этом связаны с шаржированием абразивных зёрен в обработанную поверхность заготовки. К тому же, оценка характера физико-механических последствий взаимодействия зёрен свободного абразива с зёрнами КНБ достаточно сложна и требует проведения дополнительных исследований.

Хорошо зарекомендовали себя в решении задачи поддержания режущей способности кругов из СТМ на металлической связке в процессе обработки электроэрозионные методы воздействий.

На основании выполненного нами анализа методов реализации управляющих воздействий на рабочую поверхность шлифовальных кругов из СТМ в процессе обработки с целью выделения в них управляемых элементов структуры круга и относительной оценки сложности технической реализации установлено, что при электроэрозионных воздействиях могут возникать условия, когда объектом управления будут одновременно зёрна СТМ и связка [165].

Анализ эффективности использования различных методов управления характеристиками кругов из кубического нитрида бора в процессе обработки позволил сделать следующие выводы [189]:

1) Механические воздействия на рабочую поверхность кругов из КНБ с применением алмазов или специального инструмента с наложением вибраций не оказывают существенного влияния на режущие свойства таких кругов.

2) Оценка эффективности применения для управления режущей способностью кругов из КНБ свободного абразива требует проведения дальнейших исследований.

3) Если объектом управления является связка круга, то для шлифовальных кругов из КНБ на металлической токопроводящей связке наиболее эффективными

представляются управляющие воздействия с использованием электрической энергии.

4) При применении электрофизических воздействий на РПК объектами управления будут оба компонента структуры круга из КНБ: зерна КНБ и удерживающая их связка.

7.4 Исследование точности определения силовых факторов процесса шлифования с применением метода термомеханических коэффициентов

7.4.1 Погрешность определения составляющих силы резания при шлифовании с применением метода термомеханических коэффициентов

Полученные нами зависимости для сил резания на единичном зерне (3.10) и (3.11) использовать для аналитического расчёта составляющих P_z и P_y не представляется возможным, так как в соответствии с формулой (4.8) максимальная температура поверхности резания и, следовательно, сила P_z , являются частью показателя в показательных функциях в составе формул (3.10) и (3.11).

Поэтому для расчета составляющих сил резания на зерне воспользуемся формулами (4.10) и (4.11), но при этом линейное уравнение вида (2.1) для определения касательных напряжений на условной плоскости сдвига будем выводить не с использованием модификации К.Макгрегора и И.Фишера, а путем аппроксимации данных, получаемых из уравнения (3.9).

Правомерность такой аппроксимации подтверждается тем, что зависимость вида (3.9) в диапазоне температур 600-1000°C незначительно отличается от линейной, в частности, для хромоникелевых сталей [119].

Сопоставим результаты расчёта составляющих силы резания на круге по формулам (4.10) - (4.11) при подстановке в них касательных напряжений на условной плоскости сдвига, определённых с использованием модификации К.Макгрегора-И.Фишера и с применением метода термомеханических коэффициентов [190].

Расчёты выполним для условий плоского врезного шлифования высоколегированной стали 12X18H9T алмазным кругом 1A1 250×76×15×5 AC6-100/80-4-M2-01 на следующих режимах: скорость круга $V_k = 35$ м/с, скорость детали $V_d = 6$ м/мин, глубина резания $t = 10$ мкм. Параметры алмазных зёрен: диаметр шаровой модели зерна $d = 132$ мкм, угол заострения $\varepsilon = 91^\circ$ и радиус округления вершины $\rho = 6,69$ мкм для модели в виде конуса с округлённой вершиной; параметры распределения разновысотности после электроэрозионной правки, описываемого законом Вейбулла: $m = 2,23$, $x_0 = 2946$. Физико-механические свойства стали 12X18H9T: коэффициент температуропроводности $a = 4,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, коэффициент теплопроводности $\lambda = 19,5$ Вт/м·К.

Форма площадки контакта алмазного зерна с поверхностью обрабатываемой заготовки принята прямоугольной.

Влияние времени шлифования на значение функции распределения разновысотности зёрен по закону Вейбулла $F(t_\phi)$ учтём с помощью поправочного коэффициента (1.22), а влияние времени обработки на длину контактных площадок алмазных зёрен – с использованием степенной зависимости (1.23).

Для алмазного круга зернистостью 100/80 при глубине шлифования $t = 10$ - 15 мкм значения постоянных коэффициентов в выражениях (1.22) и (1.23): $A_1 = 1,05$, $q_1 = 0,336$, $C_1 = 0,22$, $q_1 = 0,047$.

Значения коэффициентов C и α в уравнении (3) для стали 12X18H9T принимаем:

– при использовании модификации К.Макгрегора и И.Фишера:

$$C = 1697, \alpha = 0,148;$$

– при использовании метода термомеханических коэффициентов после аппроксимации выражения (3.9)

$$C = 1560, \alpha = 0,664.$$

Результаты расчёта тангенциальной и нормальной составляющих силы резания на шлифовальном круге по формулам (4.10) - (4.11) при подстановке в них касательных напряжений на условной плоскости сдвига, определённых различными методами, приведены на рис. 7.1.

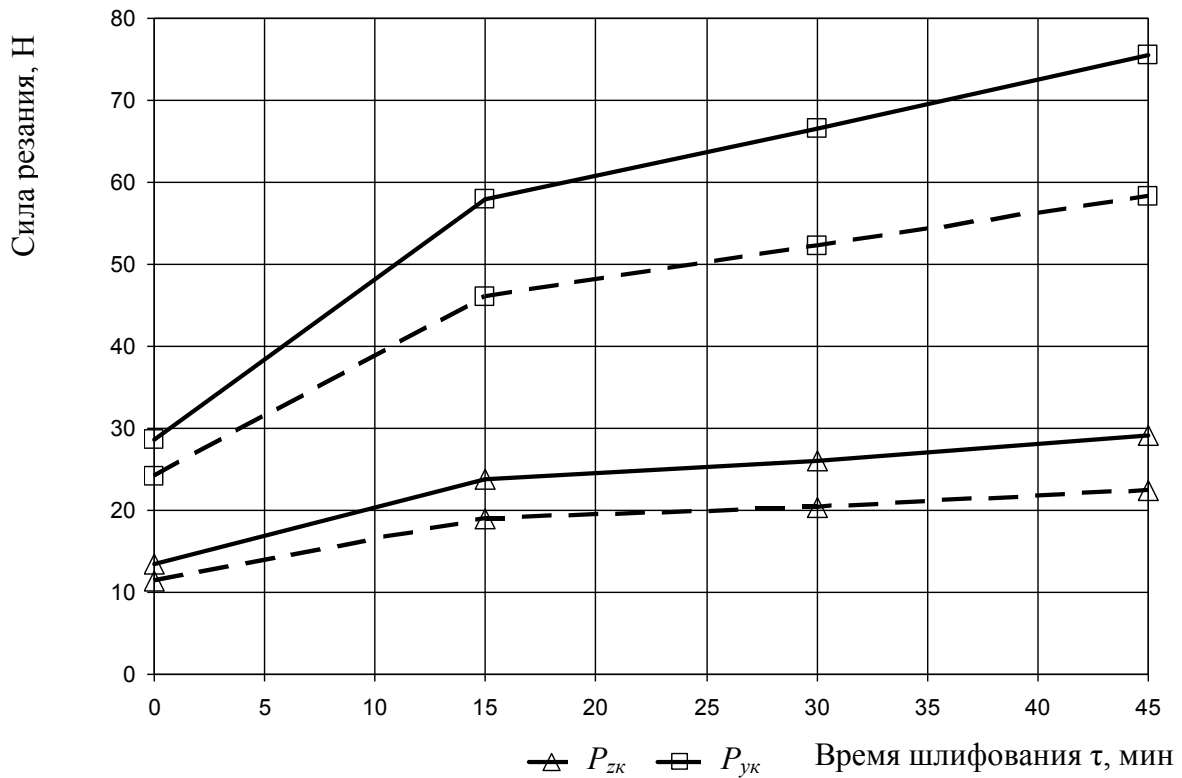


Рисунок 7.1 – Составляющие силы резания на круге в различные моменты времени шлифования при определении касательных напряжений на условной плоскости сдвига с использованием модификации К.Макгрегора-И.Фишера (сплошная линия) и с использованием метода термомеханических коэффициентов (штриховая линия)

В соответствии с рис. 7.1 зависимости составляющих силы резания на круге для обоих методов расчёта имеют сходный характер. Результаты определения погрешности расчёта сил резания с применением метода термомеханических коэффициентов по отношению к данным расчёта, основанным на применении модификации К.Макгрегора - И.Фишера, указаны в табл. 7.3.

Как видно из табл. 7.3, погрешность расчёта сил резания с применением метода термомеханических коэффициентов по сравнению к данным расчёта, основанным на применении модификации К.Макгрегора - И.Фишера, в различные моменты времени шлифования находится в пределах 15-23 %, что вполне допустимо

в практике определения механических характеристик материалов в сложных условиях деформации, характерных для процесса резания [190].

Таблица 7.3 – Погрешность расчёта сил резания с применением метода термомеханических коэффициентов по отношению к данным расчёта, основанным на применении модификации К.Макгрегора-И.Фишера

Время шлифования τ , мин	Модификация К.Макгрегора - И.Фишера		Метод термомеханических коэффициентов		Погрешность расчёта силы $P_{зк}, \%$	Погрешность расчёта силы $P_{ук}, \%$
	$P_{зк}, Н$	$P_{ук}, Н$	$P_{зк}, Н$	$P_{ук}, Н$		
1	13,4	28,6	11,4	24,1	14,9	15,7
15	23,8	59,0	18,9	46,0	20,6	20,7
30	26,0	66,6	20,4	52,3	21,5	21,5
45	29,2	79,0	22,5	58,3	22,9	22,9

Таким образом, методика определения механических характеристик обрабатываемых сталей и сплавов в условиях резания, основанная на применении метода термомеханических коэффициентов, наряду с методикой, которая использует модификацию К.Макгрегора - И.Фишера, может быть применена для определения составляющих силы резания при шлифовании и назначения усилия поджима обрабатываемой заготовки к рабочей поверхности шлифовального круга при обработке по схеме с фиксированной силой поджима.

7.4.2 Сопротивление обрабатываемого материала деформированию с учётом скорости деформации при обработке шлифованием

Для прогнозирования энергосиловых параметров процесса и показателей качества механически обрабатываемых изделий машиностроения важное значение имеет определение сопротивления обрабатываемого материала деформированию в фактических (традиционно называемых «истинными») условиях деформирования. Графические, графоаналитические и численные модели сопротивления металлов деформированию учитывают четыре основных фактора: химический со-

став металла, температуру, степень и скорость деформации [114, 117, 191]. Наиболее детализированные методики определения истинного сопротивления деформации, пределов текучести и прочности, учитывающие перечисленные факторы и основанные на результатах математической обработки большого количества экспериментальных данных, разработаны для условий холодной и горячей прокатки металлов и сплавов и описаны в работах Зюзина В.И. [115, 116], Третьякова А.В. [118], Андреюка Л.В. [192, 193, 194], Шиды С. (Shida S.) [195].

В связи с недостижимостью при пластометрических испытаниях материалов скоростей деформации, характерных для процессов обработки металлов резанием [196], в результаты расчетов необходимо вносить поправки, которые учитывают отличие скоростей деформации при обработке резанием от значений, принятых при выводе расчётных зависимостей авторами отмеченных методик.

В связи с непрерывным совершенствованием технологии и оборудования обработки давлением постоянно ведутся исследования по совершенствованию методик определения сопротивления материала деформированию и уточнению условий их применения [197]. Так, в работе [198] предложена модификация расчётной модели Шиды С., состоящая в повышении верхней границы диапазона изменения скоростей деформирования до значения 3000 с^{-1} , а в работах [199, 200] формула Андреюка Л.В. дополнена коэффициентом влияния фазовых превращений и коэффициентом коррекции по скорости и степени деформации.

Исследуем точность расчёта сопротивления сталей деформированию при обработке шлифованием по оригинальной формуле Л.В. Андреюка и по той же формуле, включающей современные дополнения к ней, а также выполним определение поправок к соответствующим расчётным формулам, учитывающих скорости деформации при обработке шлифованием.

Для определения истинного сопротивления деформации Л.В. Андреюком предложена зависимость:

$$\sigma_u = S \cdot \sigma_{0d} \cdot u^a \cdot (10\varepsilon)^b \cdot (T/1000)^c, \quad (7.1)$$

где S , a , b , c – постоянные числа, определяемые для каждой марки стали по результатам испытаний на пластометре.

В соответствии с положениями теории прокатки истинное сопротивление деформации в русскоязычной технической литературе определяется как «истинный предел текучести» σ_m [200, 201], в англоязычной – как «среднее напряжение текучести» (Mean Flow Stress, MFS) [202].

В работе [193] предложены зависимости для расчёта постоянных чисел в формуле (7.1) по химическому составу сталей и сплавов. В этих зависимостях учтены 13 основных легирующих и микролегирующих элементов. Диапазон практического применения формулы (7.1) по трём оставшимся основным факторам составляет: $u = 0,01-150 \text{ с}^{-1}$; $\varepsilon = 0,05-0,3$; $T = 800-1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

В работе [200] с целью применения методики Л.В. Андреюка для моделирования прокатки при температуре ниже $800 \text{ }^\circ\text{C}$ в уравнение (7.1) добавлен коэффициент K_s , учитывающий влияние фазовых превращений в стали.

С учетом указанного дополнения формула (7.1) принимает вид:

$$\sigma_u = \frac{S \cdot \sigma_{0d}}{K_s} \cdot u^a \cdot (10\varepsilon)^b \cdot \left(\frac{T}{1000} \right)^c, \quad (7.2)$$

где

$$K_s = \begin{cases} 0,4619 + 0,1327 \frac{T}{100} & \text{при } T < 700^\circ \text{C}; \\ 2,0265 \frac{T}{100} - 12,749 & \text{при } 700 \leq T \leq 750^\circ \text{C}; \\ 21,835 - 2,5307 \frac{T}{100} & \text{при } 750 \leq T \leq 800^\circ \text{C}; \\ 4,632 - 0,667 \frac{T}{100} + 0,0305 \left(\frac{T}{100} \right)^2 & \text{при } T > 800^\circ \text{C}. \end{cases}$$

Коэффициент, учитывающий погрешности значений степени и скорости деформации относительно средних значений этих же параметров, в работе [200] предлагается рассчитывать по регрессионным зависимостям, полученным либо при конечно-элементном моделировании процесса прокатки на широкополосном стане горячей прокатки, либо при уточнении результатов моделирования с ис-

пользованием экспериментальных данных о параметрах процесса, полученных из АСУ ТП стана прокатки крупногабаритных листов из низколегированной стали. На основании того, что конечно-элементное моделирование процесса прокатки проводилось для значений термомеханических параметров, характерных для процесса горячей прокатки и существенно отличающихся от значений аналогичных параметров процесса обработки резанием, для дальнейшего исследования примем формулу (7.2), включающую коэффициент K_s .

Возможность применения методики Л.В. Андреюка для определения механических характеристик сталей при резании проверим на примере сталей марок 30ХГСНА, 18Х2Н4ВА.

Значения постоянных величин уравнения (7.1) для указанных марок сталей приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4 – Значения постоянных величин для определения сопротивления сталей деформации по уравнению (7.1) [194]

Марка стали	S	σ_{0d} , МПа	a	b	$-c$
30ХГСНА	1,051	97,6	0,116	0,140	3,42
18Х2Н4ВА	0,971	107	0,117	0,165	2,73

Возможная ошибка определения сопротивления деформации по зависимости (7.1) оценивается как $\pm 4\%$ с доверительной вероятностью 0,95 [194].

Уравнение вида (7.1) для стали 30ХГСНА получим по данным табл. 7.4, приняв максимальную из диапазона применения формулы (7.1) степень деформации $\varepsilon = 0,30$, скорость деформации $u = 100 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, зависимость предела текучести стали 30ХГСНА от температуры будут иметь вид (по оригинальной формуле Л.В. Андреюка):

$$\begin{aligned}\sigma_m &= 1,051 \cdot 97,6 \cdot 100^{0,116} \cdot (10 \cdot 0,3)^{0,140} \cdot (T/1000)^{-3,42}; \\ \sigma_m &= 204,10 \cdot (T/1000)^{-3,42}.\end{aligned}\tag{7.3}$$

Сопоставим значения предела текучести, рассчитанные по уравнению (7.3), с данными С.Н. Корчака [83] для разрушающего напряжения стали 30ХГСНА в температурно-скоростных условиях процесса шлифования (табл. 7.5).

Таблица 7.5 – Пределы текучести стали 30ХГСНА, рассчитанные по формуле Л.В. Андреюка, и разрушающее напряжение стали 30ХГСНА при шлифовании

Температура T , К	Предел текучести стали 30ХГСНА σ_m , МПа (формула Л.В. Андреюка [194])	Разрушающее напряжение в условиях шлифования стали 30ХГСНА σ_b , МПа (по данным С.Н. Корчака [83])	Разность значений механических характеристик стали 30ХГСНА в условиях шлифования $\Delta\sigma$, МПа
1	2	3	4
873	1171	1927	756
973	691	1590	899
1073	438	1253	815
1173	293	1189	896
1273	204	1125	921
1373	147	1011	864
1473	109	896	787

Аппроксимируем разность значений рассчитанных нами механических характеристик стали 30ХГСНА (столбец 4 в табл. 7.5) показательной зависимостью:

$$\Delta\sigma = d \cdot m^T, \quad (7.4)$$

где d и m – коэффициенты уравнения регрессии.

Значения постоянных коэффициентов зависимости (7.4), определённых с помощью функции экспоненциальной аппроксимации ЛГРФПРИБЛ () табличного процессора Excel, составляют: $d = 0,9999$, $m = 979$ [203].

Таким образом, при введении поправки вида (7.4) зависимость разрушающего напряжения стали 30ХГСНА от температуры при скорости деформации в условиях шлифования можно представить в следующем виде:

$$\sigma_s = 204,10 \cdot (T/1000)^{-3,42} + 979. \quad (7.5)$$

Определим погрешность расчета разрушающего напряжения по зависимости (7.5) по сравнению с экспериментальными данными С.Н. Корчака (рис. 7.2). Как видно из рис. 7.2, в температурном диапазоне 600-1200°С применение формулы Л.В. Андреюка с учетом принятой поправки позволяет определять значения механических характеристик стали 30ХГСНА в условиях деформирования при шлифовании, которые весьма близки к экспериментальным данным С.Н. Корчака.

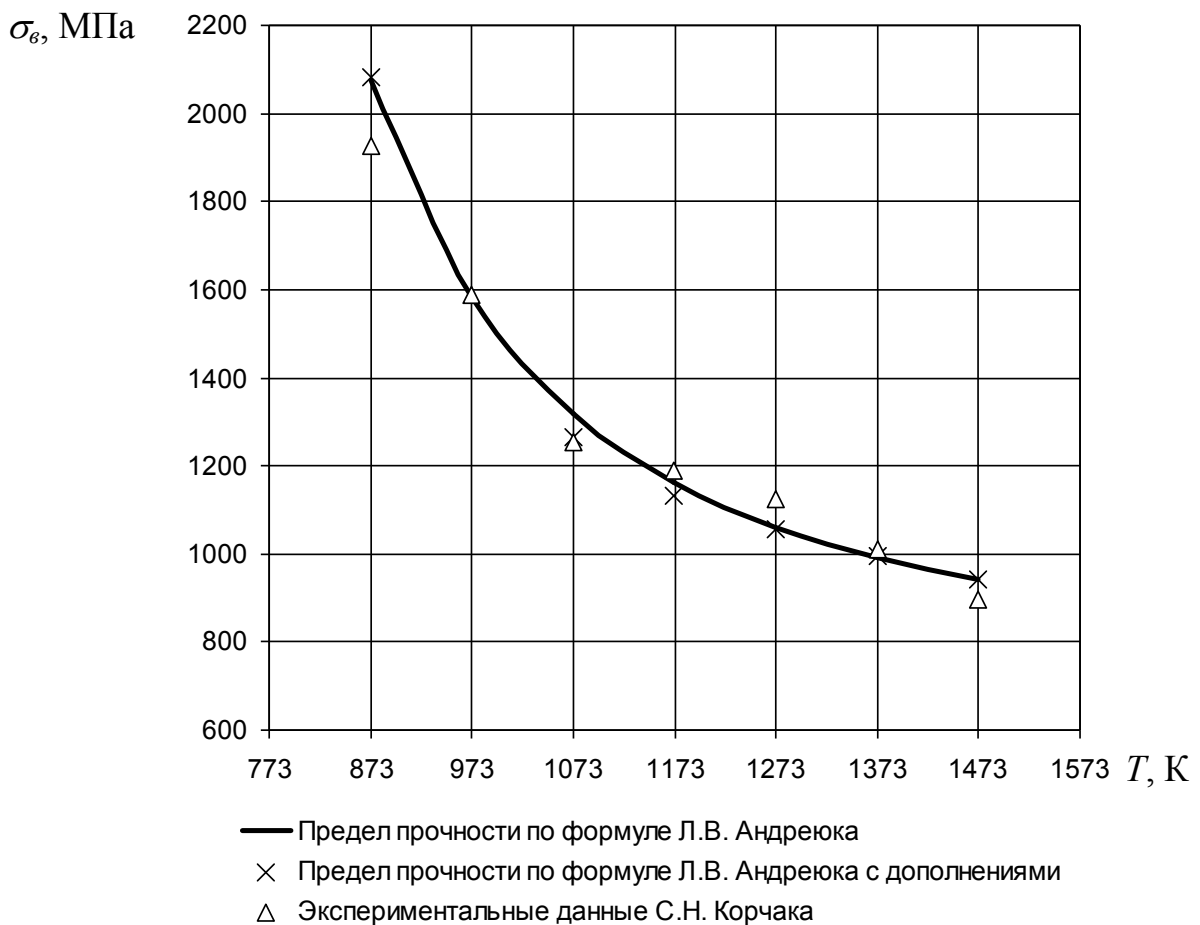


Рисунок 7.2 – Разрушающее напряжение (предел прочности) стали 30ХГСНА, определённое по формуле Л.В. Андреюка, в температурно-скоростных условиях шлифования

Максимальная погрешность определения разрушающего напряжения (предела прочности) при этом не превышает 8%. Введение дополнительного коэффициента K_s , учитывающего влияние фазовых превращений в стали, не приводит к повышению точности расчёта предела прочности (максимальная погрешность оп-

ределения σ_g во всех исследованных точках при использовании дополненной формулы Л.В. Андреюка находится в пределах до 8 %) [203].

Уравнение вида (7.1) для стали 18X2H4BA получим по данным табл. 7.4, приняв степень деформации и скорость деформации аналогичными указанным ранее. Зависимость предела текучести стали 18X2H4BA от температуры будет иметь вид (по оригинальной формуле Л.В. Андреюка):

$$\sigma_m = 0,971 \cdot 107 \cdot 100^{0,117} \cdot (10 \cdot 0,3)^{0,165} \cdot (T/1000)^{-2,73};$$

$$\sigma_m = 213,47 \cdot (T/1000)^{-2,73}. \quad (7.6)$$

Сравним значения предела текучести, рассчитанные по уравнению (7.6) с данными С.Н. Корчака [83] для разрушающего напряжения стали 18X2H4BA в температурно-скоростных условиях для процесса шлифования (табл. 7.6).

Таблица 7.6 – Пределы текучести стали 18X2H4BA, рассчитанные по формуле Л.В. Андреюка, и разрушающее напряжение стали 18X2H4BA при шлифовании

Температура T , К	Предел текучести стали 18X2H4BA σ_m , МПа (формула Л.В. Андреюка [194])	Разрушающее напряжение в условиях шлифования стали 18X2H4BA σ_g , МПа (по данным С.Н. Корчака [83])	Разность значений механических характеристик стали 18X2H4BA в условиях шлифования $\Delta\sigma$, МПа
1	2	3	4
873	861	3747	2886
973	565	2866	2301
1073	393	1985	1592
1173	285	1701	1416
1273	213	1417	1204
1373	165	–	–
1473	130	–	–

Аналогично ранее рассмотренному случаю исследования сопротивления деформации стали 30ХГСНА зависимость разрушающего напряжения стали

18X2H4BA от температуры при скорости деформации в условиях шлифования при введении поправки вида (7.4) представим следующим образом (рис. 7.3):

$$\sigma_{\sigma} = 213,47 \cdot (T/1000)^{-2,73} + 10653 \cdot 0,9978^T. \quad (7.7)$$

Определим погрешность расчета предела прочности по зависимости (7.7) по сравнению с экспериментальными данными С.Н. Корчака. Как и в предыдущем случае, в соответствии с рис. 7.3 в температурном диапазоне 600-1200°C применение формулы Л.В. Андреюка с учетом принятой поправки на скорость деформации позволяет определять значения механических характеристик стали 18X2H4BA в условиях деформирования при шлифовании с достаточной для практических целей точностью.



Рисунок 7.3 – Разрушающее напряжение (предел прочности) стали 18X2H4BA, определённое по формуле Л.В. Андреюка, в температурно-скоростных условиях шлифования

Определим погрешность расчета предела прочности по зависимости (7.7) по сравнению с экспериментальными данными С.Н. Корчака. Как и в предыдущем

случае, в соответствии с рис. 7.3 в температурном диапазоне 600-1200°C применение формулы Л.В. Андреюка с учетом принятой поправки позволяет определять значения механических характеристик стали 18Х2Н4ВА в условиях деформирования при шлифовании с достаточной для практических целей точностью. Максимальная погрешность определения разрушающего напряжения (предела прочности) по сравнению с экспериментальными данными С.Н. Корчака составляет 10%. Введение дополнительного коэффициента K_s приводит к некоторому повышению точности расчёта (максимальная погрешность определения σ_g во всех исследованных точках при использовании дополненной формулы Л.В. Андреюка не превышает 5 %) [203].

Как показали результаты проведенного исследования, использование дополнений к формуле Л.В. Андреюка, учитывающих влияние фазовых превращений в стали на её сопротивление деформации, не является принципиальным для повышения точности расчёта разрушающего напряжения (предела прочности в температурно-скоростных условиях шлифования); вопрос о целесообразности применения указанного дополнения следует рассматривать по отдельности для каждой марки стали или группы обрабатываемых сталей.

7.5 Определение относительного вклада процессов изнашивания зёрен и засаливания межзёренного пространства в ухудшение режущей способности рабочей поверхности шлифовального круга

Как было отмечено в подразделе 3.5, для определения производительности шлифования в любой момент времени обработки достаточно иметь зависимость фактической глубины шлифования от времени $t_{\phi}(\tau)$. Для получения указанной зависимости воспользуемся совокупностью выражений, составляющих математическое описание процесса шлифования инструментальных ванадиевых сталей с фиксированными режимами (см. п. 1.5.1), а условие бездефектной обработки (4.13) представим в виде:

$$0,98[P_y] < P_y < 1,00[P_y]. \quad (7.8)$$

Приведенное в работах [60, 112] математическое описание процесса шлифования инструментальных сталей включает в себя ухудшение режущей способности РПК в результате процесса изнашивания зёрен шлифовального инструмента, а остальные факторы, вызывающие снижение режущих свойств шлифовального круга инструмента, не учитываются.

С использованием ЭВМ пошаговым методом рассчитаем в различные моменты времени обработки фактическую глубину шлифования, при которой выполняется неравенство (7.8). По полученным данным выведем закономерность изменения глубины шлифования $t_{\phi 1}$ во времени обработки τ в результате процесса изнашивания зёрен, которая описывается выражением вида:

$$t_{\phi 1}(\tau) = t_{ycm1} + \Delta t_1 \cdot \exp(\alpha_1 \tau), \quad (7.9)$$

где величины имеют тот же физический смысл, что в формуле (3.21).

Изменение во времени фактической глубины шлифования t_{ϕ} при обработке с фиксированной силой поджима заготовки к кругу в случае совместного воздействия на режущую способность РПК процессов изнашивания зёрен и засаливания межзёренного пространства опишем уравнением, аналогичным (7.9).

$$t_{\phi \Sigma}(\tau) = t_{ycm \Sigma} + \Delta t_{\Sigma} \cdot \exp(\alpha_{\Sigma} \tau). \quad (7.10)$$

Параметры уравнения (7.10), отражающего совместное влияние на фактическую глубину шлифования процессов засаливания межзёренного пространства и изнашивания зёрен, определим экспериментальным путём при врезной обработке образцов из закалённой быстрорежущей стали Р6М5Ф3 с постоянной силой поджима $P_n = 80$ Н алмазным шлифовальным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 D181 100 М2-01 40 м/с ГОСТ Р 53923-2010.

Перед началом обработки шлифовальный круг правили электроэрозионным методом с подводом технологического тока в зону резания. В качестве источника технологического тока при правке использовался блок электропитания модели ИТТ-35. При правке анодом был шлифовальный круг, катодом – правящий электрод-инструмент. Правка осуществлялась на режимах, приведенных в табл. 7.7. Охлаждение – 0,3 %-ный водный раствор кальцинированной соды.

Таблица 7.7 – Электрические и механические режимы правки алмазного круга
1A1 250×76×15×5 AC6 D181 100 M2-01 40 м/с ГОСТ Р 53923-2010

Электрические режимы		Механические режимы			
Напряжение холостого хода U_{xx} , В	Средняя сила тока I_{cp} , А	Глубина резания t , мкм	Поперечная подача S_n	Скорость круга V_k , м/с	Скорость электрода $V_э$, м/мин
60	8-10	2-5	3 мм/ход (ручная)	35	6

Уравнение регрессии (7.9), выведенное по математической модели процесса, при постоянной силе поджима $P_n = 80$ Н имеет вид

$$t_{\phi 1} = 9 + 4,88 \exp(-0,07 \tau). \quad (7.11)$$

Уравнение регрессии (7.10), полученное по экспериментальным данным, для указанных выше условий и режимов шлифования с постоянной силой поджима заготовки к кругу имеет вид

$$t_{\phi \Sigma} = 0,18 + 14,13 \exp(-0,118 \tau). \quad (7.12)$$

Из сравнения уравнений (7.11) и (7.12) с учётом доверительного интервала фактической глубины шлифования (табл. 7.8) видно, что исходная глубина шлифования, определённая расчётным путём по математической модели процесса, попадает в 95%-й доверительный интервал экспериментально установленной исходной глубины шлифования.

Выведем уравнение, описывающее изменение во времени фактической глубины шлифования t_{ϕ} при обработке с фиксированной силой поджима заготовки к кругу в случае воздействия на режущую способность РПК только процесса засаливания межзёренного пространства [204].

Вычислим разности значений фактической глубины шлифования t_{ϕ} при обработке с фиксированной силой поджима заготовки к кругу, рассчитанных по уравнениям (7.9) и (7.10); эти разности характеризуют влияние на ухудшение режущей способности РПК процесса засаливания межзёренного пространства без учёта изнашивания зёрен.

Таблица 7.8 – Доверительные интервалы фактической глубины шлифования t_ϕ при обработке образцов из быстрорежущей стали Р6М5Ф3 кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 D181 100 М2-01 40 м/с ГОСТ Р 53923-2010

№ п/п	Время шлифования τ , мин	Среднее квадратическое отклонение фактической глубины шлифования S_{t_ϕ} , мкм	Фактическая глубина шлифования t_ϕ , мкм
1	1	1,08	14,31±2,78
2	5	0,270	9,14±0,69
3	10	0,216	5,09±0,55
4	15	0,216	2,66±0,55
5	30	0,072	0,86±0,19
6	45	0,072	0,68±0,19
7	60	0,072	0,24±0,19

Аппроксимируем разности значений фактической глубины шлифования t_ϕ выражением, аналогичным формуле (3.21):

$$t_{\phi 2}(\tau) = t_{ycm2} + \Delta t_2 \cdot \exp(\alpha_2 \tau). \quad (7.13)$$

С использованием полученных результатов аппроксимации модифицируем закономерность изменения во времени фактической глубины шлифования t_ϕ при обработке с фиксированной силой поджима заготовки к кругу в случае совместного воздействия на режущую способность РПК процессов изнашивания зёрен и засаливания межзёренного пространства (уравнение (7.10)) и представим её выражением следующего вида:

$$t_{\phi \Sigma}(\tau) = \Delta t_1 \cdot \exp(\alpha_1 \tau) + \Delta t_2 \cdot \exp(\alpha_2 \tau), \quad (7.14)$$

где $\Delta t_1 = t_0 - t_{ycm1}$ – амплитуда снижения глубины шлифования вследствие воздействия процесса изнашивания зёрен;

t_{ycm1} – установившаяся глубина шлифования для случая, когда ухудшение режущей способности РПК обусловлено только процессом изнашивания зёрен;

$\Delta t_2 = t_0 - t_{ycm2}$ – амплитуда снижения глубины шлифования вследствие воздействия процесса засаливания межзёренного пространства;

t_{ycm2} – установившаяся глубина шлифования для случая, когда ухудшение режущей способности РПК обусловлено только процессом засаливания межзёрненного пространства;

α_1, α_2 – эмпирические коэффициенты.

В формуле (7.14) первое слагаемое отражает вклад в ухудшение режущей способности РПК процесса изнашивания зёрен, а второе – вклад в снижение режущей способности РПК процесса засаливания межзёрненного пространства. Для рассматриваемого процесса плоского шлифования закалённой быстрорежущей стали повышенной производительности Р6М5Ф3 с постоянной силой поджима заготовки к кругу $P_n = 80$ Н алмазным шлифовальным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 D181 100 М2-01 40 м/с ГОСТ Р 53923-2010 выражение (7.14) принимает вид:

$$t_{\phi\Sigma} = 4,88 \exp(-0,07 \tau) + 9,0 \exp(-0,064 \tau). \quad (7.15)$$

Для того чтобы зависимость (7.15) можно было использовать не только с начала координат, где $\tau = 0$, а и с любого другого момента времени, когда начнётся изменение режущей способности круга в результате суммарного воздействия процессов изнашивания зёрен и засаливания межзёрненного пространства РПК, переведём её в безразмерный вид, разделив обе части уравнения (7.15) на величину t_0 – исходную глубину шлифования рельефом, сформированным после правки круга:

$$\frac{t_{\phi\Sigma}}{t_0} = \frac{\Delta t_1}{t_0} \exp(\alpha_1 \tau) + \frac{\Delta t_2}{t_0} \exp(\alpha_2 \tau).$$

В результате получим следующее уравнение для безразмерной фактической глубины шлифования $T_{\phi\Sigma}$ [204]:

$$T_{\phi\Sigma} = 0,35 \exp(-0,07 \tau) + 0,65 \exp(-0,064 \tau). \quad (7.16)$$

В формуле (7.16) коэффициенты перед показательными выражениями характеризуют относительный вклад процессов изнашивания зёрен и засаливания межзёрненного пространства в суммарное снижение режущей способности РПК.

В итоге можно сделать вывод, что при шлифовании труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, характер разрушения которых при

резании преимущественно пластический, относительный вклад процессов изнашивания зёрен инструментального материала и засаливания межзёренного пространства в суммарное снижение режущей способности РПК характеризуется соотношением 0,35:0,65 или, принимая во внимание неизбежное наличие погрешностей, приближенным соотношением 1:2.

7.6 Внедрение результатов исследований

7.6.1 Разработка новых способов шлифования

Проведенные теоретические исследования и результаты их экспериментальной проверки позволили разработать новые способы шлифования, которые защищены патентами Украины (Приложение 5).

Патент Украины № 51396.

Разработан способ шлифования, включающий соответствующую обработку детали на оптимальных режимах, которые определяются при обработке образцовой детали, **отличающийся** тем, что подачу на врезание задают переменной на каждый проход, а её величину задают в соответствии с соотношением [166]

$$S_{ep} = t_{ycm} + \Delta t \cdot \exp(\alpha \cdot i \cdot \tau_{np}),$$

где t_{ycm} – глубина шлифования, которая установилась при предварительной обработке образцовой детали по упругой схеме, аналогичной по кинематике жёсткой и выполняемой с постоянной силой прижатия образца к рабочей поверхности круга, которая обеспечивает отсутствие фазово-структурных превращений в поверхностном слое образца;

Δt – амплитуда уменьшения глубины шлифования при предварительной обработке детали по упругой схеме вследствие ухудшения режущей способности рабочей поверхности;

α – эмпирический коэффициент;

i – номер прохода инструмента с начала работы круга после правки;

τ_{np} – время рабочего прохода инструмента при обработке детали [166].

Задаваясь периодом дискретизации τ_{disc} , получим дискретные значения переменной фактической глубины шлифования, которая будет изменяться в соответствии с изменением ТЛФГШ и по которой будет назначаться подача на врезание (рис. 7.4).

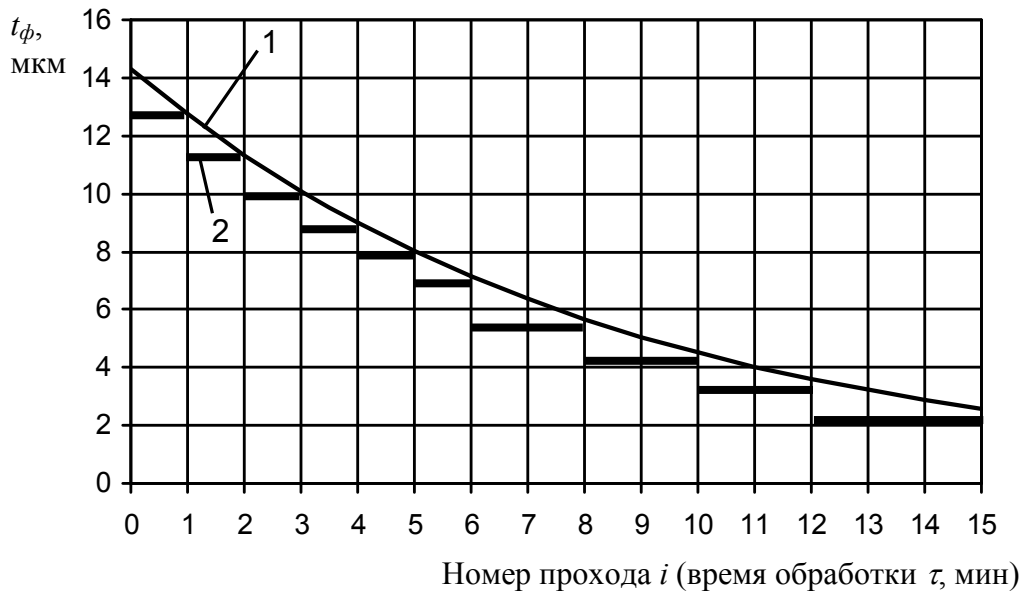


Рисунок 7.4 – Изменение ТЛФГШ и подач на врезание на каждый проход при обработке образца из стали Р6М5Ф3 без ЭЭВ:

1 – изменение фактической глубины шлифования $t_{\phi} = f(\tau)$,

2 – подача на врезание для i -го прохода

Период дискретизации подачи на врезание рекомендуется выбирать кратным машинному времени, необходимому для выполнения шлифовальной операции. Минимальное значение периода дискретизации при плоском шлифовании равно времени одного продольного хода стола станка.

Патент Украины № 97680.

Разработан способ шлифования, включающий обработку детали по упругой схеме с электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга на оптимальных режимах, которые определяются при обработке образцовой детали, когда сначала находят закономерность уменьшения режущей способности рабо-

чей поверхности круга при шлифовании на оптимальных механических режимах без электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга, **отличающийся** тем, что потом определяют время периодических электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга на максимальных для данного источника тока электрических режимах одновременно с обработкой детали до восстановления начальной величины режущей способности и закономерность увеличения режущей способности за счёт электроэрозионных воздействий, находят оптимальное время между периодическими электроэрозионными воздействиями по критерию минимальной удельной себестоимости шлифования, а величину среднего тока непрерывных электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга одновременно со шлифованием детали задают в соответствии с соотношением

$$I_{\text{ср непр}} = I_{\text{ср пер}} \frac{\tau_{\text{восст}}}{\tau_{\text{восст}} + T_{\text{опт}}},$$

где $I_{\text{ср непр}}$ – средняя величина тока непрерывных электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга;

$I_{\text{ср пер}}$ – средняя величина тока периодических электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга;

$\tau_{\text{восст}}$ – время периодических электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга до восстановления начальной величины режущей способности;

$T_{\text{опт}}$ – оптимальное время между периодическими электроэрозионными воздействиями по критерию минимальной удельной себестоимости шлифования [168].

Патент Украины № 61437.

С целью совершенствования способа определения режимов шлифования [166] разработан способ шлифования, в котором для поиска оптимальных режимов в качестве основного технического ограничения на режимы шлифования используется скорость погружения поверхности обрабатываемого образца в РПК, причем указанная скорость определяется при шлифовании неподвижного образца по упругой схеме [205].

После определения квазипостоянной скорости погружения глубина шлифования t , мм, по схеме обработки с фиксированными режимами определяется из соотношения:

$$t = \frac{W \cdot \tau}{60},$$

где W – квазипостоянная скорость погружения поверхности обрабатываемого образца в режущую поверхность круга при шлифовании по упругой схеме, мм/мин;

τ – время непрерывного шлифования по упругой схеме, с;

а скорость стола станка, м/мин, задается в соответствии с соотношением:

$$V_{cm} = \frac{60(B + B_k)}{1000 \cdot \tau},$$

где B – размер обрабатываемой детали в направлении вектора скорости резания, мм;

B_k – ширина алмазоносного слоя на шлифовальном круге, мм.

7.6.2 Внедрение результатов исследований в производство

Ряд разработок, выполненных в диссертационной работе, переданы для использования на промышленных предприятиях и в проектных организациях Донецкой Народной Республики и Украины (Приложение 6).

Разработанные в результате выполненных исследований рекомендации по назначению подачи на врезание при шлифовании деталей из легированных сталей в соответствии с законом изменения режущей способности шлифовального круга во время осуществления процесса шлифования переданы для использования на ООО «Озеряновский машиностроительный завод «Технология». Внедрение указанных рекомендаций позволит повысить производительность шлифовальных операций при обработке поверхностей вращения на 30-40 % и обеспечит существенное снижение себестоимости механической обработки машиностроительных

изделий, имеющих рабочие поверхности, подвергаемые обработке шлифовальным инструментом.

Ожидаемый экономический эффект от использования переданных на ООО «Озеряновский машиностроительный завод «Технология» рекомендаций и методик назначения режимов обработки шлифованием поверхностей изделий тяжелого машиностроения составит 85000,00 рублей РФ (восемьдесят пять тысяч рублей РФ 00 коп.).

Для внедрения в производственный процесс ООО «Торпласт» переданы следующие разработки:

1. Методики определения рациональных режимов резания на отрезной и фаскообразующей операциях при изготовлении полипропиленовых труб.

2. Разработки конструкции устройства для восстановления режущей способности заточного круга электроэрозионным способом при затачивании отрезных ножей с режущими твердосплавными элементами.

3. Модернизации заточного станка модели ЗБ632 для регулирования силы прижатия затачиваемой заготовки к заточному кругу.

4. Совершенствования конструкции осевого отрезного устройства для непрерывной порезки пластиковых труб с целью увеличения его производительности и надежности.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработок в производственный процесс ООО «Торпласт» в 2014 году составил 25000 гривен (двадцать пять тысяч гривен Украины 00 коп.).

Для использования в технологической подготовке производства и в производственных условиях механических и сборочных цехов на ООО «Фирма «Ви-Ва» переданы следующие разработки:

1. Технологические рекомендации по назначению режимных параметров при алмазно-абразивной обработке деталей из нержавеющей труднообрабатываемых молибденосодержащих сталей.

2. Методика определения физико-механических свойств нержавеющей высоколегированных сталей в температурно-скоростных условиях обработки лезвийным и абразивным инструментом.

3. Конструкторская документация по модернизации станков шлифовальной группы для осуществления управляющих воздействий с целью восстановления режущей способности шлифовальных кругов электроэрозионным способом в рабочей или автономной зоне.

Ожидаемый экономический эффект от использования в технологической подготовке производства и в производственных условиях переданных на предприятие ООО «Фирма «Ви-Ва» рекомендаций, методик и конструкторской документации составит 84000,00 рублей РФ (восемьдесят четыре тысячи рублей РФ 00 коп.).

Для практического использования в производственных условиях на ООО «Деревообрабатывающий инструмент» переданы следующие разработки:

1. Технологические рекомендации по назначению режимов резания при алмазном шлифовании кругами на металлической связке изделий из твердых сплавов группы ВК.

2. Технологические рекомендации по назначению режимов резания при алмазном шлифовании кругами на металлической связке изделий из комбинации материалов «твердый сплав – сталь».

3. Конструкторская документация по модернизации станков шлифовальной группы для осуществления обработки с фиксированной силой прижатия обрабатываемой заготовки к шлифовальному или заточному кругу.

4. Конструкторская документация по модернизации станков шлифовальной группы для восстановления режущей способности шлифовальных кругов электроэрозионным способом в рабочей или автономной зоне.

Ожидаемый экономический эффект от использования в технологической подготовке производства инструмента переданных на предприятие ООО «Деревообрабатывающий инструмент» рекомендаций и конструкторской документации составит 102000,00 рублей РФ (сто две тысячи рублей РФ 00 коп.).

Для использования в проектных работах на ГП «ДОНПКТИ» переданы следующие разработки:

1. Методики определения рациональных режимов резания при алмазном шлифовании кругами на металлической связке деталей из труднообрабатываемых высоколегированных сталей и твердых сплавов группы ВК.

2. Методики определения оптимальных режимов электроэрозионных управляющих воздействий резания при шлифовании деталей из труднообрабатываемых высоколегированных сталей и твердых сплавов кругами из СТМ с восстановлением режущей способности кругов электроэрозионным способом.

3. Конструкции специальных устройств для восстановления режущей способности шлифовальных кругов электроэрозионным способом в автономной зоне при осуществлении управляющих воздействий одновременно с обработкой.

Ожидаемый экономический эффект от использования в технологическом обеспечении операций алмазно-абразивной обработки переданных на Государственное предприятие «ДОНПКТИ» методик и конструкций составит 98000,00 рублей РФ (девяносто восемь тысяч рублей РФ 00 коп.).

7.6.3 Внедрение результатов исследований в учебный процесс

В учебном процессе кафедры «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики используются следующие разработки, выполненные на основе исследований из диссертационной работы:

1. Теоретическая модель определения оптимальных режимов шлифования – при подготовке бакалавров направлений подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» при чтении лекций по учебной дисциплине «Теория резания», тема «Методики назначения режимов резания».

2. Рекомендации по выбору способов управления режущей способностью шлифовальных кругов, обеспечивающих минимальную удельную себестоимость обработки, – при подготовке бакалавров направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» при проведении лабораторных занятий по учебной дисциплине «Физико-механические методы обработки», тема «Изучение современных способов правки алмазных шлифовальных кругов на металлической связке».

7.7 Выводы

1. Из трёх исследованных групп труднообрабатываемых материалов: ванадиевых инструментальных сталей, твердых сплавов группы ВК и двухфазных титановых сплавов со структурой ($\alpha + \beta$) наименьшие значения текущей лимитированной режущей способности алмазных шлифовальных кругов из синтетических алмазов АС6 и текущего расхода алмазов формируются при обработке ванадиевых инструментальных сталей, наибольшие – при обработке двухфазных титановых сплавов со структурой ($\alpha + \beta$).

2. Удельная себестоимость шлифования твердого сплава ВК8 для всех трёх исследованных зернистостей в 2 - 2,5 раза превышает удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

3. При управлении режущей способностью кругов из КНБ в случае, если объектом управления является связка круга, то для шлифовальных кругов из КНБ на металлической токопроводящей связке наиболее эффективны управляющие воздействия с использованием электрической энергии. При применении электрофизических воздействий на РПК объектами управления будут оба компонента структуры круга из КНБ: зерна КНБ и удерживающая их связка.

4. Методика определения механических характеристик обрабатываемых сталей и сплавов в условиях резания, основанная на применении метода термомеханических коэффициентов, может быть применена для определения составляющих силы резания при шлифовании и назначения усилия поджима обрабатываемого

мой заготовки к рабочей поверхности шлифовального круга при обработке по схеме с фиксированной силой поджима.

5. Показана возможность определения сопротивления деформации средне- и высоколегированных конструкционных сталей в условиях шлифования с использованием формулы Л. В. Андреюка путём введения поправок, учитывающих отличие в скорости и степени деформации при обработке шлифовальным инструментом. Погрешность определения разрушающего напряжения (предела прочности) при использовании формулы Л. В. Андреюка находится в пределах 8-10 % по сравнению с экспериментальными данными, полученными для температурно-скоростных условий шлифования.

6. Разработанные в диссертационной работе рекомендации по назначению режимных параметров, методики определения рациональных режимов резания при алмазно-абразивной обработке и конструкции устройств для восстановления режущей способности шлифовальных и заточных кругов электроэрозионным способом переданы для внедрения на Озеряновский машиностроительный завод «Технология», ООО «Торпласт», ООО «Фирма «ВИ-ВА», ООО «Деревообрабатывающий инструмент», Государственное предприятие «Проектно-конструкторский технологический институт», и используются в учебном процессе ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ». Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработок, выполненных в диссертационной работе, на промышленных предприятиях и в проектных организациях Донецкой Народной Республики и Украины составляет 444 000 рублей РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена **имеющая важное хозяйственное значение** научно-техническая проблема, состоящая в теоретическом обосновании назначения режимных параметров шлифования кругами из СТМ труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе их оптимизации с учётом нестационарности процесса. Определение оптимальных или рациональных механических и электрических режимных параметров процесса обеспечивается за счёт наиболее полного использования динамически изменяющихся режущих свойств рабочей поверхности круга в заданных условиях проведения обработки путём использования в качестве интегрального технического ограничения на режимы обработки текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга.

Основные научные и практические результаты работы следующие:

1. Для снижения трудоёмкости поиска оптимальных режимов шлифования предложено использовать обобщенные показатели процесса: 1) текущую лимитированную режущую способность шлифовального круга, которая описывает изменение режущих свойств шлифовального круга во времени и является характеристикой нестационарности процесса: 2) отношение скорости шлифовального круга к скорости обрабатываемой детали, которое учитывается при обеспечении заданных высотных параметров шероховатости шлифованной поверхности.

2. Получила развитие классическая теоретико-экспериментальная методика оптимизации режимов алмазно-абразивной обработки, состоящее в учете нестационарности процесса путём использования динамически изменяющегося во время обработки технического ограничения. В качестве такого технического ограничения области возможных режимов использована поверхность, образованная семейством кривых, которые описывают изменение текущей лимитированной фактической глубины шлифования во времени. Изменение фактической глубина шлифования соответствует определяемому при врезном

шлифовании изменению текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга.

3. В качестве параметра режима шлифования, с помощью которого обеспечивается соответствие производительности обработки и режущей способности шлифовального круга, предложено использовать мгновенную текущую фактическую глубину шлифования. Экспериментально получаемая зависимость текущей фактической глубины шлифования от времени обработки $t_{\phi} = f(\tau)$ является основой для математического описания изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга в заданных условиях обработки.

4. Лимитированное усилие поджима заготовки к РПК при алмазном шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к кругу необходимо определять как минимальное из найденных по трём условиям, выполнение которых обеспечивает заданное качество обработанной поверхности и поддержание высоких режущих свойств алмазного шлифовального инструмента:

- из условия предотвращения фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемого материала;
- из условия отсутствия окисления алмаза;
- из условия обеспечения механической прочности алмазных зёрен.

5. В случае, когда режущая способность круга изменяется от совместного воздействия процессов изнашивания зёрен и засаливания круга с преобладанием ухудшения режущей способности в результате засаливания межзёренного пространства, режимы электроэрозионных управляющих воздействий определяются соотношением интенсивностей удаления засаленного слоя и интенсивности засаливания межзёренного пространства, а оптимальное значение средней силы тока воздействий соответствует условию равенства этих интенсивностей.

6. При шлифовании с периодическими электроэрозионными управляющими воздействиями, когда режущая способность круга снижается вследствие изменения количества работающих зёрен и их изнашивания,

изменение текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга представляет собой циклический процесс, в котором оптимизация режимов воздействий может быть выполнена по длительности периодов цикла «шлифование без электроэрозионных воздействий – шлифование с электроэрозионными воздействиями».

7. При шлифовании труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, характер разрушения которых при резании преимущественно пластический, относительный вклад процессов изнашивания зёрен инструментального материала и засаливания межзёренного пространства в снижение режущей способности РПК характеризуется соотношением 1:2.

8. При определении напряжений сдвига в температурно-скоростных условиях шлифования конструкционных и инструментальных сталей для уточнения значений напряжений, полученных стандартными методами механических испытаний, доказана возможность применения термомеханических коэффициентов, учитывающих отличие в скорости и степени деформации при механической обработке.

9. Установлено, что минимальную удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 и твердого сплава ВК8 обеспечивает способ шлифования с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК. Удельная себестоимость шлифования с периодическими электроэрозионными воздействиями на оптимальных режимах ниже, чем удельная себестоимость шлифования без управляющих воздействий, для быстрорежущей стали Р6М5Ф3 – на 160-240 %, для твердого сплава ВК8 – на 10-20 %.

10. Установлено, что осуществление периодических электроэрозионных воздействий для поддержания высокой режущей способности алмазных кругов при обработке титанового сплава ВТ14 экономически необоснованно. Предпочтительными являются непрерывные управляющие воздействия, осуществляемые одновременно со шлифованием, а периодическая правка круга должна производиться исходя из необходимости восстановления геометрической формы РПК.

11. Установлено, что из трёх исследованных групп труднообрабатываемых материалов: ванадиевых инструментальных сталей, твердых сплавов группы ВК и двухфазных титановых сплавов со структурой $(\alpha + \beta)$ наименьшие значения текущей лимитированной режущей способности алмазных шлифовальных кругов из синтетических алмазов АСб и текущего расхода алмазов формируются при обработке ванадиевых инструментальных сталей, наибольшие – при обработке двухфазных титановых сплавов со структурой $(\alpha + \beta)$.

12. Разработанные в диссертационной работе рекомендации по назначению режимных параметров, методики определения рациональных режимов резания при алмазно-абразивной обработке и конструкции устройств для восстановления режущей способности шлифовальных и заточных кругов электроэрозионным способом переданы для внедрения на Озеряновский машиностроительный завод «Технология», ООО «Торпласт», ООО «Фирма «ВИ-ВА», ООО «Деревообрабатывающий инструмент», Государственное предприятие «Проектно-конструкторский технологический институт», и используются в учебном процессе ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ». Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработок, выполненных в диссертационной работе, на промышленных предприятиях и в проектных организациях Донецкой Народной Республики и Украины составляет 444 000 рублей РФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Итоги конференции “Спецсталь-Маркет-2008” // Metallургический бюллетень. 14.04.2008. – Информационное агентство «Melaltorg.ru» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metaltorg.ru/analytics/publication/?id=3030>.
2. Сталь не заржавеет / Ильин Артем. 05.10.2011. – Информационное агентство «МинПром» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minprom.ua/articles/77688.html>.
3. Быстрорежущие стали / Инструментальные стали. Инструментальные материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://toolmaterials.narod.ru/12.html>.
4. Основные российские производители твёрдых сплавов / Chemie Mania [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chemiemaniamania.ru/chemies-3739-1.html>.
5. Украинский инструмент не сдает позиций. Прошлое и настоящее инструментальной промышленности Украины / Зайцев Олег // Металл бюллетень. Украина. – 2007. – № 6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.web-standart.net/magaz.php?aid=8953>.
6. Мировой рынок титана. Мировые товарные рынки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cmmarket.ru/markets/tiworld.htm>.
7. Текущее и перспективное потребление металлов в России и Украине. Библиотека маркетолога // Энциклопедия маркетинга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.marketing.spb.ru/mr/industry/consumption_metal_02_4.htm.
8. Государственная программа «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы». Утверждена постановлением Правительства России от 15 апреля 2014 года № 303. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/GUAUVHfGtBGzSAqmMXAHb0jXx1CNlwaI.pdf>.
9. Цветная металлургия Украины (2007 г.) / Тестовый информационный веб-портал «Укрбас» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ukrbascompany.ua/index/cvetnaja_metallurgija_ukrainy/0-67.

10. Sandvik Coromant. Старт. Техническая информация. Материалы. Обрабатываемые материалы. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>.
11. Металлорежущий инструмент и инструментальная оснастка / Cutting tools and tooling system SECO Каталог SECO 2015 Токарный инструмент (Всего 703 стр.). Классификация обрабатываемых материалов по системе Seco. – Режим доступа: <http://lab2u.ru/klassifikatciia-obrabatyvaemykh-materialov-po-sisteme-seco-osnovoi-dlia-smg-versii-2-iavliaetsia-klassifikatciia-materialov-zagotovok-na-osnove-ikh-tipov-a-ne-otnositel'n-katalog-seco-2015-tokarnyi-instrument-str-688-0689-lab2u.html>.
12. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
13. Лавриненко, И.П. Прогрессивные методы абразивной обработки металлов / И.П. Лавриненко, Ю.Я. Савченко, В.И. Лавриненко, С.М. Дегтяренко. – К.: Техніка, 1990. – 152 с.
14. Ковальчук, Ю.М. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Гнатовский и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
15. Гольдштейн, М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачёв, Ю.Г. Векслер. – М.: МИСИС, 1999. – 408 с.
16. Белявцев, Н.И. Комбинированное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов / Н.И. Белявцев, М.Д. Узунян. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 169 с.
17. Алмазная обработка // Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. – К.: ИМСО, 1996. – 168 с.
18. Узунян, М.Д. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов / М.Д. Узунян, Ю.С. Краснощек. – М.: Машиностроение, 1988. – 92 с.
19. Матюха, П.Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга: Автореф. дис...докт. техн. наук: 05.03.01 / ХГПУ. – Харьков, 1996. – 48 с.

20. Скоробогатько, П.К. Режущая способность кругов при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.03.01 / ХПИ. – Харьков, 1982. – 16 с.
21. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб, М.Д. Узунян, М.С. Пивоваров – К.: Техника, 1978. – 192 с.
22. Захаренко, И.П. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой / И.П. Захаренко, А.А. Шепелев. – К.: Наукова думка, 1976. – 220 с.
23. Кривоухов, В.А. Обработка резанием титановых сплавов / В.А. Кривоухов, А.Д. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1970. – 184 с.
24. Саськов, В.Г. Повышение эффективности процесса шлифования титановых сплавов инструментами из высокотвёрдых материалов / В.Г. Саськов, Г.И. Саютин, И.В. Есаулов и др. // Алмазы и сверхтвёрдые материалы. – 1980. – № 1. – С. 12-13.
25. Саютин, Г.И. Выбор шлифовальных кругов (для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей) / Г.И. Саютин. – М.: Машиностроение, 1976. – 61 с.
26. Хрульков, В.А. Шлифование жаропрочных сплавов / В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1964. – 191 с.
27. Богомоллов, Н.И. Износостойкость алмазных зёрен при микрорезании титанового сплава ВТ8 / Н.И. Богомоллов, Н.В. Есаулов, Г.И. Саютин, В.Г. Саськов // Сверхтвёрдые материалы. Научно-теоретич. журнал. – Киев, 1980. – № 4. – С. 43-44.
28. Саютин, Г.И. Насыщение титанового сплав кремнием при шлифовании / Г.И. Саютин, В.А. Носенко, Н.Ф. Ларионов // Абразивы. – 1980. – Вып. 6. – С. 2-4.
29. Островский, В.И. О физико-химических процессах при шлифовании титановых сплавов / В.И. Островский // Абразивы. – 1967. – Вып. 1. – С. 9-14.
30. Шальнов, В.А. Шлифование и полирование лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Шальнов. – М.: Оборонгиз, 1958. – 349 с.

31. Сильвестров, В.Д. Особенности шлифования титановых сплавов / В.Д. Сильвестров, В.А. Кубрак. – М.: Гостехника СССР. Филиал ВИНТИ, 1957. – 23 с.
32. Глазунов, С.Г. Конструкционные титановые сплавы / С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1974. – 362 с.
33. Фадеев, В.А. Интенсификация процесса шлифования алмазными кругами / В.А. Фадеев // *Borsodi műszaki gazdasági élet*. – MTESZ, Miskolc (Hungary). – 1994. – Vol. XXXIX, № 4-5. – С. 148-155.
34. Грабченко, А.И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвёрдых поликристаллических материалов: Дис. в форме научного доклада ... докт. техн. наук: 05.03.01/ ХГПУ. – Харьков, 1995. – 59 с.
35. Грабченко, А.И. Схемы непрерывного управления рельефом круга в процессе алмазного шлифования / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, В.Н. Доброскок // *Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб.* – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1986. – Вып. 35. – С. 57-63.
36. Беззубенко, Н.К. К вопросу о выборе связки круга для электроалмазного шлифования / Н.К. Беззубенко // *Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб.* – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1975. – Вып. 14. – С. 80-86.
37. Беззубенко, Н.К. Процесс алмазно-искрового шлифования / Н.К. Беззубенко // *Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб.* – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1981. – Вып. 26. – С. 39-42.
38. Узунян, М.Д. Повышение эффективности алмазного шлифования твёрдых сплавов путём прогнозирования и стабилизации работоспособности кругов: Автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.03.01 / Мосстанкин. – М., 1989. – 40 с.
39. Узунян, М.Д. Работоспособность кругов при алмазно-эрозионном шлифовании композиции “твёрдый сплав - сталь” / М.Д. Узунян, В.В. Малыхин // *Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб.* – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1982. – Вып. 25. – С. 13-18.
40. Узунян, М.Д. Оптимизация процесса алмазно-искрового шлифования композиции “безвольфрамовый твёрдый сплав-сталь” / М.Д. Узунян, В.В. Малыхин,

- А.В. Ходыкин // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1982. – Вып. 28. – С. 33-36.
41. Узунян, М.Д. Поиск оптимальных условий высококачественной обработки твердосплавных инструментов / М.Д. Узунян, Б.М. Свердлова, Ю.С. Краснощек // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1979. – Вып. 21. – С. 118-121.
42. Узунян, М.Д. Работоспособность кругов при алмазно-искровом шлифовании твёрдых сплавов / М.Д. Узунян, Ю.С. Краснощек // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1980. – Вып. 23. – С. 5-10.
43. Дьяченко, П.Е. Исследование процесса шлифования / П.Е. Дьяченко. – М.: Оборонгиз, 1941. – 130 с.
44. Глейзер, Л.А. О сущности процесса круглого шлифования / Л.А. Глейзер // Вопросы точности в технологии машиностроения. – М.: Машгиз, 1959. – С. 5-24.
45. Технология шлифования и заточки режущего инструмента/ М.М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
46. Семко, М.Ф. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов/ М.Ф. Семко, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко и др. – К.: Вища школа, Гол. изд-во, 1979. – 232 с.
47. Иванов, Н.П. Методика оценки работоспособности кругов из СТМ / Н.П. Иванов, И.Н. Пыжов, В.И. Воронков // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1989. – Вып. 42. – С. 19-22.
48. Способ врезного шлифования круглых деталей. А.с. 1324826 СССР, МКИ В 24 В 53/00./ А.И. Грабченко, Н.К. Беззубенко, И.Н. Пыжов и др. – № 3899429/31-08; Заявлено 20.05.85// Открытия. Изобретения. – 1987. – Бюл. № 27. – С. 51.
49. Матюха, П.Г. Анализ способов стабилизации технологических показателей шлифования по упругой схеме / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец / Вісник Інженерної академії України. – 2002. – № 2. – С. 60-65.
50. Станок для заточки резцов. Модель ЗБ632В. Руководство по обслуживанию. – Мукачево: Станкостроительный завод им. Кирова, 1964.

51. Станок для заточки свёрл ЗБ652. Паспорт станка. – Витебск: Витебский завод заточных станков, 1957.
52. Универсально-заточной станок ЗБ642. Паспорт станка. – М.: Станкоимпорт, 1972.
53. Точильно-шлифовальный станок модели ТШ-300. Паспорт станка. – Мукачево: Станкостроительный завод им. Кирова, 1958.
54. Радченко, С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.
55. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник /Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
56. Островский, В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
57. Книппер, Э.Е. Назначение режимов резания с применением ЭВМ / Э.Е. Книппер. – Брянск: БГТУ, 1997. – 179 с.
58. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.
59. Якобс, Г.Ю. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации; Пер. с нем. / Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Э. Кохан. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
60. Полтавец, В.В. Обоснование режимов шлифования труднообрабатываемых материалов при электроэрозионном воздействии на рабочую поверхность круга: Автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.03.01 / ДонНТУ. – Донецк, 2001. – 19 с.
61. Семко, М.Ф. Работоспособность алмазных кругов/ М.Ф. Семко, М.Д. Узунян, Ю.А. Сизый, М.С. Пивоваров. – К.: Техніка, 1983. – 95 с.
62. Голубев, И.В. Круглое наружное шлифование со стабилизацией режущей способности токопроводящего инструмента электрическими разрядами: Автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.03.01. – М., 1985. – 16 с.

63. Методология выбора режимов шлифования / М.В. Ненашев, В.В. Борисов, В.Н. Воронин, А.Н. Журавлев, И.Д. Ибатуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 4-2. – С. 387-390.
64. Никитков, Н.В. Расчет режимов резания при алмазном шлифовании заготовок из твердых хрупких материалов / Н.В. Никитков, Н.Ю. Ковеленов, Д.Н. Шабалин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2012. – Вып. 4. – С. 162-167.
65. Дудукалов, Ю.В. Оптимизация условий автоматизированной абразивной обработки кругами из СТМ некоторых деталей инструментального производства / Ю.В. Дудукалов, А.Ф. Раб // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1991. – Вып. 46. – С. 31-34.
66. Четкарев, В.А. Комплекс для разработки, настройки и управления технологическими процессами алмазного шлифования в составе ГПС / В.А. Четкарев, В.А. Сипайлов, Г.Х. Юсупов, Л.Д. Загребин, Н.В. Козлов // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1991. – Вып. 46. – С. 48-50.
67. Белявцев, Н.И. Оптимизация процесса шлифования инструментов из БВТС группы СТИМ и анализ технологической себестоимости / Н.И. Белявцев, М.Д. Узунян // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1998. – Вып. 52. – С. 12-16.
68. Фалалеев, А.П. Вероятностный подход при имитационном моделировании электроэрозионного шлифования / А.П. Фалалеев // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1998. – Вып. 52. – С. 205-208.
69. Новоселов, Ю.К. Адаптивное регулирование процессом шлифования валов / Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, И.В. Крылов // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1999. – Вып. 55. – С. 173-181.
70. Новоселов, Ю.К. Оптимальное управление съёмом припуска при врезном шлифовании прецизионных поверхностей / Ю.К. Новоселов, Д.А. Каинов // Резание и

инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1999. – Вып. 55. – С. 182-184.

71. Федорович, В.А. Моделирование управляемого процесса шлифования сверхтвёрдых материалов / В.А. Федорович, А. Мамалис // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1999. – Вып. 55. – С. 214-219.

72. Братан, С.М. Управление операцией плоского шлифования с динамической стабилизацией параметров технологического цикла / С.М. Братан // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 2000. – Вып. 57. – С. 17-23.

73. Братан, С.М. Разработка циклов управления операций круглого наружного шлифования с учётом износа абразивного инструмента / С.М. Братан, Д.А. Каинов, Ю.К. Новосёлов // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 2001. – Вып. 60. – С. 19-25.

74. Федорович, В.А. Анализ эффективности использования алмазных зёрен при шлифовании сверхтвёрдых материалов / В.А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах. Междунар. научно-техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 235-243.

75. Козакова, Н.В. Влияние прочностных свойств элементов системы «круг-деталь» на оптимальную концентрацию алмазных зёрен / Н.В. Козакова, В.А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах. Междунар. научно-техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 2003. – Вып. 64. – С. 133-140.

76. Материал абразивного круга. А.с. 1148761 СССР, МКИ 24 В 1/00 / А.И. Грабченко, Н.И. Пыжов, В.А. Федорович, Н.Ф. Наконечный (СССР). – Заявка № 348377; заявлено 06.08.82, опубл. 08.12.84. – 3 с.

77. Федорович, В.А. Пути повышения эффективности алмазного шлифования СТПМ / В.А. Федорович, С.А. Гринько // Машинобудування: Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірник наукових праць. – Вып. 100. – Харків: ХДПУ, 2000. – С. 188-192.

78. Новиков, Г.В. Алмазное шлифование торцевых поверхностей изделий из труднообрабатываемых материалов / Г.В. Новиков // *Машинобудування: Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірник наукових праць.* – Вып. 101. – Харків: ХДПУ, 2000. – С. 169-171.
79. Евсеев, Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1978. – 129 с.
80. Королев, А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. – 212 с.
81. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10 т. – Т. 4. «Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов». – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
82. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
83. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
84. Высокопроизводительное шлифование (укр. яз.) / О.В. Якімов, Ф.В. Новіков, Г.В. Новіков, О.О. Якімов. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.
85. Соколов, Л.Д. Сопротивление металлов пластической деформации / Л.Д. Соколов. – М: Metallurgizdat, 1963. – 284 с.
86. Матюха, П.Г. Исследование высоты неровностей профиля поверхности резания при шлифовании / П.Г. Матюха, Л.К. Терехова // *Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб.* – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1990. – Вып. 44. – С. 114-121.
87. Глейзер, Л.А. О сущности процесса шлифования: Автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.03.01/ Мосстанкин. – М., 1956. – 48 с.
88. Способ шлифования. А.с. 1763148 А1 СССР, МКИ В 24 В 1/00 / П.Г. Матюха, В.П. Цокур (СССР). – Заявка № 4814747/08; заявлено 16.04.90, опубл. 23.09.92 // *Открытия. Изобретения.* – 1992. – Бюл. № 3. – 3 с.

89. Способ шлифования (укр. яз.). Рішення про видачу патенту на винахід за заявкою № 2000041899. МПК 7B24B1/00, B24B53/00, B23H5/04 / Матюха П.Г., Полтавець В.В., Гриньов А.О., Стрелков В.Б.
90. Способ шлифования (укр. яз.). Рішення про видачу патенту на винахід за заявкою № 2002032019. МПК 7B24B1/00 / Матюха П.Г., Полтавець В.В., Стрелков В.Б.
91. Матюха, П.Г. Устройство для определения износа алмазных шлифовальных кругов / П.Г. Матюха, В.П. Цокур, В.Р. Габитов; Донецкий политехн. ин-т. – Ред. журнала “Сверхтвёрдые материалы”. – Киев, 1984. – 8 с.: Деп. в ВИНТИ № 7006-84 Деп.
92. Гольдштейн, М.И. Специальные стали/ М.И. Гольдштейн, С.В. Грачёв, Ю.Г. Векслер. – М.: МИСИС, 1999. – 408 с.
93. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Metallurgiya, 1983. – 528 с.
94. Калашников, А.Т. Исследование шлифуемости новых износостойких штамповых сталей / А.Т. Калашников, Ю.М. Троянов // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1975. – Вып. 14. – С. 68-72.
95. Позняк, Л.А. Штамповые стали / Л.А. Позняк, Ю.М. Скрынченко, С.И. Тишарев. – М.: Metallurgiya, 1980. – 244 с.
96. Paul De Garmo, E. Materials and processes in manufacturing / E. Paul De Garmo, J. Temple Black, Ronald A. Kohser. – N. Y. et al.: John Willey & Sons, Inc., 1997. – 1226 p.
97. Harris, J.N. Mechanical working of metals: Theory and practice / J.N. Harris. – Oxford et al.: Pergamon Press, 1983. – VIII. – 244 p. – (International Series on Material Science and Technology).
98. Балацький, В.В. Современные инструментальные материалы для обработки резанием (укр. яз.) / В.В. Балацький, А.М. Гуржій, В.П. Голованов, В.П. Щербаков. – К.: Техніка, 1999. – 120 с.
99. ГОСТ 19265-73. Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.

100. Тарапанов, А.С. Технология обработки специальных материалов / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, С.Е. Шишков. – М.: Машиностроение, 2000. – 168 с.
101. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1983. – 352 с.
102. Матюха, П.Г. Определение напряжений сдвига в условиях резания с помощью модификации Макгрегора-Фишера / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. науч. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 1997. – Вып. 4. – С. 91-93.
103. Фальковский, В.А. Твердые сплавы / В.А. Фальковский, Л.И. Клячко. – М.: Руда и металлы, 2005. – 416 с.
104. ГОСТ 3882-74. Твердые сплавы Физико-механические свойства. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 9 с.
105. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / Баранчиков В.И., Жаринов А.В., Юдина Н.Д., Садыхов А.И.; под общ. ред. Баранчикова В.И. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
106. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
107. Мальцев, М.В. Вакуумная металлургия тугоплавких материалов и твердых сплавов / М.В. Мальцев, . – К.: Наукова думка, 1973. – 237 с.
108. Приспособления для алмазной заточки режущего инструмента / И.П. Захаренко, Л.А. Шепелев, Я.А. Кункин, В.С. Мендельсон. – К.: Техника, 1977. – 108 с.
109. Попов, С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
110. Филин, А.Н. Механизм износа круга при врезном шлифовании фасонных поверхностей / А.Н. Филин, А.П. Кузнецов // Современные методы повышения эффективности и качества механической обработки: Сб. науч. трудов. – Куйбышев: КПТИ, 1989. – С. 20-27.

111. Матюха, П.Г. Расчет нагружения участков рабочей поверхности круга в осевом сечении / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Сверхтвёрдые материалы. Научно-теоретич. журнал. – Киев, 2003. – № 3. – С. 63-70.
112. Матюха, П.Г. Алмазне шліфування з електроерозійними керуючими діями на робочу поверхню круга / П.Г. Матюха, В.В. Полтавець. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – 164 с.
113. Матюха, П.Г. Високопродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей / П.Г. Матюха. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – 222 с.
114. Коновалов, Ю.К. Расчёт параметров листовой прокатки: Справочник / Ю.К. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
115. Зюзин, В.И. Исследование сопротивления деформации сталей при горячей прокатке / В.И. Зюзин // Сб. научн. тр. ВНИИМетмаш. – № 8. – М.: ВНИИМетмаш, 1963. – С. 74-89.
116. Зюзин, В.И. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке / В.И. Зюзин, М.Я. Бровман, А.Ф. Мельников. – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
117. Хензель, А. Расчёт энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
118. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
119. Полтавец, В.В. Определение сопротивления деформации хромоникелевых сталей в условиях шлифования с помощью термомеханических коэффициентов / В.В.Полтавец // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – Вып. 5 (139). – С. 68-74.
120. Полтавец, В.В. Достижение максимальной производительности шлифования с учётом изменения режущих свойств круга / В.В. Полтавец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. Трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – Вып. 24. – С. 128-133.
121. Матюха, П.Г. Изменение температуры поверхности резания при различных способах шлифования по упругой схеме быстрорежущей стали Р6М5Ф3 / П.Г.

- Матюха, В.В. Полтавец // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 1999. – Вып. 9. – С. 191-197.
122. Матюха, П.Г. Определение режимов плоского шлифования твердых сплавов с использованием нового критерия о текущей лимитированной режущей способности круга/ П.Г. Матюха, В.Б. Стрелков, В.В. Полтавец // Сверхтвердые материалы. Научно-теоретич. журнал. – Киев, 2004. – № 3. – С. 67-73.
123. Матюха, П.Г. Режущая способность рабочей поверхности круга как ограничивающий параметр производительности шлифования / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – Вып. 13. – С. 159-164.
124. Матюха, П.Г. Расчет максимально допустимой силы поджима заготовки к кругу при шлифовании неподвижных образцов по упругой схеме / П.Г. Матюха, А.А. Гринев // Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. – Одесса, 2001. – Вып. 5. – С. 98-100.
125. Полтавец, В.В. Развитие экспериментально-теоретического метода оптимизации режимов шлифования путём использования обобщенного показателя процесса / В.В. Полтавец // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вып. 8 (190). – С. 65-71.
126. Полтавец, В.В. Оптимизация режимов шлифования с учётом нестационарности процесса / В.В. Полтавец, П.Г. Матюха // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДВНЗ ДонНТУ, 2013. – Вып. 1 (190)'2013. – С. 81-91.
127. Матюха, П.Г. Определение оптимальных режимов шлифования с электроэрозионными управляющими воздействиями на рабочую поверхность круга / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 8-й международной научно-техн. конф. 9-10 декабря 2003 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 151-155.
128. Матюха, П.Г. Расчёт режимов резания с использованием мгновенной текущей режущей способности круга (укр. яз.) / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, В.В. Га-

битов / Резание и инструмент в технологических системах: междунар. научно-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – Вып.78. – С.123-140.

129. Королев, А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов: 1975. – 189 с.

130. Редько, С.Г. Шероховатость поверхности при шлифовании металлов / С.Г. Редько // Сборник научных сообщений (в помощь промышленности). Технология машиностроения. – 1958. – Вып. 13. – С. 14-18.

131. Редько, С.Г. Вероятностный расчет шероховатости шлифованной поверхности / С.Г. Редько, А.В. Королев // Вероятностно-статистические основы процесса шлифования и доводки: Межвуз. сб. науч. трудов. – Л., 1974. – С. 73-79.

132. Редько, С.Г. Формирование профиля шлифованной поверхности / С.Г. Редько, А.В. Королев // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 1970. – Вып. 7. – С. 159-163.

133. Ящерицын, П.И. Качество поверхности и точность деталей при обработке абразивными инструментами / П.И. Ящерицын. – Минск: Госиздат БССР, 1959. – 230 с.

134. Маталин, А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А.А. Маталин. – М.-Л.: Машгиз, 1956. – 252 с.

135. Аврутин, Ю.Д. Описание рельефа рабочей поверхности шлифовального круга и анализ формирования шлифованной поверхности / Ю.Д. Аврутин // Труды ВНИИАШ. – Л., 1973. – № 14. – С. 27-40.

136. Аврутин Ю.Д. Рельеф шлифовального круга и его связь с шероховатостью шлифованной поверхности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1977. – 23 с.

137. Новоселов, Ю.К. Образование микрорельефа поверхности при чистовых процессах шлифования / Ю.К. Новоселов // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1974. – Вып. 9. – С. 38-47.

138. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: Монография / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Сев НТУ, 2012. – 304 с.

139. Матюха, П.Г. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности / П.Г. Матюха, Л.К. Терехова // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 1982. – Вып. 10. – С. 101-105.
140. Расчет высотных параметров шероховатости шлифованной поверхности / П.Г. Матюха, Н.К. Беззубенко, Н.П. Иванов, Л.К. Терехова // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1984. – Вып. 32. – С. 37-42.
141. Кулинич, С.И. Вероятность участия зерен шлифовального круга в процессе резания / С.И. Кулинич // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1971. – Вып. 3. – С.20-24.
142. Левин, В.В. Влияние режимов абразивной обработки на микрогеометрию поверхности / В.В. Левин // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 1972. – Вып. 9. – С. 153-160.
143. Филимонов, Л.Н. О роли рельефа рабочей поверхности круга в процессе шлифования / Л.Н. Филимонов // Вероятностные статистические основы процессов шлифования и доводки. – Л., 1974. – С. 125-128.
144. Полтавец, В.В. Влияние явлений, сопровождающих процесс алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов, на высотные параметры шероховатости обработанной поверхности / В.В. Полтавец, П.Г. Матюха, В.П. Цокур, В.Б. Стрелков // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Вип. 9 (205). – С. 56-63.
145. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
146. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наукова думка, 1976. – 352 с.
147. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента/ В.Н. Бакуль [и др.]. – К.: Техника, 1971. – 208 с.
148. Киселева, П.Н. Технические алмазы / П.Н. Киселева. – М.: Недра, 1964. – 156 с.

149. Резников, А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
150. Матюха, П.Г. Определение силы поджима образца к кругу, ограниченной температурой графитизации алмазных зерен / П.Г. Матюха, В.Б. Стрелков // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вып. 71. – С. 41-46.
151. Бакуль, В.Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка / В.Н. Бакуль // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 4. – С. 22-27.
152. Матюха, П.Г. Определение оптимального усилия поджима образца к рабочей поверхности круга при шлифовании стали Р6М5Ф3 кругами из СТМ / П.Г. Матюха, В.В. Габитов // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 3. – Харків: НТУ «ХП», 2009. – С. 55-62.
153. Матюха, П.Г. Определение силы поджима комбинированного образца к режущей поверхности круга, ограниченной механической прочностью алмазных зёрен / П.Г. Матюха, А.В. Бурдин // Сверхтвёрдые материалы. Научно-теоретич. журнал. – Киев, 2011. – № 3 (191). – С. 65-73.
154. Матюха, П.Г. Влияние формы зоны контакта алмазного зерна с заготовкой на изменение глубины шлифования по упругой схеме / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Вып. 15. – С. 182-186.
155. Матюха, П.Г. Обобщенные режимы процесса шлифования, обеспечивающие стабильные показатели качества / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». 2010. – Вып. 7 (166). – С. 39-45.
156. Усов, А.В. Системы оптимального управления теплофизическими процессами при механической обработке / А.В. Усов // Сучасні технології у машинобудуванні: Зб. наукових статей/ За заг. ред. А.І. Грабченка. – Том 2. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – С. 262-273.

157. Зубарев, Ю.М. Эффективность применения при шлифовании кругов из кубического нитрида бора / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев // Сучасні технології у машинобудуванні: Зб. наукових статей/ За заг. ред. А.І. Грабченка. – Том 1. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – С. 93-98.
158. Галицкий, В.Н. Алмазно-абразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали / В.Н. Галицкий, А.В. Курищук, В.А. Муровский. – К.: Наукова думка, 1986. – 144 с.
159. Прогрессивные методы правки абразивных кругов / В.Н. Малышев, В.И. Пилинский, Г.Г. Покладий и др. – К.: Техніка, 1985. – 112 с.
160. Стефаненков, П.Н. Исследование и разработка способа нанесения регулярного рельефа на поверхность шлифовального круга при правке за счет возбуждения автоколебаний правящего инструмента: Автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.02.08 / Одес. политехн. ин-т. – Одесса, 1982. – 16 с.
161. Алмазно-абразивные инструменты – основа высоких технологий инструментального производства/ И.В. Новиков, А.А. Шепелев, В.И. Лавриненко // Сучасні технології у машинобудуванні: Зб. наукових статей/ За заг. ред. А.І. Грабченка. – Том 2. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – С. 90-102.
162. Способ правки шлифовального инструмента свободным абразивом. А.с. СССР № 967784, МКИЗ В24 В53/013 / Бурмистров В.В., Хроменко А.Д., Гомон В.М., Дубовик В.Н (СССР). Донецкий политехнический институт, 1981. – Опубл. 1982, Бюл. № 39.
163. Пахалин, Ю.А. Алмазное контактно-эрозионное шлифование / Ю.А. Пахалин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с.
164. Дорофеев, В.Д. Основы профильной алмазно-абразивной обработки / В.Д. Дорофеев. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1983. – 186 с.
165. Полтавец, В.В. Повышение степени управляемости технологической системой шлифования кругами из сверхтвердых материалов за счет воздействий на характеристики инструмента / В.В. Полтавец // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Вып. 6 (154). – С. 79-86.

166. Способ шлифования (укр. яз.). Декларацийний патент України на винахід № 51396 МПК В23В 1/00 / Автори: Матюха П.Г., Полтавець В.В., Стрелков В.Б. – Оpubл. 15.11.2002, Бюл. № 11. – 3 с.
167. Способ шлифования (укр. яз.). Патент України на винахід № 52776 МПК В24В 1/00, В24В 53/00, В24Н 5/04 / Автори: Матюха П.Г., Полтавець В.В., Гриньов А.О, Стрелков В.Б. Заявка 2000041899. – Оpubл. 15.11.2002, Бюл. № 1. – 5с.
168. Способ шлифования (укр. яз.). Патент України на винахід № 97680 МПК В24В 1/00, В24В 53/00, В24Н 5/00 / Автори: Матюха П.Г., Полтавець В.В., Стрелков В.Б., Габітов В.В., Бурдін О.В. Заявка а201001824. – Оpubл. 12.03.2012, Бюл №5. – 8 с.
169. Матюха, П.Г. Определение оптимального интервала между электроэрозивными воздействиями на рабочую поверхность круга при алмазном шлифовании твердого сплава / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, В.Б. Стрелков // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 31. – С. 203-209.
170. Бурдін, О.В. Підвищення ефективності обробки при одночасному шліфуванні різнорідних матеріалів за рахунок оптимізації режимів. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / ДонНТУ. – Донецьк, 2013. – 19 с.
171. Полтавец, В.В. Себестоимость шлифования с управляющими воздействиями на РПК / В.В. Полтавец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. – Донецьк: ДонГТУ, 2000. – Вип. 10. – С. 202-207.
172. Цокур В.П. Повышение производительности и качества обработки труднообрабатываемых материалов при алмазном шлифовании за счёт введения электрической энергии: Дис.... канд. техн. наук: 05.03.01 / ДонГТУ. – Донецьк, 1990. – 279 с.
173. Житная, И.П. Техничко-экономический анализ при проектировании и производстве машин / И.П. Житная, Е.П. Житный. – К.: Вища школа, 1990. – 229 с.
174. Новиков, Г.В. Производительность и энергоёмкость алмазного шлифования / Г.В. Новиков, Ю.Г. Гуцаленко // Резание и инструмент в технологических

системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2000. – Вып. 56. – С. 124-128.

175. Экономика станкоинструментальной промышленности / Э.А. Третьяков, А.М. Андреев, Л.А. Игнатова и др. Под общ. ред. Э.А. Третьякова. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

176. Экономическое обоснование выбора алмазного круга/ М.Ф. Семко, М.Д. Узунян, Э.П. Юфа. – Харьков: Прапор, 1971. – 100 с.

177. Типовая система технического обслуживания и ремонта металло- и деревообрабатывающего оборудования / Минстанкопром СССР, ЭНИМС. – М.: Машиностроение, 1988. – 672 с.

178. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. – М.: Машиностроение, 1967. – 269 с.

179. Полтавец, В.В. Влияние зернистости шлифовального круга на закон изменения текущей лимитированной режущей способности рабочей поверхности круга при шлифовании стали Р6М5Ф3 / В.В. Полтавец, В.В. Габитов, П.Г. Матюха // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДВНЗ ДонНТУ, 2014. – Вип. 1 (11)'2014. – С. 74-80.

180. Полтавец, В.В. Описание процесса алмазного шлифования ванадиевых инструментальных сталей по упругой схеме с использованием понятия текущей лимитированной режущей способности круга / В.В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 92. – С. 92-98.

181. Матюха, П.Г. Шлифование труднообрабатываемых материалов кругами из алмаза и эльбора: Монография / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, А.В. Бурдин, В.В. Габитов. – Черкассы: Вертикаль, издатель Кандыч С.Г., 2015. – 252 с.

182. Габитов, В.В. Повышение эффективности шлифования труднообрабатываемых инструментальных материалов кругами из алмазов и эльбора за счет дополнительных механических и электрических воздействий. Автореф. Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / ДонНТУ. – Донецк, 2014. – 21 с.

183. Стрелков, В.Б. Влияние времени обработки на производительность алмазного шлифования по упругой схеме твердых сплавов группы ВК / В.Б. Стрелков, В.В. Полтавец, В.П. Цокур // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 71. – С. 56-62.
184. Матюха, П.Г. Исследование закономерностей изменения режущей способности круга при алмазном шлифовании и в процессе электроэрозионных воздействий на рабочую поверхность круга при обработке твердых сплавов (укр. яз.) / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, В.Б. Стрелков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип. 18. – С. 25-30.
185. Матюха, П.Г. Определение оптимальных режимов при шлифовании твердых сплавов / П.Г. Матюха, В.Б. Стрелков, В.В. Полтавец // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. – Краматорськ-Київ, 2006. – Вип. 19. – С. 50-57.
186. Абковиц, С. Титан в промышленности / С. Абковиц, Дж. Бурке, Р. Хильц. – М.: Оборонгиз, 1957. – 147 с.
187. Полтавец, В.В. Определение средней высоты неровностей профиля обработанной поверхности при алмазном шлифовании титановых сплавов / В.В. Полтавец, П.Г. Матюха // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. – Краматорськ, 2012. – Вип. 30. – С. 222-228.
188. Волкогон, В.М. Опыт и эффективность применения специального инструмента из гексанида-А при шлифовании пазов форвакуумного насоса / В.М. Волкогон, Л.Л. Таланцев, С.К. Аврамчук, А.В. Кравчук // Сучасні технології у машинобудуванні: Зб. наукових статей/ За заг. ред. А.І. Грабченка. – Том 1. – Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – С. 57-63.
189. Полтавец, В.В. Управление режущей способностью шлифовальных кругов на основе кубического нитрида бора / В.В. Полтавец // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. – Краматорськ, 2010. – Вип. 26. – С. 306-311.

190. Полтавец, В.В. Определение сил резания при шлифовании по механическим характеристикам обрабатываемого материала, найденным с помощью метода термомеханических коэффициентов / В.В. Полтавец // Вісник СевНТУ: збірник наукових праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – Випуск 118/2011. – С. 134-138.
191. Целиков, А.И. Основы теории прокатки / А.И. Целиков. – М.: Metallurgy. 1965. – 247с.
192. Андреюк, Л.В. Сопротивление деформации сталей и сплавов / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев // Теория и практика металлургии: Науч. тр. НИИМ. Сб. № 11. – Челябинск: Южно-Уральское книж. изд.-во, 1970. – С. 101-123.
193. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // Сталь. – 1972. – № 6. – С. 522-523.
194. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев // Сталь. – 1972. – № 9. – С. 825-828.
195. Shida, S. Effect of Carbon Content, Temperature and Strain Rate on Compressive Flow Stress of Carbon Steels / Hitachi Research Laboratory Report. – 1974. – P. 1-9.
196. Лабер, К.Б. Влияние температурно-скоростных условий на сопротивление деформации углеродистой низколегированной стали / К.Б. Лабер, Х.С. Дья, А.М. Кавалек, А.А. Богатов, Д.Ш. Нухов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Том 59. № 9. – С. 610-614.
197. Johnson, G.R. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, 19-21 April 1983. – P. 541-547.
198. Lee, Y. A study for the constitutive equation of carbon steel subjected to large strains, high temperatures and high strain rates / Y. Lee, B.M. Kim, K.J. Park, S.W. Seo, O. Min // Journal of Materials Processing Technology. Volumes 130-131, 20 December 2002. – P. 181-188.

199. Самохвал, В.М. Аналіз математичних моделей опору деформуванню для умов високошвидкісних блоків дротових станів / В.М. Самохвал, М.М. Штода, К.К. Марченко // Математичне моделювання. – 2018. – № 1 (38). – С. 46-54.
200. Румянцев, М.И. Опыт совершенствования методики Л.В. Андреюка для расчета напряжения текучести при горячей листовой прокатке / М.И. Румянцев, В.И. Белов, И.А. Разгулин // Калибровочное бюро. – 2015. – Вып. 5. – С. 73-85.
201. Чекмарев, А.П. Истинное сопротивление пластическому деформированию углеродистых сталей при высоких температурах и скоростях деформации / А.П. Чекмарев, З.А. Риднер // В сб.: Прокатное производство. – К.: изд-во АН УССР, 1957. – Т. II, вып. 2. – С. 18-32.
202. Armstrong, R.W. High strain rate properties of metals and alloys / R.W. Armstrong, S.M. Walley // Journal International Materials Reviews Volume 53, 2008. – Issue 3. – Published online: 18 Jul 2013. – P. 105-128.
203. Полтавец, В.В. Определение предела прочности стали при шлифовании с использованием методики Л.В. Андреюка / В.В. Полтавец // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Чебоксары, 18-20 декабря 2018 г.) / Под ред. проф. И.Е. Илларионова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 353-360.
204. Полтавец В.В. Моделирование процесса плоского шлифования стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к кругу / В.В. Полтавец // Инновационные технологии в металлообработке (посвящается 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора Л.В. Худобина). Всероссийская науч.-практ. заочная конф. с международным участием (г. Ульяновск, 25 ноября 2018 г.): сборник научных трудов / Отв. ред. проф. Н.И. Ветков. – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – С. 50-56.
205. Способ шлифования (укр. яз.). Декларацийний патент України на винахід № 61437 А В24В 1/00 / Автори: Матюха П.Г., Гриньов А.О., Полтавец В.В. – Опубл. 17.11.2003, Бюл. № 11.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Исходные данные для расчета усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных
изделием и шлифовальным кругом, при плоском врезном шлифовании
быстрорежущей стали Р6М5Ф3, твердых сплавов группы ВК
и титанового сплава ВТ14

Таблица П1.1 – Исходные данные для расчета усилий поджима заготовки к РПК, ограниченных изделием и шлифовальным кругом, при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3, твердых сплавов группы ВК и титанового сплава ВТ14 алмазным кругом 1А1 250×76×15×5 АС6-4-М2-01 зернистостей 100/80, 160/125, 200/160

Группа параметров	Наименование параметра, обозначение и размерность	Числовое значение
1	2	3
Режимы обработки	Скорость круга V_k , м/с	35
	Продольная скорость стола $V_{ст}$, м/мин	6
Геометрические параметры круга	Радиус круга R_k , мм	125
	Высота круга B_k , мм	15
	Относительная концентрация алмазов K , %	100
Параметры быстрорежущей стали Р6М5Ф3	Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$0,41 \cdot 10^{-6}$
	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·град	19,5
	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале μ	0,2
	Коэффициент продольной усадки стружки K_1	1,35
	Значения свободного члена и коэффициента уравнения регрессии, описывающего изменение касательных напряжений сдвига в условной плоскости сдвига, МПа и МПа/К соответственно	$C = 1761$ $\alpha = 0,185$
	Температура начала фазово-структурных изменений T_{max} , К	815
Параметры твердых сплавов группы ВК	Коэффициент температуропроводности монокарбида вольфрама a , м ² /с	$0,20 \cdot 10^{-6}$
	Коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК6 λ , Вт/м·град	62,8
	Коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК8 λ , Вт/м·град	50,2
	Коэффициент теплопроводности твердого сплава ВК15 λ , Вт/м·град	67,0

1	2	3
Параметры твердых сплавов группы ВК	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале μ	0,2
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	0,29
1	2	3
Параметры титанового сплава ВТ14	Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$9,1 \cdot 10^{-6}$
	Коэффициент теплопроводности при 20°С λ , Вт/м·град	8,9
	Коэффициент теплопроводности при 700°С λ , Вт/м·град	16,8
	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале μ	0,3
	Коэффициент продольной усадки стружки K_1	1,2
	Значения свободного члена и коэффициента уравнения регрессии, описывающего изменение касательных напряжений сдвига в условной плоскости сдвига, МПа и МПа/К соответственно	$C = 671$ $\alpha = 0,236$
	Температура полиморфного превращения T_{max} , К	1213
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	0,42
Параметры алмаза марки АС6	Коэффициент температуропроводности ω_1 , м ² /с	$0,83 \cdot 10^{-4}$
	Коэффициент теплопроводности λ_a , Вт/м·град	530
	Температура начала окисления алмазов марки АС6 $T_{ок}$, К	775
	Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200 $P_{разр2}$, Н	70
	Предельная толщина среза для зернистости 250/200 $a_{z\text{ нр}2}$, мкм	0,685
Параметры структуры круга на связке М2-01	Содержание меди, %	60
	Содержание олова, %	15
	Содержание алмазов, %	25
	Коэффициент теплопроводности меди λ_1 , Вт/м·град	361

1	2		3
Параметры структуры круга на связке М2-01	Коэффициент теплопроводности олова λ_2 , Вт/м·град		58,41
Параметры РПК для кругов различной зернистости	Угол заострения зерна ε , град	100/80	91
		160/125	98
		200/160	100
	Радиус закругления вершины зерна ρ , мкм	100/80	6,69
		160/125	9,56
		200/160	9,91
	Количество зёрен в одном карате N_z , шт	100/80	100000
		160/125	29100
		200/160	8140
	Параметры распределения разновысотности зерен по закону Вейбулла после электроэрозионной правки	100/80	$m = 2,23$ $X_0 = 2946$
		160/125	$m = 2,03$ $X_0 = 2820$
		200/160	$m = 1,70$ $X_0 = 710$
	Коэффициент и показатель степени в регрессионной зависимости, описывающей влияние времени обработки на длину контактных площадок зёрен	100/80	$A_1 = 22,38$ $q_1 = 0,218$
		160/125	$A_1 = 22,38$ $q_1 = 0,218$
		200/160	$A_1 = 28,81$ $q_1 = 0,131$
	Значения свободного члена и коэффициента в уравнении регрессии для расчета динамического коэффициента K_δ	100/80	$\alpha_\delta = 14,32$ $\beta_\delta = 0,112$
		160/125	
		200/160	
	Коэффициент контактирования K_k	100/80	0,44
		160/125	
		200/160	
	Расстояние между зернами на поверхности круга S_{zn} , мм	100/80	0,30
		160/125	0,45
		200/160	0,68

Параметры РПК для кругов различной зернистости	Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на площадке контакта задней поверхности зерна с поверхностью резания K_3	100/80	1
		160/125	
		200/160	
	Коэффициент ввода, учитывающий количество тепла, поступающее в деталь, α_8	100/80	1
		160/125	
		200/160	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Определение сил поджима заготовки к кругу по техническим ограничениям
при обработке быстрорежущей стали Р6М5Ф3

П2.1 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01 быстрорежущей стали Р6М5Ф3

Исходные данные: Круг 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01

Обрабатываемый материал: Быстрорежущая сталь Р6М5Ф3

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 91$	Угол заострения зерна, град
$ro := 6.69$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 12.8$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 2.23$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла
$X0 := 2946$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 100000$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szprov := 0.30$	Расстояние между зернами на поверхности круга
Связка круга	$Y2 := 60$ Содержание меди в %
	$Y3 := 15$ Содержание олова в %
	$YI := 25$ Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град

$\lambda_{k4} := 19.5$	Коэффициент теплопроводности Р6М5Ф3, Вт/м*град
$\omega l := 0.000083$	Коэффициент тепературопроводности алмаза, м2/с
$T_{pr} := 775$	Допустимая температура на зерне, К
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.31$	Коэффициент шлифования
$k_{cp} := 1$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза az

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$Kl := 2.45$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-tf^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.133$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{Ftf}} \quad Kc = 2.745$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha + \beta \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна d_{cp} , мкм

$$d_{cp} := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz}} \quad d_{cp} = 131.205$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$Nz := \frac{283 \cdot 10^9}{d_{cp}^3} \quad Nz = 1.253 \times 10^5$$

Расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$Szp := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot Nz}{100}}} \quad Szp = 0.122$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами lf , мм

$$lf := Szp \cdot Kl \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 43.897$$

Максимальная толщина среза $azmax$, мм

$$azmax := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{tf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$azmax = 1.88 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := azmax \cdot 10^3 + Rz \cdot kep \quad az = 14.68$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dcp^3}{6}}$$

$$dc = 114.618 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{tf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.127$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{Szpov^2} \cdot Ftf \quad np = 1.41$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k2^{p1} \cdot \lambda k3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.35$$

Функция, Azv $A1 := 1.3$ $Acp := 1.0457$

$$Azv := A1 - \frac{5.76 \cdot Acp \cdot hk \cdot F0}{\lambda k1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.296$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 0.822$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 33.659$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh} \quad Pyk = 108.577$$

П2.2 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 160/125-4-М2-01 быстрорежущей стали Р6М5Ф3

Исходные данные: Круг 1А1 250*76*15*5 АС6 160/125-4-М2-01

Обрабатываемый материал: Быстрорежущая сталь Р6М5Ф3

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 98$	Угол заострения зерна, град
$ro := 9.56$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 15.0$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 2.03$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла
$X0 := 2820$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 29100$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szprov := 0.45$	Расстояние между зернами на поверхности круга
Связка круга	$Y2 := 60$ Содержание меди в %
	$Y3 := 15$ Содержание олова в %
	$Y1 := 25$ Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град

$\lambda k4 := 19.5$	Коэффициент теплопроводности Р6М5Ф3, Вт/м*град
$\omega l := 0.000083$	Коэффициент тепературопрводности алмаза, м2/с
$T_{pr} := 775$	Допустимая температура на зерне, К
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.31$	Коэффициент шлифования
$k_{cp} := 1$	Уточняющий коэфффициент шероховатости поверхности резания
$tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза az

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$Kl := 2.45$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-tf^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.083$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{Ftf}} \quad Kc = 3.473$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \text{alfa} + \text{beta} \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна d_{cp} , мкм

$$d_{cp} := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz}} \quad d_{cp} = 197.994$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$Nz := \frac{283 \cdot 10^9}{d_{cp}^3} \quad Nz = 3.646 \times 10^4$$

Расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$Szp := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot Nz}{100}}} \quad Szp = 0.184$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами lf , мм

$$lf := Szp \cdot K1 \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 83.813$$

Максимальная толщина среза $azmax$, мм

$$azmax := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{tf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$azmax = 3.48 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := azmax \cdot 10^3 + Rz \cdot kcp \quad az = 18.48$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dcp^3}{6}}$$

$$dc = 172.964 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{tf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.124$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{Szpov^2} \cdot Ftf \quad np = 0.611$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k2^{p1} \cdot \lambda k3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.154$$

$$\text{Функция, } Azv \quad A1 := 1.3 \quad Acp := 1.0457$$

$$Azv := A1 - \frac{5.76 \cdot Acp \cdot hk \cdot F0}{\lambda k1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.298$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 1.831$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 32.516$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh} \quad Pyk = 104.891$$

II.3 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1A1 250*76*15*5 AC6 200/160-4-M2-01 быстрорежущей стали P6M5Ф3

Исходные данные: Круг 1A1 250*76*15*5 AC6 200/160-4-M2-01

Обрабатываемый материал: Быстрорежущая сталь P6M5Ф3

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 100$	Угол заострения зерна, град
$ro := 9.91$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 14.8$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 1.70$	Параметры распределения разнорысотности Вейбулла
$X0 := 710$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 8410$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szprov := 0.68$	Расстояние между зернами на поверхности круга
Связка круга	$Y2 := 60$ Содержание меди в %
	$Y3 := 15$ Содержание олова в %
	$Y1 := 25$ Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град

$\lambda k4 := 19.5$	Коэффициент теплопроводности Р6М5Ф3, Вт/м*град
$\omega l := 0.000083$	Коэффициент тепературопроводности алмаза, м2/с
$Tpr := 775$	Допустимая температура на зерне, К
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.31$	Коэффициент шлифования
$kcp := 1$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза az

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$Kl := 2.45$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-tf^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.131$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{Ftf}} \quad Kc = 2.761$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \text{alfa} + \text{beta} \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна dcp , мкм

$$dcp := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz}} \quad dcp = 299.469$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$Nz := \frac{283 \cdot 10^9}{dcp^3} \quad Nz = 1.054 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$S_{zp} := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot N_z}{100}}} \quad S_{zp} = 0.278$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами l_f , мм

$$l_f := S_{zp} \cdot K_l \cdot K_c \cdot K_d \quad l_f = 100.77$$

Максимальная толщина среза az_{max} , мм

$$az_{max} := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot l_f}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot l_f \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{t_f \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$az_{max} = 4.129 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := az_{max} \cdot 10^3 + Rz \cdot k_{cp} \quad az = 18.929$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot d_{cp}^3}{6}}$$

$$dc = 261.61 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{l_f}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$F_{t_f} := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X_0}\right) \quad F_{t_f} = 0.188$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{S_{zпов}^2} \cdot F_{t_f} \quad np = 0.408$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k2^{p1} \cdot \lambda k3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.067$$

$$\text{Функция, } Azv \quad A1 := 1.3 \quad Acp := 1.0457$$

$$Azv := A1 - \frac{5.76 \cdot Acp \cdot hk \cdot F0}{\lambda k1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.299$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 4.128$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 48.875$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh} \quad Pyk = 157.66$$

И2.4 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01 быстрорежущей стали Р6М5Ф3

Исходные данные:

Время шлифования, мин	$\tau := 1$
$t := 15$	Глубина резания, мкм
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм
$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и
$\beta_k := 0.112$	коэффициент регрессии для расчёта K_d
$a := 0.0000041$	Коэффициент температуропроводности стали Р6М5Ф3, м ² /м/с
$\lambda := 19.51$	Коэффициент теплопроводности стали Р6М5Ф3, Вт/м*К
$C := 1761000000$	Параметры уравнения регрессии, отражающего
$\alpha := 185000$	влияние температурно-скоростных факторов на
	свойства стали Р6М5Ф3, Н/м*м, Н/м*м*К
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на
	обрабатываемом материале
$K_l := 1.35$	Коэффициент продольной усадки стружки
$K_w := 0.29$	Коэффициент шлифования
$m01 := 2.23$	Параметры распределения разномысотности
$x001 := 2946$	Вейбулла после правки для зернистости 100/80
$m02 := 1.70$	Параметры распределения разномысотности
$x002 := 710$	Вейбулла после правки для зернистости 250/200
$A1 := 22.38$	Параметры уравнения, описывающего изменение во
$q1 := 0.218$	времени длины контактных площадок на зёрнах
	зернистости 100/80
$A2 := 23.0$	Параметры уравнения, описывающего изменение во
$q2 := 0.207$	времени длины контактных площадок на зёрнах
	зернистости 250/200

Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разноразмерности Вейбулла, для зернистости 100/80

$$A_{21} := 1.05$$

- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм

$$q_{21} := 0.336$$

Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разноразмерности Вейбулла, для зернистости 250/200

$$A_{22} := 1.01$$

- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм

$$q_{22} := 0.354$$

$$\text{eps1} := 91$$

Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 100/80, мкм

$$r_{o1} := 6.69$$

$$\text{eps2} := 100$$

Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 250/200, мкм

$$r_{o2} := 9.91$$

$$N_{z1} := 100000$$

Количество зёрен в одном карате для зернистости 100/80

$$N_{z2} := 8140$$

Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200

$$Kk := 0.44$$

Коэффициент контактирования

$$Kz := 1$$

Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью

$$P_{разр2} := 70$$

Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н

$$a_{znp2} := 0.685$$

Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 100/80, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{N_{z1}}} \quad d1 = 131.205$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{N_{z2}}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 100/80

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 1.253 \times 10^5$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства
зернистости 100/80

$$Nv1 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz1}{100} \quad Nv1 = 5.513 \times 10^5$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя
плоскостью для зернистости 100/80, мм

$$Szf1 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv1}} \quad Szf1 = 0.122$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$Nz2 := \frac{283 \cdot 10^9}{d2^3} \quad Nz2 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства
зернистости 250/200

$$Nv2 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz2}{100} \quad Nv2 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя
плоскостью для зернистости 250/200, мм

$$Szf2 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv2}} \quad Szf2 = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние
между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния
между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 100/80, мм

$$Szp1 := Szf1 \cdot K1 \quad Szp1 = 0.299$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 250/200, мм

$$Szp2 := Szf2 \cdot K1 \quad Szp2 = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.131$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1.01$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.133$$

Коэффициент, учитывающий влияние разности высотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 2.747$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.894$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 101.366$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfok2}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 4.151 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := 14$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 11.151$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right) \right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz2 = 33.793$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Ifok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 80.428$$

Так как $bz < Sx$, то

$$bz2 = 33.793$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 1.936$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 3.563$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном
- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := asin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := atan\left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.04$$

- угол действия

$$Omega := atan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.148$$

Длина контактной площадки на зерне 250/200, мкм

$$lz2 := A2 \cdot \tau^{q2} \quad lz2 = 23$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$S_{нк2} := b_{z2} \cdot lz2 + b_{z2} \cdot a_{z2} \cdot \sin(\Gamma) \quad S_{нк2} = 1.152 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{S_{нк2}} \quad p_{\text{давл}} = 6.074 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 100/80, мкм

$$a_{znp1} := \frac{a_{znp2} \cdot r_{o1}}{r_{o2}} \quad a_{znp1} = 0.462$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно для зернистости 100/80

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$F_{t01} := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad F_{t01} = 0.133$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$K_{\tau} := A21 \cdot \tau^{q22} \quad K_{\tau} = 1.05$$

- в произвольный момент времени

$$F_{t1} := F_{t02} \cdot K_{\tau} \quad F_{t1} = 0.138$$

Коэффициент, учитывающий влияние разницы высотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$K_{c1} := \frac{1}{\sqrt{F_{t1}}} \quad K_{c1} = 2.694$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$S_{k1} := S_{zp1} \cdot K_{c1} \quad S_{k1} = 0.805$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \text{alfa}_k + \text{beta}_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfokl := Skl \cdot Kd \quad Lfokl = 43.086$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmaxl := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfokl}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfokl \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmaxl = 1.846 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmaxl := 12.0$$

Толщина среза, мкм

$$azl := 1000 \cdot azmaxl + \frac{Rmaxl}{2} \quad azl = 7.846$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Epsl := \frac{epsl}{180} \cdot \pi \quad azsl := rol \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Epsl}{2}\right)\right) \quad azsl = 1.918$$

Ширина среза, мкм

$$bzl := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot rol \cdot azsl - azsl^2} + (azl - azsl) \cdot \tan\left(\frac{Epsl}{2}\right) \right] \quad bzl = 21.443$$

Расстояние между сечениями математической модели РНК, мкм

$$Sxl := \frac{Szpl^2 \cdot 1000}{Lfokl \cdot Ft1 \cdot Kk} \quad Sxl = 34.186$$

Так как $bz < Sx$, то

$$bzl = 21.443$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 1.936$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Z_{p1} := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft1 \cdot Kk}{Szp1^2} \quad Z_{p1} = 19.721$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$\Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot aznpl}{dl}\right) \quad \Gamma = 1.452$$

- угол сдвига

$$\beta := \arctan\left(\frac{\cos(\Gamma)}{Kl + \sin(\Gamma)}\right) \quad \beta = 0.051$$

- угол действия

$$\Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] - \beta \quad \Omega = 1.136$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$l_{z1} := A1 \cdot \tau^{q1} \quad l_{z1} = 22.38$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 100/80, мкм²

$$S_{nk1} := bz1 \cdot l_{z1} + bz1 \cdot az1 \cdot \sin(\Gamma) \quad S_{nk1} = 646.966$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$P_{разр1} := p_{давл} \cdot \frac{S_{nk1}}{10^6} \quad P_{разр1} = 39.3$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$H1 := \frac{L}{2} \quad H1 = 0.968$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$H := \frac{Vd \cdot H1}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 11.808$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, мм²

$$S := Bk \cdot L \quad S = 29.047$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{max} + 0,5Rz$

$$F_{tazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-azl^{m01}}{x001}\right) \right) \cdot K\tau \quad F_{tazmax} = 0.035$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $azp1 + 0,5Rz$.

$$F_{taznp1} := \left[1 - \exp\left[\frac{-(azl - aznp1)^{m01}}{x001}\right] \right] \cdot K\tau \quad F_{taznp1} = 0.03$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 100/80

$$z_{разп1} := \frac{S \cdot F_{taznp1}}{S_{zp1}^2} \quad z_{разп1} = 9.869$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 100/80, Н

$$P_k := P_{разп1} \cdot z_{разп1} \quad P_k = 387.845$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 100/80, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + Ku^2}} \quad P_{ук} = 372.498$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 100/80, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{Ku}\right)^2}} \quad P_{zk} = 108.024$$

П2.5 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 160/125-4-М2-01 быстрорежущей стали Р6М5Ф3

Исходные данные:

Время шлифования, мин	$\tau := 1$
$t := 15$	Глубина резания, мкм
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм
$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d
$\beta_k := 0.112$	
$a := 0.0000041$	Коэффициент температуропроводности стали Р6М5Ф3, м ² /м ² с
$\lambda := 19.51$	Коэффициент теплопроводности стали Р6М5Ф3, Вт/м ² К
$C := 1761000000$	Параметры уравнения регрессии, отражающего влияние температурно-скоростных факторов на свойства материала, Н/м ² м, Н/м ² м ² К
$\alpha := 185000$	
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале
$K_l := 1.35$	Коэффициент продольной усадки стружки
$K_{ш} := 0.31$	Коэффициент шлифования
$m_{01} := 2.23$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 160/125
$x_{001} := 2946$	
$m_{02} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 250/200
$x_{002} := 710$	
$A_1 := 28.81$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени длины контактных площадок на зёрнах зернистости 160/125
$q_1 := 0.131$	
$A_2 := 23.0$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени длины контактных площадок на зёрнах зернистости 250/200
$q_2 := 0.207$	

Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разноразмерности Вейбулла, для зернистости 100/80

$$A_{21} := 1.05$$

- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм

$$q_{21} := 0.336$$

Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разноразмерности Вейбулла, для зернистости 250/200

$$A_{22} := 1.01$$

- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм

$$q_{22} := 0.354$$

$$eps1 := 98$$

Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 160/125, мкм

$$ro1 := 9.56$$

$$eps2 := 100$$

Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 250/200, мкм

$$ro2 := 9.91$$

$$N_{z1} := 29100$$

Количество зёрен в одном карате для зернистости 160/125

$$N_{z2} := 8140$$

Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200

$$Kk := 0.44$$

Коэффициент контактирования

$$Kz := 1$$

Коэффициент, учитывающий закон распределения номинальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью

$$P_{разр2} := 70$$

Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н

$$aznp2 := 0.685$$

Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 160/125, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{N_{z1}}} \quad d1 = 197.994$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{N_{z2}}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 160/125

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 3.646 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства
зернистости 160/125

$$Nv1 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz1}{100} \quad Nv1 = 1.604 \times 10^5$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя
плоскостью для зернистости 160/125, мм

$$S_zr1 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv1}} \quad S_zr1 = 0.184$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$Nz2 := \frac{283 \cdot 10^9}{d2^3} \quad Nz2 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства
зернистости 250/200

$$Nv2 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz2}{100} \quad Nv2 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя
плоскостью для зернистости 250/200, мм

$$S_zr2 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv2}} \quad S_zr2 = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние
между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния
между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 160/125, мм

$$S_zp1 := S_zr1 \cdot K1 \quad S_zp1 = 0.451$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 250/200, мм

$$S_zp2 := S_zr2 \cdot K1 \quad S_zp2 = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.131$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1.01$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.133$$

Коэффициент, учитывающий влияние разноразмерности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 2.747$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.894$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 101.366$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot Lfok2}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 4.151 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := 14.0$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 11.151$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right) \right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz2 = 33.793$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 80.428$$

Так как $bz < Sx$, то

$$bz2 = 33.793$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 1.936$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 3.563$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := asin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := atan\left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.04$$

- угол действия

$$Omega := atan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.148$$

Длина контактной площадки на зерне 250/200, мкм

$$lz2 := A2 \cdot \tau^{q2} \quad lz2 = 23$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$S_{нк2} := b_{z2} \cdot lz2 + b_{z2} \cdot a_{z2} \cdot \sin(\Gamma) \quad S_{нк2} = 1.152 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного
зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{S_{нк2}} \quad p_{\text{давл}} = 6.074 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 160/125, мкм

$$a_{znp1} := \frac{a_{znp2} \cdot r_{o1}}{r_{o2}} \quad a_{znp1} = 0.661$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно
для зернистости 160/125

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$F_{t01} := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad F_{t01} = 0.133$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции
Вейбулла со временем обработки

$$K_{\tau} := A_{21} \cdot \tau^{q22} \quad K_{\tau} = 1.05$$

- в произвольный момент времени

$$F_{t1} := F_{t02} \cdot K_{\tau} \quad F_{t1} = 0.138$$

Коэффициент, учитывающий влияние разницы высотности на
расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$K_{c1} := \frac{1}{\sqrt{F_{t1}}} \quad K_{c1} = 2.694$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности
неподвижного круга, мм

$$S_{k1} := S_{zp1} \cdot K_{c1} \quad S_{k1} = 1.215$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов
шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfokl := Skl \cdot Kd \quad Lfokl = 65.018$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmaxl := Rk - \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot Lfokl}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot Lfokl \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmaxl = 2.74 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmaxl := 15.0$$

Толщина среза, мкм

$$azl := 1000 \cdot azmaxl + \frac{Rmaxl}{2} \quad azl = 10.24$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Epsl := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad azsl := rol \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azsl = 2.345$$

Ширина среза, мкм

$$bzl := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot rol \cdot azsl \cdot azsl^2 + (azl - azsl) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right)} \right] \quad bzl = 30.708$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sxl := \frac{Szpl^2 \cdot 1000}{Lfokl \cdot Ft1 \cdot Kk} \quad Sxl = 51.588$$

Так как $bz < Sx$, то

$$bzl = 30.708$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 1.936$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp1 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft1 \cdot Kk}{Szp1^2} \quad Zp1 = 8.66$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$\underline{Gamma} := \text{asin} \left(1 - \frac{2 \cdot aznp1}{dl} \right) \quad Gamma = 1.455$$

- угол сдвига

$$\underline{Beta} := \text{atan} \left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)} \right) \quad Beta = 0.049$$

- угол действия

$$\underline{Omega} := \text{atan} \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta \right) \right] - Beta \quad Omega = 1.137$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz1 := A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz1 = 28.81$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 160/125, мкм²

$$S_{nk1} := bz1 \cdot lz1 + bz1 \cdot az1 \cdot \sin(Gamma) \quad S_{nk1} = 1.197 \times 10^3$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$P_{разр1} := p_{давл} \cdot \frac{S_{nk1}}{10^6} \quad P_{разр1} = 72.713$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$\underline{H1} := \frac{L}{2} \quad H1 = 0.968$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$\underline{H} := \frac{Vd \cdot H1}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 11.808$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$S := Bk \cdot L \quad S = 29.047$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{\max} + 0,5Rz$

$$F_{tazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-azl^{m01}}{x001}\right) \right) \cdot K\tau \quad F_{tazmax} = 0.062$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $aznp1 + 0,5Rz$

$$F_{taznp1} := \left[1 - \exp\left[\frac{-(azl - aznp1)^{m01}}{x001}\right] \right] \cdot K\tau \quad F_{taznp1} = 0.054$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 160/125

$$z_{разп1} := \frac{S \cdot F_{taznp1}}{S_{zp1}^2} \quad z_{разп1} = 7.655$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 160/125, Н

$$P_k := P_{разп1} \cdot z_{разп1} \quad P_k = 556.623$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 160/125, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + K_{иу}^2}} \quad P_{ук} = 531.662$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 160/125, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_{иу}}\right)^2}} \quad P_{zk} = 164.815$$

И2.6 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 200/160-4-М2-01 быстрорежущей стали Р6М5Ф3

Исходные данные:

Время шлифования, мин	$\tau := 1$
$t := 15$	Глубина резания, мкм
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм
$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d
$\beta_k := 0.112$	
$a := 0.0000041$	Коэффициент температуропроводности стали Р6М5Ф3, м ² /м/с
$\lambda := 19.51$	Коэффициент теплопроводности стали Р6М5Ф3, Вт/м*К
$C := 1761000000$	Параметры уравнения регрессии, отражающего влияние температурно-скоростных факторов на свойства материала, Н/м*м, Н/м*м*К
$\alpha := 185000$	
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале
$K_l := 1.35$	Коэффициент продольной усадки стружки
$K_{ш} := 0.31$	Коэффициент шлифования
$m_{01} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 200/160
$x_{001} := 710$	
$m_{02} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 250/200
$x_{002} := 710$	
$A_1 := 23.0$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени длины контактных площадок на зёрнах зернистости 200/160
$q_1 := 0.207$	
$A_2 := 23.0$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени длины контактных площадок на зёрнах зернистости 250/200
$q_2 := 0.207$	

Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разноразмерности Вейбулла, для зернистости 100/80

$$A_{21} := 1.05$$

- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм

$$q_{21} := 0.336$$

Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разноразмерности Вейбулла, для зернистости 250/200

$$A_{22} := 1.01$$

- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм

$$q_{22} := 0.354$$

$$eps1 := 100$$

Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 200/160, мкм

$$ro1 := 9.91$$

$$eps2 := 100$$

Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 250/200, мкм

$$ro2 := 9.91$$

$$Nz1 := 8140$$

Количество зёрен в одном карате для зернистости 200/160

$$Nz2 := 8140$$

Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200

$$Kk := 0.44$$

Коэффициент контактирования

$$Kz := 1$$

Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью

$$P_{разр2} := 70$$

Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н

$$aznp2 := 0.685$$

Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 200/160, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz1}} \quad d1 = 302.744$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz2}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 200/160

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства
зернистости 200/160

$$Nv1 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz1}{100} \quad Nv1 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя
плоскостью для зернистости 200/160, мм

$$Szf1 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv1}} \quad Szf1 = 0.281$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$Nz2 := \frac{283 \cdot 10^9}{d2^3} \quad Nz2 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства
зернистости 250/200

$$Nv2 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz2}{100} \quad Nv2 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя
плоскостью для зернистости 250/200, мм

$$Szf2 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv2}} \quad Szf2 = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние
между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния
между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 200/160, мм

$$Szp1 := Szf1 \cdot K1 \quad Szp1 = 0.689$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 250/200, мм

$$Szp2 := Szf2 \cdot K1 \quad Szp2 = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.131$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1.01$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.133$$

Коэффициент, учитывающий влияние разноразмерности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 2.747$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.894$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 101.366$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfok2}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 4.151 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := 15.0$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 11.651$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right) \right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz2 = 34.985$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 80.428$$

Так как $bz < Sx$, то

$$bz2 = 34.985$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 1.936$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 3.563$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := asin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := atan\left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.04$$

- угол действия

$$Omega := atan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.148$$

Длина контактной площадки на зерне 250/200, мкм

$$l_{z2} := A2 \cdot \tau^{q2} \quad l_{z2} = 23$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$S_{нк2} := b_{z2} \cdot l_{z2} + b_{z2} \cdot a_{z2} \cdot \sin(\Gamma) \quad S_{нк2} = 1.21 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного
зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{S_{нк2}} \quad p_{\text{давл}} = 5.783 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 200/160, мкм

$$a_{znp1} := \frac{a_{znp2} \cdot r_{o1}}{r_{o2}} \quad a_{znp1} = 0.685$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно
для зернистости 200/160

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$F_{t01} := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad F_{t01} = 0.131$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции
Вейбулла со временем обработки

$$K_{\tau} := A21 \cdot \tau^{q22} \quad K_{\tau} = 1.05$$

- в произвольный момент времени

$$F_{t1} := F_{t02} \cdot K_{\tau} \quad F_{t1} = 0.138$$

Коэффициент, учитывающий влияние разноразмерности на
расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$K_{c1} := \frac{1}{\sqrt{F_{t1}}} \quad K_{c1} = 2.694$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности
неподвижного круга, мм

$$S_{k1} := S_{zp1} \cdot K_{c1} \quad S_{k1} = 1.858$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов
шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$K_d := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad K_d = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfokl := Skl \cdot Kd \quad Lfokl = 99.417$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmaxl := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfokl}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfokl \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmaxl = 4.078 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmaxl := 15.0$$

Толщина среза, мкм

$$azl := 1000 \cdot azmaxl + \frac{Rmaxl}{2} \quad azl = 11.578$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Epsl := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad azsl := rol \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azsl = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz1 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot rol \cdot azsl - azsl^2} + (azl - azsl) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz1 = 34.81$$

Расстояние между сечениями математической модели РНК, мкм

$$Sxl := \frac{Szpl^2 \cdot 1000}{Lfokl \cdot Ft1 \cdot Kk} \quad Sxl = 78.881$$

Так как $bz < Sx$, то

$$bz1 = 34.81$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L_{\text{кон}} := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 1.936$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zpl := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft1 \cdot Kk}{Szpl^2} \quad Zpl = 3.704$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном
- передний угол модели алмазного зерна

$$\underline{Gamma} := \text{asin}\left(1 - \frac{2 \cdot \text{aznp1}}{d1}\right) \quad \underline{Gamma} = 1.476$$

- угол сдвига

$$\underline{Beta} := \text{atan}\left(\frac{\cos(\underline{Gamma})}{K1 + \sin(\underline{Gamma})}\right) \quad \underline{Beta} = 0.04$$

- угол действия

$$\underline{Omega} := \text{atan}\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \underline{Beta}\right)\right] - \underline{Beta} \quad \underline{Omega} = 1.148$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$\underline{lz1} := A1 \cdot \text{tau}^{q1} \quad \underline{lz1} = 23$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 100/80, мкм²

$$\underline{Snk1} := \underline{bz1} \cdot \underline{lz1} + \underline{bz1} \cdot \underline{az1} \cdot \sin(\underline{Gamma}) \quad \underline{Snk1} = 1.202 \times 10^3$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$\underline{Pразр1} := \text{рдавл} \cdot \frac{\underline{Snk1}}{10^6} \quad \underline{Pразр1} = 69.502$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$\underline{H1} := \frac{L}{2} \quad \underline{H1} = 0.968$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$\underline{H} := \frac{Vd \cdot \underline{H1}}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad \underline{H} = 11.808$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$\underline{S} := Bk \cdot L \quad \underline{S} = 29.047$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $\text{azmax} + 0,5Rz$

$$\underline{Ftazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-\text{az1}^{m01}}{x001}\right)\right) \cdot K\text{tau} \quad \underline{Ftazmax} = 0.091$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $\text{azp1} + 0,5Rz$

$$F_{taznp1} := \left[1 - \exp \left[\frac{-(az1 - aznp1)^{m01}}{x001} \right] \right] \cdot K_{tau} \quad F_{taznp1} = 0.082$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 200/160

$$z_{разп1} := \frac{S \cdot F_{taznp1}}{S_{зп1}^2} \quad z_{разп1} = 5.03$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 200/160, Н

$$P_K := P_{разп1} \cdot z_{разп1} \quad P_K = 349.602$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 200/160, Н

$$P_{ук} := \frac{P_K}{\sqrt{1 + K_{иу}^2}} \quad P_{ук} = 333.925$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 200/2160, Н

$$P_{зк} := \frac{P_K}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_{иу}} \right)^2}} \quad P_{зк} = 103.517$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Определение сил поджима заготовки к кругу по техническим ограничениям
при обработке твердых сплавов группы ВК

ПЗ.1 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01 твердого сплава ВК6

Исходные данные: Круг 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01

Обрабатываемый материал: Твердый сплав ВК6

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 91$	Угол заострения зерна, град
$ro := 6.69$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 12.8$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 2.23$	Параметры распределения разнорысотности Вейбулла
$X0 := 2946$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 100000$	Число зёрен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szprov := 0.30$	Расстояние между зёрнами на поверхности круга
Связка круга	
$Y2 := 60$	Содержание меди в %
$Y3 := 15$	Содержание олова в %
$Y1 := 25$	Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град

$\lambda k4 := 62.8$	Коэффициент теплопроводности сплава ВК6, Вт/м*град
$\omega l := 0.000083$	Коэффициент температуропроводности алмаза, м2/с
$Tpr := 775$	Допустимая температура на зерне, град С
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.29$	Коэффициент шлифования
$kcp := 0.91$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза az

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$Kl := 2.45$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(-\frac{tf^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.133$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{Ftf}} \quad Kc = 2.745$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha + \beta \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна dcp , мкм

$$dcp := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz}} \quad dcp = 131.205$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$Nz := \frac{283 \cdot 10^9}{dcp^3} \quad Nz = 1.253 \times 10^5$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$S_{zp} := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot Nz}{100}}} \quad S_{zp} = 0.122$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами lf , мм

$$lf := S_{zp} \cdot K1 \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 43.897$$

Максимальная толщина среза az_{max} , мм

$$az_{max} := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{tf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$az_{max} = 1.88 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := az_{max} \cdot 10^3 + Rz \cdot kcp \quad az = 13.528$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dcp^3}{6}}$$

$$dc = 114.618 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{lf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$F_{tf} := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X0}\right) \quad F_{tf} = 0.107$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга
 np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{S_{zпов}^2} \cdot F_{tf} \quad np = 1.188$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k2^{p1} \cdot \lambda k3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.35$$

Функция, Azv $A1 := 1.3$ $Acp := 1.0457$

$$Azv := A1 \cdot \frac{5.76 \cdot Acp \cdot hk \cdot F0}{\lambda k1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.296$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 0.931$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 32.12$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$kh := 0.32$ Коэффициент шлифования для сплава ВК6 по экспериментальным данным

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh} \quad Pyk = 100.374$$

ПЗ.2 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 160/125-4-М2-01 твердого сплава ВК6

Исходные данные: Круг 1А1 250*76*15*5 АС6 160/125-4-М2-01

Обрабатываемый материал: Твердый сплав ВК6

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 98$	Угол заострения зерна, град
$ro := 9.56$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 15.0$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 2.03$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла
$X0 := 2820$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 29100$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szprov := 0.45$	Расстояние между зернами на поверхности круга
Связка круга $Y2 := 60$	Содержание меди в %
$Y3 := 15$	Содержание олова в %
$Y1 := 25$	Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град

$\lambda_{k4} := 62.8$	Коэффициент теплопроводности сплава ВК6, Вт/м*град
$\omega_1 := 0.000083$	Коэффициент тепературопроводности алмаза, м2/с
$T_{pr} := 775$	Допустимая температура на зерне, град С
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.29$	Коэффициент шлифования
$k_{cp} := 0.91$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$\tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза a_z

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$K_I := 2.45$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$F_{tf} := 1 - \exp\left(\frac{-t^m}{X_0}\right) \quad F_{tf} = 0.083$$

Значение коэффициента K_c , учитывающего разновысотное положение зерен

$$K_c := \frac{1}{\sqrt{F_{tf}}} \quad K_c = 3.473$$

Кинематический коэффициент K_d , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$K_d := \alpha + \beta \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad K_d = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна d_{cp} , мкм

$$d_{cp} := \frac{6090}{\sqrt[3]{N_z}} \quad d_{cp} = 197.994$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$N_z := \frac{283 \cdot 10^9}{d_{cp}^3} \quad N_z = 3.646 \times 10^4$$

Расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$Szp := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot Nz}{100}}} \quad Szp = 0.184$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами lf , мм

$$lf := Szp \cdot K1 \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 83.813$$

Максимальная толщина среза $azmax$, мм

$$azmax := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{lf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$azmax = 3.48 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := azmax \cdot 10^3 + Rz \cdot kcp \quad az = 17.13$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dcp^3}{6}}$$

$$dc = 172.964 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{lf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Fff := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X0}\right) \quad Fff = 0.107$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{Szpov^2} \cdot Fff \quad np = 0.529$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k2^{p1} \cdot \lambda k3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{V k \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.154$$

Функция, Azv $A1 := 1.3$ $Acp := 1.0457$

$$Azv := A1 - \frac{5.76 \cdot Acp \cdot hk \cdot F0}{\lambda k1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.298$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot V k} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 1.995$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot V k} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 30.659$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$kh := 0.32$ Коэффициент шлифования для сплава ВК6 по экспериментальным данным

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh} \quad Pyk = 95.808$$

ПЗ.3 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 200/160-4-М2-01 твердого сплава ВК6

Исходные данные: Круг 1А1 250*76*15*5 АС6 250/200-4-М2-01

Обрабатываемый материал: Твердый сплав ВК6

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 100$	Угол заострения зерна, град
$ro := 9.91$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 14.8$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла
$X0 := 710$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 8410$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szprov := 0.68$	Расстояние между зернами на поверхности круга
Связка круга	$Y2 := 60$ Содержание меди в %
	$Y3 := 15$ Содержание олова в %
	$Y1 := 25$ Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град

$\lambda k4 := 62.8$	Коэффициент теплопроводности ВК6, Вт/м*град
$\omega l := 0.000083$	Коэффициент температуропроводности алмаза, м2/с
$Tpr := 775$	Допустимая температура на зерне, град С
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.29$	Коэффициент шлифования
$kcp := 0.91$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза a_z

Среднее значение коэффициента Kl для данной марки алмаза, для расчета расстояния между зёрнами

$$Kl := 2.45$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(-\frac{tf^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.131$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{Ftf}} \quad Kc = 2.761$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha + \beta \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна dcp , мкм

$$dcp := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz}} \quad dcp = 299.469$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$Nz := \frac{283 \cdot 10^9}{dcp^3} \quad Nz = 1.054 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$Szp := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot Nz}{100}}} \quad Szp = 0.278$$

Расстояние между двумя контактирующими зёрнами lf , мм

$$lf := Szp \cdot K1 \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 100.77$$

Максимальная толщина среза $azmax$, мм

$$azmax := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{tf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$azmax = 4.129 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := azmax \cdot 10^3 + Rz \cdot kcp \quad az = 17.597$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dcp^3}{6}}$$

$$dc = 261.61 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зёрен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{tf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.168$$

Количество режущих зёрен на квадратном миллиметре поверхности круга np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{Szpov^2} \cdot Ftf \quad np = 0.364$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k2^{p1} \cdot \lambda k3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.067$$

$$\text{Функция, } Azv \quad A1 := 1.3 \quad Acp := 1.0457$$

$$Azv := A1 \cdot \frac{5.76 \cdot Acp \cdot hk \cdot F0}{\lambda k1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.299$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 4.376$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k1 + 2.25 \cdot \lambda k4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot nr \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 46.314$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$$kh := 0.32 \quad \text{Коэффициент шлифования для сплава ВК6 по экспериментальным данным}$$

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh} \quad Pyk = 144.731$$

ПЗ.4 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01 твердых сплавов группы ВК

Исходные данные:

Время шлифования, мин	$\tau := 1$		
$t := 20$	Глубина резания, мкм		
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с		
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин		
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм	$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм		
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %		
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d		
$\beta_k := 0.112$			
$a := 0.00002$	Коэффициент температуропроводности монокарбида вольфрама, м ² /с		
$\lambda := 62.8$	Коэффициент теплопроводности сплава ВК6, Вт/м ² К		
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на твердом сплаве		
$K_l := 1.2$	Коэффициент продольной усадки стружки		
$K_{ш} := 0.29$	Коэффициент шлифования		
$m_{01} := 2.23$	Параметры распределения разномысотности Вейбулла после правки для зернистости 100/80		
$x_{001} := 2946$			
$m_{02} := 1.70$	Параметры распределения разномысотности Вейбулла после правки для зернистости 250/200		
$x_{002} := 710$			
$A_1 := 0.22$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени размеров контактных площадок на зёрнах		
$q_1 := 0.047$			
	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разномысотности Вейбулла, для зернистости 100/80		
$A_{21} := 1.05$	- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм		
$q_{21} := 0.336$			
	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разномысотности Вейбулла, для зернистости 250/200		

$A22 := 1.01$	- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм
$q22 := 0.354$	
$eps1 := 91$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна
$ro1 := 6.69$	зернистости 100/80, мкм
$eps2 := 100$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна
$ro2 := 9.91$	зернистости 250/200, мкм
$Nz1 := 100000$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 100/80
$Nz2 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Kz := 1$	Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью
$Pразр2 := 70$	Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н
$aznp2 := 0.685$	Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм
$Rmax1 := 12$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 100/80, мкм
$Kmc1 := 0.91$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 100/80
$Rmax2 := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 250/200, мкм
$Kmc2 := 0.91$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 250/200

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 100/80, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz1}} \quad d1 = 131.205$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz2}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 100/80

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 1.253 \times 10^5$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 100/80

$$N_{v1} := \frac{4.4 \cdot k \cdot N_{z1}}{100} \quad N_{v1} = 5.513 \times 10^5$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью для зернистости 100/80, мм

$$S_{zr1} := \frac{10}{\sqrt[3]{N_{v1}}} \quad S_{zr1} = 0.122$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$N_{z2} := \frac{283 \cdot 10^9}{d^3} \quad N_{z2} = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 250/200

$$N_{v2} := \frac{4.4 \cdot k \cdot N_{z2}}{100} \quad N_{v2} = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью для зернистости 100/80, мм

$$S_{zr2} := \frac{10}{\sqrt[3]{N_{v2}}} \quad S_{zr2} = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 100/80, мм

$$S_{zp1} := S_{zr1} \cdot K1 \quad S_{zp1} = 0.299$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 250/200, мм

$$S_{zp2} := S_{zr2} \cdot K1 \quad S_{zp2} = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.205$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1.01$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.207$$

Коэффициент, учитывающий влияние разности высотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 2.198$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.515$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 81.102$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot Lfok2}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 3.93 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота шероховатостей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := Rmax2 \cdot Ktc2 \quad Rmax2 = 13.65$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 10.755$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz2 = 32.849$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 64.349$$

Так как $bz < Sx$, то $bz2 = 32.849$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.236$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 6.427$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := a \sin \left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2} \right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := \operatorname{atan} \left(\frac{\cos(Gamma)}{K1 + \sin(Gamma)} \right) \quad Beta = 0.043$$

- угол действия

$$Omega := \operatorname{atan} \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta \right) \right] - Beta \quad Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz2 := d2 \cdot A1 \cdot \tan^{q1} \quad lz2 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$Snc2 := bz2 \cdot lz2 + bz2 \cdot az2 \cdot \sin(Gamma) \quad Snc2 = 2.54 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного
зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{Snc2} \quad p_{\text{давл}} = 2.756 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 100/80, мкм

$$aznp1 := \frac{aznp2 \cdot ro1}{ro2} \quad aznp1 = 0.462$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно для зернистости 100/80

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft01 := 1 - \exp \left(\frac{-t^{m01}}{x001} \right) \quad Ft01 = 0.237$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$K_{\tau} := A_{21} \cdot \tau^{q_{22}} \quad K_{\tau} = 1.05$$

- в произвольный момент времени

$$F_{t1} := F_{t02} \cdot K_{\tau} \quad F_{t1} = 0.215$$

Коэффициент, учитывающий влияние разновысотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$K_{c1} := \frac{1}{\sqrt{F_{t1}}} \quad K_{c1} = 2.156$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$S_{k1} := S_{zpl} \cdot K_{c1} \quad S_{k1} = 0.644$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$K_d := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad K_d = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$l_{fok1} := S_{k1} \cdot K_d \quad l_{fok1} = 34.472$$

Максимальная толщина среза, мм

$$a_{zmax1} := R_k \cdot \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot l_{fok1}}{60 \cdot V_k}\right)^2 + R_k^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot l_{fok1} \cdot R_k}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_k \cdot 1000}}$$

$$a_{zmax1} = 1.723 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$R_{max1} := R_{max1} \cdot K_{tc1} \quad R_{max1} = 10.92$$

Толщина среза, мкм

$$a_{z1} := 1000 \cdot a_{zmax1} + \frac{R_{max1}}{2} \quad a_{z1} = 7.183$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$E_{ps} := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad a_{zs1} := r_{o1} \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{E_{ps}}{2}\right)\right) \quad a_{zs1} = 1.918$$

Ширина среза, мкм

$$b_{z1} := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot r_{o1} \cdot a_{zs1} - a_{zs1}^2} + (a_{z1} - a_{zs1}) \cdot \tan\left(\frac{E_{ps}}{2}\right) \right] \quad b_{z1} = 20.093$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$S_{x1} := \frac{S_{zp1}^2 \cdot 1000}{l_{fok1} \cdot F_{t1} \cdot K_k} \quad S_{x1} = 27.352$$

Так как $bz < S_x$, то

$$b_{z1} = 20.093$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{D_k \cdot \frac{l}{1000}} \quad L = 2.236$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Z_{p1} := \frac{B_k \cdot L \cdot F_{t1} \cdot K_k}{S_{zp1}^2} \quad Z_{p1} = 35.573$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$\Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot a_{zn1}}{d1}\right) \quad \Gamma = 1.452$$

- угол сдвига

$$\beta := \arctan\left(\frac{\cos(\Gamma)}{K_l + \sin(\Gamma)}\right) \quad \beta = 0.054$$

- угол действия

$$\Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] - \beta \quad \Omega = 1.131$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$l_{z1} := d1 \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad l_{z1} = 28.865$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна

с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$S_{nk1} := b_{z1} \cdot l_{z1} + b_{z1} \cdot a_{z1} \cdot \sin(\Gamma) \quad S_{nk1} = 723.301$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$P_{разр1} := p_{давл} \cdot \frac{S_{nk1}}{10^6} \quad P_{разр1} = 19.937$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$H1 := \frac{L}{2} \quad H1 = 1.118$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$H := \frac{Vd \cdot H1}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 2.795$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$S := Bk \cdot L \quad S = 33.541$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{max} + 0.5Rz$

$$F_{tazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-azl^{m01}}{x001}\right) \right) \cdot Ktau \quad F_{tazmax} = 0.029$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{np1} + 0.5Rz$

$$F_{taznp1} := \left[1 - \exp\left[\frac{-(azl - aznp1)^{m01}}{x001}\right] \right] \cdot Ktau \quad F_{taznp1} = 0.025$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 100/80

$$z_{разр1} := \frac{S \cdot F_{taznp1}}{Szpl^2} \quad z_{разр1} = 9.263$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 100/80, Н

$$P_k := P_{разр1} \cdot z_{разр1} = 184.681 \quad P_k = 184.681$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 100/80, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + K_{иу}^2}} \quad P_{ук} = 177.373$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 200/2160, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_{иу}}\right)^2}} \quad P_{zk} = 51.438$$

П3.5 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1A1 250*76*15*5 AC6 160/125-4-M2-01 твердых сплавов группы ВК

Исходные данные:

Время шлифования, мин	$t_{su} := 1$		
$t := 25$	Глубина резания, мкм		
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с		
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин		
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм	$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм		
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %		
$alfa_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d		
$beta_k := 0.112$			
$a := 0.00002$	Коэффициент температуропроводности монокарбида вольфрама, м*м/с		
$lambda := 62.8$	Коэффициент теплопроводности сплава ВК6, Вт/м*К		
$mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на твердом сплаве		
$K_l := 1.2$	Коэффициент продольной усадки стружки		
$K_{su} := 0.29$	Коэффициент шлифования		
$m01 := 2.03$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 160/125		
$x001 := 2820$			
$m02 := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 250/200		
$x002 := 710$			
$A1 := 0.22$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени размеров контактных площадок на зёрнах		
$q1 := 0.047$	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 160/125		
$A21 := 0.89$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм		
$q21 := 0.364$	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 250/200		

$A_{22} := 1.00$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм
$q_{22} := 0.296$	
$eps1 := 98$	Угол заострения, град. и радиус закругления зерна
$ro1 := 9.56$	зернистости 160/125, мкм
$eps2 := 100$	Угол заострения, град. и радиус закругления зерна
$ro2 := 9.91$	зернистости 250/200, мкм
$Nz1 := 29100$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 160/125
$Nz2 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Kz := 1$	Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью
$P_{разр2} := 70$	Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н
$a_{znp2} := 0.685$	Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм
$R_{max1} := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 160/125, мкм
$K_{mc1} := 0.91$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 200/160
$R_{max2} := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 250/200, мкм
$K_{mc2} := 0.91$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 250/200

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 160/125.

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz1}} \quad d1 = 197.994$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz2}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 160/125

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 3.646 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 160/125

$$N_{v1} := \frac{4.4 \cdot k \cdot N_{z1}}{100} \quad N_{v1} = 1.604 \times 10^5$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью для зернистости 160/125, мм

$$S_{zr1} := \frac{10}{\sqrt[3]{N_{v1}}} \quad S_{zr1} = 0.184$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$N_{z2} := \frac{283 \cdot 10^9}{d2^3} \quad N_{z2} = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 250/200

$$N_{v2} := \frac{4.4 \cdot k \cdot N_{z2}}{100} \quad N_{v2} = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью для зернистости 250/200, мм

$$S_{zr2} := \frac{10}{\sqrt[3]{N_{v2}}} \quad S_{zr2} = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 160/125, мм

$$S_{zp1} := S_{zr1} \cdot K1 \quad S_{zp1} = 0.451$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 250/200, мм

$$S_{zp2} := S_{zr2} \cdot K1 \quad S_{zp2} = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.285$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.285$$

Коэффициент, учитывающий влияние разницы высот на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 1.874$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.292$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 69.146$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot Lfok2}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 3.795 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := Rmax2 \cdot Kte2 \quad Rmax2 = 13.65$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 10.62$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 \cdot azs2^2 + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right)} \right] \quad bz2 = 32.527$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 54.863$$

$$\text{Так как } bz < Sx, \text{ то} \quad bz2 = 32.527$$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L_2 := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L_2 = 2.5$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L_2 \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 9.885$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном
- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := \arctan\left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.043$$

- угол действия

$$Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz2 := d2 \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz2 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$S_{нк2} := bz2 \cdot lz2 + bz2 \cdot az2 \cdot \sin(Gamma) \quad S_{нк2} = 2.51 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного
зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{S_{нк2}} \quad p_{\text{давл}} = 2.789 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 160/125, мкм

$$aznp1 := \frac{aznp2 \cdot ro1}{ro2} \quad aznp1 = 0.661$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно для зернистости 160/125

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft01 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad Ft01 = 0.217$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции
Вейбулла со временем обработки

$$K_{tau} := A21 \cdot tau^{q22} \quad K_{tau} = 0.89$$

- в произвольный момент времени

$$F_{t1} := F_{t02} \cdot K_{tau} \quad F_{t1} = 0.253$$

Коэффициент, учитывающий влияние разности высот на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$K_{c1} := \frac{1}{\sqrt{F_{t1}}} \quad K_{c1} = 1.986$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$S_{k1} := S_{zp1} \cdot K_{c1} \quad S_{k1} = 0.896$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$K_d := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad K_d = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$L_{fok1} := S_{k1} \cdot K_d \quad L_{fok1} = 47.934$$

Максимальная толщина среза, мм

$$a_{zmax1} := R_k \cdot \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot L_{fok1}}{60 \cdot V_k}\right)^2 + R_k^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot L_{fok1} \cdot R_k}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_k \cdot 1000}}$$

$$a_{zmax1} = 2.664 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$R_{max1} := R_{max1} \cdot K_{tc1} \quad R_{max1} = 13.65$$

Толщина среза, мкм

$$a_{z1} := 1000 \cdot a_{zmax1} + \frac{R_{max1}}{2} \quad a_{z1} = 9.489$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$E_{ps1} := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad a_{zs1} := r_{o1} \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{E_{ps1}}{2}\right)\right) \quad a_{zs1} = 2.345$$

Ширина среза, мкм

$$b_{z1} := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot r_{o1} \cdot a_{zs1} - a_{zs1}^2} + (a_{z1} - a_{zs1}) \cdot \tan\left(\frac{E_{ps1}}{2}\right) \right] \quad b_{z1} = 28.981$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$S_{x1} := \frac{S_{zpl}^2 \cdot 1000}{l_{fok1} \cdot F_{t1} \cdot K_k} \quad S_{x1} = 38.033$$

Так как $b_z < S_x$, то $b_{z1} = 28.981$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{D_k \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.5$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Z_{p1} := \frac{B_k \cdot L \cdot F_{t1} \cdot K_k}{S_{zpl}^2} \quad Z_{p1} = 20.569$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном
- передний угол модели алмазного зерна

$$\Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot a_{znpl}}{d_l}\right) \quad \Gamma = 1.455$$

- угол сдвига

$$\beta := \arctan\left(\frac{\cos(\Gamma)}{K_l + \sin(\Gamma)}\right) \quad \beta = 0.053$$

- угол действия

$$\Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] - \beta \quad \Omega = 1.133$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$l_{z1} := d_l \cdot A_l \cdot \tau^{q_l} \quad l_{z1} = 43.559$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 160/125, мкм²

$$S_{nk1} := b_{z1} \cdot l_{z1} + b_{z1} \cdot a_{z1} \cdot \sin(\Gamma) \quad S_{nk1} = 1.536 \times 10^3$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой, Н

$$P_{разр1} := p_{давл} \cdot \frac{S_{nk1}}{10^6} \quad P_{разр1} = 42.818$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$H1 := \frac{L}{2} \quad H1 = 1.25$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$H := \frac{Vd \cdot H1}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 3.125$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$S := Bk \cdot L \quad S = 37.5$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{max} + 0,5Rz$

$$F_{ta_{zmax}} := \left(1 - \exp\left(\frac{-az_{max}^{m01}}{x001}\right) \right) \cdot K_{tau} \quad F_{ta_{zmax}} = 0.03$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{np1} + 0,5Rz$

$$F_{ta_{znp1}} := \left[1 - \exp\left(\frac{-(az_{np1} - az_{np1})^{m01}}{x001}\right) \right] \cdot K_{tau} \quad F_{ta_{znp1}} = 0.026$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 160/125

$$z_{разр1} := \frac{S \cdot F_{ta_{znp1}}}{S_{zр1}^2} \quad z_{разр1} = 4.773$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 160/125, Н

$$P_k := P_{разр1} \cdot z_{разр1} \quad P_k = 204.36$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 160/125, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + K_{иу}^2}} \quad P_{ук} = 196.273$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 160/125, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_{иу}}\right)^2}} \quad P_{zk} = 56.919$$

П3.6 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 200/160-4-М2-01 твердых сплавов группы ВК

Исходные данные:

Время шлифования, мин	$\tau := 1$		
$t := 23.5$	Глубина резания, мкм		
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с		
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин		
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм	$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм		
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %		
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d		
$\beta_k := 0.112$			
$a := 0.00002$	Коэффициент температуропроводности монокарбида вольфрама, м*м/с		
$\lambda := 62.8$	Коэффициент теплопроводности сплава ВК6, Вт/м*К		
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на твердом сплаве		
$K_l := 1.2$	Коэффициент продольной усадки стружки		
$K_{\mu} := 0.29$	Коэффициент шлифования		
$m_{01} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 200/160		
$x_{001} := 710$			
$m_{02} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 250/200		
$x_{002} := 710$			
$A_1 := 0.22$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени размеров контактных площадок на зёрнах		
$q_1 := 0.047$	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 200/160		
$A_{21} := 1.00$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм		
$q_{21} := 0.296$	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 250/200		

$A22 := 1.00$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм
$q22 := 0.296$	
$eps1 := 100$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна
$ro1 := 9.91$	зернистости 200/160, мкм
$eps2 := 100$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна
$ro2 := 9.91$	зернистости 250/200, мкм
$Nz1 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости
	200/160
$Nz2 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости
	250/200
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Kz := 1$	Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных
	напряжений на поверхности контакта зерна с деталью
$Prap2 := 70$	Разрушающая нагрузка на единичное зерно для
	зернистости 250/200, Н
$aznp2 := 0.685$	Предельная толщина среза для зернистости
	250/200, мкм
$Rmax1 := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания
	для зернистости 200/160, мкм
$Kmc1 := 0.91$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей
	поверхности резания для зернистости 200/160
$Rmax2 := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания
	для зернистости 250/200, мкм
$Kmc2 := 0.91$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей
	поверхности резания для зернистости 250/200

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 200/160, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz1}} \quad d1 = 302.744$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz2}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 200/160

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 200/160

$$Nv1 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz1}{100} \quad Nv1 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью для зернистости 200/160, мм

$$Szs1 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv1}} \quad Szs1 = 0.281$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$Nz2 := \frac{283 \cdot 10^9}{d2^3} \quad Nz2 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 250/200

$$Nv2 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz2}{100} \quad Nv2 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью для зернистости 250/200, мм

$$Szs2 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv2}} \quad Szs2 = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 200/160, мм

$$Szp1 := Szs1 \cdot K1 \quad Szp1 = 0.689$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 250/200, мм

$$Szp2 := Szs2 \cdot K1 \quad Szp2 = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.26$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.26$$

Коэффициент, учитывающий влияние разности высот на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 1.96$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.351$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha k + \beta k \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 72.305$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfok2}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 3.835 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := Rmax2 \cdot Kte2 = 13.65 \quad Rmax2 = 13.65$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 10.66$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz2 = 32.622$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 57.369$$

Так как $bz < Sx$, то $bz2 = 32.622$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.424$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 8.765$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := asin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := atan\left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.043$$

- угол действия

$$Omega := atan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz2 := d2 \cdot A1 \cdot \tan^{q1} \quad lz2 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$Snk2 := bz2 \cdot lz2 + bz2 \cdot az2 \cdot \sin(Gamma) \quad Snk2 = 2.519 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{давл} := \frac{P_{разр2} \cdot 10^6}{Snk2} \quad p_{давл} = 2.779 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 200/160, мкм

$$aznp1 := \frac{aznp2 \cdot ro1}{ro2} \quad aznp1 = 0.685$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно для зернистости 200/160

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft01 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad Ft01 = 0.26$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A21 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1$$

- в произвольный момент времени

$$Ft1 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft1 = 0.26$$

Коэффициент, учитывающий влияние разницы высотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc1 := \frac{1}{\sqrt{Ft1}} \quad Kc1 = 1.96$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk1 := Szp1 \cdot Kc1 \quad Sk1 = 1.351$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha k + \beta k \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok1 := Sk1 \cdot Kd \quad Lfok1 = 72.305$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax1 := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfok1}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfok1 \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax1 = 3.835 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax1 := Rmax1 \cdot Ktc1 = 13.65 \quad Rmax1 = 13.65$$

Толщина среза, мкм

$$az1 := 1000 \cdot azmax1 + \frac{Rmax1}{2} \quad az1 = 10.66$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad azs1 := rol \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs1 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz1 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro1 \cdot azs1 - azs1^2} + (az1 - azs1) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz1 = 32.622$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx1 := \frac{Szp1^2 \cdot 1000}{Lfok1 \cdot Ft1 \cdot Kk} \quad Sx1 = 57.369$$

Так как $bz < Sx$, то $bz1 = 32.622$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.424$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp1 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft1 \cdot Kk}{Szp1^2} \quad Zp1 = 8.765$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$\Gamma := \text{asin}\left(1 - \frac{2 \cdot aznp1}{dl}\right) \quad \Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$\beta := \text{atan}\left(\frac{\cos(\Gamma)}{Kl + \sin(\Gamma)}\right) \quad \beta = 0.043$$

- угол действия

$$\Omega := \text{atan}\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] - \beta \quad \Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz1 := dl \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz1 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна

с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$Snk1 := bz1 \cdot lz1 + bz1 \cdot az1 \cdot \sin(\Gamma) \quad Snk1 = 2.519 \times 10^3$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$Pразр1 := p_{давл} \cdot \frac{Snk1}{10^6} \quad Pразр1 = 70$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$Hl := \frac{L}{2} \quad Hl = 1.212$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$H := \frac{Vd \cdot Hl}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 3.03$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$S := Bk \cdot L \quad S = 36.358$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{max} + 0,5Rz$.

$$F_{tazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-azl^{m01}}{x001}\right) \right) \cdot Ktau \quad F_{tazmax} = 0.076$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{pr1} + 0,5Rz$.

$$F_{tazpr1} := \left[1 - \exp\left[\frac{-(azl - azpr1)^{m01}}{x001}\right] \right] \cdot Ktau \quad F_{tazpr1} = 0.068$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 200/160

$$z_{разр1} := \frac{S \cdot F_{tazpr1}}{Szpr1^2} \quad z_{разр1} = 5.192$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 200/160, Н

$$P_k := P_{разр1} \cdot z_{разр1} \quad P_k = 363.441$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 200/160, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + Ku^2}} \quad P_{ук} = 349.059$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 200/160, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{Ku}\right)^2}} \quad P_{zk} = 101.227$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Определение сил поджима заготовки к кругу по техническим ограничениям
при обработке титанового сплава BT14

И4.1 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01 титанового сплава ВТ14

Исходные данные: Круг 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М1-01

Обрабатываемый материал: Титановый сплав ВТ14

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 91$	Угол заострения зерна, град
$ro := 6.69$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 12.0$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 2.23$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла
$X0 := 2946$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 100000$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szprov := 0.30$	Расстояние между зернами на поверхности круга
Связка круга	$Y2 := 60$ Содержание меди в %
	$Y3 := 15$ Содержание олова в %
	$Y1 := 25$ Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град
$\lambda k4 := 16.8$	Коэффициент теплопроводности сплава ВТ14, Вт/м*град

$\omega l := 0.000083$	Коэффициент теплопроводности алмаза, м ² /с
$T_{pr} := 775$	Допустимая температура на зерне, град С
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.30$	Коэффициент шлифования
$k_{cp} := 0.91$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$\tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза az

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$Kl := 2.45$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(-\frac{tf^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.133$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{Ftf}} \quad Kc = 2.745$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha + \beta \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна d_{cp} , мкм

$$d_{cp} := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz}} \quad d_{cp} = 131.205$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$Nz := \frac{283 \cdot 10^9}{d_{cp}^3} \quad Nz = 1.253 \times 10^5$$

Расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$S_{zp} := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot Nz}{100}}} \quad S_{zp} = 0.122$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами lf , мм

$$lf := Szp \cdot K1 \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 43.897$$

Максимальная толщина среза $azmax$, мм

$$azmax := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{tf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$azmax = 1.88 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := azmax \cdot 10^3 + Rz \cdot kcp \quad az = 12.8$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dcp^3}{6}}$$

$$dc = 114.618 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{tf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.095$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга
 np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{Szpov^2} \cdot Ftf \quad np = 1.057$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k_2^{p1} \cdot \lambda k_3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.35$$

Функция, Azv $AI := 1.3$ $Acpr := 1.0457$

$$Azv := AI - \frac{5.76 \cdot Acpr \cdot hk \cdot F0}{\lambda k l + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.296$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k l + 2.25 \cdot \lambda k_4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 0.815$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k l + 2.25 \cdot \lambda k_4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 25.026$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh}$$

$$Pyk = 83.419$$

114.2 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1A1 250*76*15*5 AC6 160/125-4-M2-01 титанового сплава BT14

Исходные данные: Круг 1A1 250*76*15*5 AC6 160/125-4-M2-01

Обрабатываемый материал: Титановый сплав BT14

$b := 15$	Ширина заготовки, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 98$	Угол заострения зерна, град
$ro := 9.56$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 15.0$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 2.03$	Параметры распределения разнорысотности Вейбулла
$X0 := 2820$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 29100$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szrov := 0.45$	Расстояние между зернами на поверхности круга
Связка круга	$Y2 := 60$ Содержание меди в %
	$Y3 := 15$ Содержание олова в %
	$YI := 25$ Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град
$\lambda k4 := 16.8$	Коэффициент теплопроводности сплава BT14, Вт/м*град

$\omega I := 0.000083$	Коэффициент теплопроводности алмаза, м ² /с
$T_{pr} := 775$	Допустимая температура на зерне, град С
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.30$	Коэффициент шлифования
$k_{cp} := 1.20$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$\tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза az

Среднее значение коэффициента KI для данной марки алмаза, для расчета расстояния между зернами

$$KI := 2.46$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$F_{tf} := 1 - \exp\left(\frac{-tf^m}{X0}\right) \quad F_{tf} = 0.083$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{F_{tf}}} \quad Kc = 3.473$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha + \beta \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна d_{cp} , мкм

$$d_{cp} := \frac{6090}{\sqrt[3]{N_z}} \quad d_{cp} = 197.994$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$N_z := \frac{283 \cdot 10^9}{d_{cp}^3} \quad N_z = 3.646 \times 10^4$$

Расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$S_{zp} := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot N_z}{100}}} \quad S_{zp} = 0.184$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами lf , мм

$$lf := Szp \cdot Kl \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 84.155$$

Максимальная толщина среза $azmax$, мм

$$azmax := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{tf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$azmax = 3.494 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := azmax \cdot 10^3 + Rz \cdot kcp \quad az = 21.494$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dep^3}{6}}$$

$$dc = 172.964 \quad \text{Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания } dc$$

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{tf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(-\frac{az^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.164$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга
 np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{Szpov^2} \cdot Ftf \quad np = 0.812$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k_2^{p1} \cdot \lambda k_3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.154$$

Функция, Azv $Al := 1.3$ $Acpr := 1.0457$

$$Azv := Al - \frac{5.76 \cdot Acpr \cdot hk \cdot F0}{\lambda k_1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.298$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k_1 + 2.25 \cdot \lambda k_4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 1.821$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k_1 + 2.25 \cdot \lambda k_4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot \dot{n}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 42.934$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh}$$

$$Pyk = 143.112$$

14.3 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по критерию отсутствия окисления алмазных зёрен при обработке кругом 1A1 250*76*15*5 AC6 200/160-4-M2-01 титанового сплава BT14

Исходные данные: Круг 1A1 250*76*15*5 AC6 200/160-4-M2-01

Обрабатываемый материал: Титановый сплав BT14

$b := 15$	Ширина образца, мм
$Rk := 125$	Радиус круга, мм
$bk := 15$	Высота круга, мм
$Vk := 35$	Скорость круга, м/с
$Vd := 6$	Скорость детали, м/мин
$tf := 15$	Глубина резания, мкм
$T := 0$	Время шлифования, мин (0 - после правки)
$K := 100$	Относительная концентрация алмазов, %
$eps := 100$	Угол заострения зерна, град
$ro := 9.91$	Радиус закругления вершины зерна, мкм
$Rz := 14.0$	Шероховатость обработанной поверхности
$m := 1.70$	Параметры распределения разнорысотности Вейбулла
$X0 := 710$	
$alfa := 14.32$	Значение свободного члена регрессии и коэффициента регрессии для расчёта Kd
$beta := 0.112$	
$Nz := 8140$	Число зерен в одном карате
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Szpor := 0.68$	Расстояние между зернами на поверхности круга, мм
Связка круга	
$Y2 := 60$	Содержание меди в %
$Y3 := 15$	Содержание олова в %
$Y1 := 25$	Содержание алмазов в %
$\lambda k1 := 530$	Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м*град
$\lambda k2 := 361$	Коэффициент теплопроводности меди, Вт/м*град
$\lambda k3 := 58.41$	Коэффициент теплопроводности олова, Вт/м*град
$\lambda k4 := 16.8$	Коэффициент теплопроводности сплава BT14, Вт/м*град

$\omega l := 0.000083$	Коэффициент тепературопроводности алмаза, м2/с
$Tpr := 775$	Допустимая температура на зерне, град С
$\delta := 1.5$	Коэффициент неравномерности нагрузки
$kh := 0.30$	Коэффициент шлифования
$kcp := 1.79$	Уточняющий коэффициент шероховатости поверхности резания
$tau := 1$	Время шлифования

Определение толщины среза a_z

Среднее значение коэффициента Kl для данной марки алмаза, для расчета расстояния между зернами

$$Kl := 2.46$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-tf^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.131$$

Значение коэффициента Kc , учитывающего разновысотное положение зерен

$$Kc := \frac{1}{\sqrt{Ftf}} \quad Kc = 2.761$$

Кинематический коэффициент Kd , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := alfa + beta \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Диаметр шаровой модели зерна dcp , мкм

$$dcp := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz}} \quad dcp = 302.744$$

Среднее количество зерен в одном карате

$$Nz := \frac{283 \cdot 10^9}{dcp^3} \quad Nz = 1.02 \times 10^4$$

Расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм

$$Szp := \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4.4 \cdot K \cdot Nz}{100}}} \quad Szp = 0.281$$

Расстояние между двумя контактирующими зернами lf , мм

$$lf := Szp \cdot K1 \cdot Kc \cdot Kd \quad lf = 102.288$$

Максимальная толщина среза $azmax$, мм

$$azmax := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot lf}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot lf \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{lf \cdot 10^{-3}}{Rk}}$$

$$azmax = 4.186 \times 10^{-3}$$

Толщина единичного среза az , мкм

$$az := azmax \cdot 10^3 + Rz \cdot kcp \quad az = 29.246$$

Определение параметров цилиндрической модели зерна

Диаметр основания цилиндрической модели зерна dc , мкм

$$dc := \sqrt[3]{\frac{4 \cdot dcp^3}{6}}$$

$$dc = 264.471$$

Высоту цилиндрической модели положим равной диаметру основания dc

Расчет количества режущих зерен

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом L , мм

$$L := \sqrt{2 \cdot Rk \cdot \frac{lf}{1000}} \quad L = 1.936$$

Значение функции распределения Вейбулла

$$Ftf := 1 - \exp\left(\frac{-az^m}{X0}\right) \quad Ftf = 0.354$$

Количество режущих зерен на квадратном миллиметре поверхности круга
 np , шт/мм²

$$np := \frac{1}{Szpov^2} \cdot Ftf \quad np = 0.766$$

Определение теплофизических свойств связки круга

Показатели степени в формуле расчета теплопроводности

$$\text{меди} \quad p1 := \frac{Y2}{100 \cdot Y1} \quad p1 = 0.024$$

$$\text{олова} \quad p2 := \frac{Y3}{100 \cdot Y1} \quad p2 = 6 \times 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности связки круга без алмазов hc , Вт/м*град

$$hc := \lambda k_2^{p1} \cdot \lambda k_3^{p2} \quad hc = 1.18$$

Коэффициент теплопроводности связки круга hk , Вт/м*град

$$hk := 0.41 \cdot (hc + 0.098) \cdot K^{0.15} \quad hk = 1.046$$

Расчет силы резания на круге

Безразмерный критерий фурье, $F0$ (безразмерное время)

$$F0 := \frac{\omega l \cdot L \cdot 10^{-3}}{Vk \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}} \quad F0 = 0.066$$

Функция, Azv $AI := 1.3$ $Acp := 1.0457$

$$Azv := AI \cdot \frac{5.76 \cdot Acp \cdot hk \cdot F0}{\lambda k_1 + 5.76 \cdot hk \cdot F0} \quad Azv = 1.299$$

Общая сила на зерне $Pzzer$, Н

$$Pzzer := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k_1 + 2.25 \cdot \lambda k_4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot dc^2 \cdot 10^{-12}}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52 \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}}}$$

$$Pzzer = 4.202$$

Общая сила на круге Pzk , Н

$$Pzk := \frac{0.95 \cdot Tpr \cdot (\lambda k_1 + 2.25 \cdot \lambda k_4 \cdot Azv \cdot \sqrt{F0}) \cdot \pi \cdot np \cdot 10^6 \cdot dc^2 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{L \cdot 10^{-3}} \cdot b}{Azv \cdot \delta \cdot \sqrt{\omega l \cdot Vk} \cdot 4.52}$$

$$Pzk = 93.538$$

Определение силы поджима заготовки к кругу

Сила поджима заготовки к кругу Pyk , Н

$$Pyk := \frac{Pzk}{kh}$$

$$Pyk = 311.794$$

И4.4 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 100/80-4-М2-01 титанового сплава ВТ14

Время шлифования, мин	$\tau := 1$		
$t := 20$	Глубина резания, мкм		
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с		
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин		
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм	$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм		
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %		
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d		
$\beta_k := 0.112$			
$a := 0.0000091$	Коэффициент температуропроводности сплава ВТ14, м*м/с		
$\lambda := 8.9$	Коэффициент теплопроводности сплава ВТ14, Вт/м*К		
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале		
$K_l := 1.2$	Коэффициент продольной усадки стружки		
$K_{\mu} := 0.30$	Коэффициент шлифования		
$m_{01} := 2.23$	Параметры распределения разнорысности Вейбулла после правки для зернистости 100/80		
$x_{001} := 2946$			
$m_{02} := 1.70$	Параметры распределения разнорысности Вейбулла после правки для зернистости 250/200		
$x_{002} := 710$			
$A_1 := 0.22$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени размеров контактных площадок на зёрнах		
$q_1 := 0.047$			
	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разнорысности Вейбулла, для зернистости 100/80		
$A_{21} := 1.05$			
$q_{21} := 0.336$	- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм		
	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разнорысности Вейбулла, для зернистости 250/200		

$A_{22} := 1.01$	- при глубине шлифования $t = 10-15$ мкм
$q_{22} := 0.354$	
$eps1 := 91$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна
$ro1 := 6.69$	зернистости 100/80, мкм
$eps2 := 100$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна
$ro2 := 9.91$	зернистости 250/200, мкм
$Nz1 := 100000$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 100/80
$Nz2 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Kz := 1$	Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью
$P_{разр2} := 70$	Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н
$aznp2 := 0.685$	Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм
$R_{max1} := 12$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 100/80, мкм
$K_{mum1} := 0.91$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 100/80
$R_{max2} := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 250/200, мкм
$K_{mum2} := 1.79$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 250/200

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 100/80, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz1}} \quad d1 = 131.205$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz2}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 100/80

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 1.253 \times 10^5$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 100/80

$$Nv1 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz1}{100} \quad Nv1 = 5.513 \times 10^5$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазноносного слоя плоскостью для зернистости 100/80, мм

$$Szs1 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv1}} \quad Szs1 = 0.122$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$Nz2 := \frac{283 \cdot 10^9}{d2^3} \quad Nz2 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 250/200

$$Nv2 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz2}{100} \quad Nv2 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазноносного слоя плоскостью для зернистости 250/200, мм

$$Szs2 := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv2}} \quad Szs2 = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазноносного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 100/80, мм

$$Szs1 := Szs1 \cdot K1 \quad Szs1 = 0.299$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 250/200, мм

$$Szs2 := Szs2 \cdot K1 \quad Szs2 = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.205$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1.01$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.207$$

Коэффициент, учитывающий влияние разноразности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 2.198$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.515$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 81.102$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot Lfok2}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 3.93 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := Rmax2 \cdot Kтит2 \quad Rmax2 = 26.85$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 17.355$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz2 = 48.581$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 64.349$$

Так как $bz < Sx$, то $bz2 = 48.581$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.236$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 6.427$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := \arctan\left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.043$$

- угол действия

$$Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz2 := d2 \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz2 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$Snc2 := bz2 \cdot lz2 + bz2 \cdot az2 \cdot \sin(Gamma) \quad Snc2 = 4.075 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{Snc2} \quad p_{\text{давл}} = 1.718 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 100/80, мкм

$$aznp1 := \frac{aznp2 \cdot ro1}{ro2} \quad aznp1 = 0.462$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно для зернистости 100/80

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft01 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad Ft01 = 0.237$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A21 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1.05$$

- в произвольный момент времени

$$Ft1 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft1 = 0.215$$

Коэффициент, учитывающий влияние разновысотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc1 := \frac{1}{\sqrt{Ft1}} \quad Kc1 = 2.156$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk1 := Szp1 \cdot Kc1 \quad Sk1 = 0.644$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok1 := Sk1 \cdot Kd \quad Lfok1 = 34.472$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax1 := Rk - \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot Lfok1}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot Lfok1 \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax1 = 1.723 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax1 := Rmax1 \cdot Kтит1 \quad Rmax1 = 10.92$$

Толщина среза, мкм

$$az1 := 1000 \cdot azmax1 + \frac{Rmax1}{2} \quad az1 = 7.183$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad azs1 := rol \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs1 = 1.918$$

Ширина среза, мкм

$$bz1 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro1 \cdot azs1 - azs1^2} + (az1 - azs1) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz1 = 20.093$$

Расстояние между сечениями математической модели РИК, мкм

$$Sx1 := \frac{Szp1^2 \cdot 1000}{Lfok1 \cdot Ft1 \cdot Kk} \quad Sx1 = 27.352$$

Так как $bz < Sx$, то $bz1 = 20.093$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.236$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp1 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft1 \cdot Kk}{Szp1^2} \quad Zp1 = 35.573$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$\Gamma := \text{asin}\left(1 - \frac{2 \cdot aznp1}{dl}\right) \quad \Gamma = 1.452$$

- угол сдвига

$$\beta := \text{atan}\left(\frac{\cos(\Gamma)}{K1 + \sin(\Gamma)}\right) \quad \beta = 0.054$$

- угол действия

$$\Omega := \text{atan}\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] - \beta \quad \Omega = 1.131$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz1 := dl \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz1 = 28.865$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна

с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$S_{nk1} := bz1 \cdot lz1 + bz1 \cdot az1 \cdot \sin(\Gamma) \quad S_{nk1} = 723.301$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$P_{разр1} := p_{давл} \cdot \frac{S_{nk1}}{10^6} \quad P_{разр1} = 12.425$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$Hl := \frac{L}{2} \quad Hl = 1.118$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$H := \frac{Vd \cdot Hl}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 6.143$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$S := Bk \cdot L \quad S = 33.541$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{max} + 0,5Rz$

$$F_{tazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-azl^{m0l}}{x00l}\right) \right) \cdot Ktau \quad F_{tazmax} = 0.029$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{p1} + 0,5Rz$

$$F_{tazp1} := \left[1 - \exp\left(\frac{-(azl - az_{p1})^{m0l}}{x00l}\right) \right] \cdot Ktau \quad F_{tazp1} = 0.025$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 100/80

$$z_{разp1} := \frac{S \cdot F_{tazp1}}{Szp1^2} \quad z_{разp1} = 9.263$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 100/80, Н

$$P_k := P_{разp1} \cdot z_{разp1} = 115.097 \quad P_k = 115.097$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 100/80, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + Ku^2}} \quad P_{ук} = 110.243$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 100/80, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{Ku}\right)^2}} \quad P_{zk} = 33.073$$

П4.5 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1A1 250*76*15*5 AC6 160/125-4-M2-01 титанового сплава BT14

Время шлифования, мин	$\tau := 1$		
$t := 25$	Глубина резания, мкм		
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с		
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин		
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм	$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм		
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %		
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d		
$\beta_k := 0.112$			
$a := 0.0000091$	Коэффициент температуропроводности сплава BT14, м*м/с		
$\lambda := 8.9$	Коэффициент теплопроводности сплава BT14, Вт/м*К		
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на титановом сплаве		
$K_l := 1.2$	Коэффициент продольной усадки стружки		
$K_{ut} := 0.30$	Коэффициент шлифования		
$m_{01} := 2.03$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 160/125		
$x_{001} := 2820$			
$m_{02} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности Вейбулла после правки для зернистости 250/200		
$x_{002} := 710$			
$A_1 := 0.22$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени размеров контактных площадок на зёрнах		
$q_1 := 0.047$			
	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 160/125		
$A_{21} := 0.89$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм		
$q_{21} := 0.364$			
	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 250/200		

$A_{22} := 1.00$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм
$q_{22} := 0.296$	
$eps1 := 98$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 160/125, мкм
$ro1 := 9.56$	
$eps2 := 100$	Угол заострения, град, и радиус закругления зерна зернистости 250/200, мкм
$ro2 := 9.91$	
$Nz1 := 29100$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 160/125
$Nz2 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Kz := 1$	Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью
$P_{разр2} := 70$	Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н
$aznp2 := 0.685$	Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм
$R_{max1} := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 160/125, мкм
$K_{тум1} := 1.2$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 160/125
$R_{max2} := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 250/200, мкм
$K_{тум2} := 1.79$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 250/200

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 160/125, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz1}} \quad d1 = 197.994$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz2}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 160/125

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 3.646 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 160/125

$$Nv1 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz1}{100} \quad Nv1 = 1.604 \times 10^5$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя
плоскостью для зернистости 160/125, мм

$$S_{zr1} := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv1}} \quad S_{zr1} = 0.184$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$Nz2 := \frac{283 \cdot 10^9}{d2^3} \quad Nz2 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 250/200

$$Nv2 := \frac{4.4 \cdot k \cdot Nz2}{100} \quad Nv2 = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазонасного слоя
плоскостью для зернистости 100/80, мм

$$S_{zr2} := \frac{10}{\sqrt[3]{Nv2}} \quad S_{zr2} = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние
между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния
между зёрнами в сечении алмазонасного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 160/125, мм

$$S_{zp1} := S_{zr1} \cdot K1 \quad S_{zp1} = 0.451$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга
зернистости 250/200, мм

$$S_{zp2} := S_{zr2} \cdot K1 \quad S_{zp2} = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна
с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.285$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции
Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A22 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.285$$

Коэффициент, учитывающий влияние разницы высот на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 1.874$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.292$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 69.146$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfok2}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 3.795 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := Rmax2 \cdot Kтит2 \quad Rmax2 = 26.85$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 17.22$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps2 := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps2}{2}\right)\right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps2}{2}\right) \right] \quad bz2 = 48.258$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 54.863$$

Так как $bz < Sx$, то $bz2 = 48.258$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.5$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 9.885$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := \arctan\left(\frac{\cos(Gamma)}{K1 + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.043$$

- угол действия

$$Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz2 := d2 \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz2 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна

с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$Snc2 := bz2 \cdot lz2 + bz2 \cdot az2 \cdot \sin(Gamma) \quad Snc2 = 4.041 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{Snc2} \quad p_{\text{давл}} = 1.732 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 160/125,
мкм

$$aznp1 := \frac{aznp2 \cdot ro1}{ro2} \quad aznp1 = 0.661$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно
для зернистости 160/125

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft01 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad Ft01 = 0.217$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A21 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 0.89$$

- в произвольный момент времени

$$Ft1 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft1 = 0.253$$

Коэффициент, учитывающий влияние разновысотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc1 := \frac{1}{\sqrt{Ft1}} \quad Kc1 = 1.986$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk1 := Szp1 \cdot Kc1 \quad Sk1 = 0.896$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha_k + \beta_k \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok1 := Sk1 \cdot Kd \quad Lfok1 = 47.934$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax1 := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfok1}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfok1 \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax1 = 2.664 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax1 := Rmax1 \cdot Kтит1 \quad Rmax1 = 18$$

Толщина среза, мкм

$$az1 := 1000 \cdot azmax1 + \frac{Rmax1}{2} \quad az1 = 11.664$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad azs1 := ro1 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs1 = 2.345$$

Ширина среза, мкм

$$bz1 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot rol \cdot azs1 - azs1^2} + (az1 - azs1) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz1 = 33.985$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx1 := \frac{Szpl^2 \cdot 1000}{Lfo1 \cdot Ft1 \cdot Kk} \quad Sx1 = 38.033$$

Так как $bz < Sx$, то $bz1 = 33.985$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.5$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp1 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft1 \cdot Kk}{Szpl^2} \quad Zp1 = 20.569$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$\Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp1}{dl}\right) \quad \Gamma = 1.455$$

- угол сдвига

$$\beta := \arctan\left(\frac{\cos(\Gamma)}{Kl + \sin(\Gamma)}\right) \quad \beta = 0.053$$

- угол действия

$$\Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] - \beta \quad \Omega = 1.133$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz1 := dl \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz1 = 43.559$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 160/125, мкм²

$$Sк1 := bz1 \cdot lz1 + bz1 \cdot az1 \cdot \sin(\Gamma) \quad Sк1 = 1.874 \times 10^3$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$Pразр1 := p_{давл} \cdot \frac{Sк1}{10^6} \quad Pразр1 = 32.46$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$HI := \frac{L}{2} \quad HI = 1.25$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$H := \frac{Vd \cdot HI}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 6.868$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$S := Bk \cdot L \quad S = 37.5$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{max} + 0,5Rz$

$$F_{tazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-azl^{m0l}}{x00l}\right) \right) \cdot Ktau \quad F_{tazmax} = 0.045$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{np1} + 0,5Rz$

$$F_{taznp1} := \left[1 - \exp\left[\frac{-(azl - az_{np1})^{m0l}}{x00l}\right] \right] \cdot Ktau \quad F_{taznp1} = 0.04$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 160/125

$$z_{разр1} := \frac{S \cdot F_{taznp1}}{Szpl^2} \quad z_{разр1} = 7.402$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 160/125, Н

$$P_k := P_{разр1} \cdot z_{разр1} \quad P_k = 240.266$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 160/125, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + K_{иу}^2}} \quad P_{ук} = 230.133$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 160/125, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_{иу}}\right)^2}} \quad P_{zk} = 69.04$$

П4.6 Определение силы поджима заготовки к шлифовальному кругу по механической прочности алмазных зёрен при обработке кругом 1А1 250*76*15*5 АС6 200/160-4-М2-01 титанового сплава ВТ14

Время шлифования, мин	$\tau := 1$		
$t := 23.5$	Глубина резания, мкм		
$V_k := 35$	Скорость круга, м/с		
$V_d := 6$	Скорость детали, м/мин		
$D_k := 250$	Диаметр круга, мм	$R_k := 125$	Радиус круга, мм
$B_k := 15$	Высота круга, мм		
$k := 100$	Относительная концентрация алмазов, %		
$\alpha_k := 14.32$	Свободный член регрессии и коэффициент регрессии для расчёта K_d		
$\beta_k := 0.112$			
$a := 0.0000091$	Коэффициент температуропроводности сплава ВТ14, м*м/с		
$\lambda := 8.9$	Коэффициент теплопроводности сплава ВТ14, Вт/м*К		
$\mu := 0.2$	Коэффициент трения алмазного зерна на титановом сплаве		
$K_l := 1.2$	Коэффициент продольной усадки стружки		
$K_{ш} := 0.30$	Коэффициент шлифования		
$m_{01} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности		
$x_{001} := 710$	Вейбулла после правки для зернистости 200/160		
$m_{02} := 1.70$	Параметры распределения разновысотности		
$x_{002} := 710$	Вейбулла после правки для зернистости 250/200		
$A_1 := 0.22$	Параметры уравнения, описывающего изменение во времени размеров контактных площадок на зёрнах		
$q_1 := 0.047$			
$A_{21} := 1.00$	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 200/160		
$q_{21} := 0.296$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм		
	Параметры зависимости для поправочного коэффициента, описывающего изменение во времени значения функции распределения разновысотности Вейбулла, для зернистости 250/200		

$A22 := 1.00$	- при глубине шлифования $t = 20$ мкм
$q22 := 0.296$	
$eps1 := 100$	Угол заострения, град. и радиус закругления зерна
$ro1 := 9.91$	зернистости 200/160, мкм
$eps2 := 100$	Угол заострения, град. и радиус закругления зерна
$ro2 := 9.91$	зернистости 250/200, мкм
$Nz1 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 200/160
$Nz2 := 8140$	Количество зёрен в одном карате для зернистости 250/200
$Kk := 0.44$	Коэффициент контактирования
$Kz := 1$	Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с деталью
$Pразр2 := 70$	Разрушающая нагрузка на единичное зерно для зернистости 250/200, Н
$aznp2 := 0.685$	Предельная толщина среза для зернистости 250/200, мкм
$Rmax1 := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 200/160, мкм
$Kmum1 := 1.79$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 200/160
$Rmax2 := 15$	Максимальная высота неровностей поверхности резания для зернистости 250/200, мкм
$Kmum2 := 1.79$	Поправочный коэффициент на высоту неровностей поверхности резания для зернистости 250/200

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 100/80, мкм

$$d1 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz1}} \quad d1 = 302.744$$

Диаметр шаровой модели зерна зернистости 250/200, мкм

$$d2 := \frac{6090}{\sqrt[3]{Nz2}} \quad d2 = 302.744$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 200/160

$$Nz1 := \frac{283 \cdot 10^9}{d1^3} \quad Nz1 = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 200/160

$$N_{v1} := \frac{4.4 \cdot k \cdot N_{z1}}{100} \quad N_{v1} = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью для зернистости 200/160, мм

$$S_{zr1} := \frac{10}{\sqrt[3]{N_{v1}}} \quad S_{zr1} = 0.281$$

Среднее количество зёрен в одном карате зернистости 250/200

$$N_{z2} := \frac{283 \cdot 10^9}{d_2^3} \quad N_{z2} = 1.02 \times 10^4$$

Количество зёрен в 1 куб. см абразивного пространства зернистости 250/200

$$N_{v2} := \frac{4.4 \cdot k \cdot N_{z2}}{100} \quad N_{v2} = 4.488 \times 10^4$$

Расстояние между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью для зернистости 250/200, мм

$$S_{zr2} := \frac{10}{\sqrt[3]{N_{v2}}} \quad S_{zr2} = 0.281$$

Коэффициент, показывающий, насколько среднее расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга больше расстояния между зёрнами в сечении алмазоносного слоя плоскостью

$$K1 := 2.45$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 200/160, мм

$$S_{zp1} := S_{zr1} \cdot K1 \quad S_{zp1} = 0.689$$

Расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга зернистости 250/200, мм

$$S_{zp2} := S_{zr2} \cdot K1 \quad S_{zp2} = 0.689$$

Расчет площади поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200

Значение функции распределения Вейбулла

$$\text{- после правки} \quad Ft02 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m02}}{x002}\right) \quad Ft02 = 0.26$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$K_{tau} := A22 \cdot tau^{q22} \quad K_{tau} = 1$$

- в произвольный момент времени

$$Ft2 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft2 = 0.26$$

Коэффициент, учитывающий влияние разнорысности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc2 := \frac{1}{\sqrt{Ft2}} \quad Kc2 = 1.96$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk2 := Szp2 \cdot Kc2 \quad Sk2 = 1.351$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha k + \beta k \cdot \frac{60 \cdot Vk}{Vd} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok2 := Sk2 \cdot Kd \quad Lfok2 = 72.305$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax2 := Rk - \sqrt{\left(\frac{Vd \cdot Lfok2}{60 \cdot Vk}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{Vd \cdot Lfok2 \cdot Rk}{60 \cdot Vk} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax2 = 3.835 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax2 := Rmax2 \cdot Kтит2 \quad Rmax2 = 26.85$$

Толщина среза, мкм

$$az2 := 1000 \cdot azmax2 + \frac{Rmax2}{2} \quad az2 = 17.26$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps2}{180} \cdot \pi \quad azs2 := ro2 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs2 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz2 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot ro2 \cdot azs2 - azs2^2} + (az2 - azs2) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz2 = 48.354$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx2 := \frac{Szp2^2 \cdot 1000}{Lfok2 \cdot Ft2 \cdot Kk} \quad Sx2 = 57.369$$

Так как $bz < Sx$, то $bz2 = 48.354$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.424$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp2 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft2 \cdot Kk}{Szp2^2} \quad Zp2 = 8.765$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp2}{d2}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := \arctan\left(\frac{\cos(Gamma)}{K1 + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.043$$

- угол действия

$$Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz2 := d2 \cdot A1 \cdot \tan^{q1} \quad lz2 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$Snc2 := bz2 \cdot lz2 + bz2 \cdot az2 \cdot \sin(Gamma) \quad Snc2 = 4.051 \times 10^3$$

Разрушающее давление на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, МПа

$$p_{\text{давл}} := \frac{P_{\text{разр2}} \cdot 10^6}{Snc2} \quad p_{\text{давл}} = 1.728 \times 10^4$$

Предельная толщина среза для зернистости 200/160, мкм

$$aznp1 := \frac{aznp2 \cdot ro1}{ro2} \quad aznp1 = 0.685$$

Расчет разрушающего усилия на единичное зерно для зернистости 200/160

Значение функции распределения Вейбулла

- после правки

$$Ft01 := 1 - \exp\left(\frac{-t^{m01}}{x001}\right) \quad Ft01 = 0.26$$

- поправочный коэффициент, учитывающий изменение значения функции Вейбулла со временем обработки

$$Ktau := A21 \cdot tau^{q22} \quad Ktau = 1$$

- в произвольный момент времени

$$Ft1 := Ft02 \cdot Ktau \quad Ft1 = 0.26$$

Коэффициент, учитывающий влияние разновысотности на расстояние между зёрнами в активной части РПК

$$Kc1 := \frac{1}{\sqrt{Ft1}} \quad Kc1 = 1.96$$

Расстояние между активными зёрнами на рабочей поверхности неподвижного круга, мм

$$Sk1 := Szp1 \cdot Kc1 \quad Sk1 = 1.351$$

Кинематический коэффициент, учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами

$$Kd := \alpha k + \beta k \cdot \frac{60 \cdot V_k}{V_d} \quad Kd = 53.52$$

Среднее фактическое окружное расстояние между контактирующими зёрнами, мм

$$Lfok1 := Sk1 \cdot Kd \quad Lfok1 = 72.305$$

Максимальная толщина среза, мм

$$azmax1 := Rk - \sqrt{\left(\frac{V_d \cdot Lfok1}{60 \cdot V_k}\right)^2 + Rk^2} - 2 \cdot \frac{V_d \cdot Lfok1 \cdot Rk}{60 \cdot V_k} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{Rk \cdot 1000}}$$

$$azmax1 = 3.835 \times 10^{-3}$$

Максимальная высота неровностей поверхности резания, мкм

$$Rmax1 := Rmax1 \cdot Kтит1 \quad Rmax1 = 26.85$$

Толщина среза, мкм

$$az1 := 1000 \cdot azmax1 + \frac{Rmax1}{2} \quad az1 = 17.26$$

Толщина сегментообразного участка среза, мкм

$$Eps := \frac{eps1}{180} \cdot \pi \quad azs1 := rol \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{Eps}{2}\right)\right) \quad azs1 = 2.318$$

Ширина среза, мкм

$$bz1 := 2 \cdot \left[\sqrt{2 \cdot rol \cdot azs1 - azs1^2} + (az1 - azs1) \cdot \tan\left(\frac{Eps}{2}\right) \right] \quad bz1 = 48.354$$

Расстояние между сечениями математической модели РПК, мкм

$$Sx1 := \frac{Szp1^2 \cdot 1000}{Lfok1 \cdot Ft1 \cdot Kk} \quad Sx1 = 57.369$$

Так как $bz < Sx$, то $bz1 = 48.354$

Длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом, мм

$$L := \sqrt{Dk \cdot \frac{t}{1000}} \quad L = 2.424$$

Количество одновременно контактирующих зёрен

$$Zp1 := \frac{Bk \cdot L \cdot Ft1 \cdot Kk}{Szp1^2} \quad Zp1 = 8.765$$

Геометрические параметры процесса резания единичным зерном

- передний угол модели алмазного зерна

$$Gamma := \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot aznp1}{dl}\right) \quad Gamma = 1.476$$

- угол сдвига

$$Beta := \arctan\left(\frac{\cos(Gamma)}{Kl + \sin(Gamma)}\right) \quad Beta = 0.043$$

- угол действия

$$Omega := \arctan\left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - Beta\right)\right] - Beta \quad Omega = 1.145$$

Размер контактной площадки на зерне, мкм

$$lz1 := dl \cdot A1 \cdot \tau^{q1} \quad lz1 = 66.604$$

Площадь поверхности контакта единичного зерна

с обрабатываемой заготовкой для зернистости 250/200, мкм²

$$Snk1 := bz1 \cdot lz1 + bz1 \cdot az1 \cdot \sin(Gamma) \quad Snk1 = 4.051 \times 10^3$$

Разрушающее усилие на поверхности контакта единичного зерна с обрабатываемой заготовкой, Н

$$Pразр1 := p_{давл} \cdot \frac{Snk1}{10^6} \quad Pразр1 = 70$$

Ширина зоны контакта шлифовального круга с заготовкой, мм

$$HI := \frac{L}{2} \quad HI = 1.212$$

Безразмерная полуширина источника тепла

$$H := \frac{Vd \cdot HI}{60 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot a} \quad H = 6.659$$

Площадь зоны контакта заготовки с кругом, кв. мм

$$S := Bk \cdot L \quad S = 36.358$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{max} + 0,5Rz$

$$F_{tazmax} := \left(1 - \exp\left(\frac{-azl^{m0l}}{x00l}\right) \right) \cdot Ktau \quad F_{tazmax} = 0.164$$

Значение функции распределения Вейбулла на глубине $az_{np1} + 0,5Rz$

$$F_{taznp1} := \left[1 - \exp\left[\frac{-(azl - aznp1)^{m0l}}{x00l}\right] \right] \cdot Ktau \quad F_{taznp1} = 0.154$$

Количество зёрен, которые разрушатся при шлифовании на заданных режимах, для зернистости 200/160

$$z_{разп1} := \frac{S \cdot F_{taznp1}}{Szpl^2} \quad z_{разп1} = 11.742$$

Суммарное результирующее усилие на шлифовальном круге, при котором произойдёт разрушение алмазных зёрен на заданных режимах, для зернистости 200/160, Н

$$P_k := P_{разп1} \cdot z_{разп1} \quad P_k = 821.932$$

Допустимая радиальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 200/160, Н

$$P_{ук} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + K_{иу}^2}} \quad P_{ук} = 787.268$$

Тангенциальная составляющая силы резания, ограниченная прочностью алмазных зёрен, для зернистости 200/160, Н

$$P_{zk} := \frac{P_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{K_{иу}}\right)^2}} \quad P_{zk} = 236.181$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Описания патентов на новые способы шлифования



УКРАЇНА

(19) UA (11) 51396 (13) A

(51) B 24B1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДВидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ШЛІФУВАННЯ

1

2

(21) 2002032019

(22) 13 03 2002

(24) 15 11 2002

(46) 15 11 2002, Бюл. №11, 2002р

(72) Матюха Петро Григорович, Полтавець Ва-
лерій Васильович, Стрілков Вадим Борисович

(73) Донецький державний технічний університет

(57) Спосіб шліфування, що включає відповідну
обробку деталі на оптимальних режимах, що ви-
значаються при обробці зразкової деталі, який
відрізняється тим, що подачу на врізання зада-
ють перемінною на кожний прохід, а її величину
знаходять відповідно співвідношенню

$$S_{вр} = t_{вс} + \Delta t \cdot \exp(\alpha t_{пр}),$$

де $t_{вс}$ - глибина шліфування, яка встановилася при
попередній обробці зразкової деталі за гнучкоюсхемою, що аналогічна за кінематикою жорсткій і
виконується з постійною силою притиску зразка до
робочої поверхні круга, яка забезпечує відсутність
фазово-структурних перетворень в поверхневому
шарі зразка, Δt - амплітуда зменшення глибини шліфування
при попередній обробці деталі за гнучкою схемою
внаслідок погіршення різальної здатності робочої
поверхні, α - емпіричний коефіцієнт, i - номер проходу інструмента з початку роботи
круга після правки, $t_{пр}$ - час робочого проходу інструмента при обро-
бці деталіВинахід, що пропонується, відноситься до аб-
разивної обробки шліфуванням по жорсткій схемі,
коли подача круга на врізання в оброблювану по-
верхню виконується за допомогою механізму по-
дачіВідомий спосіб шліфування [А С №1763148
АІ В24В 1/00 Спосіб шліфування Автори П Г
Матюха и В П Цокур Опубл. 23 09 1992 Бюл.
№35], що включає відповідну обробку деталі на
оптимальних режимах, які визначаються при об-
робці зразкової деталі, в якому поперечну пода-
чу(подачу на врізання) задають виходячи із спів-
відношення

$$S_{\theta} = \frac{W_{oy}}{T_{м} S_{пy} 1000 V_{\theta y}},$$

де W_{oy} - об'єм матеріалу, видаленого шліфу-
ванням із зразкової деталі при попередній обробці
за пружною схемою шліфування на оптимальних
режимах, $T_{м}$ - час обробки зразкової деталі, $S_{пy}$ - оптимальне значення поздовжньої подачі
при шліфуванні за пружною схемою, $V_{\theta y}$ - оптимальна швидкість зразкової деталі
при шліфуванні за пружною схемоюНедоліком способу є те, що при невеликій
трудомісткості пошуку оптимальних режимів обро-
бки він обмежений тільки шліфуванням з підтри-
муванням ріжучих можливостей круга за допомо-
гою керуючих дій на робочу поверхню круга(РПК),
що обумовлює неможливість розповсюдження
способу на звичайне шліфування з періодичною
правкоюВідомий спосіб визначення оптимальних ре-
жимах шліфування [Абразивная и алмазная обра-
ботка материалов Справочник /Под ред А Н
Резникова - М Машиностроение, 1977 - 391с
стр 170 - 173] (прототип), що включає механічну
обробку зразків згідно з матрицею планування
експериментів, складання систем рівнянь, що опи-
сують технічні обмеження, які накладаються на
режим різання вимогами до деталі, верстату, ін-
струменту(знаходяться експериментальне з вико-
ристанням статистичних методів планування експериментів), математичний опис функції мети,
тобто функції, що виражає мету оптимізації, суміс-
не рішення методом лінійного програмування сис-
тем рівнянь технічних обмежень і функції мети для
визначення оптимальних режимів обробкиНедоліком способу є його висока трудоміст-
кість, що пов'язана з великим обсягом експериме-
нтів для знаходження рівнянь, які описують техніч-
ні обмеження Крім того, в зв'язку із погіршенням(13) A
(11) 51396
(19) UA

ріжучої здатності (РПК) під час обробки, а разом з цим і зміною технологічних показників в процесі обробки за жорсткою схемою шліфування, визначені режими шліфування не забезпечують максимальної продуктивності обробки, тому що вони орієнтовані на найменшу ріжучу здатність круга (щоб запобігти зміни фазово - структурного складу поверхневого шару)

В основу винаходу поставлена задача вдосконалення способу шліфування, в якому, за рахунок запропонованого способу призначення елементів режиму і визначення їх величини забезпечується підвищення продуктивності обробки та зменшення трудомісткості пошуку оптимальних режимів обробки без погіршення якості приповерхневого шару обробленої поверхні внаслідок того, що запропонований спосіб дозволяє з більшою повнотою, в порівнянні з відомими способами, використати ріжучу здатність круга і зберегти при цьому фазово - структурний склад поверхневого шару без зміни

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що у відомому способі шліфування, що включає відповідну обробку деталі на оптимальних режимах, що визначаються при обробці зразкової деталі, згідно винаходу, подачу на врізання задають перемінною на кожний прохід, а її величину знаходять відповідно співвідношенню

$$S_{вр} = t_{вс} + \Delta t \cdot \exp(\alpha i \tau_{пр}),$$

де $t_{вс}$ - глибина шліфування, що встановилася при попередній обробці зразкової деталі за пружною схемою, що аналогічна за кінематикою жорсткій і виконується з постійною силою притиску зразка до робочої поверхні круга, яка забезпечує відсутність фазово-структурних перетворень в поверхневому шарі зразка,

Δt - амплітуда зменшення глибини шліфування при попередній обробці деталі за пружною схемою внаслідок погіршення ріжучої здатності робочої поверхні,

α - емпіричний коефіцієнт,

i - номер проходу інструмента з початку роботи круга після правки,

$\tau_{пр}$ - час робочого проходу при обробці деталі

Ознаками, що відрізняють заявлений спосіб шліфування, є наступне

подачу на врізання задають перемінною на кожний прохід,

величину подачі знаходять відповідно співвідношенню

$$S_{вр} = t_{вс} + \Delta t \exp(\alpha i \tau_{пр}),$$

де $t_{вс}$ - глибина шліфування, що встановилася при попередній обробці зразкової деталі за пружною схемою, що аналогічна за кінематикою жорсткій і виконується з постійною силою притиску зразка до робочої поверхні круга, яка забезпечує відсутність фазово - структурних перетворень в поверхневому шарі зразка,

Δt - амплітуда зменшення глибини шліфування при попередній обробці деталі за пружною схемою внаслідок погіршення ріжучої здатності робочої поверхні,

α - емпіричний коефіцієнт,

i - номер проходу інструмента з початку роботи круга після правки,

$\tau_{пр}$ - час робочого проходу при обробці деталі

В запропонованому способі шліфування під-

вищення продуктивності обробки забезпечується ознаками, що відрізняють заявлений спосіб шліфування

Дійсно, призначення подачі на врізання на кожний прохід (або хід при врізному шліфуванні), дозволяє видаляти оброблюваний матеріал відповідно з ріжучою здатністю РПК в відповідний проходу проміжок часу, що буде сприяти підвищенню продуктивності обробки, а використання пружної схеми зменшує трудомісткість пошуку оптимальних режимів обробки, тому що ця схема забезпечує відсутність фазово - структурних змін в поверхневому шарі деталі, в зв'язку з чим відпадає необхідність в рівняннях технічних обмежень, пов'язаних з якістю обробки

Визначення величини подачі відповідно співвідношенню $S_{вр} = t_{вс} + \Delta t \cdot \exp(\alpha i \tau_{пр})$, гарантує відсутність фазово - структурних змін в поверхневому шарі, тому що сила підтиску зразка до РПК при попередній обробці по пружній схемі для рельєфу, сформованого під час правки, призначається з урахуванням температури фазово - структурних перетворень в поверхневому шарі

Реалізація способу під час плоского врізного плоского шліфування сталі Р6М5Ф3 виконується таким чином

Обладнання плоскошліфувальний верстат моделі ЗГ71, модернізований для виконання електроерозійної правки, блок технологічного струму ИТТ-35

Пристрої пристрій для виконання плоского пружного шліфування з постійним притиском зразка до РПК по схемі, кінематика якої аналогічна жорсткій схемі, пристрій для визначення кількості видаленого шліфуванням оброблюваного матеріалу

Інструмент - алмазний круг 2720-0128 ГОСТ 16167-82 АС6-100/80-4-М2-01

Робоче середовище - 0,3%-вий водний розчин кальціюваної соди

Перед початком обробки круг правили електроерозійним способом з підведенням технологічного струму в зону різання від джерела технологічного струму ИТТ-35 на наступних режимах електричних - напруга холостого ходу $U_{хх} = 60V$, середня сила току $I_{ср} = 8 - 10 A$, механічних - глибина різання $t = 2 - 5 \text{ мм}$, поперечна подача $S_{п} = 3 \text{ мм/хід}$ (ручна), швидкість круга $V_{к} = 35 \text{ м/с}$, швидкість електрода $V_{э} = 6 \text{ м/хв}$

Для знаходження залежності, яка описує вплив часу обробки на глибину шліфування, обумовлений зміною ріжучої здатності круга, обробку спочатку вели врізним шліфуванням зразка із сталі Р6М5Ф3 на режимах швидкість круга $V_{к} = 35 \text{ м/с}$, швидкість поздовжнього ходу стола $V_{см} = 6 \text{ м/хв}$, сила підтиску зразка до РПК $P_{п} = 80 \text{ Н}$ Швидкість поздовжнього ходу стола $V_{см}$ визначалась з умов забезпечення параметру шорсткості обробленої поверхні $R_a = 0,63 \text{ мкм}$, сила підтиску зразка до РПК $P_{п}$ - по температурі порогу фазово - структурних перетворень, що для сталі Р6М5Ф3 дорівнює 815 К Середні значення фактичної глибини шліфування в різні моменти часу обробки приведені в табл 1

Таблиця 1 - Фактична глибина шліфування і 95%-ві довірчі інтервали при попередній обробці

зразків із сталі Р6М5Ф3 кругом 1А1 250 x 76 x 15 x 5 АС6-100/80-4-М2-01

Час шліфування τ , хв	Фактична глибина шліфування t_{ϕ} , мкм
1	14,31 ± 2,78
5	9,14 ± 0,69
10	5,09 ± 0,55
15	2,66 ± 0,55
30	0,86 ± 0,19
45	0,68 ± 0,19
60	0,24 ± 0,19

Рівняння регресії $t_{\phi} - f(\tau)$ для вказаних режимів попередньої обробки, яке одержане по даним табл 1, має вигляд

$$t_{\phi} = 0,18 + 14,13 \exp(-0,118i\tau_{\text{пр}})$$

Використовуючи це рівняння для жорсткої схеми шліфування розраховують подачу на врізання $S_{\text{вр}} = t_{\phi}$ для i -го проходу, що виконує інструмент після правки, а інші елементи режиму ($V_{\text{к}}$, $V_{\text{см}}$) переносяться з пружної схеми на жорстку без змін

Час проходу(ходу при врізному плоскому шліфуванні) розраховується по відомим математичним залежностям по розміру деталі, що оброблюється, а також в залежності від виду шліфування, наприклад

плоске врізне шліфування

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{(L_{\phi} + y + \Delta)}{1000V_{\text{см}}};$$

плоске шліфування з поперечною подачею

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{(L_{\phi} + y + \Delta)B_{\phi}}{1000V_{\text{см}}kB_{\text{к}}};$$

кругле зовнішнє і внутрішнє шліфування з позовжньою подачею

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\pi D_{\phi} L_{\phi}}{1000V_{\phi}kB_{\text{к}}}.$$

В цих формулах

L_{ϕ} - довжина поверхні, що обробляється, мм,

y - величина врізання, мм,

Δ - величина перебігу, мм,

$V_{\text{см}}$ - швидкість позовжнього переміщення столу, м/хв,

V_{ϕ} - швидкість деталі, м/хв,

D_{ϕ} - діаметр оброблюваної поверхні, мм,

B_{ϕ} - ширина оброблюваної поверхні, мм,

k - доля висоти круга при визначенні подачі,

$B_{\text{к}}$ - висота шліфувального круга, мм

Визначимо підвищення продуктивності обробки при шліфуванні за новим способом, коли подача на врізання призначається на кожний прохід, а її величина визначається по формулі

$$S_{\text{вр}} = t_{\text{вс}} + \Delta t \exp(\alpha i \tau_{\text{пр}})$$

і відомим способом, коли подача призначається на всі проходи однаковою Умови обробки - плоске алмазне шліфування з поперечною подачею поверхні розміром 390 x 180мм із сталі Р6М5Ф3 кругом 1А1 250 x 76 x 15 x 5 АС6-100/80-4-М2-01 на наступних режимах $V_{\text{к}} \approx 35\text{м/с}$, $V_{\text{см}} = 6\text{м/хв}$, $S_{\text{нон}} = 0,8 \times 15 = 12\text{мм/хід}$ Виконується п'ять проходів

Розраховуємо час одного проходу

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{(L_{\phi} + y + \Delta)B_{\phi}}{1000V_{\text{см}}kB_{\text{к}}} = \frac{(390 + 5 + 5) \cdot 180}{1000 \cdot 6 \cdot 0,8 \cdot 15} = 1 \text{ хв};$$

Визначаємо подачу на врізання для шліфування за відомим способом $S_{\text{вр}} = t_{\text{вс}} + \Delta t \exp(\alpha i \tau_{\text{пр}}) = 0,18 + 14,13 \exp(-0,118 \cdot 5 \cdot 1) = 8,01 \approx 8\text{мкм}$

Тоді продуктивність обробки за відомим способом

$$P_{\text{с}} = \frac{L_{\phi} \cdot B_{\phi} \cdot S_{\text{вр}} \cdot i}{i \tau_{\text{пр}}} = \frac{390 \cdot 180 \cdot 0,008 \cdot 5}{5 \cdot 1} = 561 \text{ мм}^3/\text{хв}.$$

Визначимо подачу на врізання для шліфування за запропонованим способом окремо для проходів $i = 1, 2, 3, 4, 5$ Будемо мати $S_{\text{вр}1} = 13\text{мкм}$, $S_{\text{вр}2} = 11\text{мкм}$, $S_{\text{вр}3} = 10\text{мкм}$, $S_{\text{вр}4} = 9\text{мкм}$, $S_{\text{вр}5} = 8\text{мкм}$

Тоді продуктивність обробки

$$P_{\text{н}} = 390 \cdot 180 (0,013 + 0,011 + 0,010 + 0,009 + 0,008)/5 = 716 \text{ мм}^3/\text{хв}$$

Визначимо підвищення продуктивності обробки за 5хв шліфування за запропонованим способом

$$\Delta P = 100 (P_{\text{н}} - P_{\text{с}})/P_{\text{с}} = 100 (716 - 561)/561 = 27,6\%$$

Запропонований спосіб шліфування може застосовуватись при алмазному і абразивному шліфуванні матеріалів на підприємствах машинобудівного комплексу, забезпечуючи збільшення продуктивності за рахунок більш повного використання ріжучої здатності РПК, та зменшення трудомісткості пошуку оптимальних режимів обробки

ДП «Український інститут промислової власності» (Укрпатент)

вул Сім'ї Хохлових, 15, м Київ, 04119, Україна

(044) 456 – 20 – 90

ТОВ «Міжнародний науковий комітет»

вул Артема, 77, м Київ, 04050, Україна

(044) 216 – 32 – 71



УКРАЇНА

(19) UA (11) 61437 (13) A

(51) 7 B24B1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДВидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ШЛІФУВАННЯ

1

2

(21) 2003021010

(22) 05 02 2003

(24) 17 11 2003

(46) 17 11 2003, Бюл. № 11, 2003 р.

(72) Матюха Петро Григорович, Гриньов Артем
Олександрович, Полтавець Валерій Васильович
(73) ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ(57) Спосіб шліфування, що включає обробку де-
талі по пружній схемі з електроерозійними діями
на робочу поверхню круга на оптимальних режи-
мах, які визначаються під час обробки зразкової
деталі, який **відрізняється** тим, що спочатку зна-
ходять квазіпостійну швидкість занурення поверхні
зразка в різальну поверхню круга, потім глибину
шліфування t по жорсткій схемі задають відповідно
співвідношенню

$$t = \frac{Wt}{60}, \text{ мм,}$$

а швидкість столу V_{cm} - відповідно співвідно-
шенню

$$V_{cm} = \frac{60(B + B_k)}{1000t}, \text{ м/хв,}$$

де W - квазіпостійна швидкість занурення поверхні
зразка в різальну поверхню круга при шліфуванні
по пружній схемі, мм/хв, t - час безперервного шліфування по пружній
схемі, с, B - розмір деталі в напрямку вектора швидкості
різання, мм, B_k - ширина алмазовмісного шару на шліфува-
льному крузі, мм

Винахід, що пропонується, відноситься до об-
робки шліфуванням по жорсткій схемі в умовах
підвищеної площі контакту робочої поверхні круга
з деталлю, коли подача круга на врізання в оброб-
лювану поверхню круга виконується за допомогою
врізної подачі.

Відомий спосіб визначення оптимальних ре-
жимів шліфування [Абразивная и алмазная обра-
ботка материалов Справочник / Под ред
А.Н. Резникова -М. Машиностроение, 1977, - 391с
стр. 170-173], що включає механічну обробку зраз-
ків згідно з матрицею планування експериментів,
складання систем рівнянь, що описують технічні
обмеження, які накладаються на режим різання
вимогами до деталі, верстату, інструменту (зна-
ходяться експериментальне з використанням ста-
тистичних методів планування експерименту), ма-
тематичний опис функції мети, тобто функції, що
виражає мету оптимізації, сумісне вирішення ме-
тодом лінійного програмування систем рівнянь
технічних обмежень і функції мети для визначення
оптимальних режимів обробки.

Недоліком способу є його висока трудоміст-
кість, що пов'язана з великим обсягом експериме-
нтів для знаходження рівнянь, що описують техні-
чні обмеження. Крім того, в зв'язку із погіршенням

ріжучої здатності робочої поверхні круга (РПК) під
час обробки, а разом з цим і зміною технологічних
показників в процесі обробки за жорсткою схемою
шліфування, визначені режими шліфування не
забезпечують максимальної продуктивності обро-
бки, тому що вони орієнтовані на найменшу ріжучу
здатність круга, щоб запобігти зміни фазово-
структурного складу поверхневого шару.

Відомий спосіб шліфування [А.С. № 1763148
А1 В24В 1/00 Спосіб шліфування. Автори
П.Г. Матюха і В.П. Цокур. Опубл. 23.09.1992. Бюл.
№ 35] прототип), що включає відповідну обробку
деталі на оптимальних режимах, які визначаються
при обробці зразкової деталі, в якому поперечну
подачу (подачу на врізання) задають виходячи із
співвідношення

$$S_B = \frac{W_{oy}}{T_M S_{ny} 1000 V_{dy}}$$

де W_{oy} - об'єм матеріалу, видаленого шліфу-
ванням із зразкової деталі при попередній обробці
за пружною схемою шліфування на оптимальних
режимах,

 T_M - час обробки зразкової деталі, S_{ny} - оптимальне значення позадвжньої подачі
при шліфуванні за пружною схемою,

(19) UA (11) 61437 (13) A

$V_{ду}$ - оптимальна швидкість зразкової деталі при шліфуванні за пружною схемою

Перевагою способу є невелика трудомісткість пошуку оптимальних режимів в зв'язку з тим, що якість обробки забезпечується стабільною внаслідок шліфування по пружній схемі, а висока різальна спроможність РПК - керуючим електроерозійним впливом на робочу поверхню круга

Недоліком способу є те, що його використання обмежене шліфуванням в умовах звичайної площі контакту поверхні деталі з РПК

В основу винаходу поставлена задача вдосконалення способу шліфування з керуючими електроерозійними діями на РПК, в якому за рахунок використання для пошуку оптимальних режимів обробки пружної схеми шліфування нерухомого зразка, що забезпечує підвищену площу контакту поверхні деталі з РПК, зменшується трудомісткість пошуку оптимальних режимів без погіршення якості поверхневого шару обробленої поверхні деталі

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що у відомому способі шліфування, що включає обробку деталі по пружній схемі з електроерозійними діями на робочу поверхню круга на оптимальних режимах, які визначаються під час обробки зразкової деталі, згідно винаходу, спочатку знаходять квазіпостійну швидкість занурення поверхні зразка в ріжучу поверхню круга, потім глибину шліфування l по жорсткій схемі задають відповідно співвідношенню

$$t = \frac{W\tau}{60}, \text{ мм}$$

а швидкість столу $V_{см}$ - відповідно співвідношенню

$$V_{см} = \frac{60(B + B_k)}{1000\tau}, \text{ м/хв}$$

де W - квазіпостійна швидкість занурення поверхні зразка в ріжучу поверхню круга при шліфуванні по пружній схемі, мм/хв,

τ - час безперервного шліфування по пружній схемі, с,

B - розмір деталі в напрямку вектора швидкості різання, мм,

B_k - ширина алмазовмісного шару на шліфувальнім крузі, мм

Ознаками, що відрізняють заявлений спосіб шліфування, є наступне,

спочатку знаходять квазіпостійну швидкість занурення поверхні зразка в ріжучу поверхню круга,

глибину шліфування l по жорсткій схемі задають відповідно співвідношенню

$$t = \frac{W\tau}{60}, \text{ мм}$$

швидкість столу $V_{см}$ задають відповідно співвідношенню

$$V_{см} = \frac{60(B + B_k)}{1000\tau}, \text{ м/хв}$$

де W - квазіпостійна швидкість занурення поверхні зразка в ріжучу поверхню круга при шліфуванні по пружній схемі, мм/хв,

τ - час безперервного шліфування по пружній схемі, с,

B - розмір деталі в напрямку вектора швидко-

сті різання, мм,

B_k - ширина алмазовмісного шару на шліфувальнім крузі, мм

В запропонованому способі шліфування зменшення трудомісткості пошуку оптимальних режимів розповсюджується на шліфування з великими площами контакту поверхні деталі з РПК ознаками, що відрізняють заявлений спосіб шліфування

Дійсно, знаходження квазіпостійної швидкості занурення поверхні зразка в ріжучу поверхню круга при шліфуванні нерухомого зразка за пружною схемою з електроерозійним впливом на РПК, дозволяє визначити глибину шліфування l по жорсткій схемі скориставшись співвідношенням

$$t = \frac{W\tau}{60}, \text{ мм}$$

і забезпечити при цьому навантаження на робочу поверхню круга, що є аналогічною шліфуванню по пружній схемі і виключає будь-які фазово-структурні перетворення в поверхневому шарі обробленої поверхні. Визначення швидкості столу $V_{см}$ за співвідношенням

$$V_{см} = \frac{60(B + B_k)}{1000\tau}, \text{ м/хв}$$

забезпечує умову, при якій температура на обробленій поверхні при шліфуванні з переміщенням деталі не буде перевищувати температуру, що виникає за час безперервного шліфування t по пружній схемі і обмежена температурою фазово-структурних перетворень в поверхневому шарі обробленої поверхні

Реалізація способу під час заточування пластин із інструментальної сталі Р6М5Ф3 площею 5x14 мм виконується таким чином

Обладнання заточувальний верстат 3В642, модернізований для електроерозійної правки в зоні різання і керуючих електроерозійних впливів на РПК в автономній зоні, блок технологічного струму ІТТ-35

Пристрої пристрій для виконання пружного шліфування нерухомого зразка з постійною силою притиску поверхні зразка до поверхні РПК з заданим часом обробки

Інструмент - алмазний круг 12А2-45° 150x32x42x20x6 (2724-0044 ГОСТ 16172 - 90) АС8-100/80-4-М2-01

Робоче середовище - 0,3% - ний водний розчин кальцінованої соди

Перед початком обробки круг правили електроерозійним способом з підведенням електричного струму в зону різання від джерела технологічного струму ІТТ-35 на наступних режимах електричних - напруга холостого ходу $U_{хх}=60В$, середня сила струму $I_{ср}=8-10А$, механічних швидкість круга $V_k=35м/с$, швидкість електрода $V_e=6м/хв$, глибина різання 0,002-0,005мм

Для знаходження залежності, яка описує вплив часу обробки на швидкість занурення поверхні зразка в РПК, обробку нерухомого зразка із сталі Р6М5Ф3 вели врізним шліфуванням за пружною схемою на режимах швидкість круга $V_k=35м/с$, сила притиску поверхні зразка до РПК 72Н, час безперервного шліфування 2с. Оптимальне значення сили струму безперервних електроерозійних дій на РПК в автономній зоні, що ви-

значена з умов мінімальної вартості обробки, дорівнювало 4,5-5А. Сила підтиску поверхні зразка до РПК в 72Н була визначена з умов досягнення за 2с температури 800°K при порозі фазово-структурних перетворень в поверхневому шарі оброблюваної поверхні для сталі Р6М5Ф3 в 815°K. Значення швидкості занурення поверхні зразка в РПК в різні моменти часу обробки наведені в табл.

Таблиця

Швидкість занурення поверхні зразка в РПК при врізному пружному шліфуванні нерухомого зразка розмірами 5x14мм із сталі Р6М5Ф3 кругом 2724-0044 ГОСТ 16172-90 АС6-100/80-4-М2-01

Час шліфування, т, хв	Час електроерозійних дій на РПК, хв	Швидкість занурення поверхні зразка в РПК, W, мм/хв
1	3,5	1,24
2	7	0,43
3	10,5	0,41
4	14	0,57
5	17,5	0,84
6	21	1,67
7	24,5	1,89
8	28	0,6
9	31,5	1,36
10	35	1,72
11	38,5	3,08
12	42	2,83
13	45,5	2,39
14	49	2,25
15	52,5	1,99

В зв'язку з тим, що при електроерозійних діях на РПК при шліфуванні ? підвищеною площею контактування поверхні деталі з кругом швидкість занурення змінюється синусоподібно, для оцінки квазіпостійної швидкою V_{cm} занурення використаємо мінімальне значення, яке дорівнює 0,41мм/хв

Використавши квазіпостійне значення величини швидкості занурення поверхні зразка в РПК знайдемо глибину шліфування t по жорсткій схемі скориставшись співвідношенням

$$t = \frac{W\tau}{60} = \frac{0,41 \cdot 2}{60} = 0,013 \text{ мм}$$

Швидкість столу V_{cm} при цьому буде дорівнювати

$$V_{cm} = \frac{60(B + B_k)}{1000\tau} = \frac{60(14 + 15)}{1000 \cdot 2} = 0,9 \text{ м/хв}$$

Таким чином оптимальними режимами заточування по жорсткій схемі пластини розмірами 5x14мм будуть швидкість круга 35м/с, глибина різання (подача на врізання) 0,013мм, повздовжня швидкість столу 0,9м/хв

Запропонований спосіб шліфування скорочує трудомісткість пошуку оптимальних режимів шліфування в умовах підвищеної площі контакту шліфувального круга із зразком в 3-4 рази за рахунок виключення необхідності пошуку рівнянь технічних обмежень, пов'язаних з якістю обробки

Запропонований спосіб шліфування може застосовуватись при алмазному заточуванні інструментів із важкооброблюваних інструментальних сталей торцем круга в вигляді чашки або периферією круга форми 1А1, забезпечуючи при цьому зменшення трудомісткості пошуку оптимальних режимів обробки



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **97680** (13) **C2**

(51) МПК (2012.01)

B24B 1/00**B24B 53/00****B23H 5/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

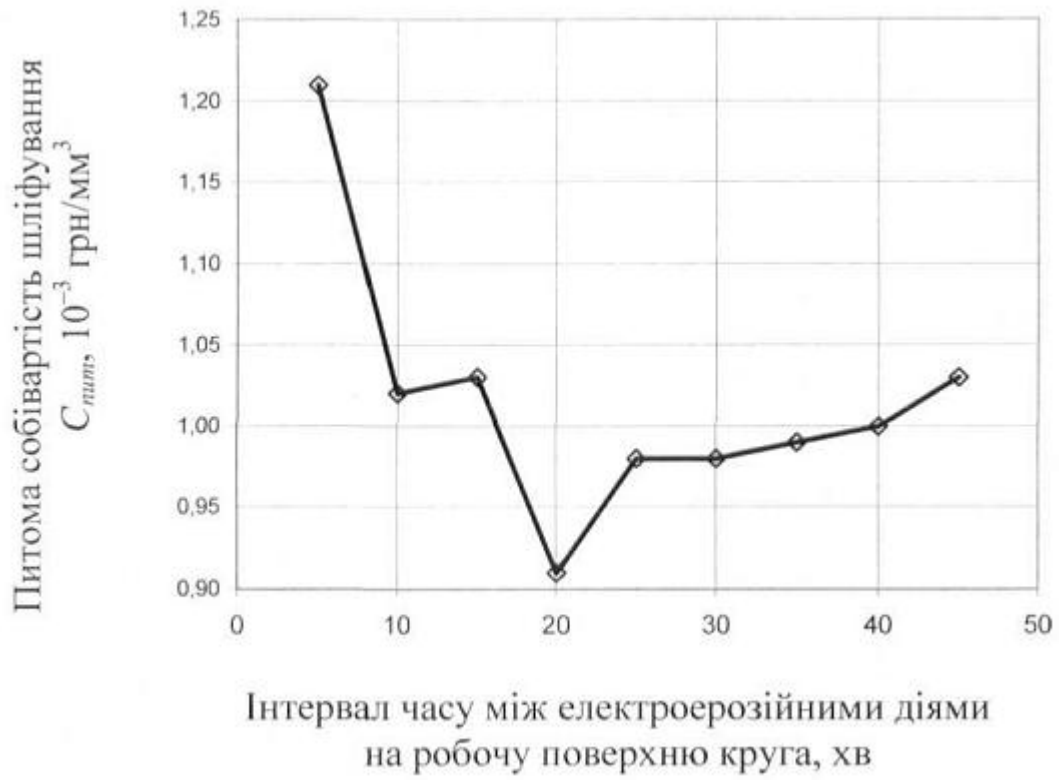
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2010 01824</p> <p>(22) Дата подання заявки: 19.02.2010</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 12.03.2012</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 25.08.2011, Бюл.№ 16</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.03.2012, Бюл.№ 5</p>	<p>(72) Винахідник(и): Матюха Петро Григорович (UA), Полтавець Валерій Васильович (UA), Стрелков Вадим Борисович (UA), Габітов Валерій Валерійович (UA), Бурдін Олександр Валентинович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83000 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: RU 2268119 C1; 20.01.2006 EP 0938948; 01.09.1999 US 2004097167 A1; 20.05.2004 WO 9929469 A1; 17.06.1999 JP 6270063 A; 27.09.1994 US 4236985; 02.12.1980</p>
--	--

(54) СПОСІБ ШЛІФУВАННЯ**(57) Реферат:**

Винахід належить до абразивної обробки, а саме до способів шліфування матеріалів, наприклад твердих сплавів. Спосіб шліфування включає обробку деталі по пружній схемі з електроерозійними діями на робочу поверхню круга на оптимальних режимах, що визначаються при обробці зразкової деталі, коли спочатку знаходять закономірність зменшення різальної спроможності робочої поверхні круга при шліфуванні на оптимальних механічних режимах без електроерозійного впливу на робочу поверхню круга. Згідно з винаходом, потім визначають час періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга на максимальних для даного джерела струму електричних режимах одночасно з обробкою деталі до відновлення початкової величини різальної спроможності та закономірність збільшення різальної спроможності за рахунок електроерозійних дій. Знаходять оптимальний час між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування. Величину середнього струму безперервних електроерозійних дій на робочу поверхню круга одночасно зі шліфуванням деталі задають в залежності від середньої величини струму безперервних електроерозійних дій на робочу поверхню круга, часу періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга до відновлення початкової величини різальної спроможності робочої поверхні круга та оптимального часу між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування. Технічний результат - мінімальна питома собівартість шліфування, максимальна продуктивності оброблення за умови забезпечення необхідної якості обробленої поверхні.

UA 97680 C2



Фіг. 3

Винахід, що пропонується, належить до абразивної обробки, а саме до шліфування з безперервними електроерозійними діями на робочу поверхню круга (РПК) важкооброблюваних матеріалів, наприклад твердих сплавів.

Відомий спосіб визначення оптимальних режимів шліфування [Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. - 391 с. - С. 170-173] (аналог), що включає механічну обробку зразків відповідно з матрицею планування експериментів, складання систем рівнянь, що описують технічні обмеження, які накладаються на режим різання вимогами до деталі, верстату, Інструменту (знаходяться експериментально з використанням статистичних методів планування експериментів); математичне описання функції мети, тобто функції, що виражає мету оптимізації; сумісне рішення методом лінійного програмування систем рівнянь технічних обмежень і функції мети з метою визначення оптимального режиму.

Недоліком способу є його висока трудомісткість, що пов'язана з великим обсягом експериментів для знаходження рівнянь, які описують технічні обмеження. Крім того, в зв'язку із погіршенням різальної спроможності (РПК) під час обробки, а разом з цим і в зв'язку із зміною технологічних показників в процесі шліфування за жорсткою схемою, визначені режими шліфування не забезпечують максимальної продуктивності обробки, тому що вони орієнтовані на найменшу різальну спроможність круга (щоб запобігти зміни фазово-структурного складу поверхневого шару заготовки).

Відомий спосіб шліфування по пружній схемі з електроерозійним впливом на РПК [Узунян М.Д., Малихин В.В., Ходыкин А.В. Оптимизация процесса алмазно-искрового шлифования композиции «безвольфрамовый твердый сплав - сталь» // Резание и инструмент. - Харьков: Вища школа. - 1982 - С. 33-36.] (аналог), який виконується на оптимальних режимах, знайдених під час обробки зразкової деталі за допомогою пошуку оптимуму функції відклику, і якості якої приймаються продуктивність та питома собівартість обробки, з використанням статистичних методів планування експериментів, наприклад, D - оптимальних планів.

Перевагою способу є те, що при використанні пружної схеми шліфування для пошуку оптимальних режимів повною мірою проявляється різальна спроможність шліфувального круга, при цьому при її зміні під час обробки вона не впливає на показники якості оброблюваного шару заготовки.

Недоліком способу є його досить висока трудомісткість, що призводить до підвищення собівартості обробки за рахунок збільшення витрат часу на пошук оптимальних режимів.

Відомий спосіб шліфування [Патент на винахід (UA) № 52776 М. кл. B24B 1/00, B24B 53/00, B23N 5/04. Опубл. 15.01.2003] (прототип), що включає обробку деталі по пружній схемі з електроерозійними діями на робочу поверхню круга на оптимальних режимах, що визначаються при обробці зразкової деталі, коли спочатку знаходять закономірність зменшення поточної лімітованої різальної спроможності робочої поверхні круга при шліфуванні на оптимальних механічних режимах без електроерозійного впливу на робочу поверхню круга за рахунок зношування зерен та засалювання міжзеренного простору, потім величину середнього струму електроерозійних керуючих дій задають відповідно співвідношенню

$$I_{\text{сер}} = \frac{10^{-3} \cdot (-x_0 \ln 0,05)_m^1 \cdot \pi D_k B_k \left(1 - \frac{P_v}{2} \cdot \frac{K}{100}\right)}{\tau_3 c U_{\text{sm}}}$$

де x_0 , m - параметри закону Вейбула, який описує розподіл зерен по висоті в умовах стабілізації рельєфу круга;

D_k - діаметр шліфувального круга;

45 B_k - висота шліфувального круга;

P_v - об'ємна частка алмазів в алмазовмісному шарі при 100 %-вій відносній концентрації алмазів;

K - відносна концентрація алмазів;

50 τ_3 - час, за який круг втратив різальну спроможність внаслідок зношування зерен та засалювання міжзеренного простору;

c - коефіцієнт, який враховує вплив енергії імпульсу на інтенсивність вилучення продуктів засалювання;

U_{sm} - розрахункова величина напруги на ерозійному проміжку, В.

Недоліком способу є його технічна обмеженість шліфуванням матеріалів, які сприяють засалюванню міжзеренного простору, тому що в прототипі середня величина електроерозійних дій залежить від часу засалювання, що не дозволяє знайти величину безперервних електроерозійних дій за співвідношенням, наведеним в прототипі, коли засалювання відсутнє, як це має місце при обробленні твердих сплавів.

В основу винаходу поставлена задача вдосконалення способу шліфування, в якому пошук оптимальних режимів виконується під час обробки зразкової деталі незалежно від фізичних явищ, що обумовлюють погіршення різальної спроможності робочої поверхні круга під час оброблення, тим самим забезпечуючи розширення технологічних можливостей пошуку оптимальних режимів оброблення при трудомісткості пошуку, продуктивності та якості оброблення такому ж, як і у прототипі.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що в відомому способі шліфування, який включає обробку деталі по пружній схемі з електроерозійними діями на робочу поверхню круга на оптимальних режимах, що визначаються при обробці зразкової деталі, коли спочатку знаходять закономірність зменшення різальної спроможності робочої поверхні круга при шліфуванні на оптимальних механічних режимах без електроерозійного впливу на робочу поверхню круга, потім, згідно з винаходом, визначають час періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга на максимальних для даного джерела струму електричних режимах одночасно з обробкою деталі до відновлення початкової величини різальної спроможності та закономірність збільшення різальної спроможності за рахунок електроерозійних дій, знаходять оптимальний час між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування, а величину середнього струму безперервних електроерозійних дій на робочу поверхню круга одночасно зі шліфуванням деталі задають відповідно співвідношенню

$$I_{\text{сер безп}} = I_{\text{сер пер}} \frac{t_{\text{від}}}{(t_{\text{від}} + T_{\text{опт}})}, \quad (1)$$

де $I_{\text{сер безп}}$ - середня величина струму безперервних електроерозійних дій на робочу поверхню круга;

$I_{\text{сер пер}}$ - середня величина струму періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга;

$t_{\text{від}}$ - час періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга до відновлення початкової величини різальної спроможності робочої поверхні круга;

$T_{\text{опт}}$ - оптимальний час між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування

Ознаками, які відрізняють заявлений винахід, є наявність:

- визначення часу періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга на максимальних для даного джерела струму електричних режимах одночасно з обробкою деталі до відновлення початкової величини різальної спроможності та закономірності збільшення різальної спроможності за рахунок електроерозійних дій;

- знаходження оптимального часу між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування;

- визначення величини середнього струму безперервних електроерозійних дій на РІЖ одночасно зі шліфуванням деталі задають відповідно співвідношенню (1).

Дійсно, визначення часу періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга на максимальних для даного джерела струму електричних режимах одночасно з обробкою деталі до відновлення початкової величини різальної спроможності забезпечує відновлення різальної спроможності РІЖ незалежно від фізичних явищ, які обумовлюють погіршення різальної спроможності робочої поверхні.

Знання закономірностей зменшення різальної спроможності робочої поверхні круга при шліфуванні на оптимальних механічних режимах без електроерозійного впливу на робочу поверхню круга та часу періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга на максимальних для даного джерела струму електричних режимах одночасно з обробкою деталі до відновлення початкової величини різальної спроможності, а також закономірності збільшення різальної спроможності за рахунок електроерозійних дій, дозволяє за допомогою розрахунків оптимізувати час між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування.

Визначення величини середнього струму безперервних електроерозійних дій на РІЖ одночасно зі шліфуванням деталі за співвідношенням (1) забезпечує пошук оптимального значення середнього струму при незначних витратах часу на пошук оптимальних режимів незалежно від фізичних явищ, які обумовлюють погіршення різальної спроможності РПК.

Реалізація способу під час плоского врізного шліфування твердого сплаву ВК6 виконується таким чином.

Обладнання: плоскошліфувальний верстат моделі ЗД711АФ11, модернізований для здійснення електроерозійної правки та оброблення зразка з одночасними електроерозійними діями на РПК в автономній зоні, блок електроживлення моделі ІТТ-35.

Пристрої: пристрій для виконання плоского пружного шліфування з постійним притиском зразка до РПК по схемі, кінематика якої аналогічна жорсткій схемі; пристрій для визначення кількості видаленого шліфуванням оброблюваного матеріалу, пристрій для визначення витраченого алмазовмісного шару.

5 Інструмент - алмазний круг 270-0128 ГОСТ16167-82 АС6-100/80-4-М2-01.

Робоче середовище - 0,3 %-вий водний розчин кальцинованої соди.

Підготовку робочої поверхні круга до експерименту виконували за допомогою електроерозійної правки (круг - анод, електрод-інструмент - катод) в два етапи. На першому етапі з використанням електроду із міді М1 видаляли алмазовмісний шар, який був сформований попереднім експериментом. Швидкість круга дорівнювала 35 м/с, поперечну подачу та подачу на врізання виконували вручну, підтримуючи середню силу струму в межах $I_{\text{правки}}=5-8$ А. На другому етапі електроерозійну правку вели за схемою плоского шліфування з використанням електрод-інструмента із чавуна СЧ 18-23. Режими правки: механічні - швидкість круга $V_{\text{кр}}=35$ м/с, подовжня швидкість столу $V_{\text{ст}}=6$ м/хв; поперечна подача $S_{\text{поп}}=2,5$ мм/хід, глибина різання $t=0,005\div 0,010$ мм; електричні - напруга холостого ходу $U_{\text{хх}}=50$ В, середня сила струму під час правки $I_{\text{правки}}=5-8$ А. В результаті на другому етапі правки забезпечувалося радіальне биття РПК в межах 10-15 мкм, оголення алмазних зерен на величину 1/3 від діаметра їх моделі в формі кулі.

20 Спочатку для знаходження закономірності зменшення різальної спроможності робочої поверхні круга при шліфуванні на оптимальних механічних режимах без електроерозійного впливу на робочу поверхню круга, алмазне врізне шліфування зразка із ВК6 за пружною схемою виконували на наступних механічних режимах: швидкість круга $V_{\text{к}}=35$ м/с, подовжня швидкість столу $V_{\text{ст}}=6$ м/хв. Сила підтискання зразка до РПК дорівнювала 86,3 Н; це значення було визначено розрахунком з умов відсутності окислення алмазних зерен.

25 Різальну спроможність РІЖ оцінювали об'ємом матеріалу, видаленого за хвилину. Об'єм матеріалу, видаленого шліфуванням, розраховували як добуток площі оброблюваної поверхні зразка на висоту видаленого шару через певні відрізки часу оброблення. Вимірювання висоти видаленого шару виконували після 1, 3, 5, 15, 30, 45, 60 хвилин шліфування.

30 На фіг. 1 представлений вплив часу обробки на різальну спроможність круга АС6-100/80-4-М2-01 при шліфуванні без електроерозійних дій твердого сплаву ВК6.

За даними експерименту методом найменших квадратів, знаходили рівняння, яке описує зміну різальної спроможності РПК при шліфуванні твердого сплаву ВК6 під час оброблення, що має вигляд:

$$V_1=190+248 \cdot \exp(-0,17086 \cdot \tau). \quad (2)$$

35 Потім, з метою визначення часу періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга, необхідного для відновлення початкової величини різальної спроможності РПК, електроерозійні дії на неї здійснювали в автономній зоні одночасно з шліфуванням твердого сплаву ВК6 затупленою в процесі попереднього експерименту робочою поверхнею. Режими періодичних електроерозійних дій: $U_{\text{хх}}=50$ В, середня сила струму під час періодичних дій $I_{\text{сер пер}}=10$ А (максимальне значення для джерела струму ІТТ-35), механічні режими були аналогічними алмазному шліфуванню без електроерозійних дій на РПК.

Об'єм видаленого матеріалу під час шліфування з одночасними електроерозійними діями на робочу поверхню круга визначали, як і в попередньому випадку, описаному раніше. При досягненні продуктивності шліфування, яка дорівнювала продуктивності шліфування заправленим кругом, РПК вважали оновленою.

45 Вплив часу електроерозійних дій на підвищення різальної спроможності РПК при шліфуванні сплаву ВК6 представлено на фіг. 2, а залежність, яка описує це підвищення, має вигляд прямої:

$$V_2=17,8\tau+212,2. \quad (3)$$

При цьому час, що необхідний для повного відновлення різальної спроможності РПК, дорівнює $t_{\text{від}}=14$ хв.

50 Питому собівартість розраховували шляхом ділення собівартості верстато-години на видалений за годину об'єм матеріалу.

Видалений шліфуванням об'єм матеріалу за годину для різного часу між оновленням РПК виконували представивши процес шліфування з періодичними діями на РПК як чергування періодів, що утворюють цикли «шліфування - шліфування з одночасним електроерозійним впливом на РПК» [Матюха П.Г., Стрелков В.Б. Расчет объема сошлифованного материала в процессе алмазного шлифования твердого сплава ВК8 с периодическими электроэрозийными воздействиями на рабочую поверхность круга // Сверхтвердые материалы. - 2005. - № 1. с. 51-57].

Для часу між періодичними електроерозійними діями на РПК 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 хвилин розраховували об'єм видаленого шліфуванням матеріалу для періодів шліфування по формулі (2) та шліфування з одночасними електроерозійними діями на РПК за формулою (3), а також собівартість верста-то-години, яка була в цих випадках.

5 Собівартість верстато-години з урахуванням періодів шліфування та шліфування з одночасним електроерозійним впливом на РПК виконували для вище наведених проміжків часу оновлення РПК за методикою, викладеною в роботі [Стрелков В.Б. Определение себестоимости алмазного шлифования твердых сплавов при периодических электроэрозионных воздействиях на РПК. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування та машинознавство. Донецьк: ДонНТУ, 2005. - Вип. 92. - С. 134-143].

Розрахунки виконували на ПЕОМ з використанням розроблених програм.

15 На фіг. 3 представлені результати розрахунків питомої собівартості шліфування твердого сплаву марки ВК6 кругом 1А1 250×76×16×5 АС6 100/80-4-М2-01 при різному часі між періодичними електроерозійними діями на РПК, які виконані за методиками, описаними в вище наведених роботах. З фіг. 3 видно, що при $t_{\text{від}}=14$ хв оптимальний інтервал часу між періодичними електроерозійними впливами на робочу поверхню круга дорівнює $T_{\text{опт}}=20$ хв.

20 Величину середнього струму безперервних електроерозійних дій на РПК одночасно зі шліфуванням деталі розрахуємо за співвідношенням (1), яке знайдене з умов, коли енергія періодичних та безперервних електроерозійних дій на РПК дорівнюють одна одній

$$I_{\text{сер безп}} = I_{\text{сер пер}} \frac{t_{\text{від}}}{(t_{\text{від}} + T_{\text{опт}})} = 10 \frac{14}{(14 + 20)} = 4,1 \text{ А.}$$

25 Щоб перевірити, чи залишилась при шліфуванні з безперервними електроерозійними діями на РПК собівартість шліфування такою ж, як і при шліфуванні з періодичними електроерозійними діями, були проведені експерименти з плоского врізного шліфування за пружною схемою сплаву ВК6 кругом АС6-100/80-4-М2-01 з механічними режимами, аналогічними наведеним раніше, але з безперервною електроерозійною дією на РПК струмом величиною $I_{\text{сер безп}}=4\pm 0,5$ А.

30 Було встановлено, що питома собівартість шліфування з безперервними електроерозійними діями на РПК дорівнює $0,83 \cdot 10^{-3}$ грн/мм³ проти $0,91 \cdot 10^{-3}$ грн/мм³ при шліфуванні з періодичними електроерозійними діями на РПК, тобто менше на 10 %. Середня продуктивність шліфування з безперервними електроерозійними діями на РПК дорівнює 524 мм³/хв, з періодичними діями на РПК - 313 мм³/хв, тобто продуктивність шліфування з безперервними електроерозійними діями є вищою на 67 %.

35 Запропонований спосіб шліфування може застосовуватись при алмазному шліфуванні важкооброблюваних матеріалів на підприємствах машинобудівного комплексу, забезпечуючи розширення технічних можливостей пошуку режимів обробки на шліфування таких матеріалів, коли погіршення різальної спроможності РПК обумовлене не тільки засалюванням, але і іншими фізичними явищами. При цьому трудомісткість пошуку режимів, собівартість, продуктивність та якість оброблення будуть такими ж, як і у прототипі.

40

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

45 Спосіб шліфування, що включає обробку деталі по пружній схемі з електроерозійними діями на робочу поверхню круга на оптимальних режимах, що визначаються при обробці зразкової деталі, коли спочатку знаходять закономірність зменшення різальної спроможності робочої поверхні круга при шліфуванні на оптимальних механічних режимах без електроерозійного впливу на робочу поверхню круга, який **відрізняється** тим, що потім визначають час періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга на максимальних для даного джерела струму електричних режимах одночасно з обробкою деталі до відновлення початкової

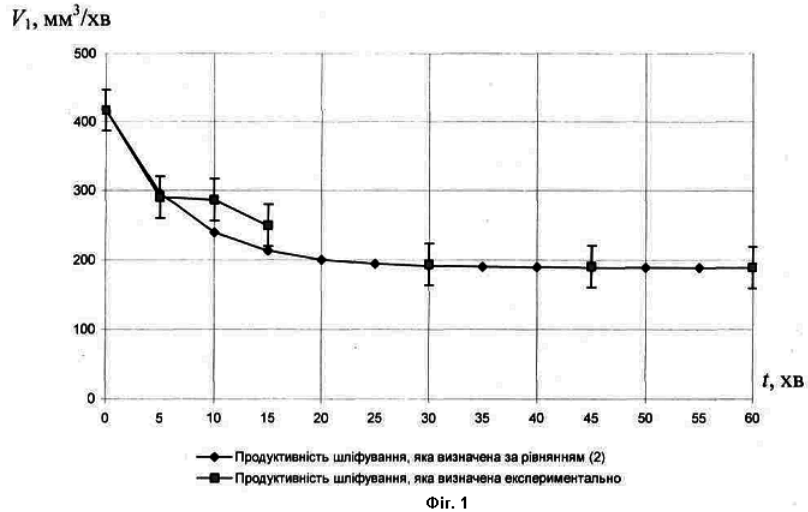
50 величини різальної спроможності та закономірність збільшення різальної спроможності за рахунок електроерозійних дій, знаходять оптимальний час між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування, а величину середнього струму безперервних електроерозійних дій на робочу поверхню круга одночасно зі шліфуванням деталі задають відповідно співвідношенню

$$55 \quad I_{\text{сер безп}} = I_{\text{сер пер}} \frac{t_{\text{від}}}{(t_{\text{від}} + T_{\text{опт}})},$$

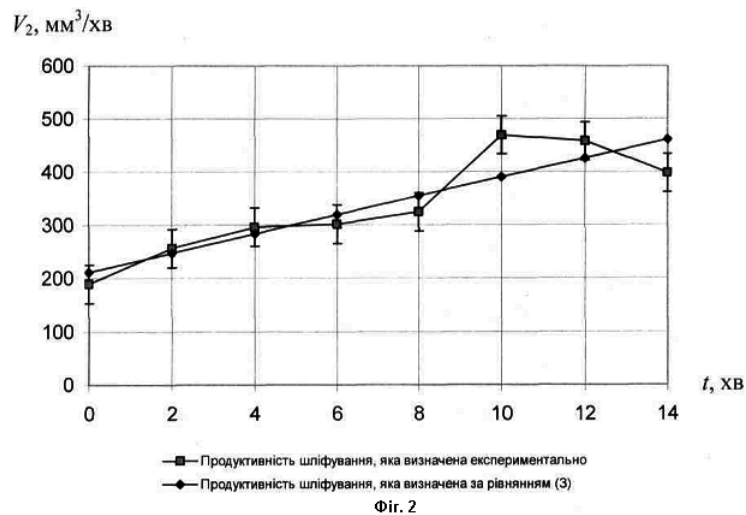
де $I_{\text{сер безп}}$ - середня величина струму безперервних електроерозійних дій на робочу поверхню круга;

$I_{сер\ пер}$ - середня величина струму періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга;
 $t_{від}$ - час періодичних електроерозійних дій на робочу поверхню круга до відновлення початкової величини різальної спроможності робочої поверхні круга;

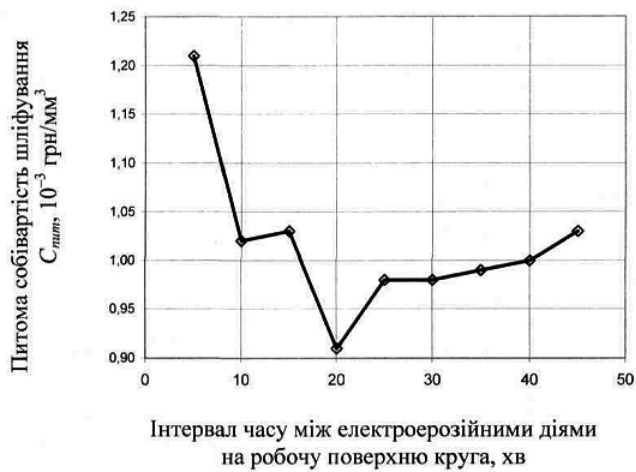
$T_{опт}$ - оптимальний час між періодичними електроерозійними діями за критерієм мінімальної питомої собівартості шліфування.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Комп'ютерна верстка Л. Купенко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Акты и справки о внедрении разработок, выполненных
в диссертационной работе, в производство и учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Торпласт»



И.И. Цыганкова

(подпись)

«08» августа 2013 года

АКТ

внедрения в производство разработок,
выполненных В.В. Полтавцом в диссертационной работе

Комиссия в составе:

1. Заведующий кафедрой «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», д.т.н., проф. Гусев В.В. – председатель комиссии;

2. Доцент кафедры «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», к.т.н., доцент Полтавец В.В. – член комиссии;

4. Главный бухгалтер ООО «Торпласт» Поливко Т.В. – член комиссии;

3. Главный инженер ООО «Торпласт» Ворона А.А. – член комиссии, составила настоящий акт о внедрении в производственный процесс ООО «Торпласт» разработок, выполненных В.В. Полтавцом в диссертационной работе на тему «Теоретические основы повышения производительности шлифования путем управления текущей лимитированной режущей способностью шлифовального круга», а именно:

1. Методики определения рациональных режимов резания на отрезной и фаскообразующей операциях при изготовлении полипропиленовых труб.

2. Разработки конструкции устройства для восстановления режущей способности заточного круга электроэрозионным способом при затачивании отрезных ножей с режущими твердосплавными элементами.

3. Модернизации заточного станка модели 3Б для регулирования силы прижатия затачиваемой заготовки к заточному кругу.

4. Совершенствования конструкции осевого отрезного устройства для непрерывной порезки пластиковых труб с целью увеличения его производительности и надежности.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработок В.В. Полтавца в производственный процесс ООО «Торпласт» в 2014 году составит 25 тыс. гривен.

Председатель комиссии

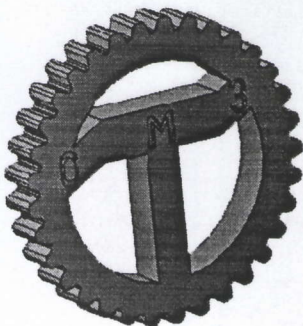
Члены комиссии

В.В. Гусев
В.В. Полтавец
Т.В. Поливко
А.А. Ворона

Соответствует оригиналу

Учёный секретарь диссертационного совета

Д 01.014.02, д-р техн. наук, профессор С.П. Еронько



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ОЗЕРЯНОВСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД «ТЕХНОЛОГИЯ»
ДНР 84601, город Горловка, Центрально-Городской район, улица
Озерьяновская, дом 12, Идентификационный код 39134903
т/с 26008732790100 (российский рубль) в Центральном
Республиканском Банке Донецкой Народной Республики, код Банка: 400019
моб.тел.: 0506427483; e-mail: omz.tehnologiya@rambler.ru

Исх. № от г.

Диссертационный совет Д 01.014.02 при
ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Полтавца Валерия Васильевича на тему «Теоретические основы повышения эффективности шлифования за счёт оптимизации режимов с учётом нестационарности процесса», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 Технология машиностроения

ООО «Озерьяновский машиностроительный завод «Технология» ведет постоянную работу по уменьшению трудоёмкости и снижению затрат при изготовлении машиностроительной продукции для тяжелой промышленности. Научно-техническое содействие при выполнении этой работы предприятию оказывает кафедра «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет». Важным направлением развивающегося научно-технического сотрудничества является разработка рекомендаций по назначению режимов абразивной обработки на основе наиболее полного использования режущих свойств абразивного инструмента и инструмента из СТМ.

Разработанные в диссертационной работе Полтавца Валерия Васильевича рекомендации по назначению подачи на врезание при шлифовании деталей из легированных сталей в соответствии с законом изменения режущей способности шлифовального круга во время осуществления процесса шлифования переданы для использования на ООО «Озерьяновский машиностроительный завод «Технология». Внедрение указанных рекомендаций позволит повысить производительность шлифовальных операций при обработке поверхностей вращения на 30-40 % и обеспечит существенное снижение себестоимости механической обработки машиностроительных изделий, имеющих рабочие поверхности, подвергаемые обработке шлифовальным инструментом.

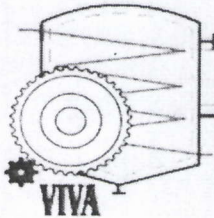
Ожидаемый экономический эффект от использования переданных на ООО «Озерьяновский машиностроительный завод «Технология» рекомендаций и методик назначения режимов обработки шлифованием поверхностей изделий тяжелого машиностроения составит 85000,00 рублей РФ (восемьдесят пять тысяч рублей РФ 00 коп.).

Директор

Федосеев С.А.

Соответствует оригиналу
Учёный секретарь диссертационного совета
Д 01.014.02, д-р техн. наук, профессор С.П. Еронько





ООО «Фирма «ВИ-ВА»

Тел/факс (062) 340-56-28, (062) 340-56-20

e-mail: vivaltd@yandex.ua, vivaltd@skif.net www.vivaltd.ua

ДНР, 83001 г. Донецк, ул. Горького, 146 ИКЮЛ : 50003878

р/с 40702810920450000146 ИНН 51000050 БИК 310101001

№ 258 от 11 декабря 2019 г.

Диссертационный совет Д 01.014.02
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Полтавца Валерия Васильевича на тему «Теоретическое обоснование режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе их оптимизации с учётом нестационарности процесса», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

ООО «Фирма «Ви-Ва» занимается проектированием и производством нестандартного оборудования для пищевой и химико-фармацевтической промышленности. При изготовлении такого оборудования применяются нержавеющие коррозионно-стойкие и жаропрочные стали марок AISI 304, AISI 316, AISI 316L, AISI 321, AISI 430. Указанные стали характеризуются пониженной обрабатываемостью резанием, и, на этой основе, в решении вопросов разработки и совершенствования технологии механической обработки нержавеющих сталей предприятие ООО «Фирма «Ви-Ва» сотрудничает с учёными кафедры «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ». В рамках существующего научно-технического сотрудничества для применения в производственных условиях предлагаются разработки на основе результатов выполненных в образовательной организации исследований.

Для использования в технологической подготовке производства и в производственных условиях механических и сборочных цехов на ООО «Фирма «Ви-Ва» переданы следующие разработки, выполненные на основе исследований диссертационной работы Полтавца Валерия Васильевича:

1. Технологические рекомендации по назначению режимных параметров при алмазно-абразивной обработке деталей из нержавеющих труднообрабатываемых молибденосодержащих сталей.
2. Методика определения физико-механических свойств нержавеющих высоколегированных сталей в температурно-скоростных условиях обработки лезвийным и абразивным инструментом.
3. Конструкторская документация по модернизации станков шлифовальной группы для осуществления управляющих воздействий с целью восстановления режущей способности шлифовальных кругов электроэрозионным способом в рабочей или автономной зоне.

Ожидаемый экономический эффект от использования в технологической подготовке производства и в производственных условиях переданных на предприятие рекомендаций, методик и конструкторской документации составит 84000,00 рублей РФ (восемьдесят четыре тысячи рублей РФ 00 коп.).

Директор
Соответствует оригиналу
Учёный секретарь диссертационного совета
Д 01.014.02, д-р техн. наук, профессор С.П. Еронько



В.И. Литвин



ООО «ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ»

ул. Куйбышева, 143-а, г. Донецк, 83060, ДНР
 тел.: (062) 253-02-29
<http://www.dzdoi.dn.ua>
 E-mail: zdoi@rambler.ru
 ИНН: 50003485

Диссертационный совет Д 01.014.02
 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
 ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
 Полтавца Валерия Васильевича на тему «Теоретическое обоснование
 режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей и
 сплавов на основе их оптимизации с учётом нестационарности процес-
 са», представленной на соискание ученой степени доктора технических
 наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

ООО «Деревообрабатывающий инструмент» – ведущее предприятие по изготовлению и заточке деревообрабатывающего инструмента и инструмента по металлу; выпускает широкий ассортимент фрез и пил, в том числе оснащенных твердосплавными пластинами. В вопросах разработки и совершенствования технологии абразивной обработки и заточки твердосплавных вставок, а также твердосплавных напайных пластин совместно с корпусами инструментов специалисты ООО «Деревообрабатывающий инструмент» сотрудничают с кафедрой «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ». С целью расширения научно-технического сотрудничества для использования на производстве предложены новые подходы к решению задач технологической подготовки производства дерево- и металлообрабатывающего инструмента.

Для практического использования в производственных условиях на ООО «Деревообрабатывающий инструмент» переданы следующие разработки, выполненные на основе исследований диссертационной работы Полтавца Валерия Васильевича:

1. Технологические рекомендации по назначению режимов резания при алмазном шлифовании кругами на металлической связке изделий из твердых сплавов группы ВК.
2. Технологические рекомендации по назначению режимов резания при алмазном шлифовании кругами на металлической связке изделий из комбинации материалов «твердый сплав – сталь».
3. Конструкторская документация по модернизации станков шлифовальной группы для осуществления обработки с фиксированной силой прижатия обрабатываемой заготовки к шлифовальному или заточному кругу.
4. Конструкторская документация по модернизации станков шлифовальной группы для восстановления режущей способности шлифовальных кругов электроэрозионным способом в рабочей или автономной зоне.

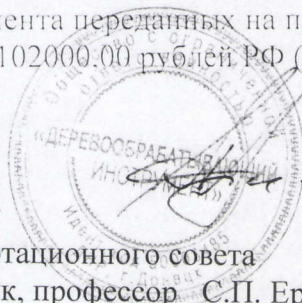
Ожидаемый экономический эффект от использования в технологической подготовке производства инструмента переданных на предприятие рекомендаций и конструкторской документации составит 102000.00 рублей РФ (сто две тысячи рублей РФ 00 коп.).

Директор

Соответствует оригиналу

Учёный секретарь диссертационного совета

Д 01.014.02, д-р техн. наук, профессор С.П. Еронько



А.И. Брижан

Министерство образования и науки 466
Государственное предприятие
«Проектно-конструкторский
технологический институт»
ГП «ДОНПКИ»
Адрес: 83003, г. Донецк,
пр. Ильича, 89.



Министерство угля и энергетики
Государственное предприятие
«Проектно-конструкторский
технологический институт»
ГП «ДОНПКИ»
Адрес: 83003, г. Донецк,
пр. Ильича, 89.

Тел. 385-81-26, код ОКПО 00174071. e-mail donpkti.donpkti@mail.ru
site: <http://donpktdonpkti.wixsite.com/donpkti>

№ 01-9/493 « 19 » декабря 2020г

Диссертационный совет Д 01.014.02
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Полтавца Валерия Васильевича на тему «Теоретическое обоснование
режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей и
сплавов на основе их оптимизации с учётом нестационарности процесса»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Государственное предприятие «Донецкий проектно-конструкторский технологический институт» ведет работы по проектированию конструкторской и технологической документации на машиностроительное оборудование различного назначения, включающее детали и элементы, выполненные из труднообрабатываемых конструкционных материалов. При разработке и совершенствовании технологии механической обработки изделий из труднообрабатываемых сталей, сплавов и конструкционной керамики научно-техническое содействие специалистам ГП «ДОНПКИ» оказывает кафедра «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ». В рамках этой совместной работы учёными технического университета предложены новые подходы к решению задач технологического обеспечения операций алмазно-абразивной обработки указанных изделий.

Для практического использования в проектных работах на ГП «ДОНПКИ» переданы следующие разработки, выполненные на основе исследований диссертационной работы Полтавца Валерия Васильевича:

1. Методики определения рациональных режимов резания при алмазном шлифовании кругами на металлической связке деталей из труднообрабатываемых высоколегированных сталей и твердых сплавов группы ВК.
2. Методики определения оптимальных режимов электроэрозионных управляющих воздействий резания при шлифовании деталей из труднообрабатываемых высоколегированных сталей и твердых сплавов кругами из СТМ с восстановлением режущей способности кругов электроэрозионным способом.
3. Конструкции специальных устройств для восстановления режущей способности шлифовальных кругов электроэрозионным способом в автономной зоне при осуществлении управляющих воздействий одновременно с обработкой.

Ожидаемый экономический эффект от использования в технологическом обеспечении операций алмазно-абразивной обработки переданных на предприятие методик и конструкций составит 98000,00 рублей РФ (девяносто восемь тысяч рублей РФ 00 коп.).

Директор
Соответствует оригиналу
Учёный секретарь диссертационного совета
Д 01.014.02. д-р техн. наук, профессор С.И. Еронько



В.П. Кыткин



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

17.12.19 № 29-23/16

На № _____

Диссертационный совет Д 01.014.02
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Полтавца Валерия Васильевича на тему «Теоретическое обоснование режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе их оптимизации с учётом нестационарности процесса», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

На кафедре «Мехатронные системы машиностроительного производства» ГОУВПО «ДОННТУ» ведутся долгосрочные научно-исследовательские работы по обоснованию и определению режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей, твердых сплавов, титановых сплавов и конструкционной керамики кругами из СТМ. Указанные работы имеют большое значение для дальнейшего развития теоретических основ технологии машиностроения, общей теории резания и теории абразивно-алмазной обработки.

В учебном процессе кафедры «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» используются следующие разработки, выполненные на основе исследований диссертационной работы Полтавца Валерия Васильевича:

1. Теоретическая модель определения оптимальных режимов шлифования – при подготовке бакалавров направлений подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» при чтении лекций по учебной дисциплине «Теория резания», тема «Методики назначения режимов резания».

2. Рекомендации по выбору способов управления режущей способностью шлифовальных кругов, обеспечивающих минимальную удельную себестоимость обработки, – при подготовке бакалавров направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» при проведении лабораторных занятий по учебной дисциплине «Физико-механические методы обработки», тема «Изучение современных способов правки алмазных шлифовальных кругов на металлической связке».

Зав. кафедрой «Мехатронные системы
машиностроительного оборудования»

В.В. Гусев

Начальник учебного отдела

Б.В. Гавриленко

Первый проректор

А.А. Каракозов

Соответствует оригиналу

Учёный секретарь диссертационного совета

Д 01.014.02. д-р техн. наук, профессор С.Н. Ерошенко

