

Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Полтавец Валерий Васильевич

УДК 621.923

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

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Донецк – 2019

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Матюха Пётр Григорьевич

Официальные
оппоненты:

Ведущая
организация:

Защита состоится _____ 2020 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, 6-й учебный корпус, ауд. 6202а. Тел.: +380 (62) 304-30-55, эл. почта: ychenarada@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет – <http://donntu.org>

Автореферат разослан _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.014.02,
д-р техн.наук, проф.

С.П. Еронько

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, 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;

– обобщить и разработать способы определения оптимальных 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, твердых и титановых 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 групп 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 технико-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.

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);

– Международных научно-технических конференциях «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении «Механообработка. Севастополь – 2011, 2012, 2013» (2011-2013 гг., г. Севастополь, 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 объеме диссертационная работа докладывалась на расширенных семинарах кафедры мехатронных систем машиностроительного оборудования Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Структура и объем работы.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Современные способы повышения эффективности шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных материалов». Проанализирована потребность мировой экономики в труднообрабатываемых инструментальных и конструкционных материалах: специальных и инструментальных сталях, твердых сплавах, титановых сплавах.

К специальным сталям, за исключением инструментальных, относят: подшипниковые стали; коррозионностойкие (нержавеющие) стали; жаропрочные стали и сплавы. Производство и потребление специальных и инструментальных сталей в мире, странах СНГ, России и на Украине имеет устойчивую тенденцию к росту. Потребление специальных и инструментальных сталей в России на данный момент времени оценивается объемом 1,3-1,7 млн. т. 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.

Потребление твёрдых сплавов в России, на Украине и в целом в странах СНГ значительно (иногда в разы превышает производство). Не менее половины твердосплавной продукции (в России – это 1800-2000 тонн изделий) подвергается абразивной обработке и обработке кругами из СТМ.

В чистом виде и в виде сплавов титан применяется в: химической промышленности, военной промышленности, автомобильной промышленности, сельскохозяйственной и пищевой промышленности, медицинской промышленности, производстве спортивных товаров, ювелирных изделий и др. Титановые сплавы являются важнейшим конструкционным материалом в авиа-, вертолёт-, ракето-, кораблестроении. Потребление титановых сплавов в России можно оценить в 8-10 тыс. тонн. В частности, аэрокосмическая промышленность потребляет в России 60 - 70 % титанового проката. Более 60 % деталей из титановых сплавов на заключительных этапах изготовления обрабатывается абразивным инструментом и инструментом из СТМ.

Государственной программой Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013 - 2025 годы» планируется увеличить долю российских производителей авиационной продукции на мировом рынке до 6,3 % по сравнению с нынешними 5 %. Соответственно, стоимость механической обработки изделий из титановых сплавов вырастет с 400 до 500 млн. руб.

При использовании классической методики определения оптимальных режимов резания при шлифовании 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 настоящее 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 круг, то изменение режущих свойств круга вследствие выполнения резания сочетается с изменением режущих свойств вследствие управляющих воздействий, что значительно усложняет решение оптимизационной задачи.

Анализ существующих способов оптимизации режимов 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.
2. Поиск комплексного показателя процесса алмазно-абразивной обработки, который бы характеризовал режущие свойства шлифовального

круга и учитывал бы технические ограничения, накладываемые на режимы шлифования совокупностью требований к изделию и шлифовальному кругу.

Второй раздел «Методология исследований. Оборудование. Обрабатываемые материалы. Инструменты. Методики измерений».

Задача теоретического обоснования режимных параметров процесса шлифования труднообрабатываемых инструментальных и конструкционных материалов сводится к определению условий для повышения эффективности использования высоких 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.

Методология поиска оптимальных режимных параметров процесса шлифования труднообрабатываемых конструкционных и инструментальных сталей, твёрдых и титановых сплавов включает такие основные положения:

1. Учёт нестационарности процесса шлифования производится путём использования в модели поиска оптимальных режимных параметров обобщенного показателя процесса – текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга (ТЛРСШК).

2. Для определения закономерности изменения ТЛРСШК во время обработки применяется врезное шлифование с фиксированной силой поджима заготовки к кругу, где такое изменение проявляется явным образом в виде изменения фактической глубины резания во времени ($t_{\phi} = f(\tau)$).

3. Полученные закономерности $t_{\phi} = f(\tau)$, при которых выполняются все технические ограничения на процесс шлифования, переносятся на схему обработки с фиксированными режимами обработки путём соответствующего выбора или программирования режимных параметров процесса.

Структурно-логическая схема исследований представлена на рисунке 1.

Для осуществления алмазного шлифования твердых сплавов с управлением параметрами РПК электроэрозионным способом и формирования параметров РПК на стадии правки использовался модернизированный плоскошлифовальный станок модели ЗД711АФ11. Для аналогичных целей при обработке труднообрабатываемых инструментальных сталей и титановых сплавов применялся модернизированный плоскошлифовальный станок модели ЗГ71. В качестве источника технологической электроэнергии использовали блок электропитания модели ИТТ-35.

Исследования процесса шлифования труднообрабатываемых инструментальных сталей проводились при обработке ванадийсодержащих сталей, в структуре которых присутствует очень твердый карбид ванадия MeC . В качестве материала – представителя группы инструментальных быстрорежущих сталей повышенной производительности использовалась

ванадиевая быстрорежущая сталь повышенной производительности марки Р6М5Ф3.

Исследования процесса шлифования твердых сплавов проводились при обработке однокарбидных твердых сплавов марок ВК6, ВК8, ВК15, а исследования процесса шлифования титановых сплавов – при обработке деформируемого титанового сплава средней прочности ВТ14, который относится к двухфазным сплавам со структурой ($\alpha + \beta$).

При шлифовании исследуемых образцов из труднообрабатываемых материалов использовали круги из синтетических алмазов 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.

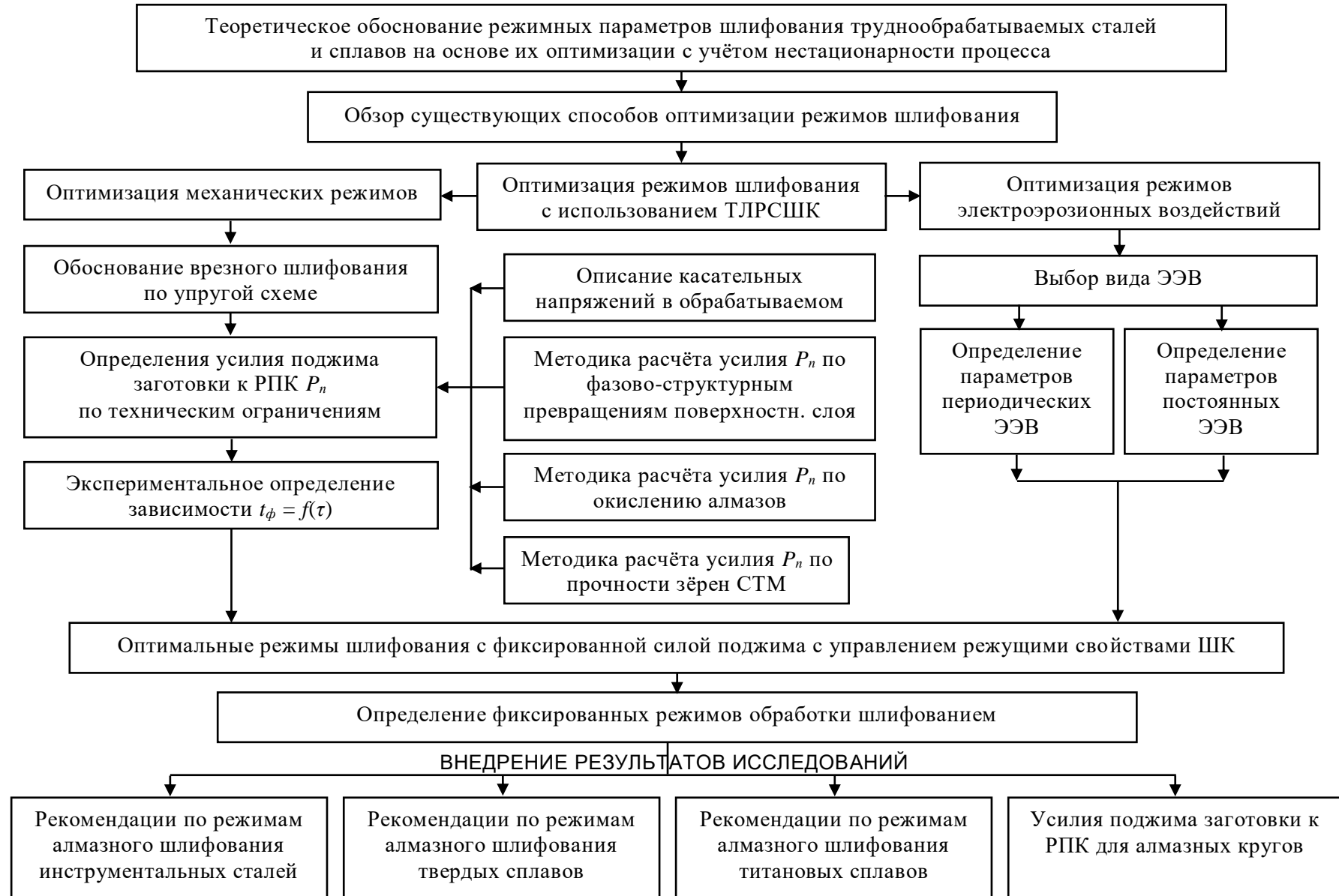


Рисунок 1. Структурно-логическая схема исследований

При исследованиях процесса шлифования применялись оригинальные измерительные устройства и приборы:

1) Устройство для электроэрозионных воздействий на РПК в автономной зоне.

2) Устройство для реализации шлифования с постоянной силой поджима заготовки к РПК.

3) Устройство для измерения расхода алмазов при шлифовании и визуального контроля состояния РПК.

Количество сошлифованного обрабатываемого материала в объёмных единицах определяли по объёму материала, удаленному за время эксперимента. Определение расхода алмазов при шлифовании основывалось на расчете объема изношенного алмазоносного слоя по данным измерения радиальных координат отдельных точек РПК до и после проведения опыта.

Третий раздел «Описание области возможных режимов шлифования и последовательность их определения с учетом нестационарности процесса». Нестационарность процесса шлифования проявляется в изменении во время обработки режущей способности шлифовального 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.

Первому условию удовлетворяет схема шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК (рисунок 2).

Наибольшую нагрузку на абразивные зёрна или зёрна СТМ и наибольшие высотные параметры шероховатости обеспечивает схема врезного шлифования. Это подтверждается результатами исследований распределения нагрузки на шлифовальный круг в осевом направлении при шлифовании с поперечной подачей.

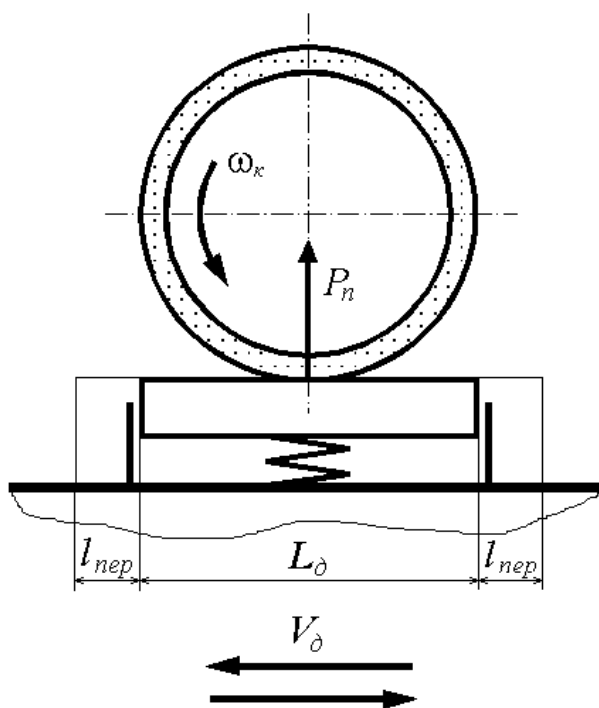


Рисунок 2. Плоское врезное шлифование с фиксированной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга (шлифование по упругой схеме)

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.

Таким образом, для исследования выходных показателей шлифования как нестационарного процесса необходимо использовать схему врезного шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК. При реализации этой схемы шлифования снижение режущей способности круга во время обработки проявляется в виде

непрерывного изменения фактической глубины шлифования (рисунок 3).

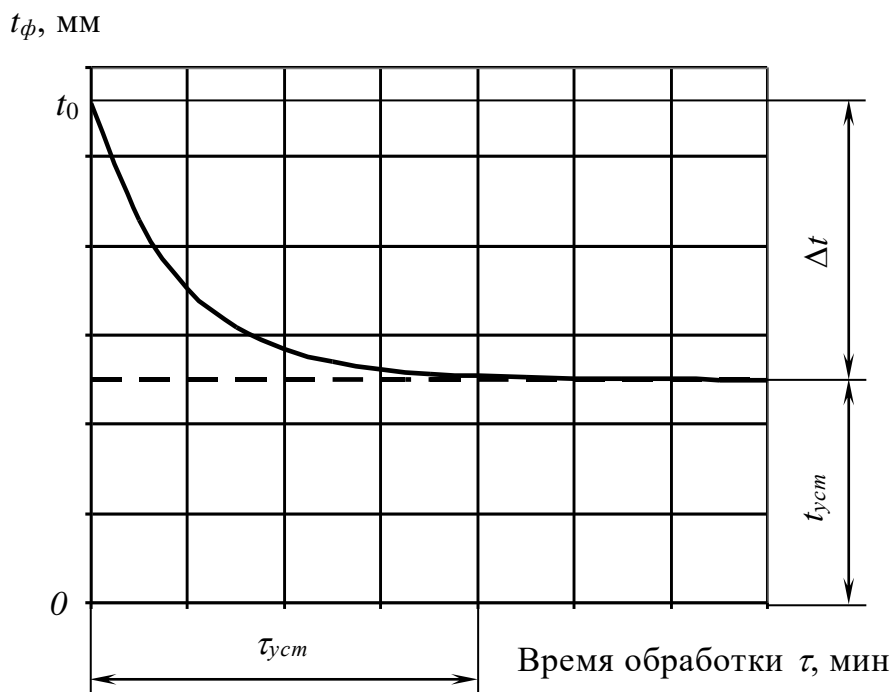


Рисунок 3. Изменение фактической глубины шлифования во время обработки с фиксированной силой поджима заготовки к РПК

Фактическая глубина шлифования t_ϕ с исходного значения t_0 , соответствующего исходному состоянию рельефа РПК, при обработке

уменьшается на величину Δt и достигает через некоторое время $\tau_{уст}$ квазипостоянного значения $t_{уст}$, которое соответствует стабилизировавшимся параметрам РПК.

Второе условие в случае использования шлифовальных кругов на металлической связке обеспечивают параметры рельефа рабочей поверхности круга, сформированные электроэрозионной правкой.

Для реализации **третьего условия** в качестве обобщенного показателя процесса шлифования введем новое понятие «текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга» (ТЛРСШК), которая может выступать также в качестве интегрального технического ограничения на режим шлифования, обеспечивающего требуемые показатели качества обработанной поверхности и максимальную производительность обработки.

Рассмотрим область возможных режимов алмазного шлифования с фиксированным усилием поджима заготовки к РПК рельефом круга, сформированным правкой, в начальный момент времени, соответствующий исходному состоянию РПК в системе координат $t_{\phi}(P_n) - v_{\partial} - \tau$ (рисунок 4).

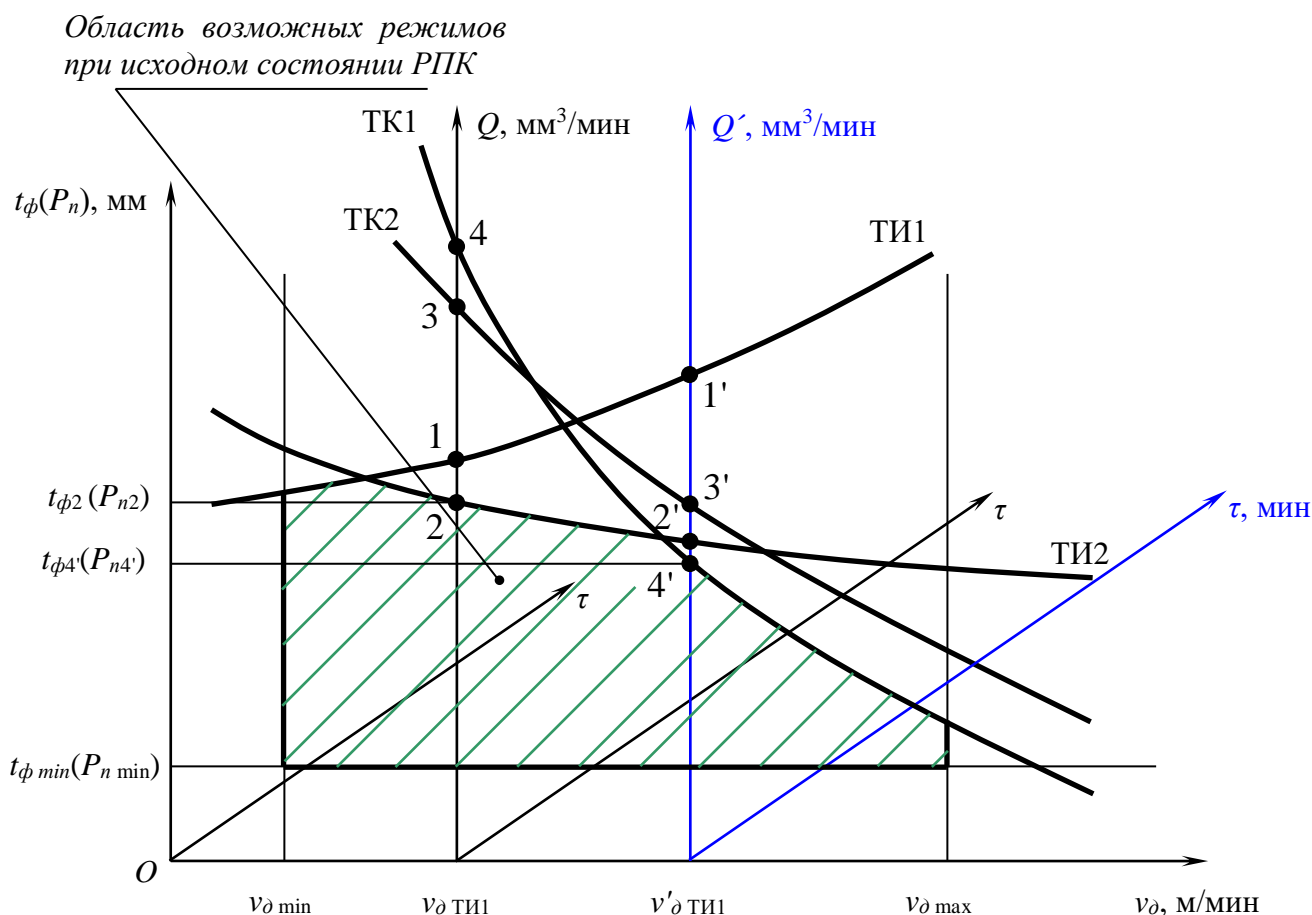


Рисунок 4. Определение режимов шлифования с фиксированной силой поджима заготовка к РПК при изменении заданной шероховатости поверхности изделия

В этой системе координат в плоскости $t_{\phi}(P_n) O v_{\partial}$ область возможных режимов ограничена кривыми, описываемыми уравнениями технических

ограничений, налагаемых на режим шлифования станком ($v_{\partial \min}$, $v_{\partial \max}$); приспособлением для упругого поджима заготовки к РПК, где диапазон сил упругого поджима ($P_{n \min}$, $P_{n \max}$) 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).

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 рисунке 4 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.

При изменении требуемой шероховатости обработанной поверхности скорость детали принимает значение $v'_{\partial \text{ТИ1}}$ (см. рисунок 4). При этом исходное значение фактической глубины шлифования также изменится и определится самой нижней из точек пересечения кривых технических ограничений с вертикалью $v'_{\partial \text{ТИ1}}$ (точки 1' - 4'). На рисунке 4 такой точкой является точка 4' пересечения вертикали $v'_{\partial \text{ТИ1}}$ 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.

Нестационарность процесса обработки учтём путём использования текущей лимитированной фактической глубины шлифования $t_{\phi}(\tau)$ полученной путем деления ТЛРСШК на площадь обрабатываемой поверхности заготовки. График ТЛФГШ может быть расположен в плоскости $t_{\phi}(P_n)$ τ в любой из точек диапазона $v_{\partial \min} - v_{\partial \max}$, в которой значение скорости детали v_{∂} обеспечивает требуемый параметр шероховатости R_a (рисунок 5).

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

Таким образом, область возможных режимов шлифования как нестационарного процесса представляет собой трехмерное пространство, ограниченное плоскостями, проходящими параллельно соответствующим координатным плоскостям через точки $v_{\partial \min}$ и $v_{\partial \max}$, $t_{\phi \min}(P_n)$, а также семейством кривых, описывающих изменение ТЛФГШ в соответствующих

точках диапазона $v_{\partial \min} - v_{\partial \max}$. 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 $v_{\partial \min}$, $v_{\partial \text{ТИ1}}$, и $v'_{\partial \text{ТИ1}}$, $v_{\partial \max}$ представлены на рисунке 5.

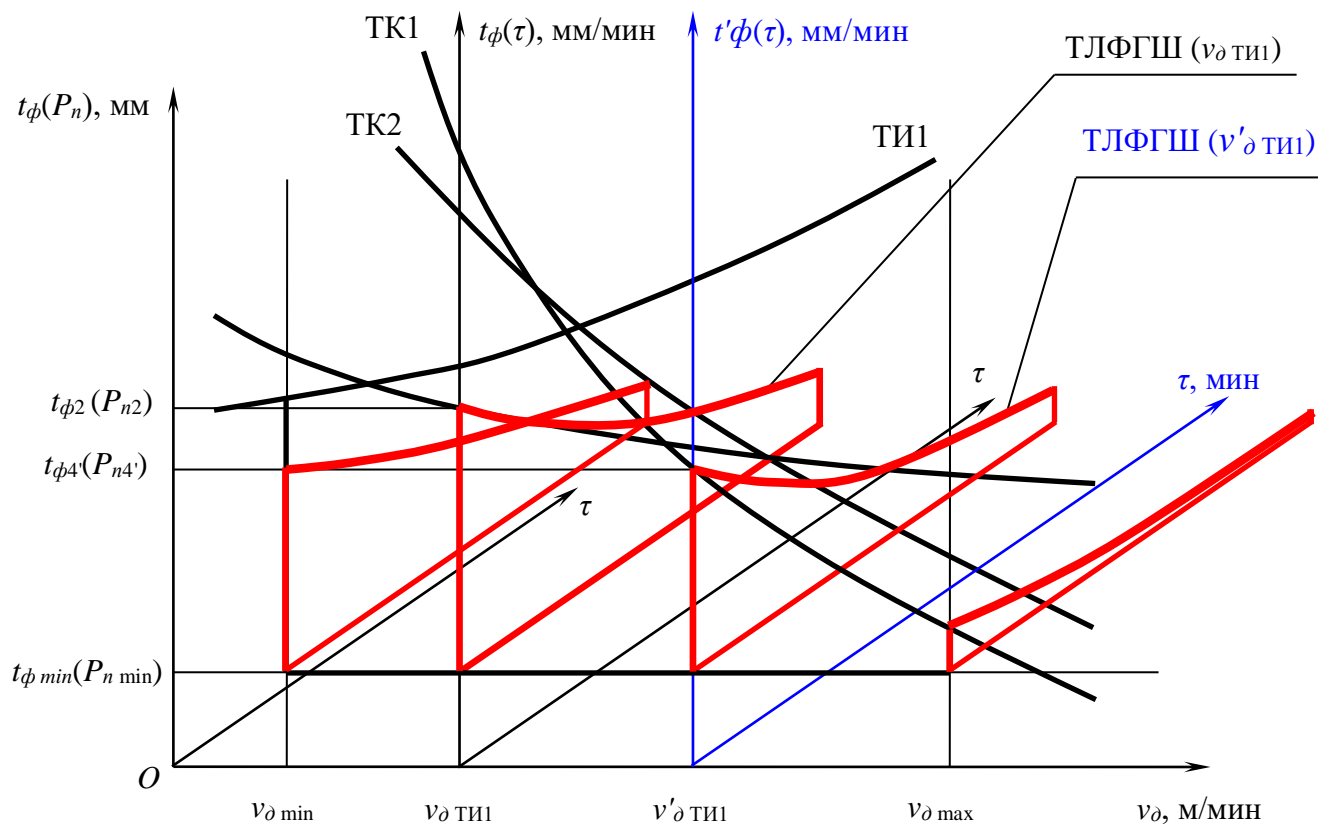


Рисунок 5. Определение режимов шлифования с фиксированной силой поджима заготовка к РПК при изменении при изменении режущей способности шлифовального круга во время обработки

Последовательность поиска режимов шлифования по схеме с фиксированными режимными параметрами с электроэрозионными управляющими воздействиями на РПК и без них представлена на рисунке 6.

Четвертый раздел «Определение технических ограничений, налагаемых на режим шлифования изделием и шлифовальным кругом». Для расчета скорости детали, ограниченной параметрами шероховатости шлифованной поверхности, выбор базовой методики расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности осуществим на основе следующих допущений о параметрах инструмента, принятых при анализе процессов формообразования шлифованной поверхности при чистовом и тонком шлифовании:

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.

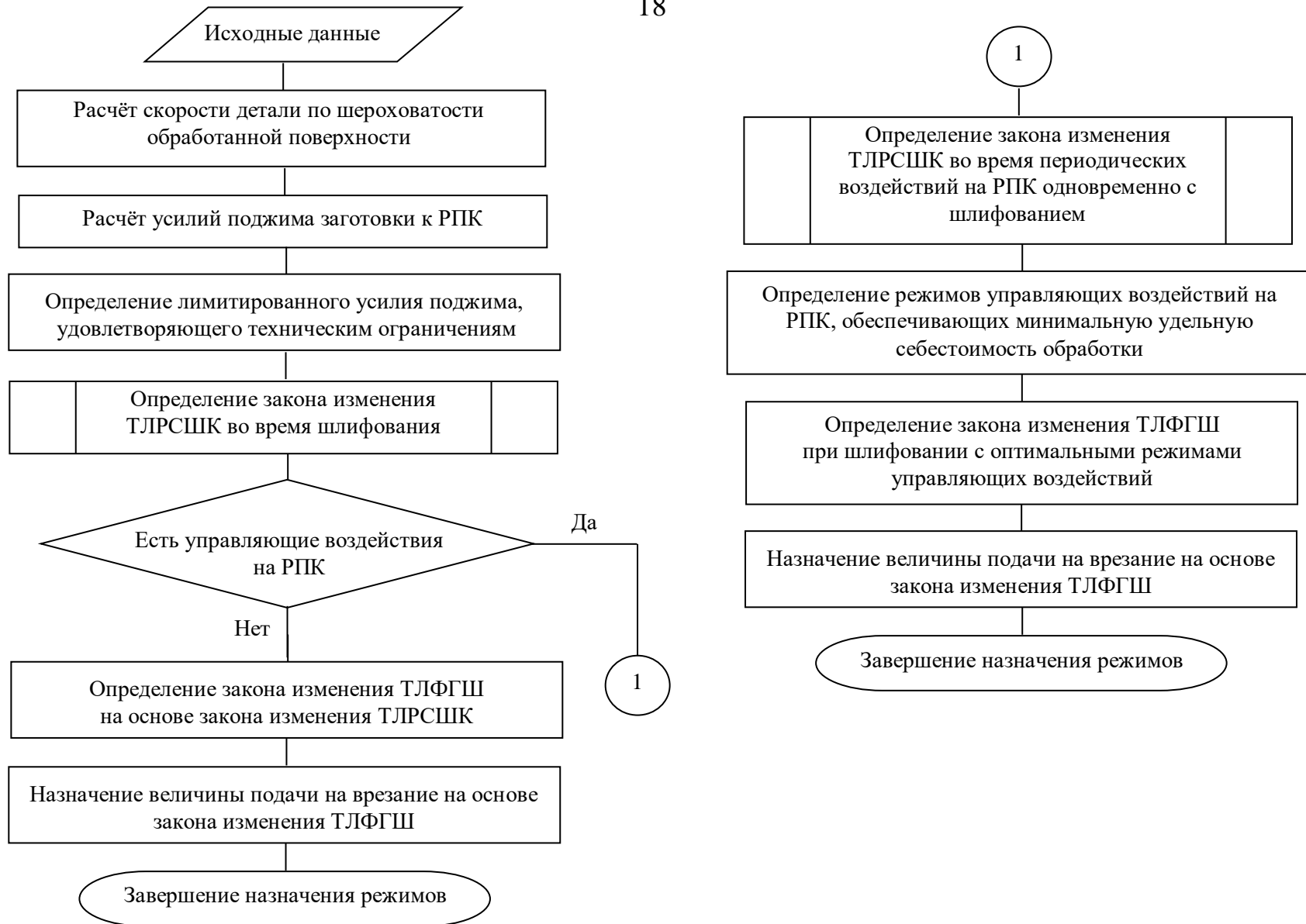


Рисунок 6. Последовательность поиска режимов шлифования с учётом нестационарности процесса

Исходными данными при расчете высотных 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_k , м/с; скорость детали V_d , м/мин; фактическая глубина шлифования t_ϕ , мм;
- 3) геометрические размеры круга – радиус R_k , мм;
- 4) величина интервала расчета – ΔR , мкм.

Расчет выполняется при допущении, что шероховатость сформируется в момент времени, когда ширина шлифования будет перекрыта срезами, т.е. выполнится условие

$$\sum_i^{z_c} b_i' = B \cdot 10^3$$

где z_c – количество зерен, участвующих в формировании поперечного профиля обработанной поверхности; b_i' – ширина среза единичным зерном, мкм; B – ширина шлифования, мм.

Определение скорости детали, которая обеспечивает заданный параметр R_a , выполняется в предположении, что параметры шероховатости шлифованной поверхности формируются только за счет геометрического фактора. Влияние пластических деформаций, наростообразования, а также хрупкого разрушения учитывается с помощью поправочного коэффициента K_m , который представляет собой отношение параметра R_a *обр.*, сформированного при обработке с учетом влияния перечисленных явлений, к параметру R_a , полученному при расчёте, т.е. $K_m = R_{a \text{ обр}} / R_a$.

Допустимое усилие поджима заготовки к кругу, обеспечивающее отсутствие фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала в процессе шлифования, определяется по формуле:

$$P_{n2} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M l_3 \right) z_p b C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M l_3 \right) z_p b \alpha \frac{4a \cdot 60V_k \sqrt{H} \alpha_\varepsilon}{\lambda V_d \sqrt{\pi}} K_{ш}}, \quad (1)$$

где $M = 1 + 2(\pi/4 - \beta)$ – коэффициент, определяемый соотношением нормальных и касательных напряжений в плоскости сдвига σ / τ_s ; a_z – максимальная толщина среза, мм; β , ω – соответственно угол сдвига и угол действия; μ – коэффициент трения задней поверхности зерна о поверхность резания; f_3 – площадь зоны контакта задней поверхности зерна с заготовкой, мм²; l_3 – длина площадки контакта на зерне, мм; b – ширина единичного

среза, мм; z_p – количество одновременно контактирующих с заготовкой зёрен; a , λ – соответственно коэффициент температуропроводности, м²/с, и теплопроводности, Вт/(м·К), обрабатываемого материала; H – безразмерная полуширина источника тепла; α_s – коэффициент ввода, учитывающий количество тепла, поступающее в деталь; C , α – начальная ордината и коэффициент в линейной зависимости, отражающей влияние температурно-скоростных факторов в условиях шлифования на величин касательных напряжений; зависимость имеет вид $\tau_s = C - \alpha T$; $K_{ш}$ – коэффициент шлифования.

Допустимое усилия поджима заготовки к кругу, обеспечивающее отсутствие окисления алмазов, определяется по формуле:

$$P_{нз} = \frac{0,95 \cdot T_{ок} \cdot (\lambda_1 + 2,25 \cdot \lambda \cdot A^* \cdot \sqrt{Fo}) \cdot \pi \cdot n_p \cdot d^2 \cdot \sqrt{l} \cdot B}{4,52 \cdot A^* \cdot \delta \cdot \omega_1 \cdot V_k \cdot K_{ш}}, \quad (2)$$

где $T_{ок}$ – температура окисления алмазов; λ_1 – коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/(м·град); A^* – безразмерная величина, учитывающая вид модели теплообмена между зерном и поверхностью резания;

$$A^* = A_1 - \frac{8 \cdot \lambda_k \cdot F_0}{\ln 4h/d\lambda_1} \cdot \frac{A_{ср}}{1 + \frac{8 \cdot \lambda_k \cdot Fo}{\ln 4h/d\lambda_1}};$$

h – высота цилиндрической модели зерна наиболее вероятного размера, м; d – диаметр основания цилиндрической модели зерна наиболее вероятного размера, м; λ_k – коэффициент теплопроводности алмазосносного слоя круга, Вт/(м·К); ω_1 – коэффициент температуропроводности алмаза, м²/с; $A_{ср}$ – безразмерная функция, учитывающая среднюю температуру рабочего и нерабочего торцов зерна; A_1 – безразмерная функция, учитывающая температуру рабочего торца зерна; A_2 – безразмерная функция, учитывающая температуру нерабочего торца зерна; n_p – количество режущих зёрен на квадратном миллиметре рабочей поверхности круга, шт/мм²; l – длина дуги контакта единичного зерна с кругом, м; B – ширина шлифования, м.

Усилие поджима заготовки к РПК, ограниченное механической прочностью алмазных зёрен, определяется значением силы на единичном зерне, при которой происходит его разрушение. В качестве разрушающей силы на единичном зерне $P_{разр}$ принимаем динамическую прочность алмазного зерна. Учитывая, что динамическая прочность зерна установлена 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.

Допустимое усилие поджима заготовки к кругу, ограниченное механической прочностью алмазных зёрен, определяется по формуле:

$$P_{n4} = \frac{[p]S}{S_{zn}^2} (b \cdot l_3 + b \cdot a_{znp} \sin \gamma) \cdot F \left(a_{zmax} + \frac{R_z}{2} - a_{znp} \right), \quad (3)$$

где S – площадь зоны контакта заготовки со шлифовальным кругом, мм²; S_{zn} – расстояние между зёрнами на рабочей поверхности круга, мм; b, l_3 – соответственно ширина и длина контактной площадки на единичном зерне, мм; a_{znp} – предельная толщина единичных срезов, превышение которой приводит к разрушению алмазного зерна, мм; γ – передний угол для сферической модели режущей части зерна; a_{zmax} – максимальная толщина среза зёрнами, наиболее выступающими из связки, мм; R_z – значение высотного параметра шероховатости R_z на поверхности резания, мм; $F(a_{zmax} + R_z/2 - a_{znp})$ – значение функции распределения Вейбулла, определяющее вероятное количество зёрен, удаляющих такие срезы, при которых произойдёт разрушение зерен.

Лимитирующим усилием поджима заготовки к РПК при шлифовании, удовлетворяющим всем рассмотренным выше техническим ограничениям, налагаемым на режим резания температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое обработанной поверхности, температурой окисления алмазов и механической прочностью алмазных зерен, является наименьшее из значений P_{n2}, P_{n3}, P_{n4} , рассчитанных по формулам (1) - (3).

Пятый раздел «Определение оптимальных режимных параметров при шлифовании труднообрабатываемых материалов различными способами». При шлифовании без электроэрозионных управляющих воздействий, имеющих целью поддержание 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 плоском шлифовании с постоянным усилием поджима заготовки к РПК на режимах: скорость детали (стола) $V_{ст}$, лимитированное усилие поджима заготовки к рабочей поверхности круга $P_{nлм}$. Используя закон $Q(\tau)$, найдем закон изменения текущей лимитированной фактической глубины шлифования $t_{\phi}(\tau)$, которая изменяется в результате ухудшения режущей способности РПК:

$$t_{\phi}(\tau) = \frac{Q(\tau)}{F(\tau)}, \quad (4)$$

где $F(\tau)$ – площадь обработанной поверхности на момент времени τ , мм².

При плоском врезном шлифовании с продольной подачей формула (4) принимает вид:

$$t_{\phi}(\tau) = \frac{L + 2l_{nep}}{1000V_{\phi}B \cdot L \cdot \tau_{disc}} Q(\tau), \quad (5)$$

где B , L – ширина и длина шлифуемой поверхности, мм; l_{nep} – величина перебега, мм; τ_{disc} – период дискретизации значений переменной фактической глубины шлифования, мин.

Задача оптимизации при шлифовании с электроэрозионными управляющими 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 её качестве. В этом случае максимальная производительность обработки достигается как режимами резания, обеспечивающими максимальную производительность обработки при удовлетворении заданных 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 обновления РПК за счет управляющих электроэрозионных воздействий.

В случае, когда в процессе шлифования явление 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. Для перевода наиболее выступающих зёрен из устойчивого состояния в неустойчивое достаточно удалить необходимый объем связки при средней силе тока электроэрозионных управляющих действий

$$I_{cp} = \frac{\frac{d_{ш} D_k B_k}{3} \left(1 - \frac{P_v K}{100} \right)}{\tau_{кр} c U_{sm}}$$

где $d_{ш}$ – диаметр модели зерна в форме шара, мм; P_v – объёмная доля алмазов в алмазоносном слое при 100%-ной относительной концентрации алмазов; K – относительная концентрация алмазов; $\tau_{кр}$ – время образования критических размеров контактных площадок на задних поверхностях зёрен в процессе шлифования; c – коэффициент, который учитывает влияние энергии импульса на интенсивность удаления продуктов засаливания; U_{sm} – расчетная величина электрического напряжения в дуге разряда, В.

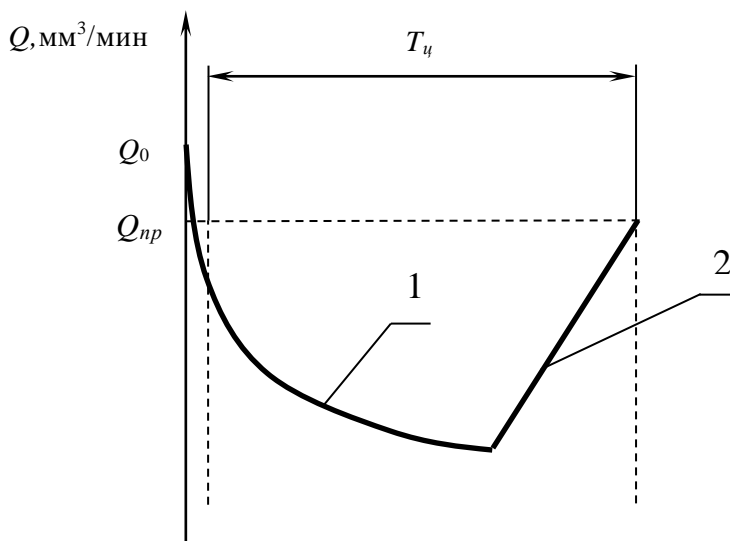
Если в ухудшении режущей способности РПК преобладают процессы засаливания, среднее значение силы тока непрерывных электроэрозионных управляющих воздействий

$$I_{cp} = \frac{10^{-3} \cdot (-x_0 \ln 0,05)^{\frac{1}{m}} \cdot \pi D_k B_k \left(1 - \frac{P_v}{2} \cdot \frac{K}{100}\right)}{\tau_3 c U_{sm}},$$

где x_0 , m – параметры закона Вейбулла, который описывает распределение зерен по высоте в условиях стабилизации рельефа РПК; D_k , B_k – соответственно диаметр и высота шлифовального круга, мм; 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 заготовки на максимальных для используемого источника технологического тока режимах. В этом случае цикл состоит из периодов «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» (рисунок 7), а шлифование с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК представляет собой чередование таких циклов.

Шлифование без электроэрозионных воздействий на РПК на протяжении $\tau = T$ приводит к снижению режущей способности от величины Q_0 после правки до установившейся величины $Q_{уст}$, обусловленной износом зерен и засаливанием межзеренного пространства. За время $\tau_{ЭЭВ}$ режущая способность РПК может быть повышена до уровня $Q_{пр}$, 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 $\tau_{ЭЭВ}$, а также величины $\tau_{пр}$, при которых удельная себестоимость цикла шлифования была бы минимальной.



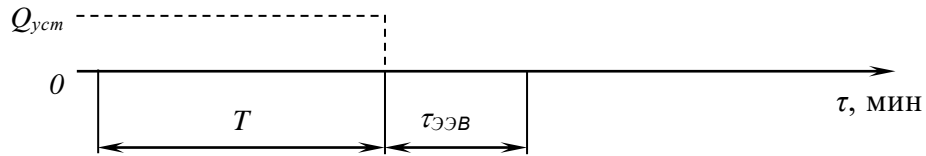


Рисунок 7. Периоды, составляющие цикл «шлифование без ЭЭВ (1) – шлифование с ЭЭВ (2)»

Средняя сила тока непрерывных электроэрозионных воздействий находится из условия равенства энергий в процессе периодических и непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК (пат. Украины № 97680):

$$I_{ср\ n} = I_{ср\ n} \frac{\tau_{\text{ЭЭВ}}}{T + \tau_{\text{ЭЭВ}}},$$

$I_{ср\ n}$ – среднее значение тока периодических воздействий (ограничено техническими возможностями источника технологического тока), А; T – время периода шлифования без ЭЭВ, мин; $\tau_{\text{ЭЭВ}}$ – время периода восстановления режущих свойств РПК при периодических ЭЭВ, мин.

Оптимальная длительность периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» определяется по критерию минимальной удельной себестоимости обработки, представляющей собой отношение себестоимости шлифования за время цикла $T_{ц}$ к объему материала V_m , удаленного с поверхности заготовки за это же время:

$$C_{уд}(T_{ц}) = \frac{C_{шл}(T_{ц})}{V_m(T_{ц})}.$$

Поиск минимума удельной технологической себестоимости шлифования выполняется 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 осуществляется 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

$$C_{удц}(\tau_{np}, T) = \frac{C_{ц}(\tau_{np}, T)}{V_{мц}(\tau_{np}, T)} \rightarrow \min,$$

где $C_{ц}(\tau_{np}, T)$ – технологическая себестоимость цикла, руб; $V_{мц}(\tau_{np}, T)$ – объем удаленного материала за цикл обработки, мм³.

Рассмотрим алгоритм оптимизации удельной себестоимости обработки, в котором учитывается как зависимость ТЛРСШК от состояния РПК в различные периоды времени обработки, так и закон изменения

расхода алмазов в процессе восстановления режущих свойств электроэрозионными воздействиями на РПК.

В системе координат $Q O \tau$ снижение режущей способности при шлифовании без электроэрозионных воздействий описывается уравнением

$$Q = Q_{уст} + \Delta Q \exp(\beta_Q (\tau - \tau_{исх}))$$

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, имеет вид уравнения прямой:

$$Q_2 = K_Q \tau,$$

где K_Q – угловой коэффициент.

Аналогично, уравнение, описывающее расход алмазов, имеет вид:

$$M = M_{уст} + \Delta M \exp(\beta_M (\tau - \tau_{исх}))$$

где $\Delta M = (M_{исх} - M_{уст})$ – амплитуда снижения расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ, карат³/мин; M , $M_{уст}$, $M_{исх}$ – значения текущего, установившегося и исходного расхода алмазов, карат³/мин; β_M – эмпирический коэффициент, мин⁻¹; $\tau_{исх}$ – момент времени, при котором экспериментально определялась $M_{исх}$, ($\tau_{исх} \approx 1$ мин).

Уравнение, описывающее расход алмазов при восстановлении режущих свойств РПК, имеет вид уравнения прямой:

$$M_4 = K_M \cdot \tau,$$

где K_M – угловой коэффициент.

Влияние оптимизируемых параметров τ_{np} , T на удельную технологическую себестоимость цикла обработки описывается выражением:

$$C_{y\partial\Omega}(\tau_{np}, T) = \frac{(Z_{ом} + A_m + P_{Тм})(T + \tau_{эв}(\tau_{np}, T)) + \mathcal{E}_{шл}(T) + I_{шл}(\tau_{np}, T) + \mathcal{E}_{шл+эв}(\tau_{np}, T) + I_{шл+эв}(\tau_{np}, T)}{Q_{уст} T - \frac{\Delta Q}{\beta_Q} (\exp(\beta_Q (\tau_{np} - \tau_{исх})) - \exp(\beta_Q (T + \tau_{np} - \tau_{исх})))} + (K_Q T - Q_T) \frac{1}{K_Q} (Q_{np} - Q_T) + \frac{(Q_{np} - Q_T)^2}{2K_Q} \quad (5)$$

где $Z_{ом}$ – заработная плата шлифовщика за минуту, руб/мин; A_m – амортизация производственного оборудования за минуту, руб/мин; $P_{тм}$ – затраты на текущий ремонт и содержание оборудования за минуту, руб/мин; $\mathcal{E}_{шл}(T)$ – затраты на технологическую электроэнергию в период шлифования без ЭЭВ за минуту, руб/мин; $I_{шл}(\tau_{np}, T)$ – затраты на расход алмазов при шлифовании без ЭЭВ за минуту, руб/мин; $\mathcal{E}_{шл+эв}(\tau_{np}, T)$ – затраты на

технологическую электроэнергию во время периодических электроэрозионных воздействий на РПК за минуту, руб/мин; $I_{шл+ээв}(\tau_{пр}, T)$ – затраты на расход алмазов при шлифовании с одновременными ЭЭВ за минуту, руб/мин.

Оптимальные значения параметров T и $\tau_{пр}$ находятся по минимуму целевой функции (5).

Шестой раздел «Определение режимов шлифования инструментальных ванадиевых сталей, твердых сплавов и титановых сплавов». При расчете высотных параметров шероховатости по методике, базирующейся на преобладании геометрического фактора в формировании неровностей шлифованной поверхности, экспериментальные проверки результатов расчета при шлифовании сталей X12Ф4М и Р6М5Ф3 алмазными кругами АС6 100/89-4-М2-01, АС6 160/125-4-М2-01 позволили установить, что расчетные значения высотных параметров шероховатости попадают в 95% - ный доверительный интервал на средние величины параметров, определенных 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 коэффициента K_m для других материалов.

Скорость детали, обеспечивающая заданный высотный параметр шероховатости R_a при плоском врезном шлифовании стали Р6М5Ф3, приведена в таблице 1. Расчёты выполнены при скорости шлифовального круга $V_k = 35$ м/с, фактической глубине шлифования $t_{ф} = 0,015$ мм, интервале расчета $\Delta R = 0,2$ мкм, радиусе шлифовального круга $R_k = 125$ мм.

В таблице 1 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.

Таблица 1. Скорость детали, обеспечивающая заданные параметры шероховатости R_a при плоском врезном шлифовании стали Р6М5Ф3

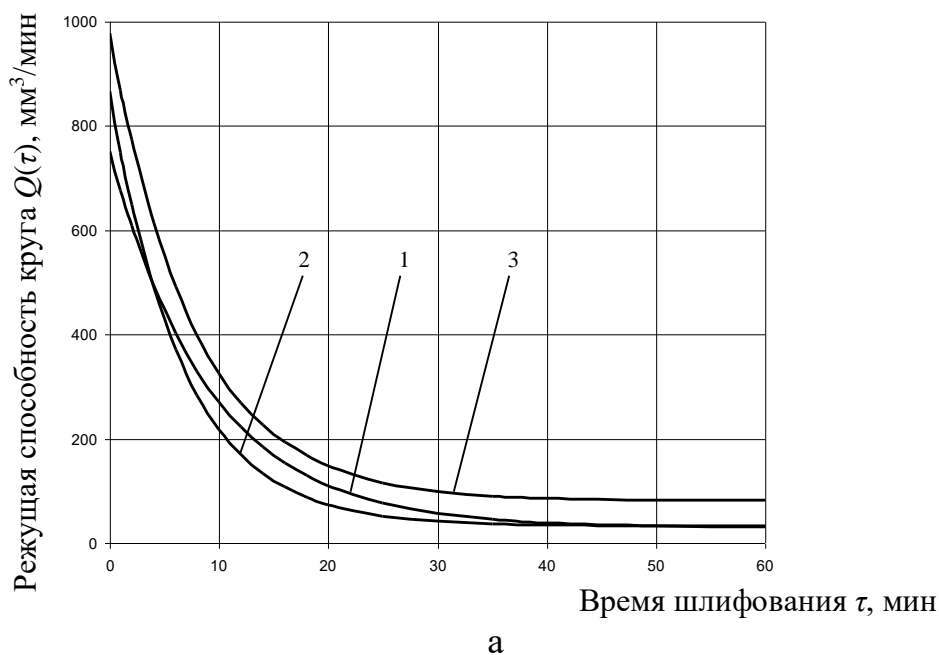
Характеристика шлифовального круга	Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Базовая длина $l_{баз}$, мм	Скорость детали V_d , м/мин
АС6 100/80-4-М2-01	0,40	0,8	6
АС6 160/125-4-М2-01	0,54		
АС6 200/160-4-М2-01	0,57		

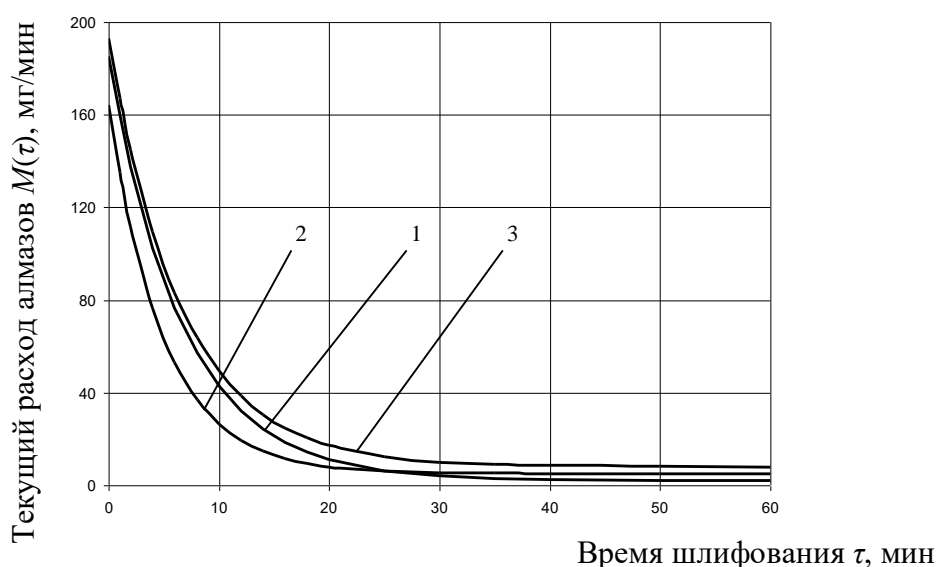
Лимитированное значение силы поджима заготовки к РПК при обработке ванадиевых инструментальных сталей определяем как наименьшее значение радиальных составляющих силы резания, ограниченных температурой фазово-структурных превращений в поверхностном слое обработанной поверхности заготовки, температурой окисления алмазов и механической прочностью алмазных зерен (таблица 2).

Таблица 2. Допустимые значения составляющих силы резания при плоском врезном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5Ф3 кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 различной зернистости

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	42,8	79,2	45,3	85,4	44,0	81,2
Температура окисления алмазных зёрен	33,7	108,7	32,6	110,4	52,5	181,1
Механическая прочность алмазных зёрен	127,9	412,4	150,8	502,7	95,9	330,7

Очевидно, что лимитирующим техническим ограничением является температура начала фазово-структурных изменений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. Таким образом, обобщенными режимами плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК будет скорость детали $V_d = 6$ м/мин и силы поджима заготовки, приведенные в таблице 2. С использованием указанных режимов определены законы изменения текущей лимитированной режущей способности алмазных шлифовальных кругов и текущего расхода алмазов для кругов различной зернистости (рисунок 8).





б

Рисунок 8. Изменение текущей лимитированной режущей способности круга (а) и текущего расхода алмазов (б) при плоском врезном шлифовании заготовки из стали Р6М5Ф3 с постоянным усилием поджима:

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.

В соответствии с полученным экспериментально законом изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга по формуле (5) определяется закон изменения текущей лимитированной фактической глубины шлифования (ТЛФГШ) t_{ϕ} при обработке без ЭЭВ заготовок из стали Р6М5Ф3 с размерами обработанной поверхности 15×150 мм (таблица 3), с использованием которого при обработке на плоскошлифовальном станке назначается переменная глубина шлифования.

Таблица 3. Изменение текущей лимитированной фактической глубины шлифования t_{ϕ} в процессе обработки заготовки из стали Р6М5Ф3 размером 15×100 мм ($V_{\kappa} = 35$ м/с; $V_{cm} = 6$ м/мин, $l_{nep} = 10$ мм)

Характеристика шлифовального круга	Уравнение, описывающее изменение ТЛФГШ во времени $t_{\phi}(\tau)$, мм
АС6 100/80-4-М2-01	$t_{\phi}(\tau) = 1,3 \cdot 10^{-5} (30 + 721 e^{-0,11 \tau})$
АС6 160/125-4-М2-01	$t_{\phi}(\tau) = 1,3 \cdot 10^{-5} (32 + 834 e^{-0,15 \cdot \tau})$
АС6 200/160-4-М2-01	$t_{\phi}(\tau) = 1,3 \cdot 10^{-5} (81 + 897 e^{-0,13 \cdot \tau})$

Закономерности изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга и изменения текущего расхода алмазов в процессе плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 с периодическими ЭЭВ находили на следующих режимах: $V_{\kappa} = 35$ м/с, $V_{cm} = 6$ м/мин, сила поджима образца к РПК $P_n = 80$ Н. Периодические электроэрозионные воздействия на РПК с целью восстановления режущей способности круга

выполняли с величиной среднего тока $I = 10$ А, при напряжении холостого тока $U_{xx} = 60$ В.

Расчет оптимальных значений периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» выполняли на ПЭВМ по критерию минимальной удельной себестоимости по специально разработанной программе.

Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, $\tau_{пр}$, и длительности периода шлифования без ЭЭВ T на удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01 приведено на рисунке 9.

Аналогичные оптимизационные процедуры были выполнены для кругов АС6 160/125-4-М2-01 и АС6 200/160-4-М2-01.

В результате проведения оптимизации найдены оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» для обработки стали Р6М5Ф3 (таблица 4).

С использованием данных таблицы 4 были рассчитаны средние значения силы тока непрерывных электроэрозионных воздействий на РПК, осуществляемых одновременно со шлифованием. На полученных режимах было выполнено шлифование стали Р6М5Ф3 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК с целью определения закона изменения ТЛРСШК.

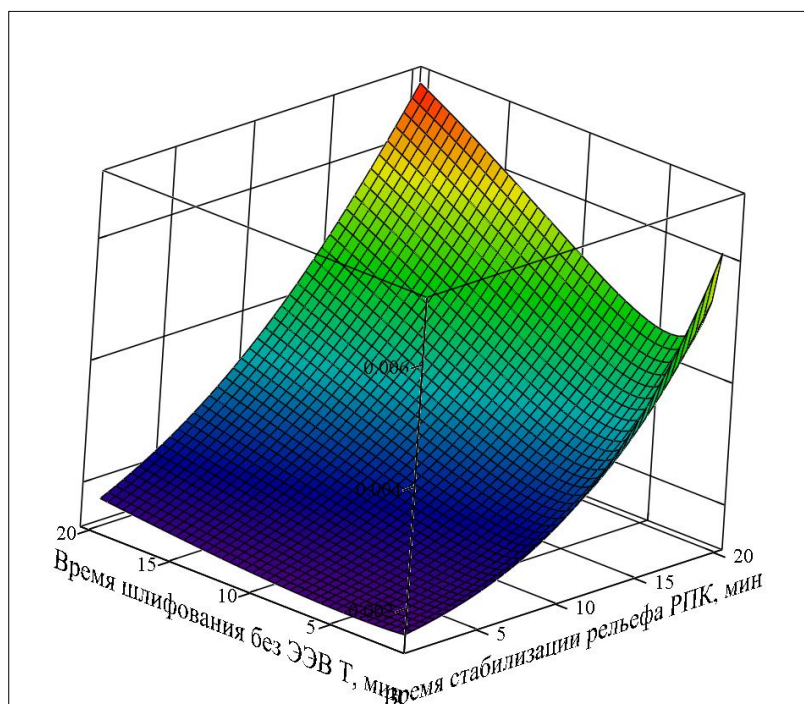


Рисунок 9. Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, $\tau_{пр}$, и длительности периода шлифования без ЭЭВ T на удельную себестоимость плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01

Таблица 4. 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

Проведенные исследования позволили определить технико-экономические показатели алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 различными способами. Установлено, что для всех исследованных зернистостей алмазных кругов минимальную удельную себестоимость обработки обеспечивает шлифование с периодическими ЭЭВ.

Аналогичные исследования и оптимизационные процедуры были проведены для плоского врезного шлифования заготовок из твердых сплавов марок ВК6, ВК8, ВК15 и заготовок из титанового сплава ВТ14.

Для исследованных зернистостей алмазных кругов минимальную удельную себестоимость обработки твердого сплава ВК8 обеспечивает шлифование с периодическими ЭЭВ, а осуществление периодических электроэрозионных воздействий для поддержания высокой режущей способности алмазных кругов при обработке титанового сплава ВТ14 экономически необоснованно.

Седьмой раздел «Влияние обрабатываемых материалов на выходные показатели процесса шлифования. Внедрение результатов исследований». Удельная себестоимость шлифования алмазными шлифовальными кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей при обработке труднообрабатываемых материалов приведена в таблице 5.

Таблица 5. Влияние обрабатываемых материалов на удельную себестоимость шлифования алмазными шлифовальными кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей с периодическими ЭЭВ на РПК

Обрабатываемый материал	Удельная себестоимость шлифования, 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 таблицы 5 видно, что удельная себестоимость шлифования твердого сплава ВК8 для различных зернистостей в 2 - 2,5 раза превышает удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

Перенос полученных при обработке по схеме с фиксированной силой поджима заготовки к кругу закономерностей изменения ТЛФГШ $t_{\phi} = f(\tau)$ на схему обработки с фиксированными режимами осуществляется с использованием формулы (5) (Пат. Украины № 51396).

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 (рисунок 10). Период дискретизации рекомендуется выбирать кратным машинному времени, необходимому для выполнения шлифовальной операции. Минимальное значение периода дискретизации при плоском шлифовании равно времени одного продольного хода стола станка.

С целью совершенствования описанного способа определения режимов шлифования, в котором для поиска оптимальных режимов используется шлифование неподвижного образца по схеме с фиксированной силой его поджима к кругу, является использование в качестве основного технического ограничения на режимы шлифования скорости погружения поверхности обрабатываемого образца в РПК, причем указанная скорость определяется при шлифовании образцовой детали на оптимальных режимах по той же схеме.

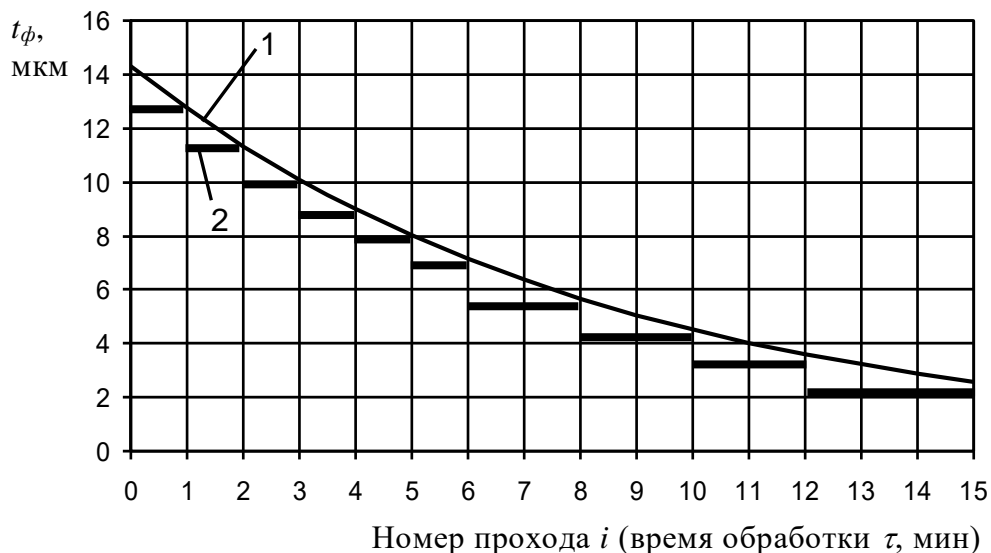


Рисунок 10. Изменение ТЛФГШ и подачи на врезание на каждый проход при обработке образца из стали Р6М5Ф3 без ЭЭВ:

- 1 – изменение фактической глубины шлифования $t_{\phi} = f(\tau)$,
- 2 – подача на врезание для i -го прохода

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 с фиксированной силой поджима, мм/мин; τ – время непрерывного шлифования по схеме с фиксированной силой поджима, с; а скорость стола станка, м/мин, задается в соответствии с соотношением:

$$V_{\text{н\o}} = \frac{60(B + B_{\text{с}})}{1000 \cdot \tau},$$

где B – размер обрабатываемой детали в направлении вектора скорости резания, мм; $B_{\text{с}}$ – ширина алмазоносного слоя на шлифовальном круге, мм (Пат. Украины № 61437).

Разработанные в диссертационной работе рекомендации по назначению подачи на врезание при шлифовании деталей из легированных сталей, твердых и титановых сплавов, методики определения рациональных режимов резания при алмазно-абразивной обработке указанных материалов, а также конструкции устройств для восстановления режущей способности шлифовальных и заточных кругов электроэрозионным способом переданы для внедрения на предприятия и проектные организации Донецкой Народной Республики, Российской Федерации и Украины: Озеряновский машиностроительный завод «Технология», Донецкий завод деревообрабатывающего инструмента, Государственное предприятие «Проектно-конструкторский технологический институт», ООО «Торпласт».

Методики определения оптимальных и рациональных режимных параметров шлифования и выбора обобщенных показателей процесса обработки используются в учебном процессе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

ВЫВОДЫ

1. Решена важная 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 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.

2. 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.

3. 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 глубины шлифования соответствует определяемому при врезном шлифовании изменению текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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».

8. При определении напряжений сдвига в температурно-скоростных условиях шлифования конструкционных и инструментальных сталей, а также титановых сплавов, 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 АС6 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», Донецкий завод деревообрабатывающего инструмента, Государственное предприятие «Проектно-конструкторский технологический институт», ООО «Горпласт» 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, Российской Федерации и Украины составляет 480 000 рублей РФ.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК, профессиональных рецензируемых изданиях

1. Матюха, П.Г. Режущая способность рабочей поверхности круга как ограничивающий параметр производительности шлифования / П.Г. Матюха, **В.В. Полтавец** // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2003. – Вып. 13. – С. 159-164.
2. 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.
3. **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.
4. 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.
5. 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.
6. **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.
7. Матюха, П.Г. Определение оптимального интервала между электроэрозионными 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.

8. Матюха, П.Г. Определение оптимальных режимов при шлифовании твердых сплавов / П.Г. Матюха, В.Б. Стрелков, **В.В. Полтавец** // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2006. – Вып.19. – С. 50-57.

9. **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. Випуск 5 (139). – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – С. 68-74.

10. **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. Випуск 6 (154). – Донецьк: ДонНТУ, 2009.– С. 79-86.

11. Матюха, П.Г. Розрахунок режимів шліфування з використанням миттєвої поточної різальної здатності круга / П.Г. Матюха, **В.В. Полтавец**, В.В. Габітов / Резание и инструмент в технологических системах: междунар. научно-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – Вып.78. – С.123-140.

12. Матюха, П.Г. Обобщенные режимы процесса шлифования, обеспечивающие стабильные показатели качества / П.Г. Матюха, **В.В. Полтавец** // Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. Випуск 7 (166). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010.– С. 39-45.

13. **Полтавец, В.В.** Управление режущей способностью шлифовальных кругов на основе кубического нитрида бора / **В.В. Полтавец** // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. – Вып. 26. – С. 306-311.

14. **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.

15. **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.

16. **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. – Вып. 9 (205). – С. 56-63.

17. **Полтавец, В.В.** Определение средней высоты неровностей профиля

обработанной поверхности при алмазном шлифовании титановых сплавов / **В.В. Полтавец**, П.Г. Матюха // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вип. 30. – С. 222-228.

18. **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. – Вип. 1 (190)'2013. – С. 81-91.

19. **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.

20. 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.

Работы, опубликованные в материалах конференций

21. **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. унта, 2018. – С. 353-360.

22. **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 научно-практ. заочная конференция с международным участием (г. Ульяновск, 25 ноября 2018 г.): сборник научных трудов / Отв. ред. проф. Н.И. Веткасов. – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – С. 50-56.

Другие работы

23. Спосіб шліфування. Деклараційний патент України на винахід № 51396 А В23В 1/00. Автори: Матюха П.Г., **Полтавец В.В.**, Стрелков В.Б. Опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11.

24. Спосіб шліфування. Деклараційний патент України на винахід № 61437 А В24В1/00. Автори: Матюха П.Г., Гриньов А.О., **Полтавец В.В.** Опубл. 17.11.2003, Бюл. № 11.

25. Спосіб шліфування. Патент України № 97680 С2 МПК, В24В 7/00, В24В 53/00, В223Н 5/00. Автори: Матюха П.Г., **Полтавец В.В.**, Стрелков В.Б., Габітов В.В., Бурдін О.В. Опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5.

