

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

БЕЗЗУБЕНКО НИКОЛАЙ КИРИЛЛОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ  
ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ  
ЭНЕРГИИ В ФОРМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

Специальность 05 03 01

Процессы механической обработки,  
станки и инструмент

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени доктора технических наук



ХАРЬКОВ 1995

21.7

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00761272 (P)

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

БЕЗЗУБЕНКО НИКОЛАЙ КИРИЛЛОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ  
ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В ЗОНУ ОБРАБОТКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ  
ЭНЕРГИИ В ФОРМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

Специальность 05 03 01

Процессы механической обработки,  
станки и инструмент

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени доктора технических наук

ХАРЬКОВ 1995

АВ 33.093

Работа выполнена в проблемной лаборатории "Физика процессов резания инструментами из сверхтвёрдых материалов им.М.Ф.Семко" при кафедре "Резание материалов и режущие инструменты" Харьковского государственного политехнического университета.

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки и техники Украины, Лауреат государственной премии Украины, доктор технических наук, профессор Александр Васильевич Якимов

Доктор технических наук, профессор Якубов Февзи Якубович

Доктор технических наук, профессор Невлюдов Игорь Шакирович

Ведущее предприятие НПК ФЭД, г.Харьков.

Защита состоится "2" 11 1995г. на заседании специализированного ученого совета Д 02.09.01 в Харьковском государственном политехническом университете по адресу 310002, г.Харьков, 2, ул.Фрунзе, 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "3" 10 1995г.

Ученый секретарь специализированного совета, доктор технических наук, профессор

Узунян М. Д.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

### Актуальность работы

Постоянно растущие требования повышения производительности и качества обработанных изделий, в том числе на окончательных операциях шлифования труднообрабатываемых материалов, вызывают необходимость поиска новых процессов и технологий, в первую очередь, на базе использования износостойких сверхтвердых инструментов, обладающих уникальными режущими свойствами. Это обеспечивает возможность обработки новых конструкционных и инструментальных материалов, имеющих повышенные показатели по ряду физико-механических свойств.

На операциях шлифования для этих целей используют алмазные круги на прочной износостойкой металлической связке. Однако эффективность такой обработки, как правило, невысока из-за большой трудоемкости при восстановлении режущих свойств инструментов после затупления.

Работы по созданию специальных связок, обеспечивающих самозатачивание инструмента, позволили частично решить этот вопрос. При этом, с одной стороны, увеличивалась номенклатура связок, а с другой – снижалась износостойкость шлифовального круга, работающего в режиме самозатачивания, т.е. повышенного износа, так как было нарушено основное требование к инструменту: возможно более прочное удержание связкой режущих зерен.

В связи с этим идея введения дополнительной энергии в зону обработки с целью обеспечения высокой режущей способности, повышения стойкости инструмента и интенсификации процесса шлифования оказалась своевременной и результативной. В данном случае решается проблема обработки ряда труднообрабатываемых материалов, расширяется область применения сверхтвердых инструментов и одновременно создаются условия получения изделий высокого качества. Кроме того, в связи с высокой стойкостью шлифовальных кругов появляются предпосылки автоматизации этих технологических процессов.

Однако практическая реализация методов с введением в зону обработки дополнительной энергии столкнулась с рядом задач и принципиальных проблем. Назрела необходимость разработки научных основ алмазно-искрового шлифования с целью повышения технологической и экономической эффективности этого перспективного метода обработки, что является важной научно-технической проблемой, имеющей народнохозяйственное значение для машиностроительного, инструментального и станкостроительного производств Украины.

Цель работы состоит в повышении технологической и экономической эффективности процессов шлифования конструкционных и инструментальных материалов кругами со сверхтвердыми режущими зёрнами на металлических связках, увеличении режущей способности инструмента и его стойкости за счет разработки процессов резания и технологий, основанных на новой идее интенсификации процесса шлифования.

Для достижения поставленной цели обеспечения высоких показателей производительности, качества обработки и стойкости инструментов при шлифовании решены следующие теоретические и практические задачи:

- установлена физическая основа процессов и явлений в зоне обработки при действии электрических разрядов, выявлены основные закономерности и положительные особенности предложенного метода шлифования;
- даны теоретические обоснования условий работы инструментов в процессе обработки;
- разработаны модели процесса шлифования при введении дополнительной энергии в зону обработки;
- намечены перспективные пути совершенствования процесса алмазно-искровой обработки и на этой основе предложены новые технологии;
- разработаны и внедрены в производство специальные шлифовальные станки для реализации нового процесса.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены на основе глубокого использования положений теории резания материалов и технологии машиностроения, теории теплопроводности, упругости, сопротивления материалов, методов физики твердого тела и материаловедения.

Постановка задач исследования, обработка результатов лабораторного и промышленного эксперимента проведены с широким использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Лабораторные и промышленные экспериментальные исследования выполнены на разработанных автором специальных установках, а также на первых образцах специальных алмазно-шлифовальных станков, оснащенных широкодиапазонными генераторами импульсов. Методика экспериментальных исследований включала в себя изучение действия единичного электрического разряда на металл, действия разряда на образованную стружку, исследование работы единичного зёрна и круга

с измерением сил резания, тензометрированием, осциллографированием, а также с использованием рентгеноструктурных дифрактометров, электронных микроскопов, металлографических и инструментальных микроскопов. Обработка результатов исследования, машинный эксперимент и моделирование выполнены на ЭВМ.

Научная новизна исследования состоит в том, что теоретически обоснована и экспериментально подтверждена высокая эффективность впервые в мировой практике разработанного процесса алмазного шлифования с введением в зону обработки дополнительной энергии электрических разрядов (авторское свидетельство 494130). Основные научные положения, составляющие фундамент нового метода алмазно-искровой обработки, заключаются в том, что

- выявлены возможности полного использования высоких режущих и физико-механических свойств алмазов, как инструментального материала, работы инструмента без контакта связки с обрабатываемым металлом, длительного сохранения режущих свойств инструмента при увеличении режущей способности и стабильного поддержания этих свойств в процессе работы, улучшения условий работы шлифовальных кругов;

- решена задача контактного взаимодействия рельефа круга с обрабатываемым материалом, что послужило основой для разработки нового подхода к расчету шероховатости шлифуемой поверхности;

- установлены закономерности комбинированного шлифования, как механо-электрофизической системы, и вскрыты особенности действия электрических разрядов в условиях перемикания межэлектродного промежутка срезаемой микростружкой, что послужило основой выбора источников дополнительной энергии;

- обосновано научное положение о возможности снижения теплового воздействия на обрабатываемую поверхность в условиях проявления дополнительной энергии в зоне шлифования за счет повышения "остроты" рельефа инструмента и снижения сил резания и потерь на трение, на основе которого разработана теория контактного взаимодействия обрабатываемого материала с инструментом, рельеф которого сформирован электроразрядами;

- создана модель режущей поверхности алмазного инструмента, позволяющая устанавливать основные характеристики и параметры обработки, на этой основе разработана имитационная модель процесса шлифования, в соответствии с которой определены основные технологические показатели в зависимости от характеристики круга и усло-

вий шлифования;

- разработан принципиально новый процесс шлифования с увеличенными длинами среза, основой которого является скорость изделия, соизмеримая со скоростью шлифовального круга, что повышает стабильность процесса и улучшает качество обработанной поверхности.

Названные научные положения явились основой для оптимизации структуры и параметров гаммы новых алмазно-искровых шлифовальных станков, реализующих процесс обработки с введением дополнительной энергии.

Автор защищает:

- новый процесс алмазного шлифования, основанный на введении в зону обработки энергии электрических разрядов, положения о возможности работы шлифовального круга без затупления и без контакта связки с обрабатываемым материалом при условии действия в зоне обработки дополнительной энергии;

- научные основы контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом при шлифовании в условиях действия электрических разрядов (электроэрозии);

- новое положение об использовании величины внедрения материала в межзеренное пространство в качестве параметра для оценки нагрузки на зерна, толщины среза, шероховатости поверхности резания и обработанной поверхности;

- имитационную модель процесса шлифования, пути повышения производительности на базе введения в зону шлифования дополнительной энергии, новые научные положения о целесообразности работы с увеличенными длинами срезов в алмазно-искровом режиме и реализацию этого положения в форме новых технологических процессов "двойного скоростного шлифования" со скоростью детали, близкой к скорости круга и с уменьшенной глубиной, и шлифования с увеличенной глубиной со съемом припуска за один проход при весьма малой скорости детали;

- принципы, заложенные при создании нового оборудования, разработанного для алмазно-искрового шлифования и научно-обоснованные рекомендации по выбору электрических и механических режимов алмазно-искровой обработки.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций обосновывается корректностью постановки задач и их решений, применением проверенных методов вычислений, обоснованными подходами при постановке эксперимента, использованием современных методов иссле-

ований, приборов и аппаратуры. Достоверность полученных данных подтверждается большим объемом сравнительных опытов, эффективным применением результатов исследований в практике шлифования на многих заводах и использованием их для создания нового оборудования, вошедшего в серию.

#### Практическая ценность работы.

Новый процесс алмазно-искрового шлифования дает возможность существенно (в 1,5...3 раз) повысить производительность при алмазном шлифовании деталей и заточке инструмента, в десятки раз увеличить стойкость шлифовального круга (производительность возрастает за счет создания рабочего рельефа с высокими режущими свойствами, качество поверхности улучшается в связи с формированием ее только алмазными зернами без участия вредных сил трения связки о материал). Существенно расширяется спектр материалов, эффективно обрабатываемых в алмазно-искровом режиме, снижается влияние физико-механических свойств на обрабатываемость. Решается задача шлифования труднообрабатываемых материалов. Расширяется перечень технологий, где алмазная обработка делается целесообразной.

Разработанные модели являются базой для системы автоматизированного проектирования технологии алмазно-искрового шлифования. В настоящее время такая работа выполняется по научной тематике Министерства образования Украины. Научно-технические рекомендации по назначению технологических параметров и режимов обработки и результаты научных исследований явились основой для создания новых технологий. Увеличивается область эффективного применения процессов алмазной обработки, расширяется перечень технологий алмазно-искрового шлифования за счет новых эффективных технологических вариантов, разработанных в результате исследований (двойное скоростное, глубинное, пошаговое шлифование).

Для практического применения алмазно-искрового шлифования разработаны методические рекомендации (РТМ):

- выбор характеристик кругов для алмазно-искрового шлифования;
- выбор связки для алмазных кругов, работающих в интенсифицированном режиме;
- назначение электрических параметров при алмазно-искровой обработке;
- расчет шероховатости обработанной поверхности;
- назначение наиболее выгодных режимов при заточке инструмента;
- назначение режимов при внутреннем шлифовании с увеличенными

скоростями изделия;

- режимы алмазно-искровой обработки при шлифовании с увеличенными припусками.

Стабильность процесса, высокая стойкость инструмента и простота управления электрическими режимами определяют целесообразность алмазно-искровых технологий для автоматизированного производства.

Алмазно-искровые шлифовальные головки могут встраиваться в гибкие модули с целью качественной обработки "острыми" кругами точных поверхностей изделий из различных материалов. Такая работа проводится совместно с ЛПИ, где разработан гибкий модуль.

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований явились основой для создания новых инструментов, источников дополнительной энергии и специальных алмазно-искровых станков, вошедших в серию.

Новые научные данные по алмазно-искровому шлифованию используются в учебном процессе на машиностроительном факультете в программах лекционных курсов и лабораторных работах.

Реализация результатов работы. Внедрение результатов исследований осуществлено в двух направлениях:

- внедрение процесса алмазно-искрового шлифования деталей и заточки инструмента;
- использование разработанных рекомендаций и технических заданий для создания специальных алмазно-искровых шлифовальных и точных станков и генераторов импульсов.

Внедрение алмазно-искрового шлифования осуществлено на заводах г. Харькова и области, на Полтавском заводе синтетических алмазов. Кроме этого, результаты внедрены ведущими организациями, принимавшими участие в комплексной тематике по исследованию нового процесса (ЭНИМС, г. Москва; ИСМ, г. Киев).

Разработка новых станков (по рекомендациям данных исследований) выполнена ЭНИМС совместно с ведущими станкостроительными заводами (гг. Жукачево, Саратов, Ереван, Витебск, Вильнюс и др.). Созданные алмазно-искровые станки (12 моделей) выпускаются серийно и в настоящее время эксплуатируются на многих машиностроительных и инструментальных предприятиях.

Разработаны специальные генераторы импульсов (ХПИ, ЭНИМС; генератор ИТТ вошел в серию на Кироваканском заводе).

В настоящее время подготовлена САПР алмазно-искровой обработ-

ки (по программе Министерства образования Украины), которая ориентирована на предприятия г. Харькова и Украины.

Общий экономический эффект только от выпуска заточных станков на Украине (г. Мукачево) составил 1,5 млн. рублей (в ценах 1987 г.).

Апробация работы. Предложенные разработки и идеи интенсификации процесса шлифования получили теоретическое и экспериментальное подтверждение. Исследования выполнялись по планам ГКНТ СССР в течение ряда лет отраслевой и проблемной лабораторией ХПИ. Итоги работ докладывались автором ежегодно на научно-техническом совете отраслевого института Минстанкопрома СССР - ВНИИАЛМАЗ.

Результаты исследований докладывались автором на научно-техническом совете Минвуза СССР и на коллегии Минвуза Украины. Разработками этого направления занимались: отраслевой институт Минстанкопрома - ЭНИМС, Институт сверхтвердых материалов (г. Киев, Украина).

С участием автора разработаны и серийно выпускаются специальные алмазно-искровые шлифовальные станки. Результаты работы экспонировались на выставке достижений народного хозяйства, удостоены золотой, серебряной и бронзовой медалей, значков участника ВДНХ. Автор имеет звание "Изобретатель СССР". За выполнение разработки автор удостоен премии Минстанкопрома СССР.

Под руководством автора по данному направлению подготовлено 11 кандидатских диссертаций. В настоящее время исследование алмазно-искрового шлифования выполняется по тематике Министерства образования Украины, ГКНТ Украины (прикладные и фундаментальные исследования).

Основные положения и результаты работы доложены, обсуждены и одобрены на городских, республиканских, государственных и международных семинарах и конференциях:

Международная конференция "Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу", г. Киев, 1977 г.; Всесоюзная конференция "Прогрессивные технологические процессы в инструментальном производстве", г. Харьков, 1979 г.; Всесоюзная конференция "Прогрессивные методы абразивной и алмазной обработки в машиностроении", г. Полтава, 1979 г.; Всесоюзная конференция "Перспективы развития инструментальных материалов", г. Ворошиловград, 1980 г.; Всесоюзная научно-техническая конференция "Прогрессивные методы обработки труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках", г. Мариуполь, 1980 г.; Всесоюзная научно-техническая конференция "Про-

блемы использования алмазов в машиностроении", г.Москва, 1980 г.; Международный семинар "Сверхтвердые материалы", г.Киев, 1981 г.; 6-я Международная конференция "Инструмент", г.Мишкольц (ВНР), 1985 г.; Всесоюзная конференция "Новые сверхтвердые материалы и прогрессивные технологии их применения", г.Киев (г.Канев), 1985 г.; VII Международная конференция "Инструмент", г.Мишкольц (ВНР), 1989 г.; Международная конференция "Новые ресурсосберегающие технологии в машиностроении", пос.Рыбачье, Украина, 1992 г.; Украинская научно-практическая конференция "Проблемы подготовки кадров для работы в условиях рыночной экономики", г.Харьков, Украина, 1992; Международная научно-техническая конференция "Новые технологии в машиностроении", Крым, Рыбачье, 1994. Международная конференция "Компьютерные технологии в промышленности", Крым, Песчаное, 1994. Международная научно-техническая конференция "Проблемы и перспективы развития промышленной продукции", Львов, 1995. Международная конференция "Оснастка - 95", Киев, 1995. Международная научно-техническая конференция "Информационные технологии, наука, техника, технология, образование, здоровье", Украина - Венгрия; 1993 - 1995. Международный научно-технический семинар "Высокие технологии в машиностроении", Харьков, 1992 - 1995.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 115 статей, две монографии, получено 9 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и общий объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на страницах машинописного текста, содержит рисунков, таблиц и список литературы из наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В современном машиностроении в связи с повышенными требованиями к качеству изделий широкое распространение получили методы финишной обработки, в том числе алмазное шлифование.

Применение сверхтвердых материалов на операциях шлифования открыло новые возможности повышения производительности, стойкости инструмента и качества обработки.

Анализ работ по алмазному шлифованию материалов показал, что наиболее полно уникальные физико-механические и режущие свойства алмаза, как инструментального материала, используются при шлифо-

вании кругами на прочных металлических связках. Есть данные (работы Лолодзе Т.Н., Бакуля В.М., Журавлева В.В.), что в малопрочных органических связках используется только несколько процентов режущих свойств алмаза, а коэффициент шлифования такого круга на порядок меньше, чем при работе единичным зерном.

Поэтому увеличение прочности удержания зерен в круге за счет применения металлических связок в значительной мере способствует повышению работоспособности инструмента.

Инструменты на металлических связках обеспечивают более высокую производительность (в 2-3 раза выше, чем круги на других связках), обладают надежным удержанием зерен, хорошей теплопроводностью и имеют небольшой удельный износ при шлифовании.

Однако эффективность работы алмазных кругов на металлических связках существенно снижается из-за трудностей восстановления их режущих свойств при затуплении.

По мере износа зерен возрастает контактно-фрикционное воздействие связки на обрабатываемый материал, что приводит к появлению прижогов и микротрещин при обработке некоторых материалов (в том числе малотеплопроводных твердых сплавов). Это отмечается в работах Якимова А.В., Дорофеева В.Д., Мишнаевского Л.Л. Для устранения этого недостатка были выполнены работы по совершенствованию и созданию новых связок улучшенного состава.

В ИСМ и ВНИИАЛМАЗе разработана гамма специальных металлических связок для различных условий шлифования. Наполнители и добавки в их составе способствуют лучшей самозатачиваемости инструмента, снижению коэффициента трения и повышению адгезионной прочности удержания зерен. Однако это позволило только частично повысить эффективность работы алмазных кругов. Устранить технические противоречия в требованиях, предъявляемых к связкам алмазного инструмента (надежное удержание зерен и самозатачиваемость), оказалось невозможно.

Режущая способность инструмента может быть в определенной мере восстановлена правкой, однако из-за плохой обрабатываемости алмазно-металлической композиции существующие способы правки (абразивная, химическая, электрохимическая, электроэрозионная, правка пластическим деформированием, алмазной обточкой и др.) оказались малопродуктивными и недостаточно эффективными.

В связи с этим алмазный инструмент на металлических связках при весьма высокой возможной работоспособности получил ограниченное

применение.

Возникла проблема повышения эффективности алмазного шлифования на основе более полного использования потенциальных возможностей инструментов на металлических связках. Анализ основных путей ее решения показал, что это возможно при условии стабильного поддержания высокой режущей способности круга непосредственно в процессе работы, устранения контакта связки с обрабатываемым материалом и максимального повышения прочности удержания зерен в связке.

Была выдвинута принципиально новая идея введения в зону резания дополнительной энергии с целью обеспечения высокой режущей способности инструмента и повышения эффективности шлифования.

На основании анализа комбинированных процессов шлифования (электроалмазное, алмазно-катодное, ультразвуковое) и электрофизических методов правки инструмента установлено, что из основных видов энергии (электрическая, электрохимическая, ультразвуковая, тепловая, плазменная, лазерная и др.) для алмазного шлифования в качестве дополнительной энергии целесообразно применять электрическую. При этом следует учитывать ее доступность и возможность простого подвода в зону обработки.

Некоторые виды комбинированных процессов, создаваемых на основе введения энергии в зону шлифования электрической энергии, представлены на рис. 1. Анализ этих данных позволил наметить пути прогнозирования и разработки новых видов обработки. На этой основе создан новый прогрессивный процесс - алмазно-искровое шлифование (а.с. 494130).

Новый способ шлифования основан на введении в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов. В зоне обработки совмещаются механические и электрофизические процессы; сочетание носит синергистический характер, т.е. общий эффект превышает сумму отдельно взятых эффектов.

Дополнительная энергия подается от высокочастотных импульсных генераторов, шлифование осуществляется токопроводящими алмазными кругами в среде диэлектриков или слабых растворов электролитов, (например,  $\text{CO}_2$ ). Электрические разряды возникают между связкой круга и обрабатываемым металлом (стружкой). Разряды устраняют связку из межзеренного пространства, обеспечивают выступание зерен, очищают инструмент от наростов и налипов. Инструмент приобретает развитый рабочий рельеф и высокую режущую способность, стабильно

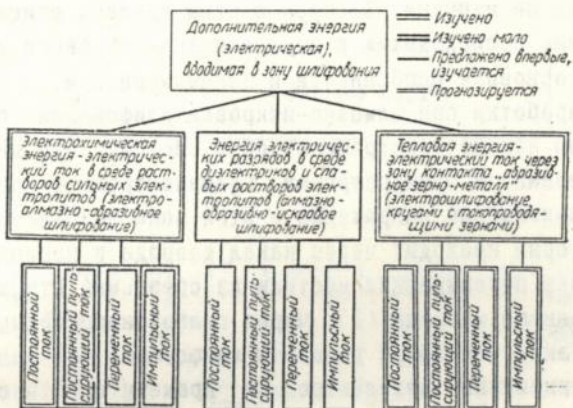


Рис. 1. Комбинированные процессы с введением в зону шлифования электрической энергии

поддерживаемую в течение длительного времени.

Под действием разрядов изменяются физико-механические свойства поверхностных слоев обрабатываемого материала.

В итоге обеспечивается высокая режущая способность инструмента, облегчается процесс микрорезания и улучшаются основные показатели процесса шлифования.

Анализ работ по алмазному шлифованию показал, что процесс взаимодействия инструмента с обрабатываемым металлом в условиях действия разрядов исследован мало, а зона комбинированной обработки совершенно не изучена. В связи с этим сделано описание процессов и явлений, происходящих в зоне алмазно-искрового шлифования, и установлены основные особенности и закономерности.

Зона обработки при алмазно-искровом шлифовании представляет собой сложную механо-электрофизическую систему. Она является местом микрорезания и электроэрозии (межэлектродным промежутком), рис.2. При приложении напряжения в этой зоне возникает электрический ток, который проходит через канал разряда в период его действия (1), через перемыкающие мостики из срезаемой стружки и частиц диспергированного металла (2), через слабопроводящую жидкость - СОЖ (3). Таким образом, в условиях шлифования ток разряда шунтируется перемыкающими межэлектродный промежуток токопроводящими элементами.

В зоне обработки осуществляется стружкообразование и действуют электрические разряды. При этом происходят сложные процессы: контактно-фрикционные, термические, электролитические, гидродинамические и плазмохимические; имеют место высокочастотные колебания и кавитация.

Размер зоны обработки определяется шириной фронта работы инструмента -  $B$ , длиной дуги контакта инструмента с изделием -  $L_k$ , величиной врезания зерен в металл -  $H_b$  и межэлектродным зазором -  $Z$  (между связкой круга и поверхностью резания), рис.3. В зоне алмазно-искрового шлифования действуют электрические разряды, возникающие при пробое межэлектродной среды между стружкой и связкой, разряды, инициируемые взрывной электроэрозией перемыкающих элементов, а также разряды, связанные с разрывом электроцепи при скольжении стружки по связке и в местах отрыва ее от обрабатываемого материала при оканчивании микрорезания.

Установлено, что зона обработки может характеризоваться либо гарантированным зазором между связкой круга и обрабатываемым ма-

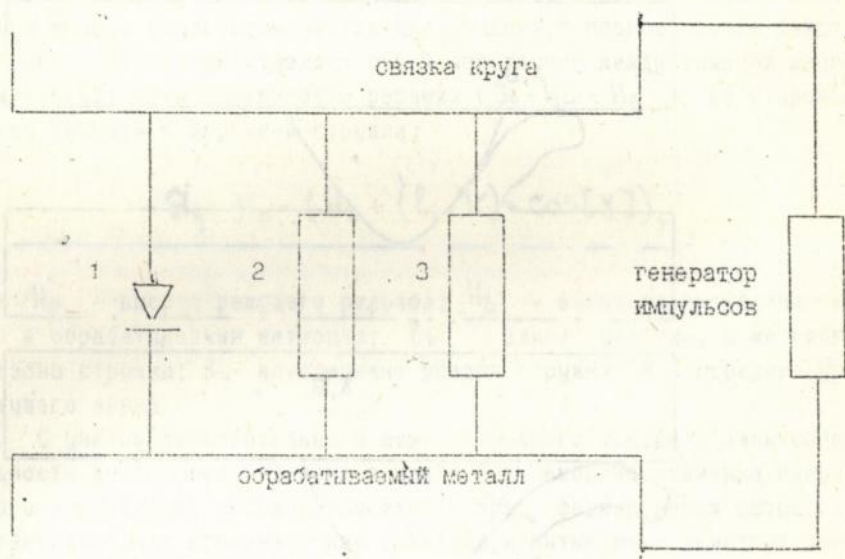


Рис. 2. Зона обработки как межэлектродный промежуток

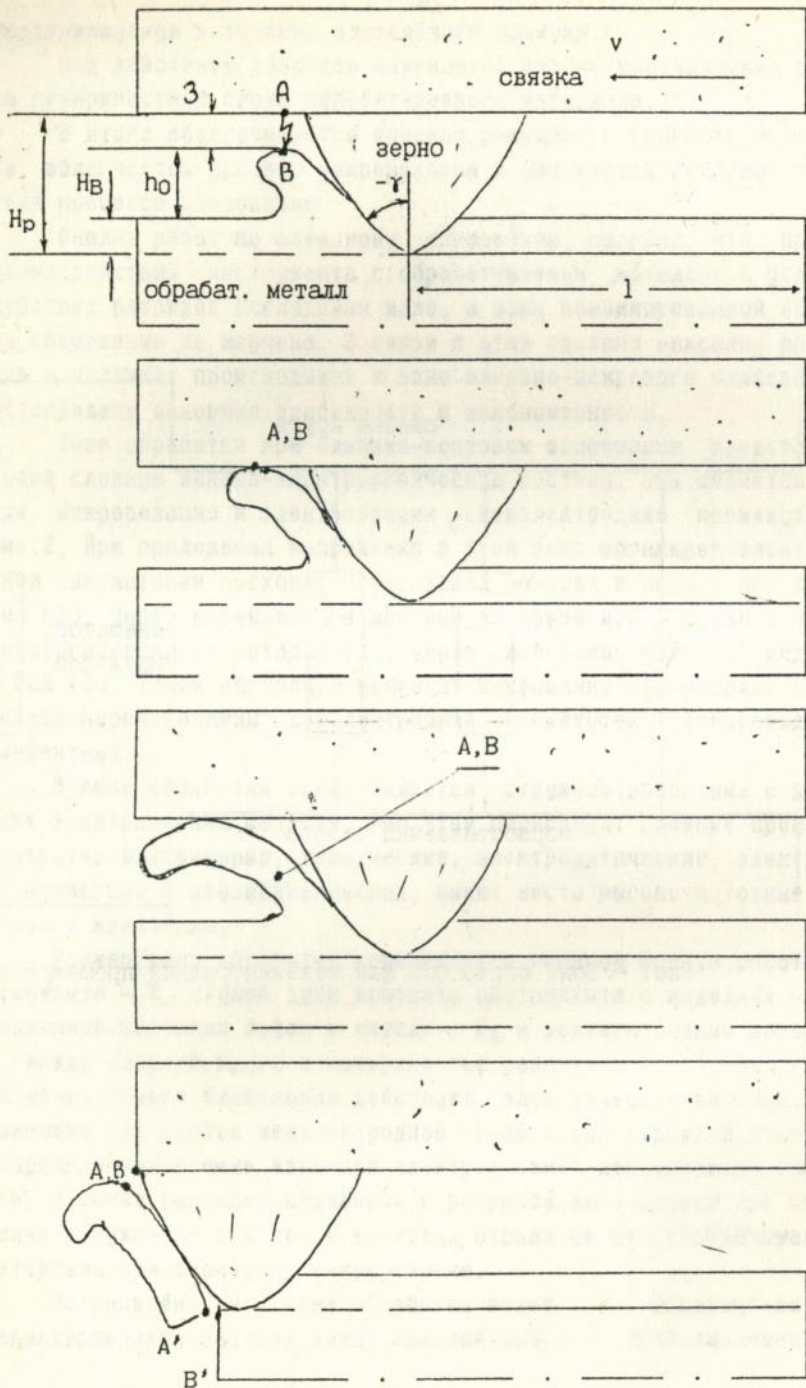


Рис. 3. Места действия разряда в зоне обработки

териалом и стружкой, либо наличием перемыкающих токопроводящих элементов.

При гарантированном зазоре доминируют разряды, возникающие вследствие пробоя жидкой среды в местах наибольшего приближения вершины стружки к связке круга, главным образом, на выходе режущих зерен, где зазор минимален.

Гарантированный зазор обеспечивается тогда, когда срезаемая стружка не перекрывает межэлектродный промежуток. Это имеет место при обработке хрупких материалов, образующих пылевидную стружку, и при шлифовании пластичных материалов, когда сливная стружка имеет малую длину, недостаточную для перемыкания. В первом случае действительный зазор представляет собой расстояние между связкой круга и микровыступами поверхности резания ( $\Delta g = H_p - H_b$ ); во втором - между связкой и вершиной стружки

$$\Delta g = H_p - (H_b + (l_k / K) * \cos[\gamma]),$$

где  $H_p$  - высота режущего рельефа;  $H_b$  - величина внедрения зерен в обрабатываемый материал;  $l_k$  - длина участка, с которого срезана стружка;  $K$  - коэффициент усадки стружки;  $\gamma$  - передний угол режущего зерна.

С учетом действительного межэлектродного зазора и электропроводности шунтирующих элементов может быть выбрана величина импульсного напряжения, необходимая для пробоя и формирования разрядов. Установлено, что стружка, как электрод, испытывающий действие разряда, может быть частично оплавлена, испарена или деформирована под действием ударно-электро-гидравлического эффекта. При энергии разряда  $E$  часть ее ( $\alpha E$ ) будет действовать на стружку.

Исходя из условия, что для расплавления (или испарения) единицы объема материала стружки необходимо количество тепла  $Q$  и что при мощности  $W$  подводимая энергия разряда распределяется равномерно по площади поперечного сечения стружки  $f_c$ , получим

$$Q_c * \rho * f_c * \Delta L = W * \Delta \tau,$$

где  $\rho$  - плотность материала,  $L$  - длина стружки,  $\tau$  - время.

При  $\tau \rightarrow 0$  скорость расплавления (испарения) срезаемой стружки

$$dL/d\tau = W / (Q_c * f_c * \rho).$$

Отсюда длина оплавливающегося участка стружки за время  $\tau$

$$L_{пл}(\tau) = \alpha E / (Q_c * \rho * f_c).$$

При этом необходимо учитывать нагрев стружки в процессе ее образования микрорезанием.

При гарантированном зазоре, когда стружка не перекрывает межэлектродный промежуток, время действия разряда  $\tau_p$  будет измеряться от момента пробоя (с учетом запаздывания разряда  $\tau_3$  после достижения пробивной величины зазора) до окончания стружкообразования:

$$\tau_p = \tau_c - (\tau_{нр} + \tau_3) = L_k / v_{кр} - (l_{нр} / v_{кр} + \tau_3),$$

где  $\tau_c$  - общее время контакта зерна с металлом;  $\tau_{нр}$  - время микрорезания до начала разряда;  $L_k$  - длина дуги контакта;  $l_{нр}$  - участок дуги контакта, проходимый зерном до начала разряда;  $v_{кр}$  - скорость резания.

При коротких импульсах ( $\tau_u < \tau_c - \tau_{нр}$ ) время действия разряда может быть ограничено длительностью импульса.

При отсутствии гарантированного зазора в зоне шлифования и перемигании электродов срезаемой стружкой доминируют разряды, инициируемые взрывной электроэрозией, наиболее вероятное место которой - середина перемигающей стружки. После оплавления стружки разряд возникает между нижней ее частью и связкой. Взрывной электроэрозии подвергается наиболее нагретая стружка. Условия оплавления стружки:

$$I^2 * (1 + \alpha * T_{пл}) * R_0 * \tau = C_c * M_c * (T_{пл} - T_n),$$

где  $I$  - ток, проходящий через стружку;  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления;  $T_n$  - начальная температура стружки;  $R_0$  - сопротивление стружки;  $C_c$  - теплоемкость материала стружки;  $M_c$  - масса стружки;  $T_{пл}$  - температура плавления,  $\tau$  - время действия тока.

Из этих условий можно определить необходимые электрические параметры алмазно-искровой обработки.

При этом необходимо учитывать общее число стружек, одновременно перекрывающих межэлектродный промежуток. Это – случайная величина, среднее значение которой можно определить из условий контактного взаимодействия рельефа круга с металлом

$$Z_{nc} = Z_{y0} \cdot B \cdot L_k \cdot \left(1 - \frac{(H_p - H_b)K}{L_k \cos \gamma}\right) \cdot \int_0^{H_b} \psi(x) dx,$$

где  $Z_{y0}$  – удельное число зерен на поверхности инструмента;  $B$  – ширина зоны обработки;  $L_k$  – длина дуги контакта;  $H_p$  – высота режущего рельефа;  $H_b$  – величина внедрения зерен в металл;  $K$  – коэффициент усадки стружки;  $\gamma$  – передний угол режущего зерна;  $\psi(x)$  – закон распределения зерен по высоте рельефа.

Зная число перемикающих стружек, можно определить общее активное сопротивление зоны обработки и по величине тока, необходимого для плавления стружки, рассчитать требуемое напряжение. Сопротивление зоны обработки при шлифовании твердых сплавов и сталей составляет 5...50 Ом. Электрические разряды в зоне шлифования действуют непосредственно на токопроводящую связку и косвенно – на зерна-диэлектрики.

Интенсивность электроэрозионного съема (устранения) поверхностных слоев связки ( $Q_c$ , мм<sup>3</sup>/с) зависит от энергии импульсов и частоты их следования:  $Q_c = U_\lambda \cdot f$ ;  $U_\lambda = A \cdot E^m \cdot K_n$ , где  $U_\lambda$  – объем микролунки – съем одного разряда;  $A$  – коэффициент, зависящий от состава связки;  $m$  – показатель степени;  $K_n$  – коэффициент, учитывающий конкретные условия (состав рабочей среды, величину зазора, токопроводность шунтирующих элементов, сокращение длительности действия разрядов и др.).

Скорость электроэрозионного съема связки (и соответственно, всего алмазоносного слоя) будет зависеть от площади поверхности инструмента –  $S_u$ , концентрации алмазов  $K$  и интенсивности действия разрядов

$$V_{cc} = \frac{V_\lambda \cdot f}{S_u (1 - 0,25 \cdot K/100)}.$$

Увеличить или уменьшить скорость правки в процессе работы можно за счет энергии импульсов и частоты их следования.

В оптимальном режиме электроискровое воздействие на круг дол-

жно быть таким, чтобы при смене связки не повреждались алмазные зерна.

На основе анализа феноменологической модели взаимодействия разрядов с алмазоносной поверхностью круга получены полуэмпирические соотношения, позволяющие определить оптимальные параметры импульсов при шлифовании.

Полагая, что действие разряда эквивалентно локальному нагреву импульсным источником с нормальным распределением плотности потока по радиусу  $r$  пятна нагрева ( $q(r) = q_0 \exp[-k \cdot r/r_0]$ ), и считая, что при коротких импульсах распределение температуры подчиняется закону нормального распределения ( $T(r) = T_0 \cdot \exp[-kr/r_0]$ ), получим допустимое значение энергии импульса

$$E < 3,14 \cdot r_0 \cdot ((T_p - T_n) \cdot (3,14 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot T)^{0,5} \cdot \exp(k) / (2 \cdot A \cdot k)),$$

где  $\lambda, \rho, c$  - теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость материала связки инструмента;  $r_0$  - радиус канала разряда;  $T_n$  - начальная температура связки;  $A$  - коэффициент поглощения энергии разряда поверхностного тела ( $0 < A < 1$ );  $K$  - коэффициент сосредоточенности разряда;  $T_p$  - предельная температура материала зерна.

Для получения некоторых данных, необходимых для расчетов, изучено действие разрядов на материал. В экспериментах электрическая энергия искровых разрядов варьировалась в диапазоне от 10 до 300 мДж, а длительность импульсов составляла 100 мкс. Искровой обработке подвергались алмазно-шлифовальные круги на связках на медно-оловянниой основе. В ходе экспериментов проводились измерения объема лунок, образовавшихся на поверхности круга в результате воздействия искровых разрядов с различной энергией импульсов. Статистически обработанные данные этих экспериментов представлены в табл. 1.

Из приведенных данных следует, что среднее значение коэффициента  $A = 0,15$ . Таким образом, сравнительно небольшая часть энергии импульсного разряда идет непосредственно на испарение связки, что обусловлено наличием различных механизмов трансформации электрической энергии, вкладываемой в искровой разряд, в другие виды энергии. При этом часть энергии разряда идет на ионизацию искрового канала.

Экспериментальные данные по действию  
разряда на связку

Энергия импульса E, мДж	Объем лунки $V \cdot 10^{-5}, \text{мм}^3$	Энергия испарения связки в лунке Q, мДж	Коэффициент поглощения, $A = Q/E$
300	99,45	46,60	0,16
250	85,60	40,12	0,16
200	66,90	31,36	0,16
150	48,20	22,59	0,15
100	31,90	14,95	0,15
50	15,40	7,22	0,14
10	2,87	1,34	0,13

Предложенный подход и полученные расчетно-экспериментальные результаты могут быть использованы для определения энергии и длительности импульсов при шлифовании. Показано, что сделанные оценки находятся в хорошем согласии с результатами экспериментов.

Контактное взаимодействие шлифовального круга с обрабатываемым материалом, состояние зоны обработки и эффективность работы инструмента зависят от параметров его рельефа. Рельеф алмазных кругов (при обычном шлифовании) изучался в работах Попова С.А., Старкова В.К., Узуняна М.Д. и др. Однако в связи с особенностями формирования рабочей поверхности круга в условиях действия разрядов потребовались дополнительные исследования.

Для оценки состояния рабочей поверхности и режущих свойств инструмента, работающего в алмазно-искровом режиме, выполнен комплекс теоретических исследований. Получена возможность определения ряда параметров рельефа круга расчетным путем. Режущий рельеф шлифовального круга определяет его потенциальные показатели при обработке: возможную величину врезания зерен в металл, нагрузку и ее распределение на режущие элементы, размещаемость стружки в межзеренном пространстве, интенсивность проникновения смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания. Рельеф влияет на износ инструмента, характер действия разрядов, определяет производительность и качество обработки.

Рельеф инструмента может быть достаточно полно охарактеризо-

ван следующими основными показателями: общей высотой рельефа -  $H$ , высотой режущего рельефа -  $H_p$ , удельным числом зерен рельефа -  $Z_{уд}$ , равномерностью их расположения, расстоянием между зернами, законом распределения их высот  $\Psi(x)$ , степенью выравнивания высоты зерен в верхней части рельефа, формой зерна, геометрией его режущей части (исходной и рабочей), микро- и субмикрорельефом режущей кромки, неровностью поверхности связки и ее шероховатостью. Кроме того, рельеф инструмента включает и такие показатели, как объем алмазов и объем межзеренного пространства. Характер рельефа связан с прочностью удержания зерен в связке и износостойкостью режущей части инструмента при работе.

Основные показатели рельефа инструмента представлены на диаграмме (рис.4). Формирование рабочей поверхности инструмента в условиях действия разрядов происходит вследствие устранения связки из межзеренного пространства (как бы понижением ее уровня). При этом зерна, удерживающиеся в связке, остаются на ее поверхности, образуя рельеф. Этот процесс можно имитировать путем сечения алмазоносного слоя плоскостью, проходящей через центр какого-либо зерна, с разделением связки (зерна остаются целыми).

Такой рельеф с максимальным выступанием зерна над связкой на половину его величины можно считать номинальным, что удобно использовать при расчетах.

Чтобы получить рельеф инструмента с определенной высотой выступления зерен, достаточно сместить положение поверхности связки относительно номинала. Рельеф инструмента, формируемый электроразрядами, связан с алмазоносной композицией, которая характеризуется размером зерен, их формой, концентрацией и расположением в связке. Из условия статистически равномерного расположения зерен в алмазоносном слое (при плотности пуассоновского поля -  $a$ ) определено математическое ожидание расстояния между ними:

$$R_{cp} = 0,89 * a^{-1/3}, \quad S_r^2 = 3 * a * \int_0^{\infty} r^4 * e^{-ar^3} dr.$$

Аналогично рассчитывается расстояние между зернами на поверхности инструмента. Предложено рассматривать его, как случайную величину  $L$ , характеризующую расстояние от какого-либо зерна до ближайшего.

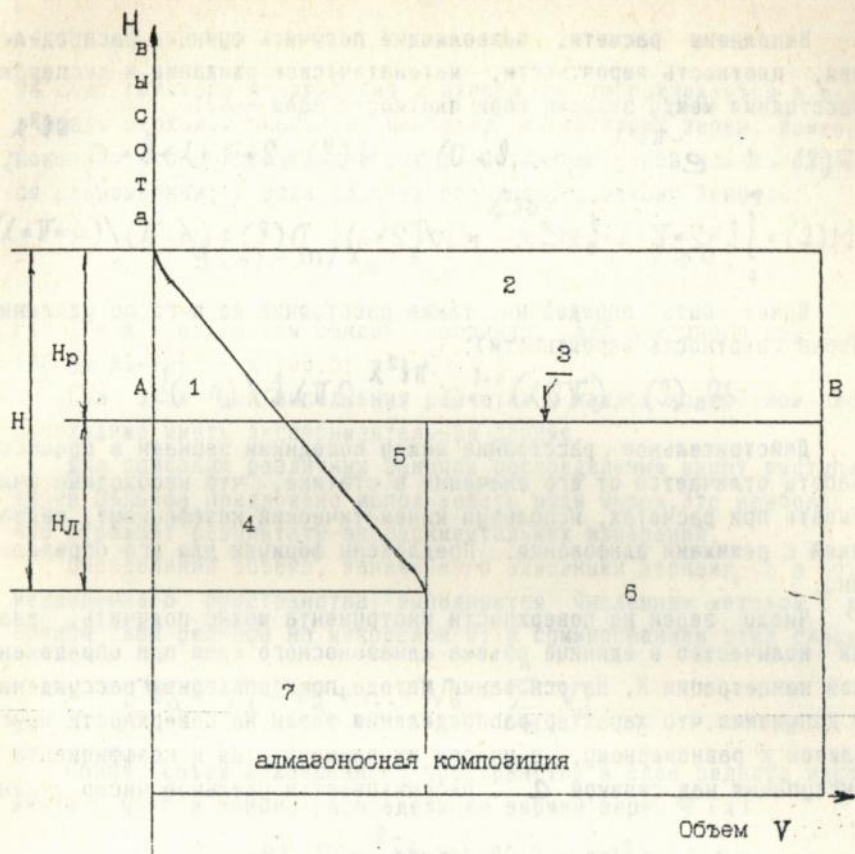


Рис. 4. Диаграмма режущей поверхности инструмента (соотношение объема алмазов, межзеренного пространства и связки по высоте рельефа)

1. Алмазы в слое рельефа
2. Межзеренное пространство
3. Поверхность связки
4. Алмазы (зерна) в связке переходного слоя
5. Лунки
6. Связка
7. Алмазы (зерна) в исходном алмазоносном слое

Выполнены расчеты, позволяющие получить функцию распределения, плотность вероятности, математическое ожидание и дисперсию расстояния между зернами (при плотности поля  $-\lambda$ ):

$$F(\ell) = 1 - e^{-\pi \ell^2 \lambda} \quad (\text{при } \ell > 0); \quad \psi(\ell) = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \ell \cdot e^{-\pi \ell^2 \lambda};$$

$$M(\ell) = \int_0^{\infty} \ell \cdot 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \ell \cdot e^{-\pi \ell^2 \lambda} = 1 / (2 \cdot \lambda); \quad D(\ell) = (4 - \pi) / (4 \cdot \pi \cdot \lambda).$$

Может быть определено также расстояние до  $n$ -го по удалению зерна (плотность вероятности):

$$\psi_n(\ell) = (\pi \ell \lambda)^{n-1} e^{-\pi \ell^2 \lambda} 2 \pi \lambda \ell / (n-1)!$$

Действительное расстояние между соседними зернами в процессе работы отличается от его значения в статике, что необходимо учитывать при расчетах, используя кинематический коэффициент, связанный с режимами шлифования. Предложены формулы для его определения.

Число зерен на поверхности инструмента можно получить, зная их количество в единице объема алмазонасного слоя при определенной концентрации  $K$ . На основании метода правдоподобных рассуждений и допущения, что характер распределения зерен на поверхности круга близок к равномерному, с учетом их размера  $-d_3$  и коэффициента выступания над связкой  $a$ , рассчитывается удельное число зерен

$$Z_{\text{уд}} = 0,0048 \cdot K \cdot d_3^{-2} \cdot a.$$

При электроэрозионном воздействии на инструмент формируется рельеф с выступанием зерен, близким к половине средней величины зерна  $H_p \leq 0,5 \cdot d_3$ . В условиях шлифования под действием сил резания, ударных нагрузок, вибраций и износа эта величина уменьшается (обычно лежит в пределах  $H_p = (0,3 \cdot 0,5) \cdot d_3$ ). Большие значения имеют место при более прочном удержании зерен в связке.

Для каждой зернистости существует оптимальная высота выступания зерен, при которой допустимому износу будет соответствовать наибольшая производительность.

При формировании рельефа электроэрозионным воздействием из условия статистически равномерного расположения зерен в исходной алмазонасной композиции следует ожидать и равномерного распределения вершин зерен по высоте. При работе круга рельеф изменится

за счет силового воздействия и износа, что воспринимается в первую очередь верхними участками наиболее выступающих зерен. Измерения показали, что распределение высот выступания зерен может сохраняться равномерным, в ряде случаев подчиняются закону Вейбула:

$$\Psi(x) = m/x_0 * x^{m-1} e^{-x^m/x_0}, \quad x \geq 0,$$

где  $x$  и  $m$  - параметры закона (например, для алмазного круга АС16 100/80 М1-100% -  $x=108.5$ ;  $m=1.5$ ).

При этом для выполнения расчетов в каждом конкретном случае необходимо иметь экспериментальные данные.

Для описания различных законов распределения высот выступания зерен рельефа предложено использовать ряды Фурье. Это наиболее точно отражает результаты экспериментальных измерений.

Определение объема, занимаемого алмазными зернами,  $V_a$  и объема межзеренного пространства, выполняется численным методом с разбивкой слоя рельефа на микрослои  $V_i$  и суммированием этих слоев:

$$V_a = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i.$$

Общий объем межзеренного пространства в слое рельефа инструмента с учетом закона распределения вершин зерен  $\Psi(x)$

$$V_{mn} = 10^{-3} f H_p - 10^{-9n} \sum_{i=1}^n \frac{F(i \Delta r)}{r^2} \pi [H - (i-1) \Delta r]^2 \left\{ r_3 - \frac{1}{3} [h - (i-1) \Delta r] \right\},$$

где  $f$  - площадь участка поверхности;  $H$  - высота рельефа;  $r_3$  - расстояние между зернами;  $r, ds$  - размер алмазных зерен;  $\Delta r$  - величина интервала;  $F(i \Delta r)$  - функция распределения разновысотности зерен рельефа.

Объем межзеренного пространства режущего рельефа, сформированного при алмазно-искровом шлифовании, примерно в 1.2-1.3 раза больше, чем при обычной обработке, что говорит о резервах повышения производительности.

Установлено, что под действием электроразрядов изменяется микрорельеф зерна, появляются дополнительные микро- и субмикроремки, способствующие повышению режущей способности.

Рассмотрен комплекс вопросов контактного взаимодействия шлифовального круга с металлом в условиях действия электрических ра-

зрядов. Установлено, что при алмазно-искровом шлифовании инструмент работает в благоприятных условиях, без участия связки. Взаимодействуют с обрабатываемым материалом только режущие зерна.

Характер контактирования инструмента с металлом в условиях действия разрядов определяется состоянием режущего рельефа и режимами шлифования (механическими и электрическими).

При алмазно-искровом шлифовании следует рассматривать контакт зерна с металлом (резание, пластическое деформирование, трение), глубину внедрения и траекторию контакта, а также контакт стружки с зерном и связкой (трение).

Наиболее важным является вопрос внедрения зерен в обрабатываемый металл и проникновения металла в межзеренное пространство режущего рельефа. Величина внедрения определяет нагрузку на зерно, размер межэлектродного промежутка, шероховатость обработанной поверхности и степень повреждаемости ее электрическими разрядами.

Сформулировано положение о том, что величина внедрения режущего рельефа в обрабатываемый материал и, соответственно, степень проникновения металла в межзеренное пространство определяются скоростью подачи металла на инструмент (круг) в нормальном к его поверхности направлении и удельным количеством режущих зерен, проходящих через площадь поперечного сечения зоны контакта в единицу времени. Показано, что это положение является общим для всех видов шлифования, для любых условий взаимодействия круга с обрабатываемым изделием.

На этой основе разработаны теоретические предпосылки для оценки интенсивности контактного взаимодействия инструмента с металлом, предложены вероятностные расчеты величины внедрения, нагрузки на зерно и шероховатости обработанной поверхности. Создана модель шлифования, имитирующая контактное взаимодействие инструмента с металлом.

Задачу о внедрении режущего инструмента в металл решали, исходя из условия, что шлифование в установившемся режиме представляет собой стационарный процесс, и весь объем металла  $V_n$ , подаваемого в зону обработки, полностью срезается алмазными зернами:  $V = \sum_{i=1}^{N_{\text{ЗР}}} v_c$ , где  $Z_p$  - число работающих зерен,  $v_c$  - объем единичного среза.

Зная количество зерен ( $Z_p = \frac{V}{v_c} = \frac{V}{\int_0^{h_0} \psi(x) dx}$ ), среднее значение объема единичного среза ( $v_c = \int_0^{h_0} \psi(x) dx \cdot l_k$ ) и учитывая, что площадь поперечного среза зависит от формы режущих

элементов, получаем в общем виде уравнение, из которого можно определить величину внедрения инструмента в металл  $H_B$ :

$$V_n^* = \psi(\varphi_3, H_B) l_k B v_{кр} Z_{уд} \tau K_p \int_0^{H_B} \psi(x) dx,$$

где  $\psi(\varphi_3, H_B) = f_c$  - площадь поперечного среза, как функция формы зерна ( $\varphi_3$ ) и величины внедрения ( $H_B$ );  $l_k$  - длина дуги контакта зерна с металлом;  $B$  - ширина фронта работы инструмента;  $Z_{уд}$  - удельное число зерен на поверхности инструмента;  $\tau$  - время работы;  $K_p$  - коэффициент участия зерен в работе.

При этом  $V_n^* = B \cdot H_f V_s \tau$ , где  $H_f$  - высота фронта работы инструмента;  $V_s$  - скорость подачи металла на круг.

В конкретном случае, например, для зерен в форме конуса (с углом при вершине  $2\alpha$ ) при статистически равномерном распределении их вершин в слое рельефа  $H_p$

$$H_B = \sqrt[3]{\frac{4 V_s H_p}{v_{кр} Z_{уд} \tau g \alpha K_p}}$$

Предложены вероятностные расчеты толщины среза и площади его поперечного сечения.

Математическое ожидание площади среза для зерен различной формы можно определить, зная законы распределения высоты выступания зерен над связкой и величины углубления зерен в металл -  $h$ :

$$M(f_c) = \int_0^{h_m} q(\varepsilon) d\varepsilon \int_{\varepsilon}^{h_m} Z(h, \varepsilon) f(u+h) dh,$$

где  $\varepsilon$  - расстояние от нулевого уровня до контура поверхности;  $q(\varepsilon)$  - плотность распределения случайной величины  $\varepsilon$ ;  $\varepsilon_m$  и  $h_m$  - максимальные значения  $\varepsilon$  и  $h$ ;  $u$  - расстояние от контура поверхности до связки.

При конической форме зерен с постоянным углом при вершине

$$M(f_c) = \tau g \alpha \int_0^{h_m} q(\varepsilon) d\varepsilon \int_{\varepsilon}^{h_m} (h-\varepsilon)^2 f(u+h) dh.$$

Шероховатость обработанной поверхности формируется на заключительном этапе контактного взаимодействия инструмента с изделием.

Предложен вероятностный расчет шероховатости обработанной поверхности из условия, что высота микронеровностей является случа-

ной величиной и имеет форму, соответствующую профилю режущего зерна. Зная вероятность попадания по меньшей мере одной точки - вершины зерна в область микрогребешка высотой  $h_m$  с площадью  $S_m$ , получим интегральную функцию распределения его высоты, плотность вероятности и математическое ожидание:

$$F(h_m) = 1 - e^{-s\lambda} ; \varphi(h) = s\lambda e^{-s\lambda} ; M(h) = \int_0^{\infty} h s \lambda e^{-s\lambda} dh.$$

Придавая зерну определенную форму, получаем возможность расчета высоты микронеровностей. Например, для зерна в форме конуса (с углом при вершине  $2\alpha$ )

$$M(h) = \int_0^{\infty} h \cdot 2\lambda \tan \alpha e^{-\lambda h^2 \tan^2 \alpha} dh.$$

Для выполнения расчетов необходимо знать плотность пуассоновского поля вершин зерен  $\lambda$ , которая зависит от характеристики режущего рельефа и режимов обработки.

Создана имитационная модель процесса шлифования. При разработке модели исходили из того, что работа инструмента в алмазно-искровом режиме происходит без участия связки и представляет собой комплекс последовательных единичных актов снятия стружки отдельными режущими зёрнами шлифовального круга. Микрорезание единственным зерном имитируется соответствующим внедрением в обрабатываемое изделие обрабатывающего кольца, образованного профилем режущего зерна, перемещающегося по заданной траектории (рис.5), т.е. рассматривается внедрение обрабатывающей поверхности в обрабатываемую. Каждая из взаимодействующих поверхностей описывается дискретной функцией в виде набора множества аппликат  $X_i$  и  $Y_i$ . В результате по изменениям  $Z_i = Z_i(t)$  для фиксированных значений  $X_i$  и  $Y_i$  определяются размеры и объем единичного среза и геометрические параметры микрорельефа обработанной поверхности.

Формирование потока машинной информации циклично ( $U_1(t) \rightarrow Q_1(t) \rightarrow Q_2(t)$ ) и в каждом цикле завершается массивом выходных характеристик  $\rightarrow Q_f(t)$ , соответствующих текущему значению параметра  $t$ .

Множество исходных данных ( $U_1(t)$ ) включает в себя характеристики инструмента, объекта обработки и элементы режима шлифования.

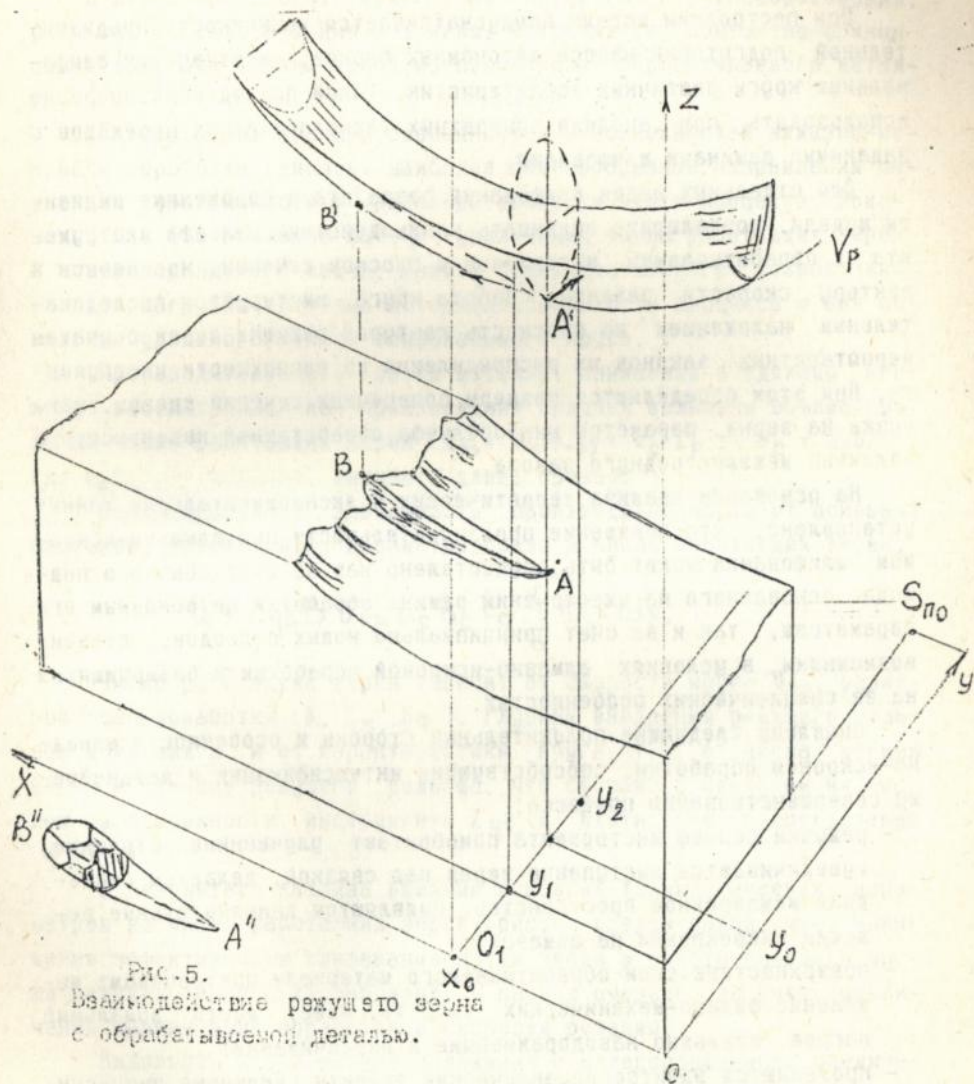


Рис. 5.

Взаимодействие режущего зерна с обрабатываемой деталью.

Множество промежуточных параметров  $Q_i(t)$  является следствием изменений, происходящих с инструментом и обрабатываемым изделием в процессе работы.

При построении модели предусматривается возможность предварительной подготовки набора автономных блоков, имитирующих шлифовальные круги различных характеристик. Такой подход целесообразно использовать при анализе конкретных технологических переходов с заданными режимами шлифования.

Для отдельных видов шлифования разработаны упрощенные варианты модели, позволяющие оценивать взаимодействие рельефа инструмента с обрабатываемым материалом в плоском сечении, нормальном к вектору скорости резания. Работа круга имитируется последовательным наложением на плоскость контуров режущих зерен с учетом вероятностных законов их распределения на поверхности инструмента. При этом определяются размеры поперечных сечений срезов, нагрузка на зерна, параметры микрорельефа обработанной поверхности и величина межэлектродного зазора.

На основании анализа теоретических и экспериментальных данных установлено, что повышение производительности при алмазно-искровом шлифовании может быть осуществлено как за счет обычного подхода, основанного на ужесточении режима обработки по основным его параметрам, так и за счет принципиально новых подходов, ставших возможными в условиях алмазно-искровой обработки и базирующихся на ее специфических особенностях.

Выявлены следующие положительные стороны и особенности алмазно-искровой обработки, способствующие интенсификации и дальнейшему совершенствованию процесса:

- режущий рельеф инструмента приобретает улучшенное строение (увеличивается выступание зерен над связкой, делается свободным межзеренное пространство, появляются дополнительные режущие микрокромки на алмазах);
- поверхностные слои обрабатываемого материала претерпевают изменение физико-механических свойств, имеет место локальный нагрев, возможно наводораживание и охрупчивание;
- проявляются электрогидравлические эффекты (волновые процессы, высокочастотные колебания, кавитация жидкой среды);
- интенсифицируется действие смазочно-охлаждающей жидкости, происходит более свободное и активное проникание ее в зону обработки;

- поверхность режущих зерен и связки очищается от наростов и налипов.

В итоге происходит облегчение процесса стружкообразования, уменьшаются силы резания и трения. Устраняется контактно-фрикционное действие связки круга на поверхность обрабатываемого металла.

На основании анализа особенностей и возможностей алмазно-искровой обработки выявлены наиболее целесообразные направления повышения эффективности и производительности этого процесса. Показано, что это возможно за счет увеличения числа работающих зерен и объема единичного среза, причем без существенного возрастания силовой нагрузки на зерна и теплонапряженности процесса и без повышения удельного износа шлифовального круга.

Производительность (объем металла, снимаемый в единицу времени) рассматривали как произведение средней величины объема среза на число работающих зерен ( $Q_M = V_M(\tau \cdot t) = V_c \cdot Z_p$ ;  $V_c = a_c b_c l_c$ , где  $a_c, b_c, l_c$  - толщина, ширина и длина среза).

Анализировалась зависимость производительности от основных факторов, определяющих параметры среза и число работающих зерен,

$$Q = Z_{уд} V \nu_{кр} a_c b_c l_c \int_0^{H_b} \psi(x) dx.$$

Число работающих зерен зависит от скорости круга  $\nu_{кр}$ , размеров зоны обработки ( $B, L_k, H_f$ ), глубины внедрения режущего рельефа в металл  $H$  и от характеристики круга, т.е. от числа вершин зерен в единице режущего рельефа, что связано с удельным числом на поверхности инструмента  $Z_{уд}$  и плотностью распределения  $\psi(x)$ .

В результате анализа влияния основных технологических параметров на число работающих зерен (рис.б) сделан вывод, что повышение эффективности шлифования путем ввода в работу большего числа режущих зерен целесообразно, в первую очередь, за счет увеличения ширины зоны обработки и скорости резания.

Выведено и обосновано положение о целесообразности увеличения фронта работы шлифовального круга для повышения производительности за счет числа работающих зерен. Это положение базируется на том, что при увеличении выступания зерен и при отсутствии сил трения связки с металлом каждое режущее зерно работает в достаточно независимых (автономных) условиях и увеличение общего их количест-

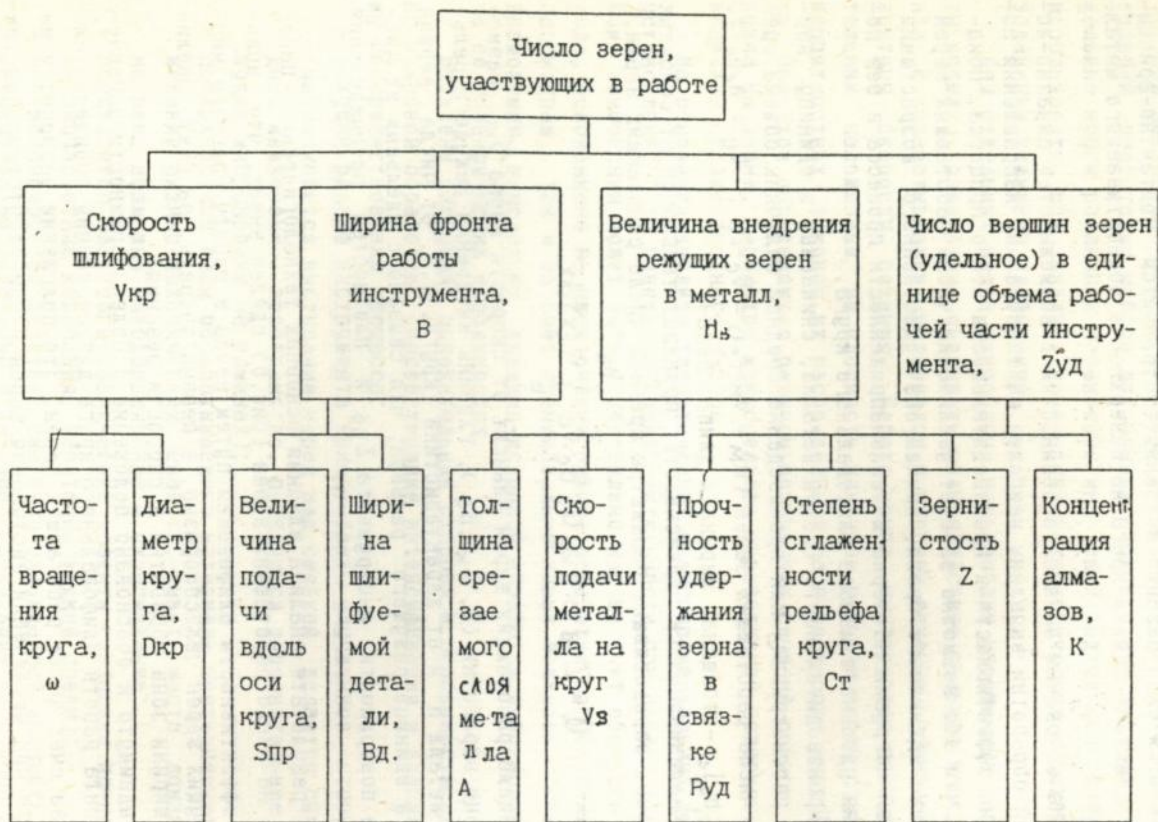


Рис. 6 Связь числа работающих зерен с параметрами шлифования

ва вдоль фронта работы не оказывает существенного влияния на температуру в зоне шлифования и на износ инструмента.

На основании результатов ряда исследований показано, что увеличение фронта работы круга (например, за счет продольной подачи при круглом шлифовании) даже при обычном алмазном шлифовании приводит только к незначительному повышению удельного износа, а при алмазно-искровой обработке удельный износ в этом случае либо не изменяется, либо несколько снижается (табл. 2).

Эффективность работы с большими подачами возрастает при увеличении теплопроводности обрабатываемого материала. На основании такого подхода разработаны рекомендации по назначению повышенных подач при круглом, плоском и внутреннем шлифовании и даны предложения по увеличению ширины алмазных кругов.

Таблица 2.

Износ инструмента при алмазно-искровом  
шлифовании с различными подачами

Относительный износ инструмента, мг/г (АС8, $M2-01, 100\%$ )					
Зернистость круга	производительность, $\text{мм}^3/\text{мин}$ ( ВК8 )				
	$S=0,24$ м/мин	$S=0,48$ м/мин	$S=0,96$ м/мин	$S=1,5$ м/мин	$S=2,5$ м/мин
	250	500	1000	1500	2300
400/315	1,9	2	2,1	2,2	2,3
315/250	2	1,5	1,2	1,3	1,5
250/200	3	3	1,9	1,3	1,9

Видвинута и обосновано новое научное положение о целесообразности работы в алмазно-искровом режиме с увеличенными длинами среза, которое базируется на том, что термодинамическая напряженность процесса микрорезания определяется, главным образом, площадью поперечного сечения среза. Увеличение длительности взаимодействия зерна с металлом мало влияет на контактную температуру в зоне микро-

резания. Это отмечается в работах Резникова А.Н., а также Вукчава Г.В., где показано, что температура на режущем зерне резко возрастает в момент врезания, и в дальнейшем практически не увеличивается. В алмазно-искровом режиме, когда увеличение дуги контакта инструмента с металлом не сопровождается дополнительной работой сил трения связки (что имеет место при обычном шлифовании) появляется возможность увеличить контактное время работы зерна без повышения теплонапряженности. Эта закономерность для единичного зерна может быть распространена на все зерна круга и перенесена на инструмент в целом.

Показано, что в пользу работы с длинными срезами говорит также следующее: при срезании длинных стружек (при длительном контакте зерна с металлом) более заметно проявляется благоприятное изменение физико-механических свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала под влиянием тепловых факторов с учетом более активного действия разрядов на длинную стружку; при длинных срезах в ряде случаев нагрузка на зерно возрастает более равномерно (чем при срезании толстых коротких стружек).

Отмечается, что при алмазно-искровой обработке появляется возможность более свободного размещения длинной стружки в увеличенном межзеренном пространстве.

Анализ влияния скорости изделия на толщину среза при шлифовании и расчеты показывают, что при одинаковой производительности меньшие значения толщины среза имеют место в зоне весьма больших и весьма малых скоростей изделия.

На основании изложенного впервые предложено, обосновано и разработано два варианта шлифования с длинными срезами в алмазно-искровом режиме:

- двойное скоростное шлифование (при весьма высокой скорости изделия, соизмеримой со скоростью круга);
- глубинное шлифование (при больших значениях срезаемого припуска и малой скорости детали).

Установлено, что двойное скоростное шлифование целесообразно использовать при чистовой обработке с малыми припусками.

Показана целесообразность съема материала тонкими длинными срезами. Это положение базируется на том, что наличие острых режущих кромок и субмикрокромки на поверхности алмазных зерен обеспечивает срезание весьма тонких слоев металла (это подтверждено экспериментально Топоровым О.А.).

Согласно теории Бочвара А.А. поверхностный слой, являясь ослабленным, имеет меньшую сопротивляемость пластической деформации и меньший предел упругости. При шлифовании в условиях действия электрических разрядов имеет место дополнительное изменение физико-механических свойств тонких слоев поверхности резания, в том числе локальный нагрев, водородное охрупчивание и электроэрозионное предразрушение, т.е. срезание тонких стружек острыми алмазными кромками при комбинированном шлифовании происходит в облегченных условиях. Эксперименты подтвердили высокую эффективность двойного скоростного алмазно-искрового шлифования на чистовых режимах (рис.7). Процесс характеризуется повышенной стабильностью работы инструмента, большой его стойкостью, высоким качеством обработанной поверхности. Возможность работы в режиме двойного скоростного шлифования заложена в конструкциях шлифовальных станков Саратовского станкозавода, где предусмотрено существенное увеличение частоты вращения изделия.

При глубинном шлифовании сохраняются все положительные особенности работы с увеличенными длинами среза и появляются дополнительно некоторые положительные эффекты, присущие только этому виду обработки. Повышение производительности за счет увеличения срезаемого припуска не вызывает изменения условий врезания зерен. При этом увеличение толщины среза по мере работы зерна происходит медленнее, чем при срезании коротких стружек (в меньшей степени, чем увеличение съема металла).

В связи с малой скоростью изделия действие разрядов в зоне шлифования сильнее влияет на изменение физико-механических свойств срезаемых слоев металла, причем, в основном, в местах наибольших толщин среза, т.е. при наибольшей нагруженности зерна.

Этот вид обработки наиболее целесообразно использовать при съеме за один проход увеличенных, в том числе неравномерных припусков в вариантах однопроходного (с большой продольной подачей) и врезного (в том числе пошагового) шлифования.

Глубинное шлифование связано с увеличенной зоной обработки, с большими значениями сил резания, поэтому в данном случае необходима более жесткая схема технологической системы. Целесообразно также применять для данного шлифования крупногабаритные круги.

Особенностью данного вида обработки является также то, что в связи с большими съемами происходит более интенсивный износ круга, и для поддержания его режущей способности необходимо увеличение

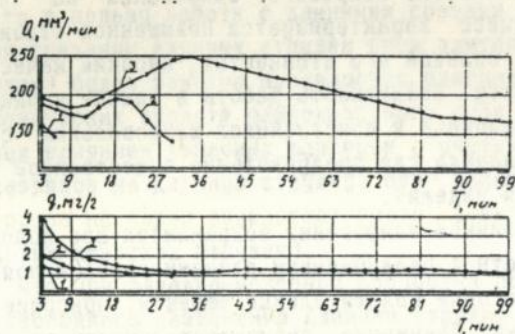


Рис. 7. Характер изменения производительности шлифования  $Q$  и удельного износа алмазов  $q$  при различных скоростях детали:

- 1 - обработка без тока при  $V_g = 0,5$  м/с;
- 2 - обработка с импульсным током  $f = 25$  кГц при  $V_g = 0,5$  м/с;
- 3 - обработка с импульсным током  $f = 35$  кГц при  $V_g = 5,0$  м/с.

энергии импульса либо введение дополнительного электроискрового воздействия на круг вне зоны резания.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований с целью проверки эффективности нового процесса алмазно-искрового шлифования, установления его физических закономерностей и особенностей, подтверждения теоретических разработок, положений и предпосылок.

Изучены вопросы режущей способности инструментов, состояние их рабочей поверхности, качество обработанной поверхности, исследовались силы резания и температура в зоне шлифования.

Эксперименты выполнялись при обработке металлов и сплавов с различными физико-механическими свойствами (твердые сплавы, инструментальные и конструкционные стали, магнитотвердые материалы, износостойкие наплавки и некоторые труднообрабатываемые материалы). Установлено, что при всех видах шлифования (круглое, плоское, внутреннее) различных материалов кругами на металлической связке в алмазно-искровом режиме обеспечивается увеличение производительности (по сравнению с обычной обработкой) в 1,5...5 раз при небольшом удельном износе алмазов и при высоком качестве обработанной поверхности. Опыты показали существенное увеличение стойкости инструмента (в десятки раз) и стабильность его работы.

Показано, что в условиях действия разрядов улучшается шлифуемость ряда материалов (в том числе сталей, чугунов), обработка которых в обычном режиме затруднена. Соответственно расширяется область эффективного применения сверхтвердых инструментов.

Эксперименты по измерению сил резания подтвердили положение о том, что при алмазно-искровом шлифовании устраняется контакт обрабатываемого материала со связкой круга. Силы резания при шлифовании в этих условиях оказались в 1,2...1,8 раза меньше. Предложены формулы для расчета сил резания при алмазно-искровой обработке, что может быть использовано при назначении режимов шлифования.

Показано, что продольная подача (при круглом шлифовании) влияет на силы ( $P_z$  и  $P_y$ ) не прямопропорционально, а в степени, меньше единицы, что подтверждает правильность выдвинутого положения о целесообразности увеличения числа работающих зерен вдоль фронта инструмента с целью повышения производительности.

Измерение температуры в зоне шлифования, выполненное с использованием метода термочувствительных вставок (Р.И. №133, 1985) показало, что благоприятные условия алмазно-искровой обработки дают возможность в ряде случаев снижать термонапряженность процес-

са, несмотря на введение в зону обработки дополнительных источников тепла, а при окончательных проходах без тока, при резании "острым" кругом температура в зоне обработки снижается (по сравнению с температурой при обычном шлифовании) на 20-30% за счет уменьшения сил трения.

Установлено, что в условиях алмазно-искрового шлифования (в связи с меньшими силами трения в зоне обработки) открывается возможность повышения скорости резания, что способствует повышению производительности и улучшению качества обработанной поверхности. Однако из-за низкой теплостойкости алмаза этот резерв ограничен. Зависимость работоспособности инструмента от скорости имеет ярко выраженный экстремальный характер, оптимальные параметры находятся в зоне невысоких скоростей (20-35 м/с). Причем для более теплопроводных обрабатываемых материалов оптимальная величина скорости смещается в область более высоких ее значений. Влияние различных факторов на показатели процесса шлифования твердого сплава показано на рис. 8.

Установлено, что действие разрядов в зоне шлифования на стружку и обрабатываемый материал облегчает процесс микрорезания за счет нагрева и изменения физико-механических свойств поверхностных слоев обрабатываемого материала и отмеченных выше физико-химических эффектов. Действие разряда на обработанную поверхность в определенной степени экранируется стружкой и слоем срезаемого припуска, но несмотря на это, электроразрядное повреждение обработанной поверхности имеет место: на поверхности остаются следы микролунки, соизмеримые по величине с высотой микронеровностей.

При моделировании условий "стружка-связка" было изучено некоторое действие разрядов. Установлено, что важным параметром является энергия импульсов. При действии в водной среде разрядов с энергией  $E=0,05 \dots 0,3$  Дж объем лунки увеличивается для связки М2-01 почти линейно. Повышение токопроводности жидкости приводит к уменьшению объема лунок. В водной среде объем лунки меньше, чем в углеводородных диэлектриках, а величина зазора, при котором происходит пробой, примерно в 1,5...2 раза больше.

В жидкости на водной основе наблюдается запаздывание разряда относительно начала рабочего импульса, причем тем сильнее, чем больше межэлектродный зазор и выше токопроводность жидкости. При этом существует строгая зависимость минимально необходимой для пробоя энергии импульса от величины зазора. Зависимость объема лунки от межэлектродного расстояния показана на рис. 9.

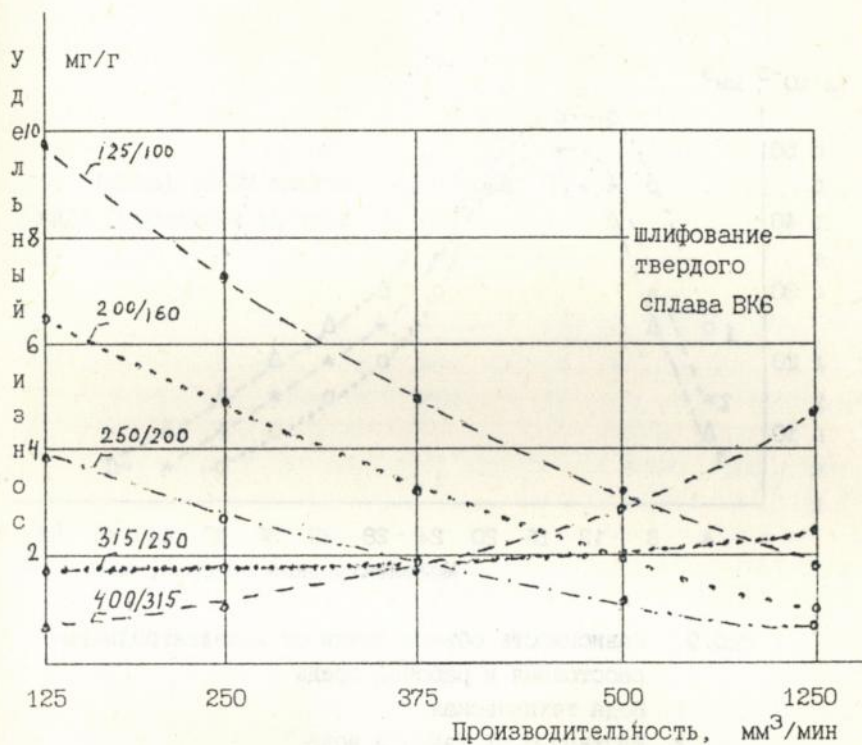


Рис.8. Влияние производительности и зернистости инструмента на удельный износ.

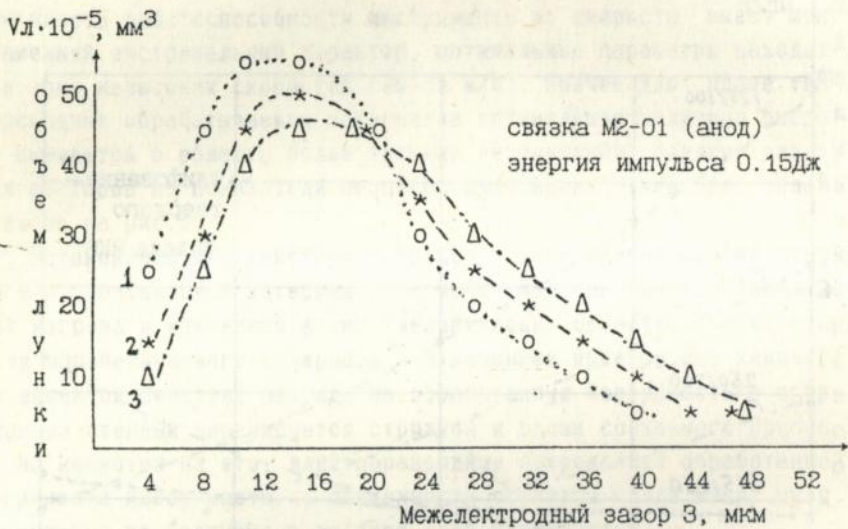


Рис.9. Зависимость объема лунки от межэлектродного расстояния и рабочей среды

1. Вода техническая.
2. Раствор 0.5% NaNO<sub>3</sub> в воде.
3. Раствор 3% CaCO<sub>3</sub> в воде.



В процессе исследований установлено, что действие разрядов при алмазно-искровой обработке и правке круга на анод и катод не одинаково. Показано, что круг целесообразно подключать в качестве анода.

Выполнен комплекс экспериментов по изучению состояния режущей поверхности алмазных кругов, работающих в условиях действия разряда. Исследовано состояние поверхностей металлических связок и морфология алмазных зерен. Изучались связки алмазных инструментов на основе оловянистой бронзы, содержащие в исходном состоянии  $\alpha$ -фазу (твердый раствор олова в меди) и  $\beta$ -фазу. Определяли фазовый состав и остаточные напряжения.

Установлено, что при определенных величинах энергии импульса (до 0,05 Дж) поверхностный слой связки инструмента формируется без трещин со слабо выраженным рельефом.

Электроэрозионное воздействие вызывает увеличение содержания  $\beta$ -фазы. В  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах поверхностного слоя связки формируются растягивающие микронапряжения величиной до 400 МПа, уравнивающиеся по глубине (табл.3). Толщина измененного слоя достигает величины 0,005...0,02 мм (большие значения - при более жестких режимах). Опыты показали, что изменения состояния поверхностного слоя при действии разрядов не снижает прочность удержания зерен, а микроплавление связки по контуру зерна способствует повышению адгезии зерна с металлом связки.

На основании изученного состояния связки круга, работающего в алмазно-искровом режиме, даны рекомендации по выбору связки, сформулированы основные требования к физико-механическим свойствам связок с учетом их электроэрозионной стойкости. Из существующих связок для алмазно-искровой обработки рекомендуется связка М2-01 (для всех видов шлифования) и связка М1-01 (для чистовых и получистовых процессов). Даны рекомендации по совершенствованию связок с учетом особенностей алмазно-искрового шлифования.

Электронномикроскопические исследования позволили изучить морфологию алмазных зерен, работающих в условиях электроразрядов. Установлено, что в результате косвенного действия электрических разрядов (термического, термомеханического, термохимического и др.) алмазные зерна приобретают ярко выраженный субмикрорельеф в виде скульптурных элементов из субмикронребешков шириной 0,3...1 мкм и ступеней размерами 5...15 мкм (с сохранением исходной структуры алмаза). Дополнительные микро- и субмикрорельефы на поверхности

Таблица 3

Фазовый состав и остаточные напряжения в связке  
М20 послезлектроискрового воздействия

Условия обработки	Относительное содержание J(220)Cu <sub>5</sub> Sn ----- J(222) α Cu		Период решетки α <sub>0</sub> , Å (напряженное состояние)			Остаточные напряжения τ, МПа	
	на глубине		α - фаза		β - фаза		
	10мм	5мм	311	222	220	α- фаза	β- фаза
Исходное состояние	0.25	0.25	3.691	3.691	2.985	-300	
W <sub>И</sub> =0.01дж τ <sub>И</sub> =2мкс f=200кГц	1.10	0.94	3.676	3.681	2.976	150	275
W <sub>И</sub> =0.01дж τ <sub>И</sub> =2мкс f=200кГц	1.73	1.43	3.671	3.678	2.676	180	315
W <sub>И</sub> =0.01дж τ <sub>И</sub> =2мкс f=200кГц	2.07	1.62	3.671	3.673	2.975	215	400

зерна повышают его режущую способность. Это позволяет рекомендовать крупные прочные зерна, имеющие обычно гладкую поверхность не только для грубых, но и для получистовых работ.

Условия алмазно-искрового шлифования благоприятны для работы агрегатированных зерен, где возможно действие разряда на поверхность токопроводного связующего зерна. В результате этого такие зерна приобретают увеличенный микрорельеф и повышенную режущую способность даже при малой мощности разрядов (а.с. № 1593806).

Проведены исследования качества обработанной поверхности при алмазно-искровом шлифовании одно-, двух- и гетерогенных материалов с использованием методов металлографии и электронной микроскопии. Исследованы фазовые и структурные превращения и напряженное состояние в приповерхностных слоях твердых сплавов, сталей и других материалов. Изучены шероховатость поверхности, ее рельеф и внешний вид. Опыты выполнялись при следующих технологических вариантах обработки: 1) алмазно-искровое шлифование, 2) алмазное шлифование "острым" кругом без тока (без разрядов), 3) обычное алмазное шлифование (при разной степени затупления круга). Они показали, что при алмазно-искровой обработке влияние основных факторов на шероховатость обработанной поверхности носит такой же характер, как и при обычном шлифовании. Высота микронеровностей при работе в алмазно-искровом режиме несколько больше в связи с увеличенным выступанием режущих зерен. Это различие уменьшается с увеличением твердости обрабатываемого материала.

Анализ рельефа обработанной поверхности подтвердил вывод о том, что связка инструмента не контактирует с металлом. Поверхность формируется только алмазными зернами, без участия связки, в условиях уменьшенных сил трения. На электронных снимках обработанной поверхности четко просматриваются линейчатые следы действия режущих микрокромки алмазов, отсутствуют участки контактно-фрикционного воздействия связки. В отдельных случаях на обработанной поверхности образуются остаточные микротрещины электроэрозионного характера, размеры которых соизмеримы с высотой микрогребешков рельефа. При окончательном проходе в режиме выхаживания без тока они устраняются.

При обработке твердых сплавов в алмазно-искровом режиме формируются сжимающие остаточные напряжения, величина которых примерно на 10...30% меньше, чем при шлифовании "острым" кругом без тока. Толщина напряженного слоя составляет 10...35 мкм. В тонких при-

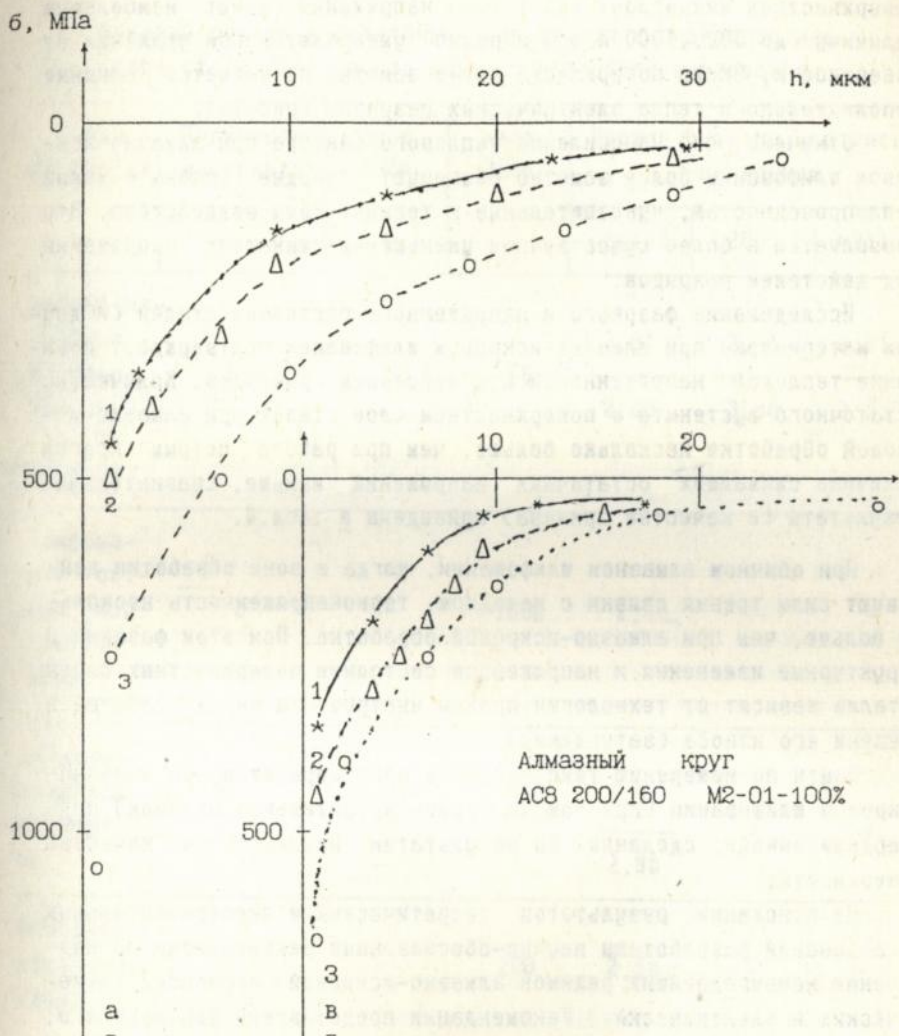


Рис.10. Остаточные напряжения в поверхностных слоях твердого сплава (а - VK8; б - T15K6)

1. Алмазное шлифование приработанным кругом.
2. Алмазно-искровое шлифование.
3. Алмазное шлифование "острым" кругом.

поверхностных микрослоях (до 1 мкм) напряжения имеют наибольшую величину (до 50...1000 МПа) и резко уменьшаются при удалении от поверхности. Около поверхности более заметно проявляется влияние дополнительного тепла электрических разрядов (рис.10).

Отмечено, что на усиление теплового фактора при алмазно-искровом шлифовании более заметно реагируют твердые сплавы с малой теплопроводностью, чувствительные к термическому воздействию. Это проявляется в более существенном уменьшении сжимающих напряжений под действием разрядов.

Исследование фазового и напряженного состояния сталей (и других материалов) при алмазно-искровом шлифовании подтверждает повышение тепловой напряженности под действием разрядов. Количество остаточного аустенита в поверхностном слое сталей при алмазно-искровой обработке несколько больше, чем при работе "острым" кругом. Величина сжимающих остаточных напряжений меньше. Сравнительные результаты (в качестве примера) приведены в табл.4.

При обычном алмазном шлифовании, когда в зоне обработки действуют силы трения связки с металлом, термонапряженность несколько больше, чем при алмазно-искровой обработке. При этом фазовые и структурные изменения и напряженное состояние поверхностных слоев металла зависят от технологии правки инструмента перед работой и степени его износа (затупления).

Опыты по измерению температуры в зоне обработки при алмазно-искровом шлифовании (при помощи термочувствительных вставок) подтвердили выводы, сделанные по результатам исследования качества поверхности.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно-обоснованные рекомендации по назначению наиболее выгодных режимов алмазно-искровой обработки (механических и электрических). Рекомендации представлены для круглого, внутреннего и плоского шлифования, в том числе для новых видов обработки - двойного скоростного и глубинного шлифования.

Установлены и сформулированы дальнейшие перспективы шлифования с введением в зону обработки дополнительной энергии. На базе выполненных исследований создана гамма алмазно-искровых шлифовальных станков.

Таблица 4.

Фазовый состав и остаточные напряжения в поверхностном слое стали ШХ-15 после алмазно-искрового шлифования

Вид обработки	Количество аустенита %	ауст. МПа	март. МПа	Период решетки мартенсита по линиям		
				(110)	(200)	(211)
Алмазно-искровое шлифование (АСВ 125/100 М1-100%)	30	50	-50	2,91	2,91	2,91
				2,86	2,86	2,86
Шлифование "острым" кругом без тока	5	-	-1000	2,86	-	-
Электроискровая обработка	35	300	250	2,91	-	-
				2,86	-	-
Исходное состояние стали	5	-	200	2,86	-	-

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований, построения имитационных моделей и математического моделирования, проведения промышленных экспериментов разработаны научные основы нового процесса шлифования с введением в зону обработки энергии электрических разрядов, которые базируются на следующих положениях:

1. Дополнительная энергия в форме электрических разрядов, вводимая в зону обработки, развивает режущий рельеф инструмента, увеличивает выступание зерен и способствует образованию на них острых режущих кромок, освобождая межзеренное пространство. При этом также происходят локальные изменения физико-механических свойств тонких поверхностных слоев обрабатываемого материала, интенсифицируется действие смазочно-охлаждающей жидкости за счет электрогидравлических эффектов и кавитации, создаются условия для смягчения параметров процесса микрорезания, что уменьшает силы шлифования в 1,2...1,8 раз. Улучшается обрабатываемость труднообрабатываемых материалов, обеспечивается возможность длительного поддержания режущих свойств инструмента, повышения в десятки раз его стойкости, работоспособности и производительности съема металла в 1,5...5 раз.

2. Зона обработки при реализации этого процесса представляет собой сложную механо-электро-физическую систему взаимосвязанных механических и электроразрядных процессов, в межэлектродных промежутках зоны шлифования которой канал разряда может шунтироваться перемычками стружками и токопроводной СОЖ. При этом возможны следующие электроэрозионные особенности и основные места действия разрядов: между вершиной стружки и связкой (пробой); между стружкой и связкой при контактировании (эрозия скольжения); при оплавлении стружки в средней ее части (взрывная электроэрозия); между основанием стружки при отрыве в конце процесса стружкообразования и металлом. В зависимости от условий работы зона обработки может характеризоваться либо гарантированным зазором с доминированием разрядов, возбуждаемых пробоем, либо наличием перемыкующих мостиков-стружек с инициированием разрядов взрывной электроэрозией, что определяет механизм действия разрядов на инструмент, стружку и обрабатываемый материал. Допустимые значения величины энергии импульса из условий неповреждаемости алмазных зерен и связки 0,05...0,1 Дж.

3. Выявлены особенности строения режущего рельефа алмазного шлифовального круга, формируемого в условиях действия электрических разрядов, который имеет увеличенную высоту выступания зерен ( $0,3...0,5 \cdot d_3$ ) и в 1,2...1,8 раза большее по сравнению с обычным шлифованием свободное межзеренное пространство. В результате косвенного действия электрических разрядов (теплового, термомеханического и термохимического) алмазные зерна приобретают дополнительные острые микрокромки, повышающие режущие свойства инструмента. Под действием разрядов в приповерхностных слоях связи глубиной 5-20 мкм происходят фазовые и структурные изменения, способствующие повышению физико-механических свойств и более прочному удержанию зерен. Регламентированы требования к связке кругов, работающих в предельных режимах: для грубых работ - с повышенной эрозионной стойкостью для обеспечения возможности большего энергетического воздействия; для чистого шлифования - с низкой эрозионной стойкостью, что позволяет уменьшить энергии импульсов, необходимых для правки инструмента.

4. Особенности модели контактного взаимодействия алмазного круга с обрабатываемым металлом, находящихся в режиме алмазно-искрового шлифования, состоят в том, что осуществляется контакт с материалом только режущих зерен без контактно-фрикционного воздействия связи. Степень внедрения зерен режущего рельефа в обрабатываемый металл зависит от величины подачи изделия на круг в нормальном к его поверхности направлении и от удельного количества работающих зерен, что аналогично для всех видов шлифования и является основанием для расчета технологических параметров процесса. Установлена зависимость величины внедрения режущего рельефа в обрабатываемый металл с электроэрозионными процессами в зоне обработки, что определяет напряжения, возникающие в месте контакта режущего зерна с обрабатываемым металлом, и силы, действующие на отдельное зерно и шлифовальный круг.

5. Имитационная модель процесса шлифования разработана на основе принципа последовательного суммирования единичных актов микропореизания с оценкой действия каждого режущего зерна и нагрузки на него в общем режущем рельефе, характеристики которого, а также форма зерна, физико-механические свойства обрабатываемого материала и режимы обработки являются варьируемыми параметрами при моделировании. При этом определяются геометрические и физические параметры процесса шлифования: параметры среза, нагрузка на зер-

но, силы микрорезания и шлифования, интенсивность взаимодействия круга и заготовки, шероховатость обработанной поверхности. Все это необходимо при сравнении технологических вариантов обработки, назначении режимов шлифования, разработке элементов АСПП.

6. При алмазно-искровом шлифовании обработанная поверхность формируется в условиях, когда стружка срезается острыми режущими кромками зерен без контактно-фрикционного воздействия связки на обрабатываемый металл, но при некотором усилении теплового фактора за счет энергии разрядов. Поэтому в приповерхностном слое ( $\sim 30$  мкм) сталей и твердых сплавов возникают сжимающие остаточные напряжения, несколько меньшие по абсолютному значению, чем при работе "острым" кругом без дополнительного введения энергии. В частности в слое ( $\sim 1 \dots 3$  мкм) величина этих напряжений достигает 1500 МПа, у сталей наблюдается увеличение остаточного аустенита (до 30%). Шероховатость поверхности при алмазно-искровой обработке несколько больше (на 5 ... 10%), чем при обычном шлифовании в связи с увеличенным выступанием зерен шлифовального круга, причем влияние на шероховатость поверхности основных условий и режима шлифования одинаково для процессов без введения дополнительной энергии и с введением. При интенсификации процесса введения энергии на обработанной поверхности появляются следы электроэрозионного воздействия в форме микролунки, соизмеримых с высотой остаточных микрогребешков, которые могут удаляться для существенного уменьшения шероховатости поверхности при выжигании без введения энергии.

7. Выявлены наиболее перспективные направления повышения производительности и эффективности процесса алмазно-искровой обработки, в основном, за счет увеличения числа работающих зерен и объема единичного среза, что не вызывает существенного возрастания нагрузки на зерна и теплонапряженности процесса. Выдвинуто, обосновано и параметрически описано положение о целесообразности увеличения фронта работы шлифовального круга для повышения производительности, так как при увеличенном выступании зерен и отсутствии сил трения связки с обрабатываемым металлом каждое режущее зерно работает достаточно автономно и эффективность работы с большими подачами возрастает при увеличении теплопроводности обрабатываемого материала.

8. Обоснована целесообразность работы в условиях алмазно-искрового шлифования с длинными срезами, что при одинаковой произво-

длительности имеет место в зонах весьма больших и весьма малых скоростей изделия. На основе этого предложенного автором принципа разработаны два варианта шлифования с длинными срезами в алмазно-искровом режиме:

- двойное скоростное шлифование при скорости изделия, соизмеримой со скоростью круга, которое эффективно при чистовых режимах и характеризуется повышенной стабильностью работы инструмента и высоким качеством обработанной поверхности;

- глубинное шлифование при больших значениях срезаемого припуска и малой скорости изделия, в процессе которого увеличение припуска и, следовательно, производительности не вызывает существенных изменений в условиях работы режущих зерен, мало влияет на изменение толщины среза по длине дуги контакта и на процесс формирования обработанной поверхности. Целесообразно применять при съеме за один проход больших припусков (в том числе неравномерных).

9. На основе выполненных исследований разработаны научно обоснованные рекомендации по назначению технологических параметров и наиболее выгодных режимов алмазно-искрового шлифования твердых сплавов, сталей, магнитных материалов и износостойких наплавов, методики для выбора инструментов и источников технологического тока. Результаты исследований реализованы в новых технологиях и конструкциях двенадцати моделей специальных алмазно-искровых шлифовальных станков, серийно выпускаемых станкозаводами Украины и стран СНГ. Полученная информация используется в учебном процессе.

Результаты исследований отражены в следующих основных работах:

1. Беззубенко Н.К. Шероховатость обработанной поверхности при шлифовании твердых сплавов // Станки и режущие инструменты. - 1967. - 4. - С. 52-55.
2. Беззубенко Н.К., Сальтевский И.С., Чернов Г.Г. и др. Алмазное шлифование твердых сплавов // Станки и режущие инструменты. - 1969. - 10. - С. 67-70.
3. Беззубенко Н.К., Козбанов Г.Н. Шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга // Станки и инструмент. - 1972. - 6. - С. 30-33.
4. Беззубенко Н.К., Телегин Д.А., Алексин Н.П. и др. Тепловые зависимости при шлифовании с высокой скоростью круга // Резание и инструмент. - 1973. - 8. - С. 3-11.
5. Семко М.Ф., Михайлуца Э.Б., Беззубенко Н.К. Электроэрозионный спо-

- сов правки алмазных кругов на металлических связках с применением жидкостей на водной основе// Синтетические алмазы.-1974.- 4.- С.14-17.
6. Беззубенко Н.К. Место нового процесса в ряду электрофизических и электрохимических методов обработки// Резание и инструмент.- 1974. -9.- С.133-139.
  7. Беззубенко Н.К. К вопросу выбора связки круга для электроалмазного шлифования// Резание и инструмент.- 1975.-14.- С.80-86.
  8. Беззубенко Н.К. и др. Формирование режущей поверхности алмазного инструмента на металлической связке при электро-эрозионной правке// Синтетические алмазы.- 1975.-1.- С.18-22. и инструмент.- 1976.- 15.- С.
  9. Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М., Серова Н.Н. Качество поверхности после алмазно-искрового шлифования кругами АСВ и АСБ // Резание и инструмент.- 1977.- 18.- С.38-42.
  10. Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М., Серова Н.Н. Особенности формирования поверхностного слоя при алмазно-искровой обработке/ Тр. Всесоюз. семин. "Качество поверхности и контактная жесткость машин".- Брянск.-1977.- С.20-21.
  11. Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М., Мочалов В.Д. Исследование фазового состава стали ШХ-15 после алмазно-эрозионного шлифования// Резание и инструмент.- 1978.- 19.- С.88-91.
  12. Фукс М.Д., Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и элборовой обработки.- К.: Вища школа, 1979.- 157 с.
  13. Беззубенко Н.К. Особенности работы алмазного инструмента в интенсифицированном режиме// Резание и инструмент.-1981.- 25.- С.39-41.
  14. Беззубенко Н.К., Матюха П.М., Иванов Н.П. Математическая модель алмазного шлифовального круга// Резание и инструмент. - 1981.- 25.- С.81-89.
  15. Беззубенко Н.К. Особенности работы алмазного инструмента в интенсифицированном режиме // Резание и инструмент.- 1981.- 25.- С.39-41.
  16. Беззубенко Н.К. Процесс алмазно-искрового шлифования// Резание и инструмент.- 1981.- 26.- С.39-42.
  17. Матюха П.Г., Беззубенко Н.К., Кононов А.Е. Устройство для изменения высоты режущего рельефа алмазных кругов// Сверхтвердые материалы.- 1982.-4.- С.47-49.

18. Беззубенко Н.К. Имитационная модель процесса шлифования// Резание и инструмент.- 1982.- 27.- С.30-35.
19. Беззубенко Н.К. Модель процесса шлифования// Резание и инструмент.- 1982.- 28.- С.22-30.
20. Беззубенко Н.К., Свердлов Б.М., Серова Н.Н. Качество поверхности как фактор, регламентирующий режимы алмазно-искрового шлифования// Резание и инструмент.- 1984.- 31.- С.35-39.
21. Матюха П.Г., Беззубенко Н.К., Терехова Л.К. Объем межзеренного пространства рельефа круга при алмазно-искровом шлифовании// Резание и инструмент.- 1985.- 34.- С.32-36.
22. К вопросу о стабилизации прижимающего усилия гидравлического привода шлифовального станка// Беззубенко Н.К., Клитной В.В., Андренко П.Н. и др./ Теория механизмов и машин.- 1984.- 36.- С.107-113.
23. Беззубенко Н.К., Сабо О., Наконечный Н.Ф. Электроэрозионная правка инструментов из сверхтвердых материалов// Тр. Мишкольского ун-та тяжелой промышл.- 1985.- С.24-25.
24. Беззубенко Н.К. Расчет шероховатости обработанной поверхности при шлифовании (вероятностный подход)// Резание и инструмент.- 1985.- 33.- С.41-47.
25. Беззубенко Н.К. Состояние зоны обработки и ее характер при алмазно-искровом шлифовании// Резание и инструмент.- 1986.- 36.- С.9-16.
26. Беззубенко Н.К., Новиков Г.В. Математическое соотношение параметров процессов стружкообразования при алмазном шлифовании // Резание и инструмент.- 1987.- 37.- С.19-23.
27. Беззубенко Н.К., Свердлов Б.М., Серова Н.Н. и др. Определение температуры алмазно-искрового шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов // Резание и инструмент.- 1987.- 37.- С.20-23.
28. Беззубенко Н.К., Евдокимов А.Е., Сальтевский И.С. Прочность удержания зерен металлической связкой алмазного круга// Резание и инструмент.- 1988.- 39.- С.37-43.
29. Беззубенко Н.К. Закономерности процессов стружкообразования при алмазном шлифовании// Резание и инструмент.- 1988.- 41.- С.25-29.
30. Беззубенко Н.К., Евдокимов А.Е. Напряжения, возникающие при микрорезании// Резание и инструмент.- 1990.- 43.- С.56-64.
31. Беззубенко Н.К. Взаимодействие алмазного круга с обрабатываемым материалом// Резание и инструмент.- 1990.- 43.- С.65-71.

- ним материалом// Тр. Украинской науч.-практ. конф.- Харьков, 1992.- С.24-28.
32. Беззубенко Н.К., Евдокимов А.Е., Сальтевский И.С. и др. Напряжение в зоне контакта алмазного зерна с металлом// Резание и инструмент.- 1992.- 45.- С.101-109.
33. Беззубенко Н.К., Рыжов Э.В., Кияшко В.А. Изучение взаимодействия импульсного излучения к поверхности алмазного инструмента // Сверхтвердые материалы.- 1993.- 6.- С.24-27.
34. Беззубенко Н.К., Рыжов Э.В., Серова Н.Н. Качество поверхности при алмазно-искровом шлифовании // Сверхтвердые материалы.- 1993.- 6.- С.53-59.
35. Беззубенко Н.К. Автоматизация управления процессом алмазно-искрового шлифования// Тез. докл. Межд. науч.-практ. конф. "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье".- Харьков-Мишколец, 1994.- Ч.4.- С.50-51.
36. Беззубенко Н.К., Сальтевский И.С. Специальные станки для алмазно-искровой обработки инструмента и оснастки// Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. "Оснастка-94".-Киев.-1994.- С.
37. Беззубенко Н.К., Давыдов В.Н. Построение функциональной модели алмазно-искровой обработки для САПР технологии//Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. "Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье".- Харьков, 1994.- Ч.1.- С.58-59.
38. Беззубенко Н.К., Рыжов Э.В., Сальтевский И.С. Рельеф алмазного круга и качество шлифованной поверхности//Тез. докл. межд. науч.-техн. конф.- Брянск, 1994.- С.
39. Беззубенко Н.К. Алмазно-искровая обработка// Технология машиностроения (Gerguarta-technologia).-Мишколец, Венгрия.- 1994.-7-8.- С.309-312.
40. Кобзарь Л.Е., Фадеев В.А., Беззубенко Н.К. Прогрессивное алмазно-искровое шлифование.- Харьков, 1995.- 52 с.
41. Рыжов Э.В., Беззубенко Н.К., Кияшко В.А. Оптимизация параметров электрических разрядов при алмазно-искровом шлифовании// Сверхтвердые материалы.- 1994.- 5-6.- С.54-57.

#### Основные изобретения:

1. А.С. N 494130 на изобретение "Способ абразивной обработки металлов"-6 августа 1975 г.
2. А.С. N 562408 на изобретение "Генератор униполярных импульсов" 28 февраля 1977-г.
3. А.С. N 1324826 на изобретение "Способ врезного шлифования круг-

- лих деталей" 22 марта 1987 г.
4. А.С. № 1593806 на изобретение "Алмазный круг для электроалмазного шлифования" 22 мая 1990 г.
5. Положительное решение от 3.08.1995 г. о выдаче патента на изобретение "Способ правки абразивных кругов", по заявке №5039741/08/020147 от 24.04.92 г.

### АНОТАЦІЯ

УДК 621.932.025

Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструмент".

Беззубенко Николай Кириллович, Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1995 г.

Работа посвящена решению народнохозяйственной проблемы - повышению эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии.

Создан новый процесс - алмазно-искровое шлифование. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по изучению зоны обработки, как механико-электрофизической системы, состояния поверхности, рельефа инструмента и его режущих свойств. Выдвинуты и обоснованы новые положения о работе круга в условиях действия разрядов. Показана возможность устранения контактно-фрикционного взаимодействия связки с обрабатываемым материалом. Разработаны имитационные модели процесса шлифования.

Исследованы основные характеристики нового процесса и качество обработанной поверхности. Выявлены положительные особенности: повышение производительности (в 1,5...5 раз), снижение сил резания, длительное сохранение высокой режущей способности инструмента и многократное увеличение его стойкости. На базе анализа потенциальных возможностей алмазно-искровой обработки разработано два новых варианта работы с увеличенными длинами срезов: двойное скоростное шлифование - с повышенной скоростью изделия и глубиной - со съемом больших припусков.

На основе результатов комплексных исследований определены области применения процесса и разработаны научно-обоснованные рекомендации, создана гамма специальных шлифовальных станков. Осуществлено эффективное внедрение в промышленность и в учебный процесс вуза.

Ключевые слова: алмазное шлифование, электрические разряды, зона обработки, рельеф круга, моделирование, качество поверхности.

The work is devoted to solution the national - economic problem consisted in raising the efficiency of diamond grinding by means of introduction the additional energy into the processing zone. The new process of diamond - sparking grinding is created. Implemented complex of theoretical and experimental investigation includes research the processing zone as mechanical - electrophysical system, the state of tooling surface and relief, its cutting characteristics. There are advanced and grounded the new scientific proposition about work of wheel in conditions the action of discharges. The possibility of removal the contact - friction interaction between bind and machining material is shown. There are worked out the simulation models of grinding process. There are investigated the basic characteristics of new process and quality of machining surface; such positive peculiarities are exposed as raising the productivity in 1,5...5 times, lowering the cutting forces, prolonged conservation the high cutting ability of tool and repeated increase its stableness. On the basis of analysis the potential possibilities of diamond - sparking machining are worked out two new variants of working with increased lengths of cuts, such as double velocity grinding with higher speed of make and deep one with output of large allowances.

On the basis the results of complex investigations are determined the fields of use the process and worked out scientific - founded recommendations. There is created the gamut of special grinding machines. There are carried out the effective introductions in industry and university educational process.

*Безумный*

Подписано к печати 25.09.95г. Формат 60x84 1/16  
 Бумага тип N2. Печать офсетная. Усл.печ.л. 3,76 Уч-изд. л. 2,94  
 Тираж 120. Заказ 1048

.....  
 Харьковский государственный политехнический университет  
 310002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.

.....  
 Типография завода ФЭД. 310023, г. Харьков, ул. Сумская, 132.

44832

AB 33.093

**AB 33.093**