

1545533

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.Э.БАУМАНА

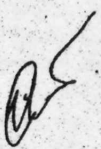
На правах рукописи

Ставицкий Иван Борисович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ГЛУБОКИХ
ОТВЕРСТИЙ

Специальность 05.03.01 - Процессы механической и
физико-технической обработки, станки и инструменты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1994 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
ПОДУРАЕВ В.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
ЗОЛОТЫХ В.Н.

- кандидат технических наук
ПОЛУЯНОВ В.С.

Ведущая организация - ГП НПО Техномаш, г.Москва.

Защита состоится "27" окт. 1994 года на заседании диссертационного совета К.053.15.15 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107006, Москва, В-5, 2-я Бауманская ул., дом 5.

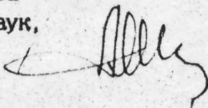
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу.

Телефон диссертационного совета 267-09-63.

Автореферат разослан "26" сентяб 1994 г.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук,
доцент



МЕЩЕРЯКОВ Р.К.

Актуальность проблемы. Развитие различных отраслей промышленности, в том числе и создание новых современных электронных приборов, вызывает необходимость изготовления точных отверстий малого диаметра (преимущественно не более 0,5 мм). Особые трудности представляет изготовление отверстий глубиной в 50...100 раз превышающей их диаметр, особенно в труднообрабатываемых металлах и сплавах - коррозионностойких сталях, в меди и медных сплавах, в тугоплавких металлах и алмазсодержащих поликристаллических сверхтвердых материалах (ПСТМ).

Особенно жесткие требования предъявляются к обрабатываемым отверстиям деталей электронной техники, СВЧ приборов. Изделия этого класса отличают высокие требования к точности обрабатываемых отверстий при одновременном обеспечении высокого качества получаемых поверхностей. Требуемая точность изготовления отверстий малого диаметра достигает в ряде случаев 0,002...0,005 мм, шероховатость поверхностей отверстий - $Ra < 1,25$ мкм, глубина - 50 диаметров и более. Во многих случаях эти отверстия должны быть близко расположены, а перемычки между ними должны составлять менее десятой доли миллиметра. Все это вызывает необходимость совершенствования технологических процессов и оборудования.

Одним из перспективных методов получения вышеуказанных отверстий, а иногда и единственно возможным, является прецизионная электророзливная приливка (ЭЭП) металлов, характеризующаяся использованием электрических разрядов малой энергии ($W_{и} < 10^{-3}$ Дж) и длительности ($t_{и} < 3$ мкс). Однако широкое промышленное освоение ЭЭП для изготовления отверстий малого диаметра сдерживается из-за ряда нерешенных проблем и требует дальнейших исследований технологических вопросов, связанных с особенностями данного метода формообразования. Вполне очевидно, что способ ЭЭП прецизионных отверстий малого диаметра в настоящее время практически не исследован. Существующее оборудование, реализующее этот процесс и традиционно использующее RC-генераторы импульсов в качестве источников питания и керосин в качестве рабочей жидкости (РЖ), исчерпало свои возможности в части повышения производительности процесса и качества обработанной поверхности, снижения износа электрода-инструмента (ЭИ), увеличения предельной глубины прошиваемого отверстия. Кроме того, нет научно-обоснованных методик выбора режимов ЭЭП.

В нашей стране практически не решена задача ускоренной про-



шивки заходных отверстий для проволочного электрода, применяемой ведущими зарубежными фирмами на вырезном электроэрозионном оборудовании. Поэтому решение проблемы высокопроизводительного изготовления отверстий диаметром 0,3...1,0 мм при отношении глубины прошиваемого отверстия к его диаметру до 100 - это не только успех в реализации задачи обработки отверстий малого диаметра, но еще и расширение области применения электроэрозионной технологии при изготовлении, например, деталей разделительных штампов, а также значительный шаг в обеспечении дальнейшей автоматизации электроэрозионного вырезного оборудования.

Цель и задачи работы. Целью работы является изыскание путей интенсификации процесса ЭЭП глубоких отверстий малого диаметра, повышения предельной глубины прошивки, увеличения их точности и качества обработанной поверхности на основе исследования комплекса технологических вопросов, связанных с особенностями электроэрозионного формообразования при использовании искровых разрядов малой энергии и длительности, а также малых площадей обработки.

В соответствии с целью были определены следующие задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов интенсификации ЭЭП отверстий малого диаметра, а также увеличения предельной глубины прошивки. Выбрать на основе этого анализа оптимальные технологические схемы ЭЭП отверстий малого диаметра и определить условия их эффективного использования.

2. Теоретически и экспериментально исследовать механизм ЭЭП отверстий малого диаметра, а также процесс удаления продуктов эрозии из межэлектродного промежутка (МЭП) в процессе ЭЭП.

3. Разработать методику расчета и выбора оптимальных параметров гидросистемы станка, предназначенного для ЭЭП отверстий малого диаметра.

4. Определить новые информативные параметры диагностики процесса ЭЭП и разработать на их основе экспресс-методику оптимизации режимов обработки и способ адаптивного управления процессом ЭЭП.

5. Теоретически и экспериментально исследовать особенности электроэрозионной обработки (ЭЭО) и ЭЭП отверстий малого диаметра в алмазсодержащих ПСТМ.

6. Разработать рекомендации по выбору режимов ЭЭП отверстий малого диаметра : различных материалах, в том числе и в алмазсодержащих ПСТМ.

7. Разработать и оптимизировать конструктивные параметры и

материалы ЭИ для ЭЭП отверстий малого диаметра.

8. Разработать рекомендации по выбору конструктивно-технологических решений при ЭЭП отверстий малого диаметра.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились на основе теории эрозии металлов при импульсном электрическом разряде в жидком диэлектрике. Использовался математический аппарат теории теплопроводности.

В экспериментальных исследованиях использовались специально разработанная методика идеального удаления продуктов эрозии из зоны обработки, известная методика групповых лунок и др. Обработка результатов проводилась с использованием методов математической статистики.

Экспериментальные исследования проводились на двух специальных экспериментальных установках, изготовленных на базе станка модели А207.86, а также на серийно выпускаемых станках О4ЭП-10М, А207.87 и А207.86. Использовался также специальный комплект акустико-эмиссионной аппаратуры, анализатор спектра С4-77, интерференционный микроскоп МИИ-4, профилограф-профилометр модели 252 и другая аппаратура.

Научная новизна. Впервые выполнено комплексное исследование гидродинамических процессов при ЭЭП отверстий малого диаметра, на основе которого предложены пути и средства повышения производительности ЭЭП. Разработана методика расчета и выбора гидродинамических и энергетических режимов, обеспечивающих условия оптимального протекания процесса обработки.

Выполнен анализ особенностей течения РЖ по трубчатому ЭИ, установлена зависимость съема материала при ЭЭП отверстий малого диаметра от расхода РЖ через МЭП. Получены неизвестные ранее зависимости, связывающие расход РЖ, протекающей через капиллярный канал ЭИ, с диаметром этого капилляра, длиной ЭИ и давлением РЖ на входе в трубчатый ЭИ.

Разработана методика оценки эффективности процесса ЭЭП отверстий малого диаметра.

Получены неизвестные ранее экспериментальные данные, связывающие между собой энергию импульса и глубину, диаметр, объем эрозионной лунки, объем валика образующегося на периферии лунки, для диапазона режимов, используемых при ЭЭП отверстий малого диаметра.

Доказано, что на производительность процесса ЭЭП отверстий малого диаметра существенным образом влияет не только загрязнение МЭП продуктами эрозии, но и эффективность удаления образующихся в МЭП газовых полостей.

Теоретически и экспериментально доказана возможность обработки алмазсодержащих ПСТМ в безударной рабочей жидкости методом ЭЭО, в том числе и ЭЭП отверстий малого диаметра. Показан механизм разрушения нетокопроводящих алмазных зерен при ЭЭО (ЭЭП).

Предложен, теоретически и экспериментально исследован новый метод диагностики состояния МЭП и управления процессом ЭЭО (ЭЭП), основанный на методе акустической эмиссии (АЭ). Проведен теоретический анализ процесса генерирования сигналов АЭ при ЭЭО. Теоретически и экспериментально установлена взаимосвязь между амплитудой сигналов АЭ и технологическими параметрами ЭЭО (ЭЭП).

Практическая ценность. Разработанные на основании проведенных исследований методы инженерного расчета и выбора технологических параметров ЭЭП и систем станка позволяют на практике формулировать технические требования к вновь проектируемому оборудованию, а также назначать технологические режимы, характеризующие оптимальным протеканием процесса ЭЭП отверстий малого диаметра.

Практическое использование выявленных физических закономерностей акустико-эмиссионных процессов позволяет решать оптимизационные технологические задачи, что приводит к сокращению сроков технологической подготовки производства и устранению субъективных факторов при настройке технологического оборудования и выборе режимов обработки. Разработаны принципы построения системы адаптивного управления процессом ЭЭО (ЭЭП) на основе метода АЭ. Даны практические рекомендации по использованию разработанной на основе метода АЭ экспресс-методики оценки состояния МЭП и настройке технологического оборудования.

Выявленный, теоретически и экспериментально обоснованный механизм разрушения электрической эрозией нетокопроводящих алмазных зерен позволяет использовать метод ЭЭО, в том числе и ЭЭП отверстий, для обработки алмазсодержащих ПСТМ. Проведенные исследования позволили сформулировать практические рекомендации для разработки технологических процессов обработки алмазсодержащих ПСТМ и назначения рациональных технологических режимов обработки.

Реализация результатов работы. Практическая ценность и эффективность разработок подтверждена результатами внедрения их на четырех промышленных предприятиях. Научные и практические результаты работы использованы при разработке технологических процессов изготовления специнструмента из алмазсодержащих ПСТМ и твердых сплавов, а также прецизионных глубоких отверстий малого диаметра в специзделиях; при проектировании и освоении выпуска

технологического оборудования, предназначенного для ЭП глубоких отверстий малого диаметра.

Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 1000000 руб. в год (в ценах 1 кв. 1993 г.).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технических семинарах кафедры "Процессы и инструментальные системы механической и физико-химической обработки" МГТУ им. Н.Э.Баумана, на Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки" в г. Москве (1988 г.), на краевой научно-практической конференции "Повышение эффективности технологических процессов машиностроительных производств" в г. Барнауле (1989 г.), на Республиканской конференции "Прогрессивные процессы механической обработки труднообрабатываемых материалов" в г. Мариуполе (1989 г.), на Всесоюзном семинаре Московского Дома научно-технической пропаганды им. Дзержинского "Прогрессивные технологические процессы и оборудование ЭХК обработки" в г. Москве (1989 г.), на Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" в г. Москве (1991 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 6 печатных работах и научно-техническом отчете.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 256 страницах и содержит 67 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется научная новизна и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы по проблеме повышения эффективности изготовления прецизионных глубоких отверстий малого диаметра. Сформулированы основные особенности прецизионных отверстий и требования, предъявляемые к методам их изготовления. Проведен сравнительный анализ известных методов изготовления отверстий малого диаметра - ЭП, электрохимической прошивки, ультразвуковой обработки, лазерной прошивки, электронно-лучевой обработки, фотохимической обработки. Из проведенного анализа сделан вывод, что для изготовления отверстий малого диаметра (0,3...1,0 мм) с отношением глубины отверстия к диаметру

до 50...100, шероховатостью поверхности $Ra < 1,25$ мкм наиболее приемлемым и перспективным является метод ЭЭП.

Выявлены основные особенности прецизионной ЭЭП отверстий малого диаметра:

1. Применение в качестве РЖ технической воды вместо керосина. Следствием этой особенности является использование биполярных импульсов напряжения микросекундной длительности со строго определенными отношениями амплитуд и длительностей прямой и обратной полуволн.

2. Осуществление мероприятий, создающих постоянные условия для быстрой и эффективной эвакуации продуктов эрозии и газовых полостей из МЭП.

3. Применение совершенных систем управления процессом ЭЭП, основанных на непрерывном контроле состояния МЭП, используя для этого информацию о протекании эрозионных процессов непосредственно из зоны обработки.

В первой главе также представлен обзор известных технологических схем и оборудования для ЭЭП отверстий малого диаметра, описаны их области применения, присущие им достоинства и недостатки. Выбраны наиболее перспективные технологические схемы для дальнейших исследований - ЭЭП трубчатых ЭИ с принудительной прокачкой РЖ через внутренний капиллярный канал электрода и ЭЭП вращающимся горизонтальным цилиндрическим ЭИ, изготовленным электроэрозионной обточкой непосредственно на шлифовочном станке без последующей переустановки этого ЭИ.

Проанализированы основные факторы, влияющие на технологические характеристики процесса ЭЭП - производительность процесса, точность формообразования, качество обработанной поверхности. Отмечено, что производительность процесса ЭЭП отверстий малого диаметра определяется прежде всего следующими факторами: условиями удаления продуктов эрозии и газовых полостей из МЭП, совершенством следящей системы электроэрозионного станка, электрическими параметрами обработки, вращением ЭИ, физическими свойствами материалов ЭИ и обрабатываемой детали.

Проведенный анализ известных методов интенсификации процесса ЭЭП позволяет сделать вывод, что при ЭЭП отверстий малого диаметра наиболее целесообразно применять прокачку РЖ через трубчатый ЭИ и вращение ЭИ.

На основании представленного в первой главе анализа были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе изложена методика проведения экспериментальных исследований. Цель этих исследований заключается в

представлении общей динамической картины процесса ЭЭП отверстий малого диаметра, а также в выявлении ряда качественных и количественных соотношений между параметрами обработки.

При выполнении настоящей работы процесс ЭЭП малых отверстий исследовали с помощью нескольких взаимосвязанных методов. В основе одного из них лежит изучение следов единичных актов эрозии (эрозионных лунок), образованных искровыми разрядами малой энергии и длительности на различных материалах. Другой метод заключается в исследовании интегральных характеристик процесса ЭЭП в реальных условиях. Кроме перечисленных методов в настоящей работе предложен и используется метод, основанный на изучении процесса электроискровой обработки в идеальных с точки зрения условий эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки условиях. Суть его заключается в сведении практически к нулю влияния загрязнений продуктами эрозии МЭП, при неизменных всех остальных технологических параметрах. Данный метод позволяет получить сведения о влиянии площади обработки на скорость съема материала, а также, в сочетании с вышеназванными методами, информацию о влиянии загрязнения МЭП продуктами эрозии на производительность ЭЭП.

Для получения и изучения эрозионных лунок, образованных искровыми разрядами, применялась методика групповых лунок. Исследования проводились на образцах из меди, латуни, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, вольфраме, молибдене, вольфрамо-медной композиции ВМ-20. Геометрические размеры лунок определялись с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. При необходимости получения профилограмм эрозионных лунок их профили регистрировались шуповым методом на профилографе-профилометре модели 252.

Исследования технологических возможностей ЭЭП отверстий малого диаметра, формообразования прошиваемого отверстия и качества его поверхности, а также выявление различных необходимых количественных и качественных соотношений между параметрами обработки проводились на двух специальных экспериментальных установках (конструкции экспертных установок разработаны и изготовлены в НИО "Исток"). Первая из них - установка ЭХ1970 - изготовлена на базе серийно выпускаемого станка модели А207.86. Одной из характерных особенностей данной установки является горизонтальное расположение ЭИ. Вторая экспериментальная электроискровая установка предназначена для прошивки глубоких отверстий малого диаметра трубчатым ЭИ. Конструктивно установка состоит из прошивочной головки, расположенной на серийном электроискровом станке модели А207.86, насоса высокого давления ($P=0...12$ МПа), генератора импульсов, системы ЧПУ и комплекса измерительной ап-

паратуры. РЖ - вода техническая.

Проведенный в настоящей работе анализ материалов для ЭИ показал, что для ЭИП отверстий малого диаметра цилиндрическим ЭИ целесообразно применять ЭИ, изготовленные из вольфрамо-медной композиции с содержанием вольфрама 80%, меди 20%. Поэтому при проведении исследований в данной работе в качестве материала ЭИ для прошивки отверстий на экспериментальной установке ЭХ1970 использовался псевдосплав ВМ-20 (эльконайт) ТУ48-19-38-86. В качестве материала трубчатых ЭИ использовались медь и латунь.

В третьей главе приводится обоснование и разработка метода акустической эмиссии для повышения эффективности электроэрозионного формообразования.

В соответствии с моделью электрической эрозии в настоящей работе выделено и рассмотрено 5 источников АЭ, действующих при ЭЭО: ударная волна, реактивное давление паров и мелких капель, выбрасываемых из лунки, структурно-фазовые превращения обрабатываемого материала, тепловой удар (нестационарные термоупругие напряжения), возникновение и развитие микротрещин. В результате их совокупного действия на поверхности материала в точках приложени- и электрических разрядов возникают упругие волны. Все источники АЭ можно рассматривать действующими одновременно, так как рассогласование по времени между ними имеет порядок 1 мкс. В результате можно считать, что совокупность всех источников АЭ является волновой реакцией материала на электрический импульс. Выделение при экспериментальном исследовании каждого фактора, очевидно, не представляется возможным, так как все они взаимосвязаны и протекают, как было сказано выше, практически одновременно. Поэтому целесообразно регистрировать суммарное воздействие этих факторов.

Качественная оценка вышеназванных составляющих показывает, что все они являются функцией разрядного тока (энергии импульса), длительности импульса и физических свойств обрабатываемого материала.

При обработке сигналов АЭ целесообразно использовать методы, позволяющие оценить энергоемкость этих сигналов. Одним из них является метод, основанный на измерении среднеквадратического значения амплитуды сигнала.

В гл. 3 показано, что

$$A = k_1 \sqrt{W_{и}} = k_2 \sqrt{M},$$

где A - амплитуда сигнала АЭ, k_1 , k_2 - коэффициенты пропорцио-

нальности; $W_{\text{и}}$ - мощность импульсов тока, M - производительность процесса ЭЭО (величина эрозии в единицу времени).

Для того, чтобы получить зависимость амплитуды сигнала АЭ от энергии импульсов, это выражение можно представить в виде

$$A = k_1 \sqrt{f_p W_{\text{и}}} = k_1 \sqrt{\eta f_{\text{хх}} W_{\text{и}}}.$$

где $\eta = f_p / f_{\text{хх}}$ - коэффициент использования импульсов, $f_{\text{хх}}$ - частота холостого хода генератора, f_p - частота рабочих импульсов, $W_{\text{и}}$ - энергия импульсов.

Из представленных выражений видно, что амплитуда сигналов АЭ при ЭЭО пропорциональна частоте рабочих импульсов (коэффициенту использования импульсов) и их энергии, а следовательно, производительности процесса ЭЭО.

Для приема, регистрации и анализа сигналов АЭ, возникающих при ЭЭО (ЭЭП), использовалась специальная аппаратура, состоящая из приемного преобразователя, предварительного высокочастотного усилителя, блока универсальных фильтров, блока основного усилителя, блока интегрирования, самописца НЗЗ8 и анализатора спектра С4-77.

При проведении экспериментов исследовалось влияние изменения различных режимов обработки на сигнал АЭ. Было подтверждено выдвинутое ранее предположение о зависимости амплитуды сигнала от технологических факторов ЭЭО, что дает возможность диагностирования этого процесса непосредственно в ходе обработки. Экспериментальные данные, представленные в гл. 3, подтверждают полученные ранее теоретические зависимости.

Анализ полученных экспериментальных исследований показывает, что метод АЭ позволяет осуществлять диагностирование процесса ЭЭО (ЭЭП) и тем самым повышать его производительность.

В четвертой главе приведены результаты исследований гидродинамических процессов при ЭЭП отверстий малого диаметра.

Эффективность ЭЭП отверстий малого диаметра, в том числе и глубоких, зависит прежде всего от степени загрязнения продуктами эрозии МЭП (эффективности удаления продуктов эрозии из МЭП), а также от скорости удаления газовых полостей из зоны обработки. Необходимость принудительного удаления газовых полостей обусловлена тем, что при ЭЭП отверстий малого диаметра объем МЭП соизмерим с объемом газов, образующихся от одного или нескольких искровых разрядов. При этом образующиеся газовые полости могут полностью вытеснить РЖ из МЭП и тем самым вызывать приостановку процесса обработки до восстановления сплошности среды. Это, в

свою очередь, приводит к снижению коэффициента использования импульсов и уменьшению скорости прошивки. Проведенные эксперименты подтверждают эти выводы.

Объем образующихся в результате искрового разряда газов зависит от энергии электрического импульса, а время выхода газовой полости из МЭП - от гидродинамических особенностей процесса ЭЭП (скорости прокачки РЖ, величины межэлектродного зазора, вязкости РЖ и др.). Поэтому назначать энергетические параметры режимов ЭЭП отверстий малого диаметра необходимо с учетом гидродинамических особенностей каждого конкретного процесса обработки.

В работе показано, что добиться существенного повышения производительности процесса ЭЭП можно путем увеличения частоты рабочих импульсов тока f_1 (при прочих равных условиях). Это, в свою очередь, достигается путем увеличения коэффициента использования импульсов η до значений, близких к 1, и частоты следования импульсов холостого хода генератора $f_{хх}$ до некоторого предельного значения $f_{хх}^{пр}$. Значение $f_{хх}^{пр}$ является максимальной частотой холостого хода генератора, при которой коэффициент η может быть равен или близок к единице (для данных условий обработки). При превышении этого значения производительность ЭЭП отверстий не увеличивается, так как происходит уменьшение коэффициента использования импульсов η .

В гл. 4 представлена методика выбора оптимальной частоты следования импульсов и длительности пауз между ними, а также необходимого расхода РЖ через МЭП. Получено выражение для определения предельной частоты холостого хода генератора $f_{хх}^{пр}$:

$$f_{хх}^{пр} = V_{мэп} / (t_{гп} \cdot k_v \cdot t_{и}^{0.5} \cdot I_p^{1.4}),$$

где $V_{мэп}$ - объем МЭП, мм³; $t_{п}$ - время нахождения газовой полости, образующейся от единичного разряда, в МЭП, с; k_v - коэффициент; $t_{и}$ - длительность импульса тока, мкс; I_p - амплитуда импульса тока, А.

Из представленного выражения видно, что для увеличения $f_{хх}^{пр}$ и, следовательно, скорости ЭЭП отверстий необходимо увеличивать объем МЭП, применять короткие импульсы и уменьшать время нахождения газовых полостей в МЭП. Первое условие реализуется повышением напряжения холостого хода генератора импульсов, а третье - высокоскоростной прокачкой РЖ через МЭП.

Проведенные эксперименты показали, что расход РЖ через МЭП в значительной степени определяет стабильность ЭЭП, частоту следования рабочих импульсов, а следовательно, производительность

процесса обработки. Представленная в гл. 4 методика расчета и необходимые экспериментальные данные позволяют определить требуемый расход РЖ через МЭП.

Для обеспечения требуемого расхода РЖ через МЭП при ЭЭП трубчатым ЭИ необходимо установить зависимость расхода РЖ от ее давления на входе в ЭИ, длины ЭИ и диаметра его внутреннего канала. Как показали эксперименты, погрешность вычисления по известным формулам гидравлики может составлять 100% и более, при этом пользоваться ими крайне неудобно. Поэтому была получена зависимость

$$Q = 18600 d_k^{2,42} L^{-0,528} P^{0,735},$$

где Q - расход РЖ через трубчатый ЭИ, мм³/с; d_k - внутренний диаметр трубчатого ЭИ, мм; L - длина ЭИ, мм; P - давление РЖ на входе в ЭИ, кгс/см².

В гл. 4 также представлена методика расчета и необходимые экспериментальные данные для определения максимально возможной скорости ЭЭП отверстий для различных режимов обработки и обрабатываемых материалов. Приводятся особенности ЭЭП отверстий трубчатым ЭИ. Показано, что существенное влияние на расход РЖ через МЭП и, следовательно, на производительность ЭЭП оказывает неудаляемый отход, представляющий собой стержень, обрамляющийся из обрабатываемого материала и находящийся внутри капиллярного канала ЭИ. Поэтому ЭЭП следует производить без образования этого отхода. Из анализа результатов экспериментов сделан вывод, что оптимальный внутренний диаметр ЭИ для рассматриваемого диапазона режимов равен 100...110 мм. При увеличении энергии импульсов внутренний диаметр ЭИ следует увеличить.

В пятой главе рассмотрены особенности ЭЭО (ЭЭП) композиционных поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза.

В последнее время в различных отраслях промышленности все большее применение находят различные детали из алмазосодержащих ПСТМ, конструктивной особенностью которых является наличие отверстий малого диаметра (волоки, направляющие фильеры и другие детали, требующие высокой износостойкости их рабочих поверхностей). Наиболее эффективным методом обработки ПСТМ на основе алмаза является метод ЭЭО материалов. Однако наличие в материалах этого класса нетокопроводящих алмазных зерен накладывает некоторые ограничения на применение этого метода обработки, требует использования специальных режимов, а иногда изменения традицион-

ных технологических схем формообразования. Поэтому необходимо рассмотреть особенности этого метода обработки при формообразовании алмазосодержащих ПСТМ.

В рассматриваемых алмазосодержащих ПСТМ алмазные зерна, как правило, имеют размеры не более 60 мкм и скреплены между собой кобальтовой связкой. Содержание кобальта в ПСТМ около 5%.

ЗОО (ЗЭП) материала, содержащего нетокопроводящие алмазные зерна, возможна по следующим причинам:

- 1) алмазные зерна имеют малые размеры (до 60 мкм) и скреплены между собой токопроводящей кобальтовой связкой;
- 2) алмаз переходит в токопроводный графит при температуре около 1700°C;

- 3) в кислородной среде алмаз легко загорается при температуре 720°C и горит, образуя диоксид углерода (CO₂).

Исходя из вышеназванных причин можно предположить, что при обработке алмазосодержащих ПСТМ электроэрозионным методом могут и должны присутствовать следующие схемы формообразования:

- 1) электроэрозионное разрушение (выборка) связки, оголение алмазного зерна, его отслоение и удаление;

- 2) термическое разрушение зерна (или его части) при инициировании разряда на связку в непосредственной близости от алмазного зерна (в момент выхода зерна из связки в процессе формообразования) или в зону контакта зерна и связки;

- 3) термическое разрушение зерна (или его части) при инициировании разряда на его графитизированную область;

- 4) выгорание зерна в кислородной среде, образующейся в результате разложения рабочей жидкости в процессе обработки.

Для анализа процесса удаления материала и формирования рельефа поверхности при обработке ПСТМ на основе алмаза была произведена оценка плотности и теплового потока q непосредственно в зоне формообразования. Для этого было использовано решение задачи о перемещении границы фазового превращения. Задача для двухфазной системы описывается системой двух дифференциальных уравнений, представляющих собой основное уравнение теплопроводности для случая нестационарной теплопроводности в полубесконечном твердом теле:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < \eta; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & \eta < x < \infty; \end{cases}$$

где a - коэффициент температуропроводности, η - координата гра-

ницы фазового превращения; 1 и 2 - индексы различных фаз материала; координата x измеряется от поверхности. В рассматриваемой задаче тело считается полубесконечным, так как размеры интересующей области формообразования много меньше размеров электрода.

Начальные и граничные условия заданы в следующем виде:

$$T_1(x, 0) = T_{пл}; \quad T_2(x, 0) = T_0;$$

$$T_1(\eta, t) = T_2(\eta, t) = T_{пл}; \quad T_2(\infty, t) = T_0;$$

$$q = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0}; \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\delta} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -\rho q_{пл} \frac{\partial \delta}{\partial t},$$

где $T_{пл}$ - температура плавления обрабатываемого материала; T_0 - начальная температура (20°C); ρ - плотность; $q_{пл}$ - скрытая теплота плавления; λ - коэффициент теплопроводности.

Наиболее адекватным методом исследования поставленной задачи являются методы математического моделирования. Согласно численным методам моделирования была составлена программа, основанная на неявной конечно-разностной схеме и методе прогонки решения системы линейных уравнений. Программа написана на языке Си.

Результаты расчетов системы уравнений, выполненные по описываемой программе, представляются как в виде численных значений, так и в виде графиков выводимых на дисплей. Графические зависимости позволяют наглядно оценить глубину фазового превращения материала в зависимости от времени действия источника теплоты (длительности импульса тока) при разных действующих тепловых потоках (энергиях импульсов), определить минимальное время действия источника теплоты, необходимое для обеспечения начала фазового превращения материала. Кроме того, графические зависимости позволяют оценить изменение температуры материала по мере удаления от его поверхности при различных действующих тепловых потоках.

Анализ решений системы уравнений показал, что для ЭЭО (ЭЭП) алмазных зерен необходимо использовать большие плотности теплового потока ($q > 17,5 \cdot 10^4$ Вт/мм²) и короткие импульсы тока ряда ($t_{им} 0,8$ мкс). Следует отметить, что минимальная плотность теплового потока, необходимая для ЭЭО алмазных зерен, превосходит минимальную плотность теплового потока для такого тугоплавкого материала как вольфрам в 2,8 раза.

Как показали эксперименты, проведенные в рамках данной работы, алмазодержащие ПСТМ можно эффективно обрабатывать не только в углеродсодержащих жидкостях, но и в воде. ЭЭО (ЭЭП) алмазодержащих ПСТМ в воде свидетельствует, что обработка алмаз-

ных зерен в рассматриваемых сверхтвердых материалах возможна без осаждения на их поверхности токопроводящего слоя, являющегося, как правило, результатом разложения углеродсодержащих РЖ.

Глава 6 посвящена рекомендациям по выбору конструктивно-технологических решений при ЭЭП отверстий малого диаметра. В ней представлена методика расчета минимальной длины рабочей части ЭИ при ЭЭП отверстий малого диаметра. Полученные в результате проведенных экспериментов зависимости позволяют для рассматриваемого диапазона режимов определить необходимую длину цилиндрического ЭИ, длину его изнашиваемой части, ее геометрию, линейный износ ЭИ. Представлены полученные формулы для расчета конструктивных параметров направляющей ЭИ фильеры. Фильера предназначена для уменьшения погрешности формы прошиваемых отверстий и увеличения их точности.

В гл. 6 приводятся результаты исследований по влиянию вращения ЭИ на производительность ЭЭП отверстий малого диаметра и их точность. Приводятся рекомендации по выбору частоты вращения ЭИ. Показано, что вращение ЭИ является эффективным средством прежде всего для улучшения качества получаемых отверстий (уменьшения увода оси, эллипсности и т.д.). Некоторое повышение производительности ЭЭП происходит благодаря самоустранению коротких замыканий. В то же время вращение ЭИ не решает проблемы удаления продуктов эрозии из зоны обработки особенно при прошивке глубоких отверстий. Удаление частиц материала из зоны обработки при малых площадях поперечного сечения ЭИ происходит за счет сил, возникающих вследствие искрового разряда (при отсутствии прокачки РЖ). При этом влияние центробежных сил, обусловленных вязкостью жидкости и большой скоростью вращения ЭИ, пренебрежимо мало из-за малого радиуса ЭИ.

Кроме того, в гл. 6 представлены блок-схемы двух устройств, позволяющие повысить производительность ЭЭО (ЭЭП) на основе использования метода АЭ. Особенностью этих устройств является возможность автоматического определения рациональных режимов формообразования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе комплекса проведенных исследований процессов, происходящих в МЭП, показаны пути и средства повышения эффективности ЭЭП отверстий малого диаметра. Разработана методика выбора оптимальных технологических параметров для ЭЭП малых отверстий.

2. Теоретические и экспериментальные исследования гидродина-

мических процессов в зоне обработки показали, что производительность ЭЭП отверстий малого диаметра зависит от эффективности удаления из МЭП как продуктов эрозии, так и газовых полостей, образующихся в результате разложения РЖ. Доказана необходимость взаимосвязи энергетических и гидродинамических параметров обработки.

3. Установлено, что производительность процесса возрастает с увеличением расхода РЖ через МЭП до создания условий полной реализации вводимой мощности. Разработана методика расчета необходимого расхода РЖ через МЭП, обеспечивающего максимально возможную для данных энергетических режимов производительность ЭЭП.

4. Получена экспериментальная зависимость, связывающая расход РЖ, протекающей через капиллярный канал трубчатого ЭИ, с его внутренним диаметром и длиной, а также с давлением РЖ на входе в ЭИ.

5. Предложен, теоретически и экспериментально исследован новый метод диагностики состояния МЭП и управления процессом ЭЭО (ЭЭП), основанный на методе акустической эмиссии. Установлены источники АЭ при ЭЭО (ЭЭП). Теоретически и экспериментально установлена взаимосвязь между амплитудой сигналов АЭ и технологическими параметрами ЭЭО (ЭЭП). Показана перспективность использования метода АЭ для контроля состояния МЭП и управления процессом ЭЭО (ЭЭП).

6. Теоретически и экспериментально доказана возможность обработки алмазосодержащих ПСТМ в безуглеродной РЖ методом ЭЭО, в том числе ЭЭП отверстий малого диаметра. Показан механизм разрушения нетокопроводящих алмазных зерен при ЭЭО (ЭЭП).

7. Получены неизвестные ранее экспериментальные данные, связывающие энергию импульса и глубину, диаметр, объем эрозионной лунки, а также объем валика, образующегося на периферии лунки, для диапазона режимов, используемых при ЭЭП отверстий малого диаметра.

8. Показана целесообразность применения в качестве РЖ технической воды вместо керосина для увеличения производительности ЭЭП отверстий малого диаметра и улучшения качества образующейся поверхности.

9. Получены экспериментальные зависимости длины изнашивающейся части и линейного износа ЭИ от его диаметра, позволяющие определить минимальный вылет ЭИ.

10. Научные и практические результаты диссертационной работы внедрены на четырех предприятиях с общим экономическим эффектом 1000000 руб. в год (в ценах 1 кв. 1993 г.).

1. Диваев А.В., Ставицкий И.В. Использование сигналов акустической эмиссии для повышения эффективности электроэрозионной обработки // Прогрессивные технологические процессы и оборудование ЭХК обработки: Сб. докл. - М.: МДНТП, 1989. - С. 22...25.

2. Ставицкий И.В. Диагностика процесса электроэрозионной обработки методом акустической эмиссии // Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы фундаментальных наук": Сб. докл. - М.: Изд-во МГТУ, 1991. - Т. 4. - С. 42...43.

3. Гуларян К.К., Ставицкий И.В. Изготовление электродов-инструментов для электроэрозионного копирования // Электронная обработка материалов. - 1991. - № 5. - С. 4...6.

4. Ставицкий И.В. Расчет оптимальной длины рабочей части электрода-инструмента при электроискровой прошивке глубоких отверстий малого диаметра // Краевая научно-практическая конференция "Повышение эффективности технологических процессов машиностроительных производств": Тезисы докл. - Барнаул: Алтайский политехнический институт, 1989. - С. 85...86.

5. Ставицкий И.В., Фролов М.В., Девин Л.Н. Технология изготовления прецизионных фасонных резцов из алмазосодержащих СМ // Всесоюзная научно-техническая конференция "Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки": Тезисы докл. - М.: Изд-во МГТУ, 1988. - Ч. 1. - С. 162.

6. Ставицкий И.В. Электроэрозионное изготовление фасонных резцов из алмазосодержащих СМ // Республиканская конференция "Прогрессивные процессы механической обработки труднообрабатываемых материалов": Сб. докл. - Мариуполь: РДЭНТИ, 1989. - С. 118...119.