

На правах рукописи

Фролов Владимир Яковлевич

ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОЙ  
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНО – ДУГОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ  
МЕТАЛЛОВ

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург

2003 г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет» (ГОУ «СПбГПУ»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Рубцов Виктор Петрович;  
доктор технических наук,  
профессор Руссо Владимир Леонидович,  
доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ,  
профессор Сумеркин Юрий Васильевич

Ведущая организация: ОАО «Институт сварки России».

Защита состоится "5" февраля 2004 г., в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.20 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: Санкт Петербург, ул. Политехническая 29, Гл. здание, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.229.20

к.т.н., доцент

Курмашев А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В 60 – е годы активное развитие получили электроэрозионные методы обработки токопроводящих материалов и сплавов основанные на использовании импульсных электрических разрядов. К этим методам относятся: электроискровая, электроимпульсная, анодно - механическая (электроконтактная) способы обработки металлов. Каждой разновидности электроэрозионной обработки соответствуют определенные технологические характеристики, оборудование и область промышленного применения, которые обусловлены физическими процессами, происходящими в каждом из указанных методов.

В большинстве указанные методы были реализованы в промышленности и обеспечивают самые различные технологические операции. В то время как метод электроконтактной (далее электроконтактно – дуговой ЭКД) обработки металлов обеспечил лишь ограниченное применение в виде отдельных технологических участков, в частности для резки и поверхностной обработки металлов из конструкционных сталей. Однако промышленность испытывает серьезные трудности в разделке крупногабаритных заготовок, в том числе и труднообрабатываемых инструментальных сплавов. Такое ограниченное развитие, несомненно, высокопроизводительного метода контактно – дугового выплавления металла, обусловлено недостаточным изучением физических процессов, происходящих на стадиях контакта и возникновения дугового разряда между инструментом и деталью, а также высокой степенью износа инструмента. Как будет показано ниже, анализ литературных данных не дает ясного представления о происходящих физических процессах в зоне обработки, а зачастую у разных авторов представленные данные являются противоречивыми. В действительности, наиболее распространенные способы зажигания электрической дуги, а именно в результате пробоя промежутка (электроискровые, электроимпульсные методы эрозии), размыкания электродов (эрозия электрических аппаратов) достаточно хорошо изучены. Напротив, зажигание электрической дуги на стадии процесса замыкания электродов после их физического соприкосновения изучено крайне недостаточно, так как это явление свойственно физическим процессам происходящим только в электроконтактно – дуговом способе выплавления металлов. В результате при реализации этого метода в технологических процессах возникают трудности, вызванные отсутствием практических рекомендаций при конструировании технологического оборудования для различных технологических операций и выборе источника питания. Отсутствие методик расчета переходных процессов, а также основ теории физических явлений, происходящих в зоне ЭКД обработки, не позволяют обеспечить обоснованный выбор технологических режимов работы оборудования. В частности это относится и к технологическому модулю, осуществляющему технологическую операцию. Возникающие трудности при выборе технологических режимов работы оборудования обусловлены необходимостью учета многих факторов, взаимосвязанных между собой и в конечном итоге определяющих эффективность применения контактно – дуговой технологии обработки металла.

Особенным спросом в последние годы пользуется метод ЭКД резки металлов, так как процесс экологически чистый и не загрязняет окружающую среду и установка может работать автономно длительное время. В то же время высокая скорость резки, достигающая в предельных случаях  $40 \cdot 10^{-3}$  м/с, позволяет производить разделку заготовок принципиально любых габаритов, но возникающий при этом необоснованный износ

инструмента, не предсказуемое качество обрабатываемой поверхности зачастую сдерживает производителей по расширению области применения электротехнологических установок.

Немалый вклад в разработку эрозионного оборудования, в том числе названного направления внесли такие российские ученые, как Александров В.И., Аренков А.Б., Борисов В.Я., Левченко Б.Н. Витлин. В.Б., Давыдов А.С., Ушомирская Л.А., Гуткин Б.Г., Григорчук И.П., Лившиц А.Л., Семенов В.Н., Рыбин С.Н., Кабанов Н.С., Золотых Б.Н., Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И., Мещеряков Г.Н., Зайцев В.А., Боков В.М. и др.

За рубежом наибольших успехов в этой области достигли фирмы и научные группы использующие электроэрозионную технологию для изготовления ковочных штампов, литьевых форм, резки заготовок. Ведущими фирмами-изготовителями станков для электроэрозионной обработки являются AGIE-Charmilles (Швейцария), Schiess Nassovia, Fridrich Deckel, AEG-Eloterm, Hahn Kolb (ФРГ), Retech (Vecoplan LLC), Exello Raycon Corp., Ingersoll, Milacorn Corp., Maivel (США), Hitachi, Mitsubishi heavy industry, Fanuc, Japax inc., Koike Sanso Koguo, The Japan Electric Maching (Япония), Agemaspark, N.E. Eroda Wickman z-d, Amchem, Trans Tec (Великобритания), ONA, Metba (Испания).

В результате исследований были созданы технологические установки, подтверждающие высокую производительность их работы. Однако эффективность функционирования оборудования при выполнении различных технологических операций, в том числе при длительной эксплуатации, в значительной мере зависит от выбора режимов работы оборудования с учетом физических особенностей протекания процесса, что еще раз подтверждает не разработанность названного направления электроконтактно – дуговой технологии. Остается также нерешенным широкий круг научно – технических задач. Математическое моделирование физических процессов на стадиях элементарного контакта электрода - инструмента (ЭИ) и электрода – детали (ЭД), физическое моделирование специфических условий развития дугового разряда, продолжительность горения которого существенным образом отражается на износе ЭИ. При этом, отсутствие модели расчета параметров электрической дуги, горящей в парах металла в условиях развития парогазовой полости повышенного давления в межэлектродном промежутке (МЭП) сдерживает создание технологических комплексов, обеспечивающих эффективную работу оборудования при выполнении различных технологических операций.

Изложенное подтверждает необходимость комплексного решения важной народнохозяйственной задачи создания электротехнологического оборудования с улучшенными технико – экономическими показателями.

Данная работа выполнялась: по Постановлению Совета Министров № 526 от 31.05.85 г., по научно - технической программе ГКНТ №0.16.05, по гранту фундаментальных исследований в области энергетики и электротехники 1998 – 1999 г.г. №70Гр – 98 «Научные основы электроконтактно – дуговой резки, обработки труднообрабатываемых металлов», заданию Министерства образования Российской Федерации по программе 001, подраздел №05.01.59 «Разработка экономичных электродов плазменно – дуговых установок», 2000 г., по гранту PD02-2.6-149 «Теоретические основы физико - химических и приэлектродных процессов при образовании электродугового разряда в условиях ЭКДР металлов», 2002 г., по заказам научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий (1985-1999 г.г.).

**Цели и задачи работы.** Целью работы является решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение и заключающейся в повышении эффективности термофизического процесса электроконтактно-дуговой технологии

обработки заготовок путем установления физических закономерностей взаимодействия инструмента и детали на стадиях контакта и горения электрической дуги с учетом взаимосвязей электрических и технологических параметров оборудования с производительностью обработки металлов.

Для достижения научной и практической реализации результатов работы за счет направленного изменения параметров термофизического процесса должна быть разработана теория, отражающая основные закономерности взаимодействия электродов и формирования дугового разряда в условиях ЭКД обработки металлов.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику проведения экспериментальных исследований физических и термических процессов в области контактно – дугового выплавления металла.

2. Изучить механизм образования физического контакта электродов в условиях ЭКД метода обработки с учетом влияния электрических и технологических параметров оборудования.

3. Исследовать условия образования импульсного дугового разряда, развивающегося в условиях интенсивной паровой фазы электродов в зависимости от внешних характеристик установки и эксплуатационных технологических параметров.

4. Исследовать термофизические процессы, происходящие в области локального электроконтактно – дугового воздействия на электроды, и на их основе, при разделении характера теплового воздействия на контактной и дуговой стадий процесса, разработать методики расчета тепловых процессов в зоне обработки.

5. Определить свойства и параметры дугового разряда в зоне обработки.

6. Установить перераспределение баланса энергий в условиях электроконтактно – дугового выплавления металла между инструментом, деталью и столбом электрической дуги, отражающее физические и термодинамические процессы в зоне действия электрического разряда.

7. Установить влияние параметров источника питания на процессы в МЭП и режимы работы технологического модуля.

8. Разработать практические рекомендации по выбору эффективных режимов электроконтактно – дуговой обработки заготовок, элементов технологического модуля; разработать оборудование, технологические процессы, обеспечивающие внедрение результатов исследований.

Разработанная методика определения параметров технологического процесса должна явиться основой для установления эффективных режимов работы технологического оборудования, направленных на решение инженерных электротехнологических задач по обработке заготовок.

**Методологическая основа исследований.** Методологической основой диссертационной работы явились фундаментальные положения теорий гидродинамики, термодинамики и теплофизики для твердых, жидких и газообразных сред, а также общие представления связи теории с практикой, вытекающие из анализа процессов и достоверности получаемых результатов. Теоретические исследования переходных процессов в МЭП базировались на численно-аналитических методах решения дифференциальных уравнений с использованием гиперболических зависимостей изменения сопротивления контакта и дуги от значений тока. Определение переходного сопротивления стягивания тока в электрическом контакте инструмента и детали базируется на аналитическом решении двумерного стационарного электрического поля и статистического распределения включений. Теоретические исследования плазмы

электрической дуги базировались на численном решении магнитогидродинамических уравнений методом контрольного объема, а исследования тепловых процессов на численном решении уравнения теплопроводности методом конечных элементов.

Достоверность результатов и выводов в работе обеспечивается обоснованным применением теоретических положений и определена путем параллельных расчетов различными методами и сопоставлением результатов расчета с результатами комплексных экспериментальных исследований. Результаты исследований обоснованы теоретически и подтверждаются практической реализацией электротехнологии.

**Научная новизна работы.** К основным научным результатам, полученным впервые и защищаемых автором, относятся:

1. Комплексная теплофизическая модель процессов, учитывающая взаимосвязь электрических и технологических параметров с производительностью обработки заготовок.

2. Общее аналитическое выражение для определения переходного электрического сопротивления на основе расчета двумерного стационарного электрического поля в электрическом контакте электрода - инструмента и электрода – детали, полученное с учетом его реальной геометрии и размеров и статистического распределения включений в структуре контактной площади, определяющих проводимость его контактной поверхности.

3. Расчетно-теоретический анализ и экспериментальные исследования изменения сопротивления контакта электродов от значений тока, а также мощности в межэлектродном промежутке в зависимости от скорости подачи инструмента.

4. Методика расчета параметров электрической дуги, горящей в парах металла, отражающая закономерности распределения температуры дугового разряда, развивающегося во времени в условиях повышенного давления, которые являются исходными данными для теоретического анализа приэлектродных процессов.

5. Результаты теоретического анализа прикатодных процессов, отражающие взаимосвязь температуры паров металла, их парциального давления и концентрации с прикатодным падением напряжения, током эмиссии электронов с плотных слоев пара и тока ионов, воздействующих на катод.

6. Закономерности перераспределения баланса энергий между столбом импульсной электрической дуги, горящей в парогазовой полости и электродами в условиях физического процесса ЭКД обработки металлов.

**Практическая значимость работы** заключается в обосновании повышения эффективности электроконтактно – дуговой технологии за счет установления параметров процесса обработки металлов, а также исследовании сложных физических явлений в межэлектродном промежутке электротехнологического модуля, возникающих при взаимодействии инструмента и детали на стадиях контакта и горения электрической дуги. Выявлены принципиальные физические процессы, которые необходимо учитывать при проектировании оборудования ЭКД технологии:

1. Установлена взаимосвязь параметров источника питания, скорости подачи, радиуса диска – инструмента и скорости его вращения с электрическими и тепловыми характеристиками физического процесса стадии контакта электродов. Так, в частности, минимальные значения линейной скорости инструмента не вызывающие его нагрев на стадии контакта электродов в диапазоне подач  $(1-4)10^{-3}$  м/с и радиуса диска –

инструмента (50 – 300) мм для соответствующих пар электродов составят: Fe-Fe - (8-13 и 12-19) м/с, Fe-Cu - (14-25 и 16-27) м/с, Fe-Al - (13-16) м/с.

2. Установлены значения плотности тока, при которых происходит отделение расплавленного металла детали на контактной стадии с последующим образованием электрической дуги для различных материалов электродов. При этом полученные значения плотности тока для различных пар электродов не зависят от скорости подачи и составляют соответственно: Fe – Fe –  $j = 2.7 - 2.8 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ , Fe – Cu –  $j = 2.45 - 2.6 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ , Fe – Al –  $j = 3.35 - 3.4 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ .

3. Установлено, что продолжительность горения электрической дуги, обеспечивающая минимальный износ инструмента в исследуемом диапазоне: скорости подачи  $(0.5-11)10^{-3} \text{ м/с}$ , линейной скорости вращения инструмента 21-56 м/с и параметров источника питания ( $U_{xx}=25-42 \text{ В}$ ) находится в пределах  $1-1.5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ .

4. Получено, что при подачах  $(1-4) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  и дисковым инструментом с вольфрамовыми вставками относительный износ инструмента не превышает 14%, при этом формируются продолжительность и скважность импульсов разряда квазипарового состава, обеспечивающих выплавления металла с тепловым к.п.д. до 75%, а при скважности 1.5 - 2 на больших подачах (более  $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ) отсутствует наплыв металла на выходе инструмента.

5. Реализованные на практике параметры процесса позволяют при обеспечении квазипарового состояния дуги увеличить мощность энергии, поступающей в анод – деталь до 70% (для установившейся дуги в воде –40%) и сократить тепловой поток в катод – инструмент на 30%.

#### **На защиту выносятся следующие основные положения**

1. Термофизическая модель для комплексного анализа электротехнологического процесса в области обработки металла с разделением стадий контакта электродов и горения электрической дуги, а также определения электрических и технологических параметров, обеспечивающих эффективный режим обработки заготовки.

2. Физические и тепловые закономерности протекания процесса выплавления металла детали на стадии контакта электродов, предопределяющие условия возбуждения квазипарового электрического разряда, на основании чего разработана методика расчета переходного сопротивления в зоне скользящего контакта инструмента и детали и более точно сформулирована задача по определению температурных полей в зоне обработки.

3. Численный метод расчета температурного поля с поверхностным источником тепла со смещающейся границей, основанный на выявленных условиях выплавления металла детали на стадии контакта электродов и установленных параметров процесса, адекватно отражающий физический процесс.

4. Методика расчета параметров электрической дуги, горящей в парах металла, с учетом изменения свойств и состава плазмы в условиях меняющегося давления в парогазовой полости.

5. Закономерности ионизационных процессов в квазипаровой электрической дуге, развивающейся во времени, в зависимости от условий развития разряда повышенного давления.

6. Методика расчета прикатодных процессов в условиях горения дуги в парах металла, в результате чего установлено перераспределение баланса энергии между столбом дуги, анодом и катодом, подтвержденные экспериментальными данными.

7. Комплексные экспериментальные исследования физического процесса стадий контакта и горения электрической дуги, а также нагрева металла инструмента и детали для различных материалов.

**Реализация результатов работы.** Полученные в диссертационной работе результаты выполнены в рамках НИР кафедры «Электротехники и электротехнологии» СПбГПУ, а также в рамках ряда программ Министерства Образования РФ, по Постановлению Совета Министров и грантов.

Основанием значимости результатов является научно-технический эффект от разработки рекомендаций по режимам обработки и областям применения электроконтактно – дуговой технологии:

- разработана и согласована в ведущих научно-исследовательских институтах и машиностроительных заводах технологическая инструкция ЭКД обработки металлов, регламентирующая параметры и режимы работы электротехнологического оборудования, в результате реализации которой повышается до 30% тепловой коэффициент полезного действия при обработке металлов резанием на подачах  $(0.5 - 2.5)10^{-3}$  м/с и до 20% на подачах  $(3.5 - 6)10^{-3}$  м/с,

- установлены параметры импульсного электрического разряда по продолжительности  $(1.2 - 1.5)10^{-3}$  с и мощности  $P=18-45$  кВт, при котором достигается минимальный расход инструмента (11-14)%,

- для организаций, разрабатывающих источники питания для ЭКД обработки металлов регламентированы параметры по напряжению  $U_{xx}=35-42$  В и по току наклона внешней характеристики  $I=1000-1600$  А в зависимости от скорости подачи.

Реализованы опытно – промышленные установки ЭКД обработки металлов для различных отраслей промышленности, в таких как металлургическая, для разрезки проб образцов (150 • 150) мм с подачами 250 –300 мм/мин, химическая, энергетическая и пищевая отраслей по обработке заготовок под пресс-формы, а также для заготовительных операций по разделке образцов из сплавов ВК8, Р6М5.

Комплексная теплофизическая модель процесса электротехнологии по установлению эффективных режимов работы оборудования явилась основой создания алгоритмов, методик расчета параметров, реализованных в ведущих организациях России при проектировании ЭКД технологического оборудования для заготовительных производств.

Результаты работы используются как для научно – исследовательских целей, так и в учебном процессе при подготовке курсов «Электротехнология», «Электротехнологические процессы, установки и системы» в СПбГПУ, один аспирант под руководством автора подготовил и защитил кандидатскую диссертацию.

**Апробация работы.** Результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях, симпозиумах, семинарах и совещаниях, в том числе на международных, российских, межвузовских: V, VI, VII – европейских конференциях по термическим плазменным процессам (Россия, Санкт-Петербург - ТРР-5, 1998; Франция, Страсбург – ТРР-6, 2000; Франция, Страсбург – ТРР-7, 2002); XV-XVI международных симпозиумах



по плазмохимии – ISPC-15, ISPS-16 (Франция, Страсбург, 2001; Орлеан, 2002); международной научно – технической конференции по электрофизическим и электрохимическим технологиям (Россия, С. – Петербург, 1997); российской научно – технической конференции по перспективным технологическим процессам обработки металлов (Россия, С. – Петербург, 1995); российских научно – практических конференциях и школы семинара по формированию технической политики наукоемких технологий (Россия, С. – Петербург, 2001, 2002), а также на XXI-XXX межвузовских неделях науки СПбГТУ (С.-Петербург, 1992-2001).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 30 печатных работ, а также более 20 тезисов к докладам на различных конференциях и симпозиумах. В число печатных работ входят: 2 монографии, 1 учебное пособие, 2 авторских свидетельства на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 203 наименования. Полный объем диссертации – 545 страниц, в том числе рисунков – 278, таблиц - 19, приложение – 55 страниц.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность исследований производительной обработки металлов, дается краткое состояние развития электроэрозионной техники, формулируются цель и задачи работы, объясняется общая структура диссертационной работы, описаны основные положения, выдвигаемые на защиту, приводится предметная область работы.

В первой главе отражается современное состояние развития электроэрозионной техники и технологии. На ряду с существующими методами резки, обработки, обдирки, формования, профилирования металлических заготовок анализируются результаты теоретических и экспериментальных исследований высокопроизводительного электроконтактно – дугового метода выплавления металлов.

Сравнительный анализ современного развития электроэрозионной, плазменной и других методов обработки заготовок показал перспективность применения высокопроизводительного ЭКД метода для широкого спектра технологических задач с различными теплофизическими параметрами.

Основной особенностью установки электроконтактно - дугового выплавления металлов является интенсификация технологических операций резки, обработки металлоемких заготовок, деталей принципиально любых габаритов (толщиной более 0,1 – 0,15 м) из высоколегированных сплавов, маломагнитных сталей и других трудно - обрабатываемых токопроводящих материалов в жидкой среде (в большинстве случаев в воде). Наиболее эффективное использование ЭКД метода достигается для черновых и получистовых операций по обработке заготовок.

Опубликованные данные, относящиеся к исследованию процессов в условиях ЭКД метода обработки металлов, зачастую содержат противоречивую и неполную информацию. В первую очередь это относится к физическому истолкованию процесса. Данные, приведенные в публикациях различных авторов, преимущественно отражают результаты по изучению отдельных физических процессов, и не оказано должного

внимания взаимодействию всех физических явлений между собой, для получения адекватного описания взаимодействующих параметров процесса контактно – дугового метода технологической обработки металлов в целом.

Особенностью метода ЭКД обработки металлов являются достаточно сложные теплофизические процессы, протекающие в технологическом модуле, имеющие различную природу. Математическое описание таких явлений представляет собой систему детерминированных нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и многосвязных областей. Существенные упрощения не всегда могут дать адекватный результат исследуемых процессов, тогда решение системы уравнений и количественное описание изучаемых объектов может быть получено только с использованием численных методов при моделировании на ЭВМ. Отсутствие комплексной теории изучаемого метода являлось сдерживающим фактором широкого развития станкостроения ЭКД обработки металлов. Применение ЭВМ при моделировании тепловых процессов в условиях электроконтактно – дуговой обработки заготовок позволило существенно продвинуть теорию ЭКД метода. Это обусловлено тем, что появилась возможность не только исследовать отдельные аспекты и закономерности протекания теплофизических процессов, но и создать комплексные модели, учитывающие неразрывную связь электромагнитных, тепловых, физических процессов на различных стадиях метода в нелинейных и многокомпонентных условиях нагрева инструмента и детали. Следовательно, уровень развития возможностей моделирования установок для ЭКД обработки заготовок, будет определять и уровень развития теории исследуемого метода.

На основании литературных данных по изучению и применению метода ЭКД выплавления металлов, а также на основании имеющихся достижений в смежных областях при рассмотрении отдельных стадий и явлений процесса проводился анализ стадии контакта электродов; образования и горения электрической дуги; распределения баланса энергий между электродом – деталью, электродом – инструментом и столбом электрической дуги; условий выплавления металла и массоперенос; влияния полярности включения электродов; материалов инструментов и рабочих диэлектрических сред, а также влияния параметров источника питания и технологических параметров установки на характеристики и режимы работы оборудования.

К предмету изучения относятся: физическая сущность явлений, протекающих на стадиях контакта и дугового разряда выплавления металла при взаимодействии электрода – инструмента, электрода – детали и столба электрической дуги; установление удельного электрического сопротивления материала контактной площади на стадии контакта, обусловленного фриттинговым механизмом проводимости; выбор действующего теплового источника при моделировании тепловых процессов в инструменте и детали; определение свойств квазипарового разряда повышенного давления и на их основе определение параметров электрической дуги; процессы теплопереноса в электрод – деталь с учетом процессов в плазме электрической дуги повышенного давления, горячей в парогазовой полости; прикатодные процессы в условиях испарения паров металла и установление доли энергии, выделяемой в инструменте; электродинамические процессы в зоне действия электродугового разряда. Изучение этих процессов и установление влияния на эти процессы источника питания, а также технологических параметров модуля установки при их совместной взаимосвязи с помощью общих параметров, позволит получить реальную картину процесса выплавления металла и снизить расход инструмента при сохранении требуемой производительности обработки заготовок.

Поэтому в течение всего времени выполнения диссертационной работы, автор уделял большое внимание совершенствованию методов моделирования технологического процесса сопоставляя их с получаемыми экспериментальными данными и следуя физическим закономерностям, выявляемым в процессе исследований. Установление закономерностей теплофизических явлений, электрических параметров и их взаимосвязей с конструктивными и технологическими параметрами процесса в широком диапазоне изменения условий обработки металлов с целью обеспечения высокой производительности, уменьшения износа инструмента и, как следствие, расширение области его рационального применения, а также более активного внедрения этого метода в производство. По результатам первой главы формулируются основные задачи, которые необходимо решить при выполнении диссертационной работы.

Во второй главе рассматриваются электрофизические процессы на стадии замыкания и нагрева ЭИ и ЭД. Установлены закономерности контактирования электродов до взрывообразного возникновения квазипарового дугового разряда, физико – химические процессы в поверхностном и около поверхностном слоях электродов.

В условиях электроконтактно – дугового съема металла градиент скоростей относительного перемещения электродов в зависимости от технологической операции находится в пределах 10...60 м/с и ограничивается нагревом инструмента на стадии контакта до температуры плавления, а также необходимой скоростью эвакуации продуктов эрозии за пределы зоны обработки.

Элементарный контакт электродов (первоначальное соприкосновение поверхностей ЭИ и ЭД) происходит практически на точечном участке микро неровности, имеющейся на поверхности электродов. Сведение электродов происходит под действием поступательного «жесткого» движения детали или инструмента навстречу друг другу. Проведенный анализ кинограмм показывает, что дальнейшее развитие процесса контактирования будет определяться для неизменных материалов инструмента и детали скоростью сближения электродов, высотой микро неровностей и радиусом окружности диска инструмента. Скорость относительного перемещения инструмента по отношению к детали в этом случае не оказывает существенного значения на физический процесс контакта электродов, так как радиус площадки неровности очень мал и инструмент сминает (срезает) эту микро неровность за единицы микросекунд.

Последующее сближение электродов приведет к контакту, имеющему продольную площадь, где все микро неровности смещены (смяты) относительно друг друга, образуя многоточечный электрический контакт. Заключительной стадией разогретой площади контакта является погружение скользящей поверхности инструмента в расплавленную ванну детали, имеющей продольную форму площади контактирования, зависящей от геометрических параметров инструмента и скорости подачи.

Время, затраченное на электрический контакт, разогрев и взрывообразное отделение расплава может достигать  $(0.5-0.6)10^{-3}$  с. и определяется наряду с другими параметрами и материалом электродов. В конечном итоге в результате пластической деформации зоны контакта и разогрева площади контакта произойдет отделение металла детали и образуется электрическая дуга.

Описанная выше последовательность формирования контактной площадки основана на полученных экспериментальных данных. Продольные размеры этих площадок можно оценить по кинограммам. Площадь элементарных контактов в среднем составляет  $0.4...3.5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> и далее увеличивается до момента взрывообразного отделения металла детали. Указанное выше время смятия (сдвига) элементарных площадок находится в

соответствии с изменением скорости подачи детали ( $1...4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ) и линейной скоростью перемещения подвижного электрода инструмента  $v_{и} = 20...56 \text{ м/с}$ .

Поверхность материала контактов в условиях ЭКД метода, как уже отмечалось, имеет микро неровности. Наряду с этим под действием механического давления в материале контактов всегда возникает упругая и пластическая деформация. Поэтому начальные точки соприкосновения превращаются в небольшие контактные поверхности. Сумма этих соприкасающихся поверхностей составляет некую величину  $S_{ок}$ , которая воспринимает основное усилие. Тогда как общая, так называемая «кажущаяся» поверхность  $S_k$  может существенно превосходить фактическую поверхность  $S_{ок}$ . Проводимость контактных площадок может быть трех видов:

- металлическая проводимость, обусловленная протеканием тока через кристаллы компактного металла с низким переходным сопротивлением,
- квазиметаллическая проводимость через участок гетерогенной поверхности, покрытой тонкой пленкой благодаря туннельному эффекту, при котором проводимость материала пленки не влияет на туннельный ток,
- проводимость через мономолекулярные пленки (окислы, сульфиды и т.п.).

Если с металлической проводимостью все понятно, то квазиметаллическая проводимость, зависящая от адсорбционного и хемосорбирующего слоев на поверхности металла, трудно поддается оценке. В этом случае для обеспечения туннельного эффекта необходимо, чтобы толщина пленки не превышала длину свободного пробега электрона. Оценить адсорбционные и хемосорбционные пленки на поверхности металла, находящегося под постоянным импульсным термодинамическим возмущением можно весьма приближенно.

Экспериментальные исследования показали, что падение напряжения на электродах в единицы вольт длится единицы микросекунд, ток при этом, не достиг какого то существенного значения. В дальнейшем напряжение на электродах в период контакта составляет значение 15 – 20В в начале развития контакта и 22-27В в конечной стадии контакта до образования электрической дуги. Ток при этом достигал значений в зависимости от материала электродов и скорости их сближения  $v_d$  от  $10^{-3} \text{ м/с}$  до  $11 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  в среднем от 150А до 800А. Источник питания применялся как с жесткой внешней характеристикой, так и с падающей, однако это практически не повлияло на напряжение на электродах, значит, влияние внешней характеристики источника питания в этом случае минимальное. Учитывая это обстоятельство, а именно на основании экспериментальных данных предполагаем, что проводимость переходной площадки контактирования определяется исключительно условиями проводимости в области смешанного проводящего слоя между соприкасающимися электродами, имеющими нелинейную зависимость. а изменение тока индуктивностью короткой сети контура коммутации.

Экспериментальные данные показывают, что в условиях контактно – дугового выплавления удельное электрическое сопротивление площадки контакта для разных материалов электродов находится в пределах, а иногда и более ( $10^{-4} - 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), при этом удельное электрическое сопротивление площадки контакта значительно превосходит удельное сопротивление самого материала электродов, даже нагретого до высоких температур, например для железа  $\rho_{Fe} = 140 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Таким образом, проводимость переходной площадки контактирования скользящих электродов в условиях рассматриваемого метода выплавления металла обусловлена

действием преимущественно упруго - пластической деформации сдвига площадки с квазиметаллическим сопротивлением линий стягивания тока.

Инструменты и детали в условиях технологии электроконтактно - дугового съема металла работают при повышенных температурах и парогазовой среде. Причем, эти условия постоянно меняются, вызывая нагрев поверхностного слоя металла или его охлаждение, при этом насыщая металл разогретой до высоких температур парогазовой средой - продуктом диссоциации жидкости.

Практически все металлические поверхности покрыты слоем оксидных пленок, толщина которых зависит от состояния внешней окружающей среды, температуры и находится в пределах  $10^{-9} - 10^{-7}$  м. Сталь, как наиболее часто обрабатываемый металл в зависимости от типа содержит вольфрам, кобальт, никель, алюминий, бериллий и другие компоненты. Под действием температуры изделия из этих сплавов покрываются толстым слоем оксидных пленок за счет поверхностного окисления и в основном за счет искажения кристаллической решетки слоев металла. Другой причиной образования оксидных пленок является сильное поглощение металлом водорода и углерода. Образуемые закиси, окиси железа при температурах 1100-1300°C разлагаются лишь под воздействием водорода и при температурах 4000-5000°K в результате термического действия образованного квазипарового разряда. Для температур близких к температуре плавления металла удельное электрическое сопротивление окиси железа составляет в среднем  $(0.15 - 0.086) \cdot 10^{-2}$  Ом·м, окиси алюминия больше на несколько порядков, а окиси меди  $\text{CuO}, \text{Cu}_2\text{O} - (0.1 - 0.7) \cdot 10^{-2}$  Ом·м.

Возникновение дефектного слоя в приповерхностной области металла обусловлено также термическим взаимодействием металла и его оксидов с водородом, где при температурах близких к температуре плавления в результате химической реакции образуется водяной пар, насыщая поверхностный слой металла. После охлаждения детали в этом слое образуются микротрещины и пустоты. Таким образом, наряду с окалинами, микротрещины и пустоты составляют поврежденный поверхностный слой, именуемый зоной «термического влияния» (ЗТВ). Все эти факторы одновременно меняют проводимость приповерхностного слоя. При дальнейшем увеличении температуры электродов до температуры кипения растет пористость поверхностных слоев электродов. Приэлектродные области на стадии контакта непосредственно перед взрывом жидкой перемычки приобретают свойства многокомпонентной среды.

Объяснение этих явлений заключено в специфических условиях электроконтактно - дугового выплавления, а также адсорбционных и абсорбционных процессов на границе раздела, твердое тело – расплав металла – газовая среда. Это влияние в первую очередь отражено в снижении проводимости площади контакта  $S_k$ .

Таким образом из - за нестационарных термодинамических процессов, происходящих в приповерхностных слоях расплавляемого металла на стадии контактирования электродов с высоким градиентом скоростей относительного перемещения, определить с высокой степенью точности проводимость гетерогенной площадки не представляется возможным. Кроме того, состав площадки контакта является весьма структурно – чувствительным к внешним факторам и конечно температуры. Приближенный оценочный результат может дать принятие гетерогенной структуры площадки в виде матричной, в составе которой равномерно распределены включения в виде окислов и газовых пузырьков, создающих пористость в расплавляемой контактной площадке.

Для определения удельного электрического сопротивления состава гетерогенной структуры в виде статистической смеси разнородных металлов и окислов можно воспользоваться следующей формулой

$$\sum_i \frac{\rho - \rho_i}{\rho + 2\rho_i} \cdot C_i = 0 \quad (1)$$

Тогда для смеси двух разнородных металлов, удельное электрическое сопротивление матрицы сплава равно:

$$\rho_m = \frac{1}{\rho_{1,2} \frac{1}{4} + \sqrt{\frac{\rho_{1,2}^2}{16} + \frac{1}{2\rho_1 \cdot \rho_2}}} \quad (2)$$

где величина  $\rho_{1,2} = \frac{(3C_1 - 1) \cdot \rho_2 + (3C_2 - 1) \cdot \rho_1}{\rho_1 \cdot \rho_2}$ ,

проводимость -  $\sigma_m = \frac{\rho_{1,2}}{4} + \sqrt{\frac{\rho_{1,2}^2}{16} + \frac{1}{\rho_1 \cdot \rho_2}}$ ,  $\rho_1, \rho_2, C_1, C_2$  – удельные электрические сопротивления включений и их объемные концентрации соответственно.

Наличие пор приводит к увеличению удельного электрического сопротивления и определяется по формуле

$$\rho = \rho_m \cdot \frac{1 - C}{1 - 2C}, \quad (3)$$

где  $\rho_m, C$  – удельное электрическое сопротивление основного материала матрицы и объемная концентрация пор (газовых включений) соответственно.

При расчете удельного электрического сопротивления состава металла в объеме расплавляемой контактной поверхности определялось содержание компонентов разнородных включений из анализа физико – химических процессов в поверхностных слоях электродов и с учетом изменения удельного электрического сопротивления металла от температуры.

Контактная поверхность формируется в кратковременные интервалы времени на стадии скольжения ЭИ по детали. При этом электродные пятна на стадии контакта не выходят за пределы контактной поверхности, что дает основание рассматривать скользящие контакты как неподвижные в рассматриваемых интервалах времени, однако, с учетом формы и размеров контактных поверхностей, соответствующих условиям ЭКД метода.

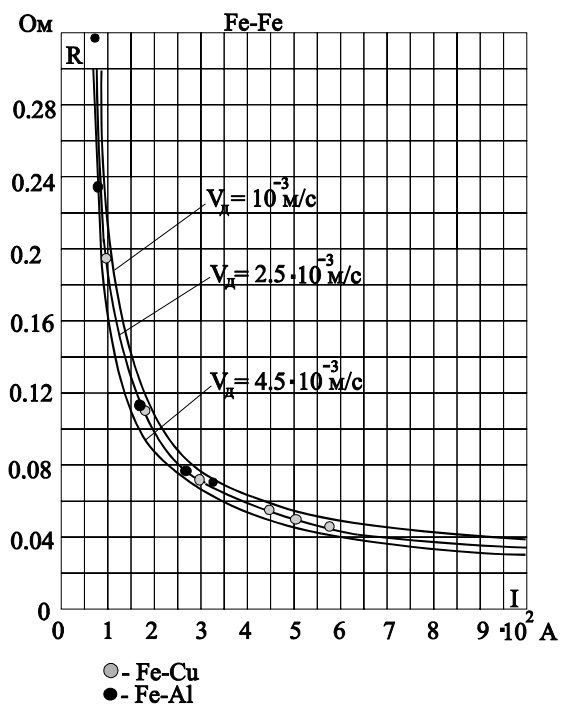


Рис.1. Зависимость сопротивления контактной площадки от тока

В первом приближении при определении сопротивления стягивания линий тока для реальных эквипотенциальных поверхностей скругленных площадок контакта можно воспользоваться формулой Намитокова

$$R_{\text{пер}} = \frac{8\rho}{3\sqrt{\pi^3 S_{\text{к}}}} \quad (4)$$

Влияние же различных включений и адгезионных пленок в составе гетерогенной структуры площадки контакта учтено при определении удельного электрического сопротивления  $\rho = \rho_{\text{пер}} = \sum_i (\rho_{\text{м}_i} + \rho_{\text{в}_i})$ . При этом отметим, что переходное сопротивление, зависящее от проводимости структуры площади, куда входят пленочные включения, определяется и размерами площади контакта.

По мере увеличения скорости подачи (увеличения усилия сжатия электродов) в области изменения скорости подачи до  $v_{\text{д}} = 1 \cdot 10^{-3}$  м/с соотношение ширины  $f$  и длины  $L$  контактной площадки незначительное. Поэтому в первом приближении можно воспользоваться формулой (4) при определении сопротивления стягивания линий тока. Однако с увеличением подачи детали более  $v_{\text{д}} \geq 1 \cdot 10^{-3}$  м/с форма контактной поверхности принимает продольный вид. Учесть это обстоятельство, можно решив уравнения Максвелла, описывающих распределение полей, создаваемых постоянным током в проводнике с вытянутой площадкой контакта. Результатом решения этих уравнений является сопротивление стягивания линий тока

$$R = \frac{1}{I^2} \oint [E_x \cdot H_y] \cdot dS, \quad (5)$$

$$\text{где } E_x = \frac{I}{2\pi \cdot fL \cdot \sigma} \cdot \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda f}{\lambda} \cdot e^{-\lambda z} \cdot \sin \lambda x \cdot d\lambda, \quad H_y = \frac{I}{2\pi \cdot fL} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda f}{\lambda^2} \cdot e^{-\lambda z} \cdot \sin \lambda x \cdot d\lambda.$$

Пример расчета сопротивления контактной площадки представлен на рис. 1 и он дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Для расчета переходных процессов с учетом изменения внешней характеристики источника питания удобно гиперболические зависимости изменения сопротивления на стадии контакта электродов записать в следующем виде:

$$R(t) = A + \frac{B}{i}, \quad (6)$$

где по рис.1:

$$A = R_{\text{макс}} - \frac{R_{\text{макс}} - R_{\text{мин}}}{1 - \frac{i_{\text{мин}}}{i_{\text{макс}}}}, \quad (7)$$

$$B = \frac{R_{\text{макс}} - R_{\text{мин}}}{\frac{1}{i_{\text{мин}}} - \frac{1}{i_{\text{макс}}}}, \quad (8)$$

В представленных формулах  $i_{\text{мин}}$ ,  $i_{\text{макс}}$  – ток соответствующий минимальному значению сопротивления на стадии контакта электродов и ток, соответствующий минимальному значению сопротивления на стадии контакта или дуги, горящей в парах металла. Для расчета параметров по представленным формулам используются вольт – амперные характеристики электрической дуги, полученные в результате проведенных экспериментальных исследований или результатов расчета свойств дуги.

Система уравнений для расчета переходных процессов на стадии контакта ЭИ и ЭД записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} U &= L \frac{di}{dt} + R \cdot i + R_k \cdot i \\ U &= U_x - (K - 1) \cdot R_n \cdot i \end{aligned} \quad (9)$$

где  $K = \frac{U_n - \Delta U}{U_n}$ ,  $U_n$  – напряжение соответствующее номинальному току источника питания,  $\Delta U$  – изменение напряжения, характеризующее наклон внешней вольт – амперной характеристики источника питания,  $R_n$  – номинальное сопротивление источника питания, определяемое отношением  $U_n/I_n$ . Решением системы уравнений 9 являются значения тока в контактной цепи  $i_k$  на стадии переходного процесса:

$$i(t) = \frac{U_x - B_k}{R + R_n(K - 1) + A_k} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (10)$$

где  $U_x$  – напряжение холостого хода ИП, а постоянная времени  $\tau = \frac{L}{R + R_n(K - 1) + A_k}$  (11)

Следовательно, расчет мощности, выделяющейся на стадии протекания тока в межэлектродном промежутке на стадии контакта электродов, может быть произведен по следующей формуле:  $P_k = [i(t)]^2 \cdot R_k(i)$ .

Для расчета переходных процессов при шунтировании электрической дуги низкоомной цепью при последующем контакте ЭИ и ЭД принимается допущение, что переходный процесс в параллельных ветвях не влияет на закономерность изменения общего тока, а также на стадии перераспределения тока между ветвями с дугой и контактами общий ток практически не меняется ввиду кратковременности процесса.

Тогда система уравнений для участка цепи а-б эквивалентной схемы с параллельно включенными ветвями с сопротивлением дуги и сопротивлением контактной площади, моделируемые по аналогии (6-8) запишется в виде:

$$\begin{aligned} u_{аб} &= L_d \frac{di_d}{dt} + A_d \cdot i_d + B_d \\ u_{аб} &= A_k \cdot i_k + B_k \\ i &= I = i_k + i_d \end{aligned} \quad (12)$$

где  $u_{аб}$  – напряжение на параллельной цепочке эквивалентной схемы,  $i_k, i_d$  – ток соответственно в контактной и дуговой цепи,  $I$  – ток дуги в момент коммутации.

Решением системы уравнений (12) являются значения тока в контактной цепи  $i_k$  и в дуговой цепи  $i_d$  на стадиях переходного процесса:

$$i_k(t) = \frac{A_d \cdot I + B_d - B_k}{A_d + A_k} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (13)$$

где  $\tau = \frac{L_d}{A_k + A_d}$ ,  $L_d$  – индуктивность дуги, учитывает удлинение дуги в зависимости от

скорости вращения инструмента и времени коммутации ( $L_d = v_{ин} \cdot t$ ). Аналогично, решая систему уравнений относительно тока в цепи с сопротивлением электрической дуги при начальных условиях  $t=0, i(0) = I$ , получим:



$$i_d(t) = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{A_k \cdot I + B_k - B_d}{A_k + A_d} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (14)$$

В выражениях (13) и (14) значение тока  $I$  принимается в момент времени касания электродов и может быть определено по следующему выражению:

$$i(t) = \frac{U_x - B_d}{R + R_n(K-1) + A_d} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_d}}\right), \quad (15)$$

где постоянная времени  $\tau_d = \frac{L + L_d}{R + R_n(K-1) + A_d}$  (16)

Полученные простые выражения позволяют производить расчет мощности на стадии контакта электродов с учетом наклона внешней характеристики источника питания, а также производить расчет переходных процессов, дающие практические результаты по установлению эффективных параметров стадии контакта и продолжительности горения электрической дуги.

Кроме того, были произведены расчеты по установлению распределения тока в контактной площадке с учетом их сужения и поверхностного эффекта, что дает возможность определить значения плотности тока непосредственно перед взрывом расплава для различных материалов электродов.

В третьей главе рассматриваются электродуговые процессы исходя из физической сущности образования дугового разряда в условиях ЭКД обработки, возникающего в парах металла повышенного давления.

Из анализа физики процесса и полученных экспериментальных данных следует, что в результате теплового взрыва после контакта электродов на месте вытесненного металла детали инициируется дуговой разряд. Причем, электрический разряд в начальный момент развивается в парах металла высокого давления (квасипаровой разряд). Однако с течением времени за счет сдвига электрода - инструмента и роста температуры, а, следовательно, усиления ионизационного процесса дуговой разряд устанавливается и проводимость плазмы увеличивается. На основе теории Дешмана установлены соотношения, определяющие связь давления паров металла с температурой паров. Определена концентрация и плотность пара с развитием разряда. Отличительной особенностью процесса, имеющего место в исследуемых условиях, является паровой разряд высокого давления (100-200атм) на начальном этапе с последующим снижением до одной атмосферы и температурой (6000-10000)<sup>0</sup>К, образованный в результате теплового взрыва области стягивания тока. Специфические условия формирования электрического разряда меняют и условия эмиссии электронов с катода. Из чего следует, что эмиссия электронов с катода значительно облегчается, которую можно представить следующим образом. Над поверхностью к катоду вплотную прилегает слой плотного пара, толщиной порядка  $10^{-7}$ м, который преобладающим образом заполняет на начальном этапе плазменный межэлектродный промежуток и продолжает испаряться с катода. Металлический слой пара обладает преимущественно электронной проводимостью, чему свидетельствуют осциллограммы тока и напряжения, где ток нарастает с большой скоростью с одновременным ростом напряжения в МЭП. Электроны, поступающие с катода в область плотного пара с металлической проводимостью высокой температуры, где занимают высокие уровни, превышающие уровни Ферми. В результате эмиссия электронов происходит из слоя пара. Причем работа выхода электронов уменьшается на величину превышения уровня Ферми. При этом полученные данные свидетельствуют о низкой плотности тока, рассчитанной по

формуле Ричардсона – Дэшмана, тогда как плотность тока в прикатодном пятне значительно выше и составляет по порядку  $10^8 - 10^{10} \text{ А/м}^2$ . При подстановке в формулу Ричардсона – Дэшмана температуру  $T$  пара, а работу выхода заниженную на величину  $e\phi_{\text{п}}$ , расчетные данные сходятся с экспериментальными, отмеченными в публикациях ряда авторов. Для различных металлов снижение работы выхода электронов составило:  $e\phi_{\text{Fe}} = 1.5 - 2.5 \text{ эВ}$ ,  $e\phi_{\text{Cu}} = 2 - 3 \text{ эВ}$ :

$$j = AT_{\text{п}}^2 \exp\left(-\frac{e\phi - e\phi_{\text{п}}}{kT_{\text{п}}}\right), \quad (17)$$

где  $T_{\text{п}}$  – температура металлического пара.

Основными характеристиками электровзрывного разрушения металла, являются: время, протекающее с момента подвода тока до наступления критического квазипарового состояния; энергия, необходимая для отделения расплава; максимальная температура; изменение сопротивления; скорость движения потока частиц; состав продуктов взрыва; давление пара.

Наряду с этими параметрами происходит образование парогазовой полости, в результате диссоциации воды, расширяемой с увеличением мощности и продолжительности разряда.

Основными влияющими факторами на эти параметры является: материал электродов; параметры источника питания; среда, в которой происходит процесс.

Аналізу перечисленных выше параметров и их влиянию на развитие дугового разряда, а также определению доли теплового потока, передаваемого в деталь в условиях ЭКД метода выплавки металла, посвящается данная глава и последующие главы 4,5.

При рассмотрении термодинамических процессов при ЭКДО необходимо рассмотреть следующие задачи:

- это возникновение и формирование сильноточных электрических разрядов в водной среде;
- взаимодействие дугового канала разряда (плазмы дуги) с поверхностью заготовки и влияние материала заготовки на процессы, происходящие в разряде, а также влияние на эти процессы состава среды (в данном случае – это техническая вода);
- пространственно-временные процессы, связанные с расширением парогазового пузыря за счёт внутренних сил (газокинетического давления) в котором развивается дуговой разряд и перемещение разряда при движении электрода-инструмента.

Все эти процессы являются взаимосвязанными в условиях ЭКДО и комплексное их рассмотрение является необходимым условием описания и понимания процесса. Рассматривая эти вопросы, вводится ряд упрощений, которые, однако, не сказываются существенно на качественной, а в ряде случаев и на количественной оценке происходящих процессов.

Проблемы, которые связаны с воздействием разрядов на поверхность электродов, отличаются многообразием возможных условий этого воздействия. Поэтому их решение в единой постановке является практически неосуществимым и требует дифференцированного подхода, в том числе и к анализу этих процессов.

Так как формирование канала разряда связано с гидродинамическими процессами и с процессами поступления электродного вещества из зон контакта канала с поверхностью электродов, то естественно предположить существование влияния параметров среды, заполняющей пространство между электродами, и материала самих электродов на электрические и тепловые характеристики разряда.

В начальной стадии развития токопроводящий канал разряда имеет ещё относительно малый диаметр и вещество находится в нем не полностью ионизированном состоянии и давление велико. При этих условиях влияние материала электродов должно быть наиболее заметным.

Технологические характеристики процесса ЭКД обработки определяются условиями развития дугового разряда и его параметрами, которые отличаются от параметров разрядов, используемых при других способах обработки. Для оценки электрических и тепловых параметров электрической дуги, которая горит между анодом-заготовкой и подвижным диском-катодом в процессе ЭКД метода, необходимо произвести её расчёт с учётом изменения давления в парогазовом пузыре. Так же производится расчёт дуги с использованием этих параметров, а именно решается уравнение баланса энергии, уравнение движения плазмы, производится оценка гидродинамических параметров.

На первом этапе моделирования плазмы дуги в парах металла заготовки и воды является расчет её термодинамических и транспортных свойств. Чтобы рассчитать свойства плазмы, необходимо в первую очередь, определить состав плазмы.

Необходимой базой для расчета состава и свойств высокотемпературных смесей является информация о термических константах и термодинамических свойствах индивидуальных веществ, входящих в состав смесей. Расчет производится в предположении, что плазма в канале дугового разряда находится в состоянии локального термодинамического равновесия. Это следует из того, что скорости процессов диссоциации, ионизации и выравнивание электронной и ионной температур велики по сравнению со скоростями изменения состояния вещества в канале электрического разряда.

На первом этапе в проведении термодинамических расчетов производится выбор числа компонентов в газовой фазе, которые необходимо учитывать при расчете. Этот выбор осуществляется на основании имеющихся данных о физике процесса и составляет 10 компонентов: e, O, O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub>, H, H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Me, Me<sup>+</sup>.

Вторым этапом является составление системы уравнений, описывающей равновесие в канале дугового разряда. Методика составления таких систем уравнений основывается на составлении уравнений закона действующих масс с использованием констант равновесия («константный» метод). Согласно этому методу, все полученные уравнения, описывающие закон действующих масс, должны быть независимыми. Эти константы широко представлены в справочниках и удобны для создания алгоритмов универсальных программ термодинамических расчетов равновесных составов (по Сурису).

Уравнения закона действующих масс записываются в следующем виде:

$$K_j = \prod_{i=1}^n p_i^{a_{ij}} / p_j ; \quad (18)$$

где: n – число химических элементов, образующих систему, p<sub>i</sub> – парциальные давления элементов, p<sub>j</sub> – парциальные давления сложных компонентов, a<sub>ij</sub> – матрица стехиометрических коэффициентов реакций разложения сложных веществ на атомы, K<sub>j</sub> – константа равновесия соответствующей реакции диссоциации компонента на атомы.

Например, для реакции диссоциации воды можно записать:

$$K_{H_2O}(T) \cdot p_{H_2O} = p_H^2 \cdot p_O \quad (19)$$

где T – заданная температура.

Плазма, состоящая из паров Me+H<sub>2</sub>O содержит и ряд других компонент, не упомянутых выше, которые присутствуют в составе в весьма малых количествах и не оказывают существенного влияния на свойства этих паров. По аналогии с (19)

записываются уравнения закона действующих масс для всех компонентов. В качестве неизвестных выступают относительные парциальные давления вышеперечисленных компонентов ( $p_e, p_{O^+}, \dots$ ):

$$K_{O^+}(T) \cdot p_{O^+} \cdot p_e = p_O \quad (20)$$

$$K_{H^+}(T) \cdot p_{H^+} \cdot p_e = p_H \quad (21)$$

$$K_{H_2O}(T) \cdot p_{H_2O} = p_H^2 \cdot p_O \quad (22)$$

$$K_{Me^+}(T) \cdot p_{Me^+} \cdot p_e = p_{Me}, \quad (23)$$

где константы равновесия  $K_{O^+}(T), K_{H^+}(T), \dots$  указаны в справочной литературе или могут быть рассчитаны по формуле Саха.

Как правило, в систему уравнений термодинамического равновесия для гомогенной газовой смеси включают закон Дальтона для парциальных давлений, который в общем виде выглядит следующим образом:

$$\sum_{j=1}^m p_j = p$$

где  $m$  – число индивидуальных веществ, учитываемых при расчете.

Для рассматриваемого случая

$$p_e + p_O + p_{O^+} + p_H + p_{H^+} + p_{H_2O} + p_{Me} + p_{Me^+} = p_r, \quad (24)$$

где  $p_r = \frac{p}{p_a}$ , [Па];  $p$  – заданное давление, [Па];  $p_a = 1.01325 \cdot 10^5$  Па – атмосферное давление.

Систему уравнений термодинамического равновесия для газовой смеси необходимо также дополнить уравнениями материального баланса. Для нашего случая это два уравнения следующего вида:

$$\frac{\sum Me}{\sum O} = k_{Me\_O}, \quad (25)$$

$$\frac{\sum Me}{\sum H} = k_{Me\_H}, \quad (26)$$

где:  $\sum Me = p_{Me} + p_{Me^+}$ ;  $\sum H = p_H + p_{H^+} + 2p_{H_2O}$ ;  $\sum O = p_O + p_{O^+} + p_{H_2O}$ .

С ростом температуры плазмы существенную роль в системе начинают играть электрически заряженные компоненты – электроны и ионы. Поэтому в систему уравнений необходимо добавить уравнение электронейтральности:

$$p_e = p_{O^+} + p_{H^+} + p_{Me^+} \quad (27)$$

Таким образом, получена система из 8 уравнений, которую необходимо решить при заданном давлении в интересующем нас диапазоне температур. Также необходимо задавать коэффициенты  $k_{Me\_O}$  и  $k_{Me\_H}$ , которые определяют относительное количество паров металла и воды в газовой смеси. Расчёт производится при различных отношениях количества металла к количеству воды и при различных давлениях, при которых существует разряд, что, соответствует динамике его развития. Определение равновесного состава гомогенных и гетерогенных смесей характеризуется большим разнообразием методов расчета.

Среди существующих методов расчета наиболее приемлемым для решения системы уравнений равновесного состава, записанной через константы равновесия, является метод Ньютона. Такой метод является наиболее общим и обладает хорошей сходимостью.

Система уравнений для давления в плазме от 1 до 100 атмосфер и для различной концентрации металлических паров в диапазоне температур 2000 – 20000 К может быть решена при помощи математического пакета MathCad.

Для расчета состава плазмы использовались экспериментальные сведения о сечениях упругих взаимодействий электрон – атом  $Q_{ea}$  для кислорода и водорода, для некоторых металлов, в частности, для железа и меди. Для других сечений взаимодействия использовались, как экспериментальные, так и расчетные данные, в частности значение эффективного сечения упругого взаимодействия электрон – ион  $Q_{ei}$  оценивалось по формуле Резерфорда.

Для определения электропроводности, теплопроводности, теплоемкости, вязкости, энтальпии, плотности, концентрации компонентов плазмы можно воспользоваться формулами представленными в работах Дресвина.

Полученные термодинамические и транспортные свойства плазмы электродугового разряда, горящего в парах металла, для различных соотношений металла и воды и для различных давлений (в диапазоне от 1 до 100 атмосфер) позволяют производить сравнение свойств плазмы паров  $Me+H_2O$ , являющейся объектом исследования в процессе развития дугевого разряда. При этом соотношения давления и концентрации паров, например для железа, менялись в следующей пропорции:  $P=100\text{атм}$ ,  $Fe=80\%$ ,  $P=70\text{атм}$ ,  $Fe=75\%$ ,  $P=50\text{атм}$ ,  $Fe=70\%$ ,  $P=30\text{атм}$ ,  $Fe=60\%$ ,  $P=1\text{атм}$ ,  $Fe=10\%$ . При данных условиях значительные изменения наблюдаются преимущественно в величине плотности многокомпонентной плазмы, что связано, в первую очередь, с изменением давления в зоне действия разряда.

Представленные результаты находятся в хорошем соответствии с частными случаями расчётов свойств плазмы с парами металлов, в частности при электродуговой плавке металлов.

На основе данной методики можно рассчитывать сложный композиционный состав, с присутствием различных материалов в плазме дугевого разряда.

Гидродинамические характеристики этого процесса зависят от соотношения между основными его параметрами: длиной разрядного промежутка, длительностью дугевого разряда, давлением в парогазовой полости, составом плазмы разряда, ВАХ ИП, подачей и скоростью перемещения ЭИ.

В настоящей работе представляет интерес давление внутри парогазовой полости, где развивается дугевого разряд. При этом давление внутри полости уменьшается очень быстро с увеличением её радиуса, и внутренняя энергия зависит от размеров парогазового пузыря.

В процессе ЭКД выплавления в рабочую зону (в дугевого разряд) вводится достаточно большое количество энергии, поэтому расширение полости и самого канала разряда может происходить со скоростями, близкими или даже превосходящими скорость звука в жидкости. Соотношение, позволяющее определить давление в данной точке при условии, если известно течение жидкости, т.е. задано распределение скорости и её изменение, выглядит следующим образом:

$$\frac{p}{\rho_0} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{const}, \quad (28)$$

где  $p$  – давление,  $\rho_0$  – плотность жидкости,  $v$  – гидродинамическая скорость,  $\varphi$  – потенциал скорости.

Гидрогазодинамические явления, происходящие в парогазовом пузыре требуют учета изменения параметров дугового разряда по мере его развития, в частности, изменение соотношения металла и воды (Н и О) в плазме дуги и изменение давления. В условиях ЭКДО металлов электрический дуговой разряд заполняет узкое пространство в зоне реза, и горит в парогазовой полости, образованной в результате диссоциации жидкости. Роль жидкости здесь сводится главным образом к торможению расширения канала разряда, вследствие чего увеличивается плотность выделившейся в канале энергии и, следовательно, повышается температура и давление. Давление в канале при этом поднимается до десятков и даже сотен атмосфер, а температура по мере развития разряда может достигать нескольких десятков тысяч градусов.

Температура плазмы в квазипаровом разряде не превышает  $10^4$ К, при этом происходит лишь частичная диссоциация молекул жидкости, однако при длительном горении дуги (более 1 мс) образуется газовый пузырь, в котором по мере уменьшения давления растет температура и увеличивается проводимость плазмы.

К окончанию импульсного разряда проводимость плазмы начинает уменьшаться из-за увеличения затрат внутренней энергии плазмы, однако, полость продолжает расширяться за счёт статического давления, а в последствии за счет инерции растекающегося потока жидкости. В первом приближении вводимая электрическая энергия  $W$  расходуется на увеличение внутренней энергии плазмы  $W_{\text{п}}$  и на энергию испарения жидкости  $W_{\text{и}}$ . Установить необходимые соотношения между давлением и радиусом  $R$  парогазовой полости можно используя известное решение уравнения (28), полученное при условии изоэнтропического движения жидкости:

$$p - p_0 = \left[ \rho_0 \frac{1}{r} \left[ R^2 \frac{d^2 R}{dt^2} + 2R \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right] \right] - \rho_0 \frac{R^4}{r^4} \frac{1}{r} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2, \quad (29)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $r$  – текущая координата радиуса полости.

В результате проведённых расчётов установлены зависимости изменения давления в расширяющейся полости в зависимости от радиуса сферы. Так при мощности электрического разряда 10000...50000 Вт, давление достигает  $(10...100) \times 10^5$  Па, максимальный радиус полости при этом составляет  $(2...4) \times 10^{-2}$  м.

В четвертой главе производится расчет параметров столба электрической дуги в условиях нарушения термодинамического равновесия и повышенного давления паров металла (квазипаровой разряд), а также параметров установившейся дуги в приближении термодинамического равновесия, горящей длительное время (более 1-1.5 мс) с целью определения составляющих теплового потока, действующего на деталь.

В первом случае технологические характеристики процесса определяются условиями развития дугового разряда и его параметрами, которые отличаются от параметров разрядов, используемых при других способах обработки. Для оценки электрических и тепловых параметров электрической дуги, которая горит между анодом-заготовкой и подвижным диском-катодом в процессе ЭКДО, необходимо производить расчёт с учётом изменения давления в парогазовой полости. При расчете параметров дуги в приближении термодинамического равновесия решаются уравнения баланса энергии и движения плазмы, также производится оценка гидродинамических параметров.

Продолжительность горения дуги в условиях электроконтактно – дуговой обработки металлов существенным образом отражается на процессе эрозии инструмента и

увеличении затрат электрической энергии при необходимости сохранения повышенной производительности рассматриваемого метода выплавления металла. Установить влияние условий горения электрической дуги на распределение баланса энергий между электродом – инструментом, столбом дуги и обрабатываемой деталью является первоочередной задачей разработчиков технологического оборудования. При этом большое значение имеет определение тепловых, энергетических, электрических и газодинамических параметров. Необходимость определения параметров дуги связана и с тем, что в этих технологических процессах основную роль при обработке играет термическое и динамическое воздействие электрической дуги на металл.

Для анализа параметров разряда, насыщенного испарившимися парами металла (результат контактной стадии и взрывообразного образования дуги) с учетом отклонения плазмы от термодинамического равновесия, можно принять двух температурную модель плазмы (по Дресвину). В этом случае плазма рассматривается как смесь двух компонент, электронной и атом - ионной металла, так как компоненты разложения воды в составе плазмы еще не значительны из – за малой длины промежутка. В соответствии с двух температурным представлением плазмы электрического разряда при соответствующем упрощении применима следующая система уравнений:

уравнение баланса электронного компонента:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{5}{2} kT_e n_e + n_e e U_i \right) = \frac{j^2}{\sigma_e} - \frac{3}{2} \delta k n_e v_{ei} (T_e - T_{ai}), \quad (30)$$

уравнение баланса атом - ионного компонента:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( (n_a + n_i) \frac{5}{2} kT_{ai} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( V_{ai} (n_a + n_i) \frac{5}{2} kT_{ai} \right) = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{ai} \frac{\partial}{\partial z} (T_{ai}) \right) + \frac{3}{2} \delta k n_e v_{ei} (T_e - T_{ai}) \end{aligned} \quad (31)$$

Уравнение движения заменено формулой скорости атомов, в результате взрывного характера их направленности по Хольму:

$$v_n = 0.27 \sqrt{\frac{2\chi}{\chi+1} \cdot \frac{kT_{ai}}{m_a}}, \quad (32)$$

где  $\chi=1,66$  для паров металлов.

уравнение непрерывности атом - ионного компонента плазмы

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_a) + \text{div}(n_a \vec{V}_{ai}) = \text{div}(D \text{grad}(n_a)) - k_i n_e n_a + k_r n_e^2 n_i \quad (33)$$

условие квазинейтральности  $n_e = n_i$  (34)

закон Дальтона  $P = n_a kT_{ai} + n_i kT_{ai} + n_e kT_e$  (35)

уравнения Максвелла

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \\ \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \end{cases} \quad \begin{cases} \text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{1}{\epsilon_0} \\ \vec{j} = \sigma \vec{E} \end{cases} \quad (36)$$

Система уравнений (30-36) дополняется соотношениями для определения термодинамических свойств плазмы ( $\lambda_e$  и  $\lambda_{ai}$  – теплопроводности электронного и атом-ионного компонент плазмы,  $\sigma$  – электропроводности,  $\mu$  – вязкости атом-ионного компонента плазмы,  $\mu \text{grad}(\vec{V}_{ai})$  – потери энергии за счёт вязкого трения,  $\delta$  – доля энергии, передаваемая электроном атом-ионной компоненте при упругом соударении и пропорциональна отношению масс электрона и атома,  $\nu_e$  – частота соударений,  $\vec{V}_e, \vec{V}_{ai}$  – скорости компонент). Уравнения (30-36) позволяют оценить распределение температуры электронной и атом-ионной компонент плазмы, концентраций электронов и атомов по длине электрического квазипарового разряда, а также в зависимости от времени его развития при заданном распределении во времени давления и значений плотности тока.

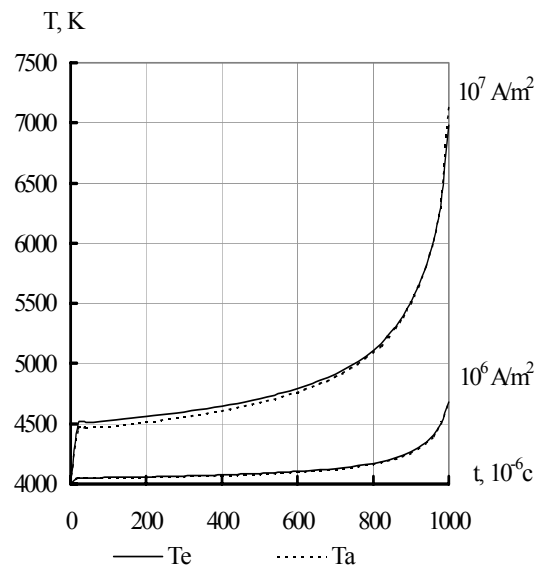


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры компонент плазмы разряда в парах железа от времени при убывании давления от  $P=100$  атм до  $P=5$  атм и различных плотностях тока дуги

Типичная зависимость изменения температуры от продолжительности развития разряда представлена на рис.2.

Расчет параметров электрической дуги в двумерном изображении с учетом сделанных допущений и в фиксированные моменты времени, в соответствии с изменением свойств плазмы в зависимости от давления  $P(t)$  производится по уравнениям вида:

Уравнение баланса энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z \cdot T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V_r \cdot T) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma (E_z^2 + E_r^2) - U_{\text{rad}} \end{aligned} \quad (37)$$

Уравнения сохранения импульса

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z \cdot V_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V_r \cdot V_z) = \\ = 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial P}{\partial z} - \mu_0 j_z H_\phi \\ \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z \cdot V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V_r \cdot V_r) = \\ = \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \right) - \frac{\partial P}{\partial r} - \mu_0 j_r H_\phi \end{aligned} \quad (38)$$

Уравнение неразрывности



$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V_r) = 0 \quad (40)$$

Уравнения Максвелла относительно функции электрического тока:

$$\chi \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\sigma r} \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r \sigma} \frac{\partial \chi}{\partial r} \right) = 0, \quad j_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial z}, \quad j_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r}, \quad E_z = \frac{j_z}{\sigma}, \quad E_r = \frac{j_r}{\sigma} \quad (41)$$

Уравнения (37-41), дополненные зависимостями переносных свойств от температуры ( $\lambda(T)$ ,  $\mu(T)$ ,  $\sigma(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $U_{rad}(T)$ ), образуют замкнутую систему уравнений. Пример распределения давлений, скоростей и температуры в столбе дуги, рассчитанный по методу контрольного объема представлен на рис.3.

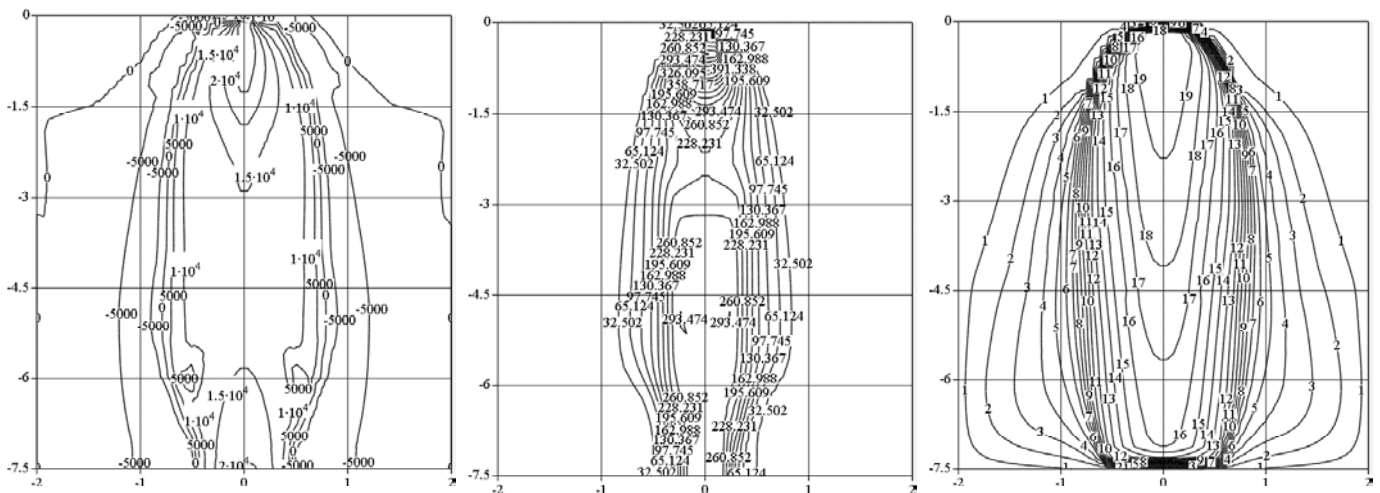


Рис.3. Распределение давления, скоростей и температуры в столбе дуги (Fe – 80%)

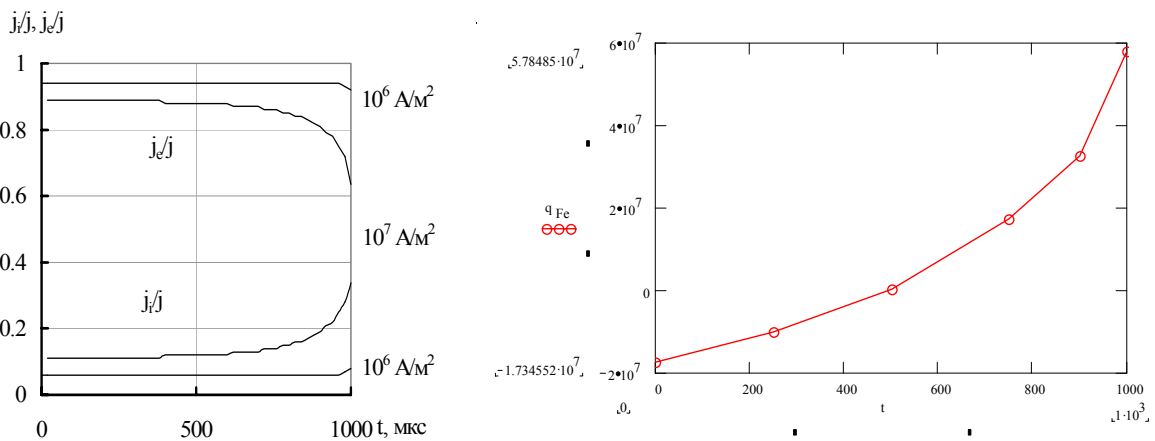


Рис. 4. Зависимость доли ионного и электронного тока в прикатодной области при различных плотностях тока дуги и удельного теплового потока от времени развития разряда при условии уменьшения парциального давления паров железа от 100 до 5 атм

В результате анализа прикатодных процессов произведен расчет прикатодного падения напряжения, долей электронного и ионного тока в прикатодной области и определен тепловой поток, действующий на катод, который определяется по следующей формуле:

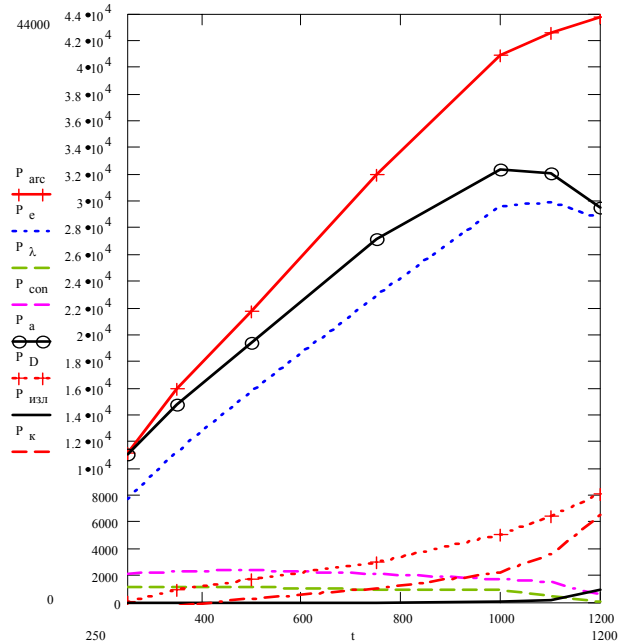
$$q = \sum_s j_i^s \frac{\left[ k \left( 2T_i + \frac{ZT_e}{2} - 2T_{кп} \right) + eU_k + eV_i^s - (e\varphi - \Delta e\varphi - e\varphi_{п}) \right]}{e} + \quad (42)$$

$$+ j_e \frac{(2kT_e + e\varphi - \Delta e\varphi - e\varphi_{п})}{e} - j_{em} \frac{(2kT_{кп} + e\varphi - \Delta e\varphi - e\varphi_{п})}{e}$$

Результаты расчета прикатодных процессов представлены на рис.4.

На основании принятой модели расчета теплового потока, передающего энергию в анод – деталь и теплового потока, передающего энергию в катод – инструмент, а также с учетом изменения скорости потока металлического пара от температуры и затрат энергии, отводимой от дуги, можно определить перераспределение баланса мощностей между инструментом, столбом дуги и деталью (рис.5).

Рис. 5. Распределение баланса мощностей для электродов Fe-Fe.



В пятой главе на основании перераспределения баланса энергий в межэлектродном промежутке решается тепловая задача по распределению температурного поля в нагреваемом изделии и в инструменте. При этом рассматривается комплексная задача с учетом физических процессов, технологических параметров и параметров источника питания и (рис.6).

На основании проведенного анализа тепловых процессов произведен выбор тепловых источников действующих на деталь и инструмент на стадии контакта и дугового разряда. Расчеты тепловых процессов осуществляются на основании сделанных заключений о характере теплового воздействия на электроды и с учетом взаимосвязей, представленных на структурной схеме, а именно: контактная стадия рассчитана при задании нормально распределенного поверхностного источника тепла со смещающейся границей по мере выплавления металла. При расчете на стадии дугового разряда используется объемный источник тепла, который определяется из задания производительности процесса выплавления металла для конечных размеров обрабатываемой заготовки. Теплопередача в инструмент характеризуется действием поверхностного источника тепла. Выбор типа теплового источника определялся на основании экспериментальных данных.

В основе расчета лежит численное решение уравнения теплопроводности МКЭ, записанного в подвижной системе координат

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_3. \quad (43)$$

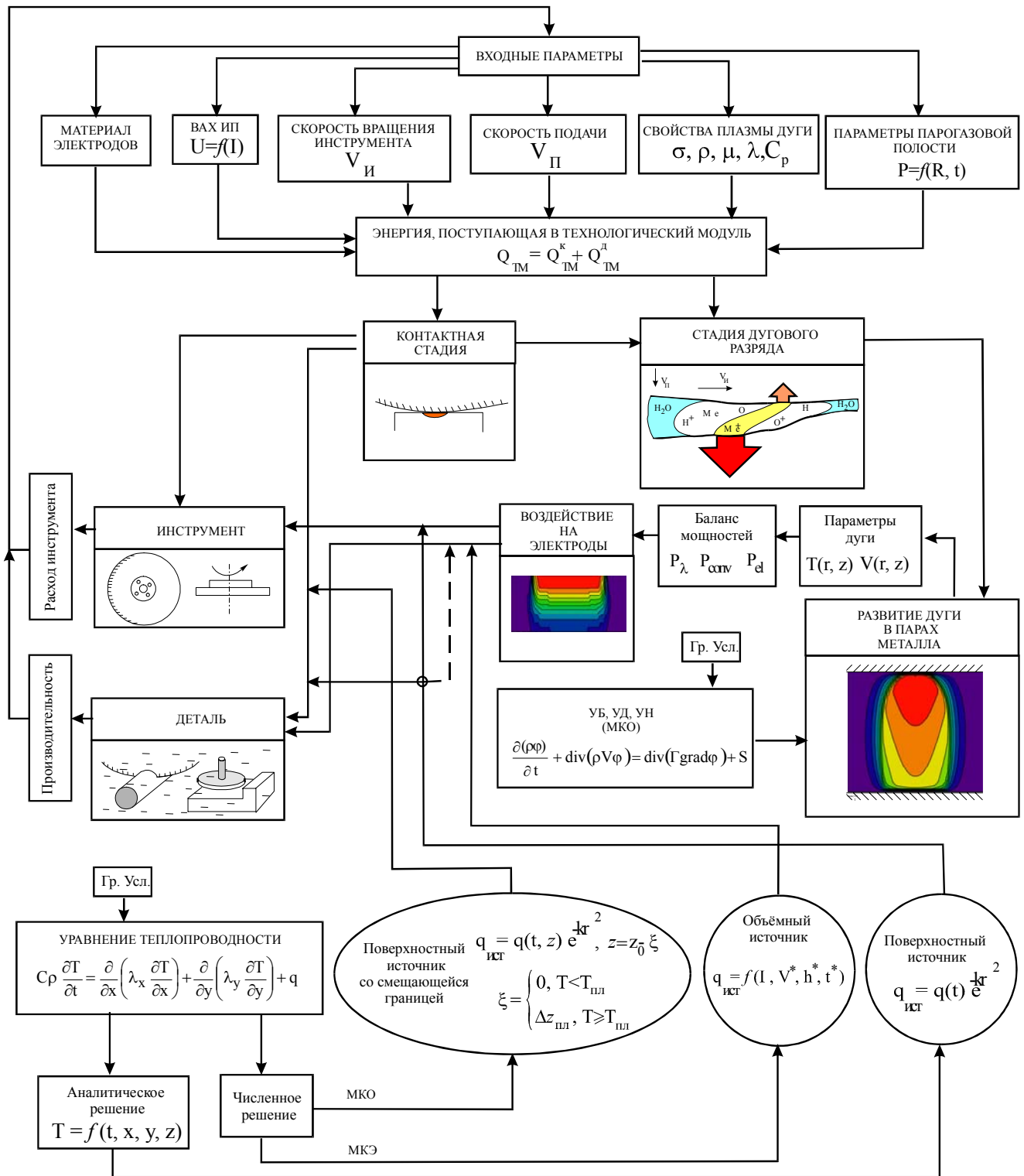


Рис. 6. Комплексная теплофизическая модель процесса ЭКД технологии обработки металлов.

Результаты расчета сравнивались с другими методами расчета, в том числе с аналитическими.

Целью расчетов являлось определение технологических режимов ЭКД метода выплавки металлов, определения ЗТВ и для количественного анализа физической картины протекающих при этом явлений и выработки обоснованных рекомендаций технологических режимов ЭКД обработки по результатам расчета температурного поля

возникающего в электродах в процессе выполнения операций размерной обработки металлов.

Расчёт распределения температурного поля в разрезаемой заготовке на стадии контакта позволил установить взаимосвязь радиуса кривизны инструмента, скорости его вращения, изменения наклона внешней характеристики источника питания и подачи с точки зрения минимального его износа. Удовлетворительную сходимость полученных результатов с экспериментальными данными дает частное аналитическое решение уравнения теплопроводности применительно к процессу нагрева инструмента:

$$T_1(r, z, t) = \frac{8P_0 a \cdot k}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \cdot \int_0^{t_i} \frac{1}{\sqrt{t(4akt+1)}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{kr^2}{4akt+1} + \frac{z^2}{4at}\right)\right] \cdot dt \quad (44)$$

Расчёт распределения температурного поля в детали на стадии контакта осуществляется для неподвижного распределенного источника при задании зависимости  $P_0(t)$  по формуле (16) с учетом коэффициента сосредоточенности  $k(r_0)$ , где  $r_0$  – начальный радиус контактной площади, определяемый из условий пластической деформации электродов. Необходимый анализ режимов работы установки и их взаимодействия с тепловыми процессами в зоне обработки может быть выполнен при помощи статических характеристик, которые определяют соотношения параметров энергетического состояния рассматриваемого ИП и технологического модуля. В данном случае строятся вольт - амперные характеристики источника питания установки, выявляется влияние параметров ИП на процессы, происходящие в технологическом модуле. Для возможности выбора необходимых параметров ИП он должен иметь систему управления, которая может изменять его внешнюю характеристику в зависимости от условий проведения технологических операций.

Для определения распределения температурного поля в детали на стадии дугового разряда, с учётом энергии ко использовалось численное решение теплопроводности методом конечных элементов (МКЭ). В этом случае для заготовки конечных размеров заданной производительности того, численное решение позволило получить распределение температур - детали  $T(y, z)$  (рис. 7) в технологических и электрических параметрах установки (параметры подачи и вращения ЭИ и др.).

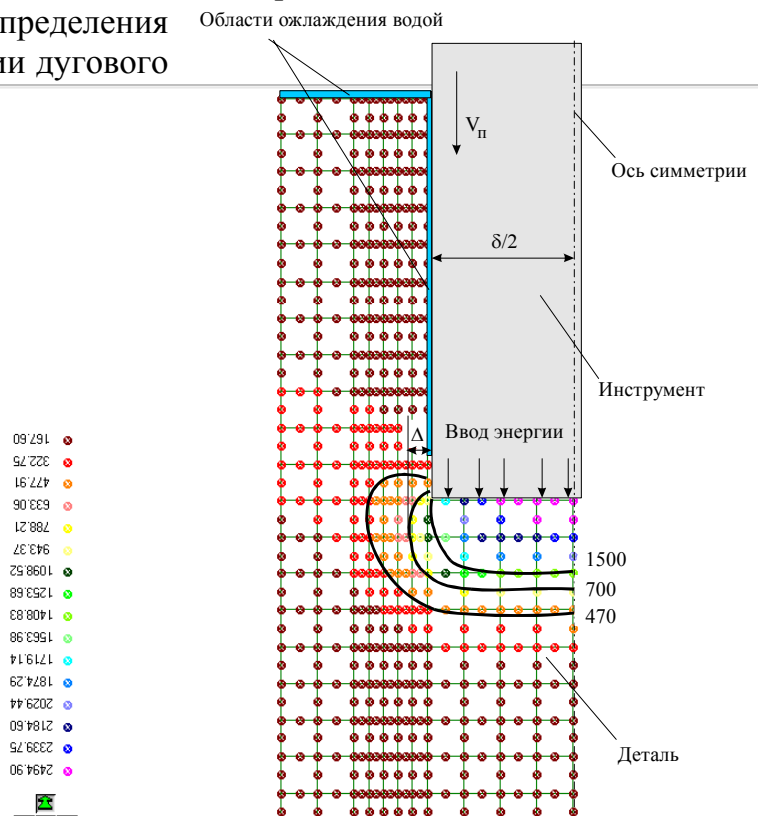


Рис. 7. Распределение температурного поля в разрезаемой стальной заготовке при скорости перемещения источника 7м/с и мощности разрядного промежутка 18кВт. Ширина диска-инструмента  $\delta = 4\text{мм}$ , скорость подачи  $V_n=2\text{мм/с}$

Результаты расчёта температурного поля в детали согласуются с экспериментальными данными и позволяют определить оптимальное время обработки при заданных геометрических размерах обоих электродов и величину подводимой мощности, а также глубину ЗТВ. При этом ЗТВ принимается размерным допуском при обработке деталей.

Анализ результатов исследований температурных полей в инструменте даёт возможность определить пути уменьшения износа ЭИ. Определены зависимости относительного износа инструмента  $\gamma$  от времени действия разряда и скорости подачи. Степень износа ЭИ находится в зависимости от тока дуги, ее состава, свойств и времени горения. Для этого рассмотрено влияние ВАХ ИП на развитие дугового разряда и определены условия сокращения времени его горения.

В шестой главе представлена методика проведения экспериментальных исследований на промышленной и специально разработанной лабораторной установке, которые позволили осуществить следующую последовательность проведения исследований:

1. Установить закономерности энерговыделения в электроимпульсном дуговом разряде в зависимости от эксплуатационных параметров станка, технологического модуля (выходных параметров источника питания постоянного тока, скорости подачи инструмента – детали  $v_d$ , линейной скорости перемещения зоны контакта инструмента -  $v_n$  и др.).

2. Исследовать стадию контакта электродов в зависимости от технологических параметров установки.

3. Исследовать виды электрических разрядов посредством скоростной киносъемки в зависимости от режимов обработки.

4. Определить условий выброса единичной порции расплавленного металла анода (детали) в зависимости от скорости подачи детали, состава окружающей среды и типа металлов анода и катода, а также количества испаряемого металла, произвести калориметрирование.

5. С целью установления закономерностей перераспределения энергий между электродами на стадиях развития разряда произвести определение эрозии материала электродов, а также геометрические параметры площадок выплавляемого металла.

6. Определить температуру детали на различной глубине от зоны резки методом ИК - излучения в зависимости от параметров импульсного электрического разряда.

7. Исследование динамических и статических вольт - амперных характеристик электрической дуги.

В результате проведенных исследований подтверждены основные положения, принятые при моделировании тепловых процессов. Погрешность экспериментальных исследований в результате статистической обработки данных не превышала 12%.

По результатам экспериментов для дискового инструмента толщиной 4мм установлена объемная производительность процесса выплавления металла, которая для электродов Fe-Fe находится в пределе  $(2 - 23)10^{-6}$  м<sup>3</sup>/мин, а для электродов инструмента и детали Fe – Cu  $(1 - 15)10^{-6}$  м<sup>3</sup>/мин в диапазоне подачи 0.5 – 11 мм/с (рис.8).

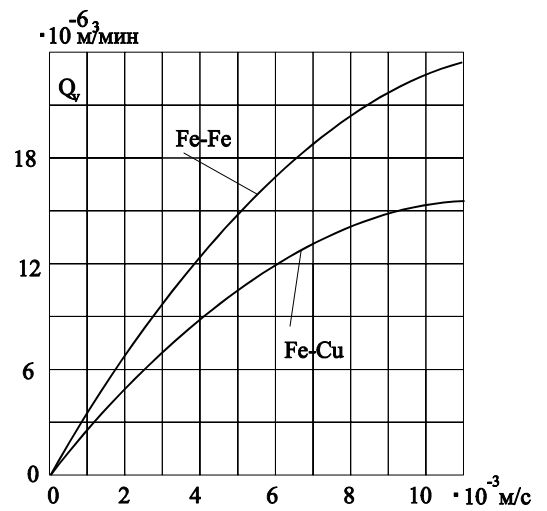


Рис. 8. Зависимость производительности от подачи при неизменной линейной скорости инструмента 40 м/с и ширине 4 мм

При использовании источника питания с управлением по первичной стороне, обеспечивающем наклон внешней характеристики установлено, что для обеспечения эффективной работы оборудования с ростом подачи необходимо увеличивать скорость вращения инструмента и уменьшать наклон внешней характеристики источника питания. Последний вывод является характеристикой, обеспечивающей минимальный износ инструмента и высокую производительность выплавления металла в условиях ЭКД метода, производимого в воде.

В приложении приводятся зависимости, определяющие состав плазмы электрического разряда, зависимости проводимости, энтальпии, плотности, теплопроводности, теплоемкости, вязкости, парциальных давлений, концентраций компонентов плазмы, степени ионизации от температуры при наличии различных концентраций паров металлов в составе плазмы. Дается описание методик расчета МКЭ и МКО. Приводятся результаты экспериментальных данных по количеству и объему выплавляемого металла. Даны принципиальные схемы силовой установки, блоков управления источником питания и управления тиристорами силового блока управления, выполненными на базе реакторно – тиристорных устройств.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация посвящена решению и теоретическому обобщению важной научно - технической проблемы в области электротехнологии, заключающейся в повышении эффективности термофизического процесса электроконтактно – дуговой технологии обработки заготовок путем установления физических и тепловых закономерностей взаимодействия инструмента и детали с разделением на стадии процессов контакта и горения электрической дуги, а также с учетом взаимосвязей электрических и технологических параметров оборудования с производительностью обработки.

Выявленные закономерности взаимодействия инструмента и детали, а также установленные параметры технологического процесса и электрической дуги позволили сократить расход инструмента при снижении затрат на электрическую энергию и обеспечить высокую производительность обработки металлов. На основании проведенных комплексных исследований процессов в условиях электроконтактно – дуговой технологии обработки металлов, получены следующие результаты:

1. Разработана комплексная теория теплофизических процессов, отражающая условия электроконтактно – дуговой технологии обработки металлов для определения параметров, обеспечивающих увеличение к.п.д. обработки заготовок, которые отличаются от существующих методов учетом влияния технологических параметров (скорости подачи, скорости вращения инструмента, геометрических размеров дискового инструмента) и параметров источника питания постоянного тока. На ее основе даются рекомендации по выбору эффективных режимов работы оборудования.

2. Разработаны методы расчета и математические модели электротехнологических режимов ЭКД обработки в переходных и установившихся процессах, которые отличаются от существующих разделением стадий процесса на контактную и электродугую. Причем электродуговая стадия процесса рассматривается в условиях развивающегося квазипарового разряда и установления ионизированной плазмы импульсного разряда в воде с учетом меняющегося давления в парогазовой полости.

3. Разработана методика определения переходного электрического сопротивления при контакте электрода – инструмента и электрода детали в условиях электроконтактно – дуговой технологии, позволяющая моделировать изменение мощности, проводить анализ процесса нагрева ЭИ и ЭД, а также давать практические рекомендации по влиянию внешних параметров на процесс нагрева инструмента и выплавление металла

заготовки в зависимости от радиуса инструмента, его материала, скорости вращения и скорости подачи. Так для определяемых параметров инструмента и скорости подачи  $(1-4)10^{-3}$  м/с минимальная линейная скорость должна составлять соответственно для электродов Fe-Fe, Fe-Cu, Fe-Al: (8-13 и 12-19) м/с, (14-25 и 16-27) м/с, (13-16) м/с.

4. Установлены параметры образования квазипаровой электрической дуги, для электродов при прямой полярности включения, так для электродов Fe-Fe, Fe-Cu, Fe-Al плотность тока образования дуги соответственно составляет:  $j = 2.7 - 2.8 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>,  $j = 2.45 - 2.6 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>,  $j = 3.35 - 3.4 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup> и не зависит от скорости подачи.

5. Расчет параметров квазипарового дугового разряда, проведенный на основе двух - температурной модели плазмы и решения магнитогидродинамических уравнений, позволил получить параметры дугового разряда в условиях ЭКД технологии обработки заготовок, установить изменение температуры плазмы и ее кинетические коэффициенты в зависимости от времени развития электрической дуги, получить исходные данные для анализа приэлектродных процессов в условиях квазипарового разряда. Так, с уменьшением давления температура паров металла растет и достигает в среднем 6000-6500 °К, что хорошо согласуется с экспериментальными данными других авторов, при этом максимум температуры находится в приповерхностном слое электрода – анода. Температура электронной и атом - ионной компонент практически не отличается в исследуемом диапазоне давлений и плотности тока разряда. Однако даже при незначительном изменении плотности тока разряда, температура паров металла может увеличиться до 30%, кроме того, установлено, что интенсивный рост температуры паров металла происходит при давлениях 5-2 атм., что обусловлено достижением энергии ионизации атомов металла.

6. Разработана методика расчета приэлектродных процессов на начальной стадии развития дугового разряда, которая включает в себя модель прикатодных и прианодных процессов, отражающая массоперенос плазмы, происходящий в квазипаровом дуговом разряде от времени. При этом установлено, что вклад электронного тока в баланс энергии на поверхности анода достигает 75÷95%, конвективный теплообмен не более 25%, теплопроводность через пограничный слой ~3÷7%, а вклад ионного тока, излучения и энергии приобретаемой заряженными частицами в слое разделения зарядов, составляет менее 10%. Причем, конвективный теплообмен, в основном, зависит от тока дуги и степени ее сжатия, что определяется величиной давления в парогазовой полости.

Установлено, что в условиях квазипарового разряда износ инструмента не превышает 14%. Это обусловлено малой долей ионного тока и изменением прикатодного падения напряжения в начальной стадии развития разряда, которое меняется от одного вольта до 5.5 – 6 В при изменении давления от 100 атм. до 5 атм.

7. При определении сравнительных закономерностей перераспределения энергий между электродами и столбом дуги в условиях квазипарового разряда и установления развития электрической дуги получено, что для развивающегося квазипарового разряда доля мощности, поступающая в анод – деталь, в среднем на 40% выше, чем для установившегося дугового разряда. При этом мощность, поступающая в катод – инструмент, сокращается на 30-35%.

8. Установлены принципы рационального регулирования наклоном характеристики источника питания постоянного тока с помощью реакторно – тиристорных устройств с целью сокращения длительности горения электрической дуги. При этом доказано, что продолжительность импульсного электрического разряда должна находиться в пределах  $1.5-2 \cdot 10^{-3}$  с в исследуемом диапазоне: скорости подачи  $(0.5 - 11)10^{-3}$  м/с, линейной скорости вращения инструмента 21-56 м/с и напряжения источника питания ( $U_{xx} = 35-$

42 В). По динамическим вольт - амперным характеристикам электрической дуги установлено время развития квазипарового дугового разряда, которое в исследованном диапазоне скорости подачи не превышает  $1-1.2 \cdot 10^{-3}$  с.

9. Проведенные экспериментальные исследования по разработанной методике подтверждают физические закономерности, происходящие в условиях ЭКДО металлов, а также удовлетворительно согласуются с данными, полученными расчетным путем с погрешностью не более 15-20%, и позволяют устанавливать количественные показатели выплавляемого металла, зону термического влияния по величине температуры, определяемой распределением температурного поля по заготовке и инструменту. Получаемые данные по дефектному слою являются исходными значениями по принятию допуска при обработке заготовок. Также установлено, что в пределах установленных технологических и электрических параметров при использовании дискового инструмента с вольфрамовыми вставками износ инструмента не превышает 11%, при этом появляется возможность формировать продолжительность и скважность импульсов разряда, обеспечивающих эффективность выплавления металла с тепловым к.п.д. до 75%. Для обеспечения эвакуации продуктов эрозии на подачах более  $2.5 \cdot 10^{-3}$  м/с скважность должна составлять 1.5-2 при продолжительности горения электрической дуги  $1.2-1.5 \cdot 10^{-3}$  с.

Полученные результаты в ходе теоретических и экспериментальных исследований тепловых процессов в условиях ЭКД технологии обработки металлов расширяют представления о физических явлениях исследуемого метода, позволяют применять разработанные методики расчета на практике, способствуют дальнейшему изучению процесса электроконтактно-дугового выплавления металла, как одного из производительных и экологически чистых методов обработки металлов. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта, разработки и проектирования технологического оборудования для ЭКД обработки заготовок, с целью увеличения эффективности обработки металлов с различными физико-механическими свойствами и снижения затрат на их эксплуатацию.

## Основные публикации по теме диссертации

### Монографии и учебные пособия

1. Веселовский А.П., Фролов В.Я., Донской А.В. Электродугоконтактная резка металлов - С.-Петербург.: Энергоатомиздат, 1993, 124 с.
2. Кукеков Г.А., Фролов В.Я. Переходные процессы в контактно – тиристорных аппаратах - Л.: Энергоатомиздат, 1988, 165 с.
3. Фролов В.Я. Исследование энергетических характеристик и тепловых процессов установки контактно – дуговой резки и обработки металлов - С.-Петербург.: Нестор, 2002, 117с.

### Статьи, доклады и авторские свидетельства

1. Фролов В.Я.. Моделирование приэлектродных процессов в установках электроконтактно – дугового выплавления металла. // Металлообработка. 2001, №3, с. 19-25.
2. Фролов В.Я. Анализ процессов на стадии контакта в условиях обработки металлов электроконтактно - дуговым методом // Металлообработка. 2002, №5, с. 16-23.
3. Ананьев В.П., Фролов В.Я.. Управление последовательно – параллельными группами тиристорных коммутаторов. //Электричество, 1986, №1, с. 38-44.



4. S.V. Dresvin, V.Y. Frolov and V.I. Yakovlev, The heat model electroerosion process. // Proc. of 5<sup>th</sup> Conference on Thermal Plasma Processes. Progress in Plasma Processing of Materials 1998. St. Petersburg, Russia, 13-16 July 1998. – С. 678-684.
5. Исследование динамических процессов на замыкаемых контактах, шунтированных тиристорами //Л.Н. Карпенко, В.П. Лунин, В.А. Скорняков, В.Я. Фролов// Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1979. – Вып. 7(99). – С.1 – 4.
6. Frolov V.Y., Krylov A.V., Smirnov E.E. The model of electric pulse electrode discharge in vapour of metals. Progress in Plasma Processing of Materials. Strasbourg, France, 2002. - pp. 742-754.
7. Артеменко М.В., Ганзуленко А.Ю., Фролов В.Я. Электродуговой разряд в жидкости при ЭДКР металла // XXVIII Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – С.87-88.
8. Фролов В.Я., Основы теории электроэрозионных процессов. // Материалы международной научно – технической конференции. Электрофизические и электрохимические технологии 1997. С. – Петербург, 9-11 июня 1997, с. 41-44.
9. V.Y. Frolov, Bases of theory electroerosion plasmcontacted sharp metals. // Proc. of 5<sup>th</sup> Conference on Thermal Plasma Processes. Progress in Plasma Processing of Materials 1998. St. Petersburg, Russia, 13-16 July 1998, pp. 285-289.
10. В.Я. Фролов, Особенности дуговых разрядов при электроконтактно – дуговой резке. // Материалы российской научно – технической конференции. Перспективные технологические процессы обработки металлов 1995. С. – Петербург, 24-25 октября 1995, с. 38-44.
11. Гимазетдинова Н.Г., Фролов В.Я. Состав высокоинтенсивной электродной плазмы // XXVIII Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – С.89-90.
12. Dresvin S.V., Frolov V.Y., Smirnov E.E., Krylov A.V. Plasma chemical processes in the near electrode areas in case of electrical contact arc handling of metals // 15<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry. Symposium Proceedings. Volume III, ISPC-15, Orléans, France, 9-13 July, 2001, GREMI, CNRS / University of Orléans, 2001. – pp. 777-782.
13. Карпенко Л.Н., Лунин В.П., Фролов В.Я. Исследование динамических процессов на замыкаемых контактах. Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1982. – Вып. 4(101). – с. 5 – 9.
14. Адоньев Н.М., Кукеков Г.А., Фролов В.Я. Влияние параметров электрических цепей на коммутационные процессы в аппаратах. – Электротехника, № 5, 1980. – с. 7-12.
15. Адоньев Н.М., Кукеков Г.А., Лунин В.П., Фролов В.Я. Оптимизация параметров дугогасительной системы аппаратов с тиристорной приставкой. – Известия Вузов, Электромеханика, № 3, - с. 6-11.
16. Фролов В.Я. Анализ переходных процессов в силовом блоке комбинированного аппарата при включении. – ВИНТИ: Информэлектро, № 1, 1982. – с. 24.
17. Ле Куанг Чуен, Лунин В.П., Фролов В.Я. Методика экспериментальных исследований распределения температуры и тока между параллельно соединенными тиристорами. Труды ЛПИ, № 392, 1983. – с. 24-27.
18. Адоньев Н.М., Александров Г.Н., Фролов В.Я. Выключатели с повышенным коммутационным ресурсом работы и перспективы их развития. Электротехническая промышленность. - 1983, - вып. 7 (141). – с. 1-4.
19. Смирнов Е.Е., Гимазетдинова Н.Г., Фролов В.Я. Распределение температурного поля в заготовке при электроконтактной резке // XXX Юбилейная Неделя науки

СПбГТУ. Ч. II: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – С. 45-46.

20. Дресвин С.В., Фролов В.Я. Теплофизические процессы в условиях электроконтактно – дуговой резки металлов. //Материалы докладов совещания по «Электротермии – 94». С.-Пб, Из-во: ДНТП, 7-8 июня 1994. с. 22-27.

21. Фролов В.Я., Тепловая модель электроэрозионного процесса. // Материалы международной научно – технической конференции. «Электрофизические и электрохимические технологии 1997». С. – Петербург, 9-11 июня 1997, с. 44-46.

22. Дресвин С.В., Фролов В.Я., Целоусов В.В.. Электромагнитные и дуговые процессы при электроконтактной резке металлов. //Сборник статей ДНТП. Автоматизация электрофизических методов обработки материалов. Л.: ЛДНТП, 1988, с. 17-21.

23. V. Frolov. Electroarc discharge in conditions bow-contact cutting of metal. Progress in Plasma Processing of Materials 2001. Strasbourg, France, May 30 - June 3, 2000, pp. 599-604, ISBN 1-56700-165-3.

24. Фролов В.Я., Основы физических процессов развития импульсного дугового разряда при электроконтактно – дуговой обработке металлов. // Материалы российской научно – практической конференции и школы семинара. Формирование технической политики наукоемких технологий. С. – Петербург, СПбГТУ, 14-16 июня 2001, с.187-209.

25. Фролов В.Я., Крылов А.В.. Анализ процессов на стадии развития квазипарового разряда при обработке металлов контактно – дуговым методом. // Материалы российской научно – практической конференции и школы семинара. Формирование технической политики наукоемких технологий. С. – Петербург, СПбГТУ, 18-20 июня 2002, с.73-78.

26. А.с. №1474809 (СССР). Устройство для формирования импульсов управления тиристорами /Фролов В.Я., Ананьев В.П. //Открытия. Изобретения. – 1989. - №15. – с.3.

27. А.с. №1130979 (СССР). Устройство для формирования импульсов управления тиристорами преобразователя /Фролов В.Я., Пасечник П.В.//Открытия. Изобретения. – 1984. - №47. – с.3.

В работах, выполненных в соавторстве, вклад автора заключался в постановке проблемы, разработке методов и их решения, а также построения математических моделей (монографии 1,2, статьи 3-7, 11,12), в разработке методики экспериментальных исследований (13-15, 17,18), в определении способов решения и построения адаптивных расчетных методик (19,20,22,25). В монографиях 1,2 вклад автора в объем изданий составляет 60% и 70% соответственно, в остальных работах написанных в соавторстве вклад между авторами распределен равномерно.