

На правах рукописи

Смирнов Евгений Евгеньевич

Разработка и исследование установки для электроконтактно-дуговой  
размерной обработки металлов

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2002 г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете.

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент Фролов Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Башенко Всеволод Владимирович;  
кандидат технических наук,  
доцент Скорняков Владимир Анатольевич

Ведущая организация: Институт Сварки России

Защита состоится "28" ноября 2002 г., в 18 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.20 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: Санкт Петербург, ул. Политехническая 29, Гл. здание, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

Курмашев А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Электроконтактно-дуговая размерная обработка (ЭКДРО) металлических заготовок, в том числе из труднообрабатываемых материалов является одним из самых высокопроизводительных способов обработки, известных в настоящее время. Она основана на формоизменении металлических поверхностей, производимом нагревом и расплавлением этих поверхностей электрическим током. Однако широкое внедрение и повышение эффективности ЭКДРО сдерживается рядом причин, основными из которых являются: отсутствие единого критерия при выборе оптимальных режимов работы, необходимость мощных источников питания, неоднозначность данных по физике процесса, отсутствие единой модели расчёта тепловых процессов, происходящих в зоне обработки. Практические вопросы выбора и использования источников питания, технического обеспечения, повышения производительности и качества обработки требуют также дальнейшего детального изучения процессов, протекающих в условиях ЭКДРО.

Всё это определяет актуальность проведения исследований термофизических процессов, происходящих в условиях ЭКДРО.

Цель работы. Целью данной диссертационной работы является разработка комплексной модели теплофизических процессов в зоне обработки с учетом внешних параметров технологического оборудования, их количественное и качественное описание на теоретическом уровне, с последующей экспериментальной проверкой полученных данных. Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Провести комплексное теоретическое исследование условий взаимодействия электродов на стадии контакта и стадии воздействия дугового разряда на электроды, а также определить влияние внешних параметров на эти процессы.

2. На основе проведения сравнительного анализа методов расчёта температурных полей при нагреве металлов, произвести обоснование и выбор метода расчёта наиболее точно отражающего физику процесса и согласующегося с экспериментальными результатами.

3. Определить распределение температурного поля в электроды на всех стадиях обработки в условиях ЭКД метода размерной обработки.

4. Определить пространственное распределение температурного поля плазмы дугового разряда с учётом изменений в условиях её развития, и рассчитать составляющую мощности, передаваемую детали дугой, горячей в условиях ЭКД выплавки металла.

5. Экспериментально определить основные параметры процесса, такие как: весовую и массовую производительности на стадии контакта и комбинированной стадии, величину зоны термического влияния для стали.

6. Обобщить теоретические и экспериментальные результаты по определению параметров процесса с выдачей рекомендаций по выбору режимов работы оборудования.

Научная новизна. Проведено комплексное исследование параметров процесса ЭКДРО металлов как электротехнологического оборудования с учётом влияния внешних параметров на термофизические процессы в зоне обработки. Разработана комплексная тепловая модель на основе выработанной концепции термофизических процессов.

Практическая ценность. Новые данные, полученные при экспериментальном и теоретическом исследованиях, дополняют и уточняют уже имеющуюся информацию о физических процессах взаимодействия дугового разряда с поверхностью электродов, происходящих при ЭКДРО металлов в жидкой диэлектрической среде, позволяют провести выбор режима работы оборудования, повысить к.п.д. и сократить расход инструмента.

На защиту выносятся:

1. Результаты обоснования и выбора метода расчёта температурных полей при нагреве металлов наиболее точно отражающего физические процессы в соответствии с экспериментальными данными.

2. Результаты комплексного теоретического исследования условий взаимодействия электродов друг с другом и с дуговым разрядом.

3. Результаты расчётов распределения температурного поля в электроды.

4. Результаты расчёта свойств плазмы столба дугового разряда, горящего в парах металла.

5. Результаты расчёта распределения температурного поля дугового разряда с учётом динамики его развития.

6. Результаты экспериментальных исследований процессов, происходящих в технологическом модуле установки для ЭКДРО металлов.

Достоверность результатов работы обеспечивается обоснованным применением теоретических положений, использованных при проведении расчётов и сопоставлением результатов расчёта с результатами экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на 6-й Европейской конференции по термическим плазменным процессам (ТРР-6), 2000г., 15-м Международном симпозиуме по плазмохимии (ISPC-15), 2001г., 7-й Европейской конференции по термическим плазменным процессам (ТРР-7), 2002г., а также на XXVII, XXIX, XXX неделях науки СПбГТУ (1999, 2000, 2001гг.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано восемь статей и тезисы двух докладов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и заключения, списка использованной литературы, изложенных на 250 страницах текста, содержит 97 рисунков, 5 таблиц, приложение.

В работе приняты обозначения: ЭКДРО – электроконтактно-дуговая размерная обработка, ЭКДР – электроконтактно-дуговая резка, ЭИ – электрод-инструмент, МЭП – межэлектродный промежуток, ЗТВ – зона термического влияния, ВАХ ИП – вольтамперная характеристика источника питания, МКО – метод конечных элементов, МКО – метод контрольного объёма.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследования, приводится общая характеристика работы, описаны выносимые на защиту положения.

В первой главе освещено современное состояние проблемы электроэрозионной обработки металлов, приведён краткий обзор существующих методов обработки и результатов теоретического и экспериментального исследования электроконтактно-дуговой обработки (ЭКДО) металлов.

Сравнительный анализ литературных данных показал предпочтительность метода ЭКДО металлов для широкого диапазона технологических задач обработки металлов с различными теплофизическими параметрами с повышенной производительностью. Однако на сегодняшний день отсутствует комплексный подход к исследованию общих закономерностей технологических процессов, основанных на электроконтактно-дуговом (ЭКД) выплавлении металла.

Литературные данные, относящиеся к исследованию процесса ЭКДО, часто содержат противоречивую и неполную информацию, в частности по физике процесса. Результаты публикаций различных авторов преимущественно содержат данные по изучению отдельных физических процессов, и не оказано должного внимания взаимодействию этих явлений между собой, для получения адекватного описания параметров процесса ЭКДО в целом.

К процессам, требующим изучения, относятся: физическая сущность ЭКДО; выбор действующего теплового источника; взаимодействие электродов при разделении процесса на стадии: контакта и дугового разряда; определение свойств и, на их основе, параметров электрической дуги; процессы теплопереноса в деталь-анод с учётом воздействия с плазмой электрической дуги. Изучение этих процессов и установление связи между ними, с помощью наиболее общих параметров, позволит получить общую картину процесса ЭКДО.

Поэтому основным направлением исследований, выполненных в настоящей работе, является установление закономерностей теплофизических явлений и электрических параметров и их взаимосвязей с конструктивными и техноло-

гическими параметрами процесса в широком диапазоне изменения условий обработки с целью обеспечения высокой производительности, уменьшения износа ЭИ и, как следствие, расширения области его рационального применения, а также более активного внедрения этого метода в производство.

Для определения этих параметров и объединения их в единую схему процесса требуется проведение следующих исследований:

1. Определение физической модели процесса как неотъемлемого звена операций ЭКДРО, необходимой для последующих расчётов и объединения их в единое целое.
2. Разработка модели тепловых процессов в зоне обработки на основе принятой концепции физической и тепловой модели при разделении характера теплового воздействия на контактную стадию и стадию дугового разряда.
3. Теоретическое и экспериментальное изучение распределения температурного поля в обрабатываемом изделии.
4. Определение параметров дугового разряда в зоне обработки.
5. Разработка тепловой модели, в зависимости от внешних технологических и электрических параметров установки для ЭКД метода выплавления металлов.

Во второй главе содержится анализ физической сущности явлений, происходящих в МЭП при ЭКДРО металлов. Подтверждено существование двух основных этапов возникновения разряда в МЭП в воде: стадии контакта и стадии дугового разряда, а также теплового взрыва при переходе от одной стадии к другой.

Произведён выбор действующего на материал детали теплового источника для решения тепловой задачи на обеих стадиях: контакта и дугового разряда.

Расчёты тепловых процессов в условиях ЭКДРО осуществляются на основании сделанных заключений о характере теплового воздействия разряда на электроды и с учётом взаимосвязей, представленных на комплексной структурной схеме (рис. 1). То есть, контактная стадия рассчитана при задании нор-

мально распределённого (кругового) поверхностного источника тепла, когда задача может быть сведена к простым или известным решениям; и, используя поверхностный распределённый источник тепла со смещающейся границей, что отражает физическую сущность процесса ЭКДРО.

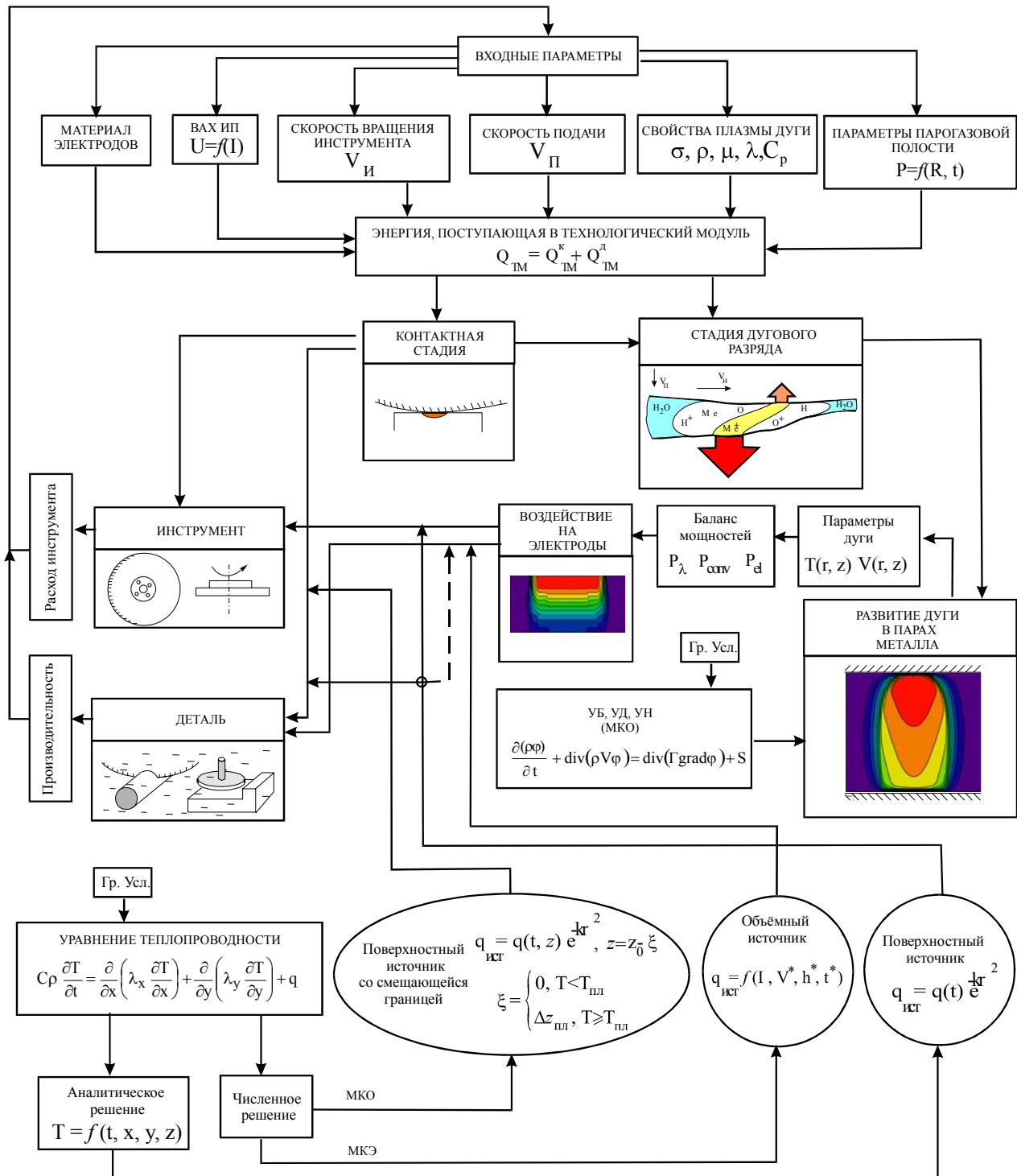


Рис. 1. Комплексная теплофизическая модель процесса ЭКД метода размерной обработки металлов.



Процесс теплопередачи в деталь на стадии дугового разряда, который наблюдается в течение ЭКДРО, целесообразно рассчитывать при задании объёмного источника тепла. При этом производились сравнительные теоретические исследования процесса с применением других методов решения уравнения теплопроводности.

Теплопередача в инструмент в общем случае характеризуется действием поверхностного источника тепла. Процессы на катоде (инструменте) в зоне обработки находятся в согласии с экспериментальными данными при использовании в расчётной модели поверхностного источника тепла.

В третьей главе рассматривается влияние контактного начала и дугового разряда на процесс нагрева металла на основе аналитического и численного решения уравнения теплопроводности, записанного в подвижной системе координат

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_3 \quad (1)$$

Для определения технологических режимов ЭКДРО металлов, определения ЗТВ и для количественного анализа физической картины протекающих при этом явлений и выработки обоснованных рекомендаций технологических режимов ЭКДРО, необходимо выполнить расчет и построение температурного поля возникающего в электродах в процессе выполнения операций размерной обработки металлов, с помощью уравнения теплопроводности (1).

Проводится теоретический расчёт распределения температурного поля в разрезаемой заготовке на стадии контакта, которая оказывает существенное влияние на дальнейший процесс ЭКДРО и создаёт условия для зажигания дуги, вызывая расплавление металла и его тепловой взрыв на начальной стадии процесса развития дуги.

Подобный расчёт проводился на основе частного аналитического решения уравнения теплопроводности:

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

Расчёт распределения температурного поля в детали на стадии контакта осуществляется для неподвижного распределенного источника при задании зависимости  $P_0(t)$ .

Для определения зависимости теплового режима на стадии контакта от параметров источника питания была определена зависимость тока, протекающего через контактную площадку от времени с учётом изменения переходного сопротивления этой площадки. Переходное сопротивление контактов определяется следующим образом:

$$R_{\text{пер}} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho_{\text{пер}}}{\sqrt{\pi^3 S}}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадка контакта,  $\rho_{\text{пер}}$  – переходное удельное сопротивление, которое определяется с учётом всех факторов, присущих контактной поверхности (зоне контакта), а именно, гетерогенной структуры (оксидными плёнками), сопротивлением металла с учётом температуры, пористостью:

$$\rho_{\text{пер}} = \sum_i (\rho_{\text{м}_i} + \rho_{\text{оп}_i} + \rho_{\text{пор}_i}). \quad (4)$$

На рис. 2 показан типичный характер изменения сопротивления контактной площадки.

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

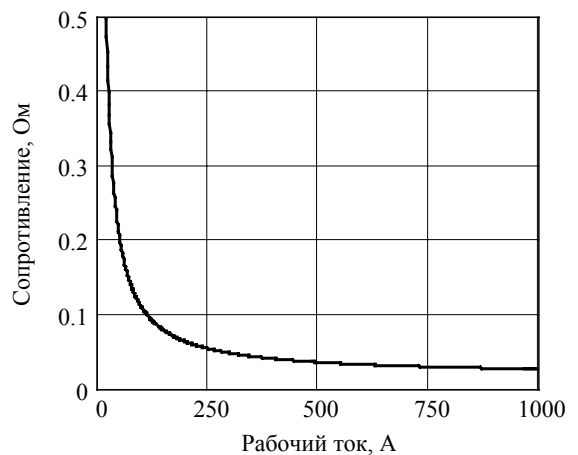


Рис. 2. Обобщенная зависимость сопротивления  $R_k$  от рабочего тока.

ИП и технологического модуля. В данном случае строятся вольтамперные характеристики источника питания рассматриваемой установки, выявляется влияние изменения 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.

Установлено, что при изменении наклона внешней характеристики ИП влияние источника питания на количество поступающей в электроды на стадии контакта энергии, не превышает 10%. Таким образом, управление жёсткостью ВАХ ИП практически не влияет на длительность контактной стадии, т.к. преобладающим фактором, влияющим на эти переходные процессы является характер изменения сопротивления стягивания тока, протекающего через контактную площадку.

Для определения распределения температурного поля в детали на стадии дугового разряда, с учётом энергии контактной стадии, использовалось численное решение уравнения теплопроводности методом конечных элементов (МКЭ). В этом случае для расчёта нагрева заготовки конечных размеров задаётся объёмный, подвижный источник тепла. Кроме того, численное решение позволяет учитывать охлаждение заготовки и зависимость теплофизических и электрических свойств материала от температуры, что повышает точность проводимых расчётов.

В результате разработанной модели тепловых процессов получено распределение температуры в металлической пластине  $T(y, z)$  в зависимости от технологических и электрических внешних параметров установки (параметры ИП, скорость подачи и вращения ЭИ и др.). Результаты расчёта температурного поля в деталь согласуются с экспериментальными данными и позволяют определить оптимальное время обработки при заданных геометрических размерах обоих электродов и величине подводимой мощности, а также глубину ЗТВ.

Анализ результатов исследований температурных полей в инструменте даёт возможность определить пути уменьшения износа ЭИ. Построены зависимо-

сти относительного износа инструмента  $\gamma$  от времени действия разряда и скорости подачи.

Также степень износа ЭИ находится почти в прямой зависимости от тока дуги и времени её горения. Для этого рассмотрено влияние ВАХ ИП на развитие дугового разряда и определены условия сокращения времени его горения.

В четвёртой главе произведён выбор и решена система уравнений термодинамического равновесия для смеси продуктов разложения воды и паров металла ( $Me+H_2O$ ), основанная на уравнениях закона действующих масс с использованием констант равновесия («константный» метод). Составлена система из 8 уравнений, где в качестве неизвестных выступают парциальные давления компонентов, присутствующих в составе плазмы паров металла электродов и продуктов разложения воды.

Предполагается, что плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия. Компоненты в конденсированной фазе в данном расчете не рассматриваются, поскольку область температур исследуемых плазменных процессов лежит в интервале 3500 – 20000 К. Предполагается, что все вещества, входящие в состав смеси, находятся в газовой фазе. В результате, получены зависимости парциальных давлений компонентов плазмы от температуры в интервале от 2000 до 20000 К при различных давлениях. На основе полученных зависимостей произведен расчёт термодинамических и транспортных свойств плазмы дуги, горящей в парах металла заготовки и продуктов разложения воды при ЭКДРО с применением известных формул из молекулярно-кинетической теории газов. Под термодинамическими свойствами понимаются плотность, энтальпия и теплоёмкость плазмы; под транспортными – электропроводность, теплопроводность и вязкость. Энергией, отводимой излучением при давлениях выше  $10^5$  Па в ограниченном объёме, можно пренебречь.

Решена задача гидрогазодинамики. В результате проведённых расчётов установлены зависимости изменения давления в расширяющейся полости в зависимости от радиуса сферы и времени. Так при мощности электрического разря-

да 10000...50000 Вт, давление достигает  $(10...100) \times 10^5$  Па, максимальный радиус полости при этом составляет  $(2...4) \times 10^{-2}$  м.

В пятой главе представлены результаты расчётов столба электрической дуги в приближении локального термодинамического равновесия в условиях ЭКДРО металлов. Расчёты проводились по системе уравнений, которая включает в себя: уравнение баланса энергии, уравнения сохранения импульса, уравнение неразрывности и уравнения Максвелла относительно функции полного тока.

В ходе расчётов получены пространственные распределения температуры столба электрической дуги для различных давлений и концентраций металла (рис. 3).

Рассматриваемая модель адекватно описывает физические аспекты поведения и свойств электрической дуги, горящей в условиях ЭКД метода выплавки металла.

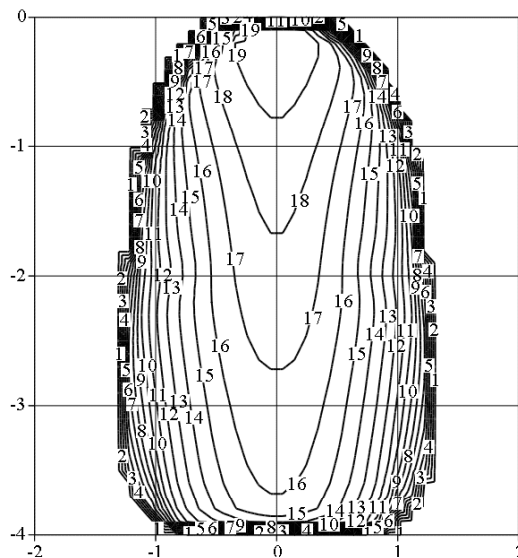


Рис. 3. Распределение температуры электрической дуги  $T(r,z)$  [ $10^3$  К] при давлении 15 атм, длиной  $L=4$  мм, ток дуги  $I=2400$  А, концентрация железа – 80%.

В реальных технологических процессах дуга является неосесимметричной и находится в движении. Также имеет место пространственная неустойчивость привязки дуги к аноду и к катоду вследствие движения дуги, что происходит в реальном процессе обработки металлов. Такие режимы могут быть исследованы только при рассмотрении нестационарной дуги и турбулентного течения

плазмы, что усложнит описанные расчёты, в которых рассматривается неподвижная в пространстве электрическая дуга в фиксированные моменты времени, что даёт возможность установить тепловое взаимодействие дугового разряда с поверхностью обрабатываемой заготовки.

Рассмотренная модель электрической дуги позволяет получить расчетным путем параметры дуги необходимые при анализе параметров технологического процесса и элементов оборудования.

Моделирование теплообмена дуги с металлом анода позволило рассчитать составляющие мощности, поступающей из разряда на анод с учётом конвективного теплообмена.

Конвективный теплообмен в условиях ЭКД выплавления металла в балансе энергии на поверхности анода составляет 5-30% от мощности передаваемой дугой в анод в различные моменты развития разряда, уменьшаясь с падением давления; вклад теплопроводности через пограничный слой  $\sim 3\div 10\%$  (табл.), а вклад ионного тока, излучения и энергии приобретаемой заряженными частицами в слое разделения зарядов составляет менее 10%. Конвективная составляющая, наряду с электронной, играет определяющую роль в процессе передачи мощности аноду.

Таблица. Результаты расчета составляющих теплообмена в анодном пятне.

##	P, атм	I, А	L <sub>д</sub> , мм	P <sub>конв</sub> , Вт	P <sub>эл</sub> , Вт	P <sub>λ</sub> , Вт	P <sub>а</sub> , Вт	P <sub>к</sub> , Вт
1	1	200	8	80	1187	67	1335	6800
2	5	2000	7.5	655	15500	528	16700	52000
3	15	1700	5	1534	11355	400	13290	40800
4	30	1200	2.5	2574	8016	794	11384	25200

Оценочный расчёт показывает, что мощность дугового разряда распределяется следующим образом: в анод поступает 30-65% от общей мощности, остальная доля мощности идёт на диссоциацию продуктов, составляющих основу состава дугового разряда и в катод.

Из-за малой подвижности ионов при кратковременном действии электрического разряда только небольшая часть их достигает катода и отдаёт ему свою энергию. Этот процесс начинается при увеличении длительности непрерывного

горения дугового разряда более 1.2-1.5мс и зависит от скорости подачи. Давление в парогазовом пузыре спадает, дуга удлиняется и доля мощности, поступающая в анод, уменьшается. Процесс ЭКДРО становится малоэффективным, т.к. увеличивается доля мощности, выделяющаяся в инструменте, что способствует увеличению его износа. Ограничение развития дугового разряда обеспечивается увеличением наклона ВАХ ИП, сокращая продолжительность горения электрической дуги.

В шестой главе даётся методика проведения экспериментальных исследований. Экспериментальная установка, изображённая на рис. 4, позволяющая исследовать общие закономерности процесса, включает в себя следующие функциональные элементы.

Основными элементами устройства являются силовой трансформатор с выпрямителем 2, выполненным по шестипульсовой мостовой схеме и силовые

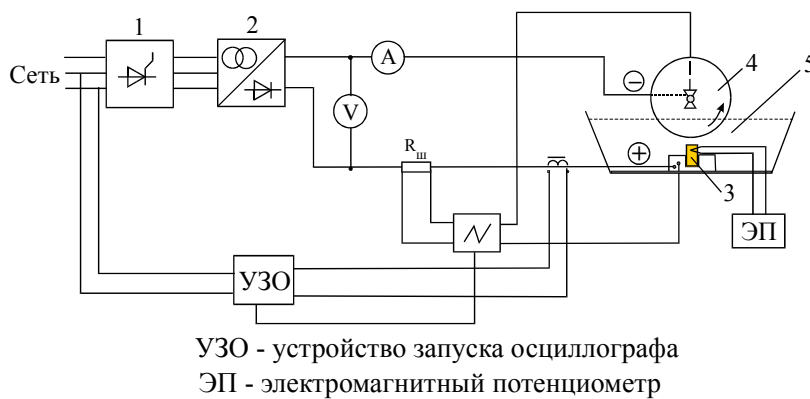


Рис. 4. Структурная схема лабораторной установки.

вентили управления 1. В технологическом модуле, в ванне с водой 5, находится деталь 3, закреплённая в тисках, которая подвергается ЭКД воздействию инструмента 4. Мгновенные значения напряжения и тока (через безындуктивный коаксиальный шунт  $R_{ш}$ ) фиксируются с помощью осциллографа. Контроль установившейся температуры вблизи зоны выплавляемого металла детали фиксируется потенциометром с использованием термопар.

Изучение контактной стадии процесса ЭКДРО, которая характеризуется относительно небольшими энергиями и малой длительностью импульса, осуществлялось с помощью разрядного LC контура.

В результате проведённых экспериментов определено количество испарившегося и выплавленного металла в процессе ЭКД воздействия и получены

зависимости параметров обработки (объёма, массы металла) от энергии, вкладываемой в зону обработки для различных материалов детали.

Технологические параметры процесса, такие как скорость вращения диска-инструмента и скорость подачи, также оказывают значительное влияние на величину вкладываемой в зону обработки энергии.

Погрешность полученных данных после статистической обработки не превышает 12%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании проведенных исследований процессов в условиях электроконтактно-дуговой размерной обработки металлов, получены следующие результаты:

1. На основе проведённого анализа литературных источников определены пути решения актуальных задач по исследованию тепловых процессов и сформулированы задачи диссертации.
2. Проведён анализ и обоснован принцип теплового воздействия разряда на электроды. Рассмотрен вопрос физики процесса ЭКД выплавления металла.
3. Произведён выбор и обоснование методов расчёта тепловых процессов в электродах, наиболее точно отражающих физическую сущность ЭКД выплавления металла, на основе проведения сравнительного анализа методов расчёта температурных полей при нагреве металлов при согласовании с экспериментом.
4. Проведено поэтапное теоретическое и экспериментальное исследование теплофизических процессов при разделении их на две стадии: контакта и дугового разряда. Разработаны тепловые схемы процессов, а также комплексная структурная схема модели тепловых процессов в условиях ЭКД метода.
5. Разработана комплексная модель совместного решения электромагнитной и тепловой задач с учётом влияния внешних параметров. И на её



основе даны рекомендации по выбору технологических параметров и режимов работы оборудования.

6. На основании комплексной структурной схемы рассчитаны распределения температурных полей в электроды, с учетом выбранных тепловых моделей, что позволяет проводить анализ и оптимизацию технологического процесса и элементов оборудования, используемого при ЭКДРО различных металлов.
7. Рассчитан состав и термодинамические и транспортные свойства равновесной плазмы электрической дуги в широком диапазоне давлений (1-100атм) и концентраций паров металла.
8. Проведены теоретические расчёты температурных полей столба электрической дуги, горящей в межэлектродном промежутке и на выходе из зоны обработки в парах металла с учётом динамики его развития. Определена доля мощности, поступающая из дугового разряда в деталь в условиях развивающегося дугового разряда.
9. Экспериментально исследованы процессы, происходящие в технологическом модуле установки для ЭКДРО.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. V.Y. Frolov, A.V. Krylov, E.E. Smirnov. The model of electric pulse electrode discharge in vapour of metals. // Proc. of 7<sup>th</sup> Conference on Thermal Plasma Processes. Progress in Plasma Processing of Materials 2002. Strasbourg, France, 18-21 June 2002.
2. V.Y. Frolov, A.V. Krylov, E.E. Smirnov. Modelling of heat processes under conditions of contact-arc melting of metal. // Proc. of 7<sup>th</sup> Conference on Thermal Plasma Processes. Progress in Plasma Processing of Materials 2002. Strasbourg, France, 18-21 June, 2002.
3. Смирнов Е.Е., Яковлев В.И. Энергетический баланс в стабилизированной дуге // XXVIII Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – С.81-82.

4. Смирнов Е.Е., Гимазетдинова Н.Г., Фролов В.Я. Распределение плотности тока в электродах при электродугоконтактной резке металлов // XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, С. 102-103.
5. 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.
6. Смирнов Е.Е., Фролов В.Я. Исследование условий массопереноса при резке труднообрабатываемых сплавов электроконтактным методом // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч. II: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – С. 47.
7. 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.
8. S. Dresvin, V. Yakovlev, E. Smirnov and J. Amouroux. Investigation of the energy balance in an arc and thermal processes in metal for welding. Progress in Plasma Processing of Materials 2001. Strasbourg, France, May 30 - June 3, 2000, – pp. 333-338. ISBN 1-56700-165-3.
9. Смирнов Е.Е., Зотов М.А., Яковлев В.И. Конвективная составляющая мощности дугового разряда на аноде при технологических процессах резки и сварки // XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, С. 100-101.
10. Смирнов Е.Е., Смородинов В.В. Тепловые процессы в металле при сварке // XXVIII Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – С.82-83.