На правах рукописи
УДК 533.9.004.14

Докукин Михаил Юрьевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА ДАВЛЕНИЙ

01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1566453
Докукин М.Ю. Разработка и

Научные руководители: доктор технических наук, профессор ХВЕСЮК В. И.
кандидат технических наук, доцент АНИКЕЕВ В. Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор ТИХОНОВ В. Б.
кандидат технических наук, стар. науч. сотрудник ПЕТРОСОВ В. А.

Ведущая организация: Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

Защита состоится «15» мая 2000 г. в 15 00 часов на заседании
при Московском государственном
умана по адресу: 107005, Москва,
ностроение".
лиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана.
рах, заверенные печатью, просьба
я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им.
ационного совета Д053.15.15.
2000 г.

1566453

а
ЗИМИН А. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие современной науки и техники настоятельно требует разработки высокоэффективного плавильного оборудования, обеспечивающего реализацию высоких технологий получения новых сплавов, состоящих из компонентов весьма отличающихся по температуре плавления и упругости насыщенных паров. Также является актуальным развитие и совершенствование плазменно-дугового оборудования для технологических процессов сварки, пайки, термообработки химически активных и тугоплавких материалов (например, молибден, титан, цирконий и их сплавы). Эффективность и качество этих высокотемпературных технологий определяется прежде всего эффективностью источника нагрева и возможностью организации процесса в широком диапазоне давлений заданной рабочей среды.

В связи с этим большой практический интерес представляет разработка и исследование технологически универсальных, удобных в эксплуатации электродуговых устройств, способных работать как в условиях вакуума, так и при атмосферном и избыточном давлениях контролируемой среды. Поэтому на сегодня актуальными направлениями развития и совершенствования электродуговых технологических систем являются:

1. Расширение диапазона рабочих параметров устройств прежде всего по давлению, а также по току, мощности при высокой эффективности передачи энергии обрабатываемому изделию (заготовке) и с учетом влияния состояния атмосферы (давление и вид газа), в которой ведется обработка, на характеристики электрической дуги.

2. Расширение технологических возможностей функционирования устройств в процессе разработки новых способов управления электродуговыми системами.

3. Снижение массогабаритных характеристик электродуговых устройств, предназначенных как для земных, так и для космических технологий.

Итогом деятельности в названных направлениях является создание эффективных нагревных электродуговых установок, использующих последние достижения в области физики плазмы, электротехники, вакуумной техники.

Цель работы

Экспериментальное исследование и анализ тепло- и электрофизических процессов в электродуговых устройствах, способных работать в широком диапазоне давлений контролируемой газовой среды, и на этой основе

15664453

М Г Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

разработка и создание опытно-промышленных образцов соответствующей техники, обеспечивающих эффективное выполнение различных высокотемпературных нагревных технологий, таких, как сварка, пайка, опытная металлургия.

Научная новизна работы

1. Проведено комплексное экспериментальное исследование дугового разряда с полым катодом (ПК). Впервые установлено существенное влияние на характеристики электрической дуги с ПК воздействия внешнего локального поперечного магнитного поля, прикладываемого к различным зонам разряда (внутрикатодная плазма, внешний столб).

2. Предложен, экспериментально подтвержден и реализован в разработанных и созданных опытно-промышленных образцах технологических устройств (электродуговые горелки с ПК) метод управления характеристиками дугового разряда с полым катодом (ДРПК) с помощью локального поперечного магнитного поля.

3. Проведено комплексное экспериментальное исследование рабочего процесса дуги со стержневым термокатодом (СК) в широких диапазонах определяющих параметров (вид и давление инертной газовой среды, ток разряда, геометрия катода) с целью установления наиболее эффективных, с точки зрения технологических приложений, режимов такого разряда. Основное внимание было уделено электрической дуге пониженного давления ($p \cong 10^3 \ldots 10^4$ Па) с особой пространственно-энергетической структурой плазмы в катодной зоне.

4. Экспериментально подтверждена работоспособность разработанных технологических электродных узлов со специальными стержневыми термокатодами без принудительного водяного охлаждения в широких диапазонах рабочих давлений ($p = 1{,}33 \cdot 10^3 \ldots 1{,}52 \cdot 10^5$ Па) и токов (I=50...600 А).

5. На основе проведенных исследований разработана концепция малогабаритной многофункциональной электродуговой плавильной печи.

Практическая ценность работы

1. Практически важными результатами обнаруженного активного воздействия малых локальных поперечных магнитных полей (с индукцией $B_\perp$ до 30 мТл) на ДРПК и разработки соответствующего метода управления таким разрядом являются: расширение рабочего токового диапазона устойчивого горения дуги в область малых токов (до 5 А); возможность достижения больших значений глубины регулирования электрическими характеристиками разряда (например, по току до 50…70 % от его начальной величины I_0); увеличение энерговклада в анод Q_A (в 1,5…2 раза) в режиме стабилизации по току; возможность снижения токовой нагрузки катода при поддержании необходимого Q_A; возможность организации импульсно-

периодического режима дуги с ПК; возможность управления пространственным положением внешнего столба дуги (и соответственно – пятна нагрева на аноде) без существенных изменений электрических параметров разряда. На основе приведенных выше результатов разработаны и созданы опытно-промышленные образцы электродуговых горелок с магнитоуправляемым полым катодом для универсального применения (сварка, пайка и т.п.) в условиях вакуума ($p \leq 133$ Па). Один из типов горелок успешно прошел производственные испытания и внедрен в технологический процесс сварки специзделий на ПО "Южмашзавод" (г. Днепропетровск).

2. Разработаны и созданы технологические электродные узлы со стержневыми неплавящимися термокатодами без принудительного охлаждения для работы в широких диапазонах давлений инертной газовой среды и рабочих токов.

3. В соответствии с предложенной концепцией разработана и создана опытно-промышленная установка, представляющая собой малогабаритную электродуговую печь для получения экспериментальных сплавов со специальными свойствами (в том числе многокомпонентных, тугоплавких и химически активных сплавов) и производства их товарных партий, необходимых в машиностроении, приборостроении, авиационной и медицинской технике. Реализованная компоновка допускает дооснащение установки (печи) специальным оборудованием с целью расширения ее технологических возможностей.

4. Получен патент на способ и устройство управления током в системах с ДРПК.

<u>На защиту выносятся:</u>

1. Результаты комплексного экспериментального исследования дугового разряда с магнитоуправляемым ПК, включающего в себя: изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) дуги; изучение температурных полей катода; определение качественного состава плазмы спектральными методами; определение локальных параметров плазмы (температура электронов, концентрация ионов) во внешнем столбе разряда, в катодном ресивере методами зондовой диагностики; калориметрирование анода.

2. Результаты исследований, в целях технологических приложений, различных режимов существования дуги пониженного давления и процессов формирования разряда с особой пространственно-энергетической структурой плазмы в катодной зоне.

3. Результаты анализа и экспериментальной проверки работоспособности разработанных электродных узлов со специальными стержневыми термокатодами без принудительного охлаждения в широких диапазонах рабочих давлений и токов.

4. Концепция малогабаритной электродуговой печи, основанная на результатах экспериментальных исследований.

5. Результаты опытно-промышленных испытаний технологических возможностей горелок с магнитоуправляемым полым катодом и малогабаритной электродуговой плавильной печи.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры "Плазменные энергетические установки" МГТУ им. Баумана, ИТФ СО АН РФ, на XI Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы, на VII Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям и ионным инжекторам, на Международной конференции "Физика и техника плазмы", на VIII конференции по физике газового разряда, на Международном конгрессе по физике плазмы (Прага, 1998 г.), на XIV Международном симпозиуме по плазмохимии (Прага, 1999 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 22 печатных работы и получен патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Работа содержит 135 страниц машинописного текста, в том числе 41 рисунок, библиографию из 66 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, поставлены цель и задачи работы, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносящиеся на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния технических разработок, относящихся к области высокотемпературных технологий, и связанных с созданием эффективных источников нагрева, предназначенных, как правило, для получения расплава обрабатываемого материала. Акцент был сделан на электродуговые устройства, обладающие большими энергетическими возможностями для решения современных и перспективных технологических задач.

Круг этих задач предполагает осуществление высокотемпературных плазменно-дуговых процессов в достаточно широком диапазоне рабочих давлений (10^{-2} Па $\leq p \leq 10^{5}$ Па) контролируемой среды. В связи с этим в ходе обзорного исследования были рассмотрены различные схемы

электродуговых устройств, определены области их устойчивой (по давлению и току) и эффективной (по энерговкладу) работы.

Было установлено, что для условий таких процессов, как пайка, сварка, рафинирование в вакууме ($p \leq 133$ Па), хорошо зарекомендовали себя устройства, основанные на дуговом разряде с полым катодом, работающим с расходом инертного газа. Основное внимание уделялось классическому однополостному дуговому ПК, но также рассматривались диафрагмированные ПК, многополостные ПК и ПК, работающие в неподвижной среде, без прокачки газа через полость. Показано, что наибольшее количество опубликованных работ посвящено исследованиям внешней межэлектродной плазмы, тогда как область, ответственная за формирование и поддержание разряда, - внутренняя полость катода - остается по-прежнему недостаточно изученной. Были выявлены ограничения по токовому диапазону существования и устойчивой работы дугового разряда с ПК различной геометрии. В главе приведен критический анализ существующих схем управления ДРПК и определены направления исследования и разработок в этой области при создании технологических устройств с ПК универсального применения, работающих в диапазоне давлений $p \cong 10^{-2}...10^{2}$ Па.

В области рабочих давлений 10^{3} Па $\leq p \leq$ 10^{5} Па хорошей работоспособностью и эффективностью, что подтверждается целым рядом работ, обладают электродуговые устройства на основе стержневых неплавящихся термокатодов, работающих в среде инертных газов.

В этом классе устройств особый интерес представляют системы, реализующие при $p \cong 10^{3}...10^{4}$ Па дуговой разряд со своеобразной, "шаровой" структурой прикатодной плазмы, обладающей резко локализованным в пространстве энерговыделением в диапазоне $10^{2}...10^{4}$ Вт/см^{3}. Такой разряд, как показывают имеющиеся данные по его исследованию, имеет ряд энергетических достоинств и технологических преимуществ по сравнению с обычной атмосферной ($p \approx 10^{5}$ Па) дугой в инертной среде.

В заключении обзора электродуговых систем с СК показана целесообразность дальнейшего исследования и разработки указанного типа газоразрядных устройств, и модернизации последних с целью расширения их работоспособности в область более высоких давлений ($p \approx 1{,}5 \cdot 10^{5}$ Па) в соответствии с современными и перспективными технологическими запросами.

В результате проведенного анализа данных литературы были сформулированы задачи настоящей работы.

Во второй главе описана экспериментальная установка и представлены методы комплексного исследования дуговых газовых разрядов в контролируемой среде.

Перечислены и даны характеристики основных и вспомогательных систем установки. Описаны использованные экспериментальные модели, одна из которых была предназначена для изучения процессов в дуговом разряде с расходным полым катодом, а другая - для исследования дуг со стержневым термокатодом.

В экспериментах обычно использовался, так называемый "классический", полый катод, представляющий собой танталовую трубку диаметром 4 мм, длиной 50 мм и с толщиной стенки 0,2 мм, через который прокачивался инертный газ (аргон, ксенон) с расходом ~ 0,1...1,0 $см^3/с$. В такой модели, включающей в себя также медный водоохлаждаемый анод и управляющую магнитную систему, могли реализовываться различные токовые режимы в диапазоне 5...150 А при давлении в камере $10^{-2}...10^{-1}$ Па. В ряде экспериментов испытывались ПК другой геометрии: диафрагмированные, толстостенные ($\delta \approx 1$ мм) и - из других материалов (вольфрам, гексаборид лантана).

В модели со стержневым катодом применялся в качестве электрода вольфрамовый пруток диаметром 3...6 мм и длиной 50...80 мм; при этом рабочая длина катода после заделки электрода в держатель составляла 30...60 мм. Данный электродный узел мог успешно работать без принудительного водяного охлаждения при токах I = 50...500 А и давлениях инертной среды (аргон, гелий) $p = 10^3 \ldots 10^5$ Па.

Комплексное исследование разрядов предусматривало различные методы диагностики плазмы, анализа теплового состояния катода и анода, а также изучение вольт-амперных (и их разновидностей - тесла-вольт-амперных) характеристик применительно к соответствующей экспериментальной модели.

Диагностический комплекс включал в себя: систему различно ориентированных электрических плоских зондов и средства спектральной диагностики плазмы в различных областях (зонах) газового разряда; пирометрическую и электронно-оптическую аппаратуру для изучения температурных распределений на поверхности катода; средства калориметрирования и оценки температурного состояния анода, а также электроизмерительные приборы и фоторегистрирующую технику. Для экспериментальной модели с ПК было спроектировано и изготовлено специальное устройство создания локального поперечного магнитного поля для изучения его воздействия на различные участки дугового разряда.

Используемая методика измерений характеристик разряда и параметров плазмы позволяла исследовать разряд на всем его протяжении - от анода до заделки катода.

Для каждого метода исследования был проведен анализ возможных ошибок измерений и сделана оценка соответствующих погрешностей.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований дуговых разрядов в широком диапазоне давлений контролируемой среды (инертный газ: аргон, ксенон, гелий); проведен анализ основных процессов и внешних факторов, влияющих на поведение и выходные (технологические) характеристики этих разрядов, реализуемых в конкретных устройствах (моделях).

Большой цикл работ был проведен по изучению дугового разряда с "классическим" расходным ПК, работающим в нормальном режиме, и его модификации, предложенной в МГТУ им. Баумана, - разряда с магнитоуправляемым ПК. Последний реализовывался при наложении на полый катод внешнего локального поперечного магнитного поля (с индукцией $B_\perp$ до 30 мТл), создаваемого специальным электромагнитным устройством. Нормальный режим ДРПК поддерживался в условиях окружающего вакуума $p=10^{-2}...10^{-1}$ Па при прокачке через полость инертного газа (ксенона, аргона) с расходом $\dot{v}$ = 0,1...0,6 см^3/с и токах I=5...150 А.

Акцент в исследованиях ДРПК был сделан на изучение его потенциальных возможностей, как высокоэффективного источника нагрева анода (изделия). В связи с этим проводились поиски таких устойчивых режимов горения дуги, при которых достигается наибольший энерговклад в анод при поддержании постоянства тока разряда. Последнее условие диктуется, прежде всего, ограничением стойкости катода по току, а также пределами токовых возможностей малогабаритных источников питания.

Снимались вольт-амперные характеристики разряда в зависимости от расхода плазмообразующего газа при одновременных регистрации продольного температурного профиля стенки полого катода $T_к(z)$ и калориметрировании анода. Это позволяло проследить изменение энергобаланса в разряде при переходе на более высокоэнергетичные режимы (с бо́льшим напряжением разряда).

Для "классического" ПК напряжение дуги обратно пропорционально расходу рабочего газа через полость. При малом расходе ($\dot{v} \leq$ 0,1 см^3/с) реализуются режимы с относительно большим напряжением ($U \geq$ 30 В), растет электрическая мощность разряда. Но при этом происходит изменение теплового состояния катода: его температурный профиль "выполаживается" и становится монотонным; а это в свою очередь при больших токах

(I>100 А), когда температура электрода достаточно высока, может привести к интенсивной эрозии (испарению) материала катода.

Обнаруженный существенный эффект, вызванный воздействием малых локальных $B_\perp$-полей на процессы в ДРПК, послужил основой для разработки нового метода управления таким разрядом. Прикладывая к полости работающего катода указанное магнитное поле, можно перевести разряд в более высокое энергетическое состояние (ВАХ перемещается в область более высоких напряжений) при сохранении исходного "нормального" режима (расход газа $\dot{v}$ = 0,1...0,6 см^3/с, распределение температур по поверхности катода имеет немонотонный характер с резко выраженным максимумом вблизи среза). При этом, как было установлено, именно область внутрикатодной плазмы является наиболее чувствительной к таким полям (рис. 1).

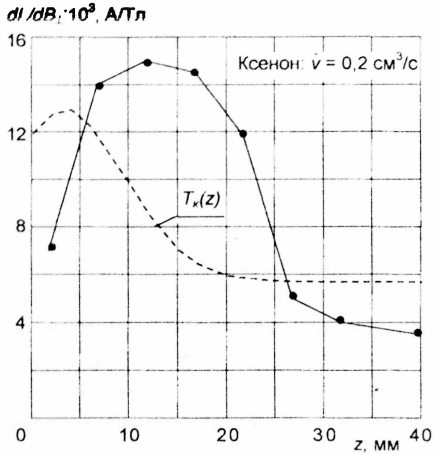

Рис. 1. Распределение функции отклика $dI/dB_\perp$ тока ДРПК на локальное воздействие $B_\perp$-поля и характерный температурный профиль катода $T_к(z)$

Воздействие $B_\perp$-полей на различные зоны разряда является эффективным и универсальным средством регулирования параметрами ДРПК: достигается большая глубина регулирования (например, по току до 50…70 % от его начального значения I_0); имеется возможность управления местоположением внешнего столба дуги без заметного изменения в ее электрических характеристиках (последнее очень важно в ряде операций таких техпроцессов, как сварка и пайка). Кроме перечисленного следует отметить: расширение токового диапазона (в область малых токов) устойчивого горения дуги с магнитоуправляемым полым катодом по сравнению с обычным ДРПК (это особенно важно при работе от источников питания с жесткой и слабо падающей характеристиками); возможность организации в этих условиях импульсно-периодического режима работы разряда.

Эксперименты по зондированию и спектроскопии различных участков разряда подтвердили генерацию полым катодом высокоионизированной "чистой" (беспримесной) плазмы с заметной долей высокоэнергетичных электронов (T_e≈ 2...5 эВ), достигающих поверхности анода. Особенно заметно характеристики внешней плазмы возрастают при наложении на

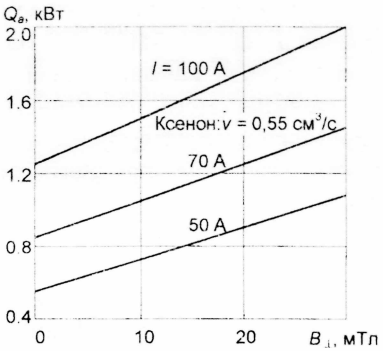

Рис. 2. Зависимость энерговклада в анод от поперечного магнитного поля

полый катод локального поперечного магнитного поля. Такая трансформация плазмы ведет, как следствие, к росту общего энерговклада в анод (изделие), что и было установлено в ходе его калориметрирования (рис. 2).

Ряд экспериментов, проведенных с диафрагмированными и относительно толстостенными ($\delta \approx 1$ мм) электродами, также подтвердил концепцию эффективного применения дугового разряда с магнитоуправляемым полым катодом в высокотемпературных технологических устройствах для работы в условиях вакуума ($p \cong 10^{-2}...10^{2}$ Па).

При давлениях окружающей среды $p \cong 10^{3}...10^{5}$ Па хорошо зарекомендовали себя электродуговые устройства со стержневыми неплавящимися катодами. В связи с этим были подробно изучены рабочие процессы и особенности поведения дуговых газовых разрядов со стержневым вольфрамовым электродом в указанном диапазоне давлений инертной среды (аргон, гелий). Предложенная идея использования в этих устройствах специальных термокатодов (с соотношением их длины к диаметру $l_к / d_к \geq 10$) без принудительного охлаждения нашла подтверждение в соответствующей серии экспериментов.

По результатам исследований ВАХ дуги, рабочих температурных профилей электродов, а также калориметрирования анода оценивались энергобаланс разряда и эффективность передачи электрической мощности в изделие (анод).

В исследованиях дуги со стержневым катодом большое внимание уделялось процессам инициирования разряда и перехода последнего в стационарный режим. Проводился выбор и оптимизация способа поджига дуги с точки зрения требований определенных технологических процессов.

Установлено, что для первоначального поджига разряда с катодом из технически чистого вольфрама требуется предварительная активация его поверхности посредством обмазки на основе гексаборида лантана (или подобных высокоэмиссионных соединений). Последующая "тренировка" электрода на различных токовых режимах улучшает в целом эмиссионные свойства его исходного материала, и поджиг дуги практически на всех давлениях становится стабильным.

Особое внимание в экспериментах на модели со стержневым катодом уделялось изучению дуговых режимов при рабочих давлениях $p \cong 10^3 \ldots 10^4$ Па, а именно форме разряда с "шарообразной" плазменной конфигурацией в катодной зоне. Была определена тенденция развития этого плазменного образования при изменении давления в камере и величины тока дуги.

Фотографирование шаровой зоны разряда позволило определить ее размеры и оценить энергосодержание, которое в среднем составляло $10^2 \ldots 10^4$ Вт/см^3. Диагностика (спектральная, зондовая) этой зоны показала наличие относительно высокоэнергетичных электронов ($T_e \approx$ 2...3 эВ) и, в основном, однократно заряженных ионов рабочего газа. В ходе спектральных исследований не обнаружено ионов и атомов материала катода (вольфрам) в газоразрядной плазме. Это свидетельствует о ее чистоте, что является положительным технологическим фактором, и говорит о несущественной эрозии электрода в режимах пониженного давления.

Анализ существующих данных и результаты диагностической серии экспериментов на модели со стержневым катодом говорят о том, что дуга низкого давления в отличие от хорошо известной дуги высокого (атмосферного) давления характеризуется локализованным энерговыделением в пределах "шаровой" катодной зоны. Было также показано, что характерные размеры этой области увеличиваются при уменьшении давления в камере, при увеличении тока разряда, а также при использовании рабочих сред с бо́льшим потенциалом ионизации (например, гелий).

Эффективность передачи энергии дуги аноду (тепловой к.п.д. процесса) также зависит от давления и межэлектродного зазора. Подтверждено, что в условиях низкого давления при введении анода в высокоэнергетичную катодную область наблюдается рост к.п.д. Сравнение профилей распределения температуры по поверхности анода для различных зазоров позволяет говорить об увеличении плотности подведенной к аноду энергии в случае контакта последнего с "шаровой" зоной. Причем использование рабочих сред с меньшим потенциалом ионизации (например, ксенон) обеспечивает более концентрированный подвод энергии к положительному электроду при более высоких уровнях его температур.

В условиях дуги атмосферного давления одновременный рост энерговклада в анод и к.п.д. невозможен, так как при фиксированном токе вклад энергии в анод здесь может быть увеличен только с увеличением длины дуги, но при этом за счет растущих потерь из столба резко падает к.п.д.

Характерный результат сравнения потенциальных возможностей разрядов в аргоне с локализованным в катодной зоне (при низком давлении $p = 2{,}7 \cdot 10^3$Па) и обычным (при атмосферном давлении) энерговыделениями

представлен на рис. 3, характеризующем глубины проплавов, полученных на нержавеющем стальном листе толщиной 15 мм в результате воздействия указанных дуг при соблюдении постоянства их тока (I= 200 А), межэлектродного зазора ($l_{мэз}$=3 мм) и времени горения (t= 30 с).

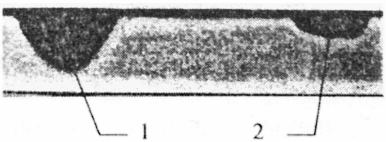

Рис. 3. Макрошлифы расплавов нержавеющей стали, полученные в дуге с локализованным энерговыделением (1) и в атмосферной дуге (2)

В четвертой главе сформулирована концепция компактной электродуговой нагревной установки для работы в широком диапазоне давлений контролируемой газовой среды, представлены результаты разработок электродуговых устройств, эффективно выполняющих основные задачи высокотемпературных нагревных технологий и описана созданная малогабаритная электродуговая плавильная печь для целей опытной металлургии.

На основе результатов и выводов, сделанных в ходе экспериментального исследования и теоретического анализа физической картины явлений, протекающих в дуговом разряде с расходным магнитоуправляемым полым катодом, были разработаны и созданы технологические устройства (горелки), предназначенные для выполнения основных операций при сварке, пайке, наплавке и т.п. процессах в вакууме ($p \cong 10^{-2}...10^{2}$ Па).

Были созданы и опробованы в лабораторных и производственных условиях горелки, рассчитанные на разные токовые нагрузки (5...100 А; 50...350 А) и в зависимости от вида выполняемых задач оснащенные простыми или диафрагмированными полыми катодами.

Управляющим звеном в этих горелках является специально разработанная электромагнитная система, создающая локальные поперечные магнитные поля с индукцией до 30 мТл. Эти поля, прикладываемые к различным участкам ДРПК, позволяли управлять внешним столбом разряда (например, проводить сканирование пятна нагрева по поверхности изделия) и параметрами дуги (ток, энерговклад в анод), придавая необходимую устойчивость разряду особенно при малых токах.

Результаты испытаний свидетельствуют об эффективности, больших технологических возможностях и простоте эксплуатации разработанных горелок на основе магнитоуправляемого полого катода.

Большой комплекс исследовательских работ по изучению дуговых разрядов в диапазоне давлений $p = 10^{3}...10^{5}$ Па стал основой при разработке электродуговых технологических узлов со стержневыми термокатодами.

Разработанные и созданные устройства со стержневыми вольфрамовыми катодами, не требующими принудительного охлаждения, эксплуатируются уже в течение ряда лет и показали высокую работоспособность и эффективность как при низких давлениях $p=10^3...10^4$Па, так и в условиях атмосферного и избыточного давлений ($p=10^5...1{,}5\cdot10^5$ Па) инертной среды и токах до 600 А.

Интересными, с точки зрения возможных технологических применений, являются рабочие режимы таких устройств при низких давлениях, когда формируется особая "шаровая" структура плазмы, обладающая плотностью регулируемого и резко локализованного в прикатодном пространстве энерговыделения в диапазоне $10^2...10^4$ Вт/см^3. В этих условиях можно: плавно изменять величину и плотность энергии, подводимой к нагреваемому металлу при фиксированном токе; существенно увеличить (~ в 2,5 раза) проплавляющее действие разряда по сравнению с дугой атмосферного давления; проводить плавку металлов в порошкообразном исходном состоянии (вследствие малого газодинамического воздействия дуги низкого давления); значительно сократить расход инертного газа; обеспечить исключительно высокую работоспособность катода при больших разрядных токах.

В то же время существует потребность в дуговых режимах атмосферного и избыточного давлений, например, когда в процессе получения новых сплавов необходимо сохранение в их составе важных летучих компонентов, или при осуществлении процесса насыщения (модификации) расплава элементами рабочей среды.

Итогом большого цикла работ по разработке нагревной газоразрядной техники для широкого диапазона давлений стало создание первой малогабаритной электродуговой печи, предназначенной для выплавки спецсплавов. Печь имеет существенно меньшие массогабаритные характеристики по сравнению с известными аналогами (например, печь LK 6 фирмы Leybold) и обладает принципиальными достоинствами, позволяющими реализовать как современные, так и перспективные металлургические и другие технологические процессы, связанные с нагревом или расплавом исходного материала.

Высокотемпературная, регулируемая плавка осуществляется в диапазоне стабилизированных давлений ($p=1{,}3\cdot10^3...1{,}5\cdot10^5$ Па) плазмообразующей среды (нейтральная, восстановительная) с применением хорошо зарекомендовавших себя электродных узлов со стержневыми термокатодами, что позволяет целенаправленно реализовать: рафинирование и дегазацию металлов; подавление их испаряемости; оптимальные режимы выплавки многокомпонентных сплавов; азотирование и поверхностную обработку

слитков; другие перспективные физико-химические процессы в металлургии при активном влиянии параметров газовой среды.

Печь имеет удобную блочную компоновку, а именно она состоит из вакуумно-газового блока, источника питания, блока и пульта управления дугой, плавильной камеры с электровакуумным вводом катодного узла. Каждый блок в отдельности был конструктивно проработан с учетом технологических применений и оптимизирован по энергетическим и массогабаритным характеристикам и возможности автоматизации. Такая схема построения установки обладает большой универсальностью в переналадке, когда возникает необходимость перехода с одного техпроцесса на другой, и допускает дооснащение и модернизацию отдельных узлов или блоков в целом. Так, например, при необходимости организации на установке нагревных технологий, требующих более низких рабочих давлений ($p \leq 133$ Па), вакуумно-газовый блок дополнительно оснащается высоковакуумным агрегатом, а в качестве эффективного источника нагрева в рабочей камере целесообразно использовать один из типов разработанных горелок с магнитоуправляемым полым катодом.

Установка в течение ряда лет успешно прошла опытные и производственные испытания, подтвердив свои потенциальные возможности при реализации высокотемпературных технологий в контролируемой среде.

В приложении А представлен акт внедрения у Заказчика (ПО ЮМЗ, г. Днепропетровск) разработки Исполнителя (НИИ ЭМ МГТУ) "Магнитоуправляемая плазменная горелка с полым катодом ГПК-300 МУ".

В приложении Б представлены акт сдачи-приемки малогабаритной электродуговой плавильной печи Заказчику (Московский завод спецсплавов).

В приложениях В, Г представлены отзывы о проведенных тестовых плавках на малогабаритной электродуговой плавильной печи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе впервые поставлена и решена задача комплексного исследования, разработки и создания электродуговых технологических устройств, способных эффективно функционировать в широких диапазонах давлений различных рабочих сред ($p = 1{,}3 \cdot 10^{-2} \ldots 1{,}5 \cdot 10^{5}$ Па) и разрядных токов ($I = 5 \ldots 600$ А).

2. В ходе всестороннего экспериментального исследования дугового разряда с расходным полым катодом в условиях вакуума ($p = 1{,}3 \cdot 10^{-2} \ldots 1{,}3 \cdot 10^{2}$ Па) было установлено существенное влияние на

характеристики дуги с ПК воздействия внешнего локального поперечного магнитного поля, прикладываемого к различным зонам разряда.

3. Предложен, экспериментально подтвержден и реализован в разработанных и созданных опытно-промышленных образцах технологических горелок метод управления характеристиками ДРПК с помощью локального поперечного магнитного поля.

4. В результате экспериментального изучения рабочего процесса дуги со стержневым термокатодом в широких диапазонах определяющих параметров (вид и давление инертной газовой среды, ток разряда, геометрия катода) были установлены существенные технологические преимущества дуги пониженного давления ($p \cong 10^3 \ldots 10^4$ Па) - дуги с особой "шаровой" пространственно-энергетической структурой плазмы в катодной зоне - по сравнению с дугой атмосферного давления.

5. Разработаны и созданы электродные узлы со специальными стержневыми термокатодами без принудительного охлаждения, и экспериментально подтверждена их работоспособность в широких диапазонах давлений нейтральной среды (p=1,3·10^3...1,5·10^5 Па) и токов дуги (I=50...600 А).

6. Разработаны и созданы опытно-промышленные образцы электродуговых горелок с магнитоуправляемым полым катодом для универсального технологического применения (сварка, пайка и т.п.) в условиях вакуума ($p \leq 133$ Па). Горелка ГПК-300МУ внедрена в техпроцессе сварки титановых специзделий в ПО «Южмашзавод» (г. Днепропетровск).

7. Разработана концепция компактной электродуговой нагревной установки для работы в широком диапазоне давлений контролируемой газовой среды.

8. Разработана и создана малогабаритная электродуговая печь для получения экспериментальных сплавов и производства их товарных партий. Благодаря универсальной блочной компоновке допускается дооснащение установки специальным оборудованием с целью расширения ее технологических возможностей. Печь в течение ряда лет успешно прошла испытания при плавке различных сплавов, что подтверждается соответствующими отзывами от предприятий-заказчиков.

Основные результаты диссертации отражены в публикациях:

1. Исследование дуговой газоразрядной плазмы внутри полого катода /М. Ф. Жуков, М. Ю. Докукин, Н. П. Козлов и др. // ДАН СССР. Сер. физ.- 1983.- Т. 273, № 4.- С. 852-854.
2. Докукин М. Ю., Павлов А. Ю., Хвесюк В. И. Влияние поперечных магнитных полей на процессы в полом катоде // Генераторы

низкотемп. плазмы.: Тез. докл. 10-ой Всесоюз. конф.- Минск, 1986.- Ч. 1.- С. 91-92.
3. Докукин М. Ю. Особенности энергетического баланса дугового разряда с магнитоуправляемым полым катодом // Генераторы низкотемп. плазмы.: Тез. докл. 11-ой Всесоюз. конф.- Новосибирск, 1989.- Ч. 2.- С. 84-85.
4. Патент 1264821 (РФ). Способ регулирования тока вакуумного дугового разряда с расходным полым катодом и устройство для его осуществления / В. Н. Аникеев, М. Ю. Докукин, А. М. Зимин и др.// Изобретения, патенты, открытия.- 1994.- № 15.
5. Аникеев В. Н., Докукин М. Ю., Хвесюк В. И. Применения магнитоуправляемого разряда с полым катодом в электродуговой технологии // Физика и техника плазмы.: Тез. докл. Междунар. конф.- Минск, 1994.- Т. 2.- С. 376-378.
6. Аникеев В. Н., Докукин М. Ю., Хвесюк В. И. Малогабаритная электродуговая установка для плавки металлов в диапазоне давлений $1.3 \cdot 10^3$ - $1,5 \cdot 10^5$ Па // Физика и техника плазмы.: Тез. докл. Междунар. конф.- Минск, 1994.- Т. 2.- С. 309-310.
7. Аникеев В. Н., Докукин М. Ю., Хвесюк В. И. Малогабаритная электродуговая плавильная установка // Физика газового разряда.: Тез. докл. 8-ой конф.- Рязань, 1996.- Ч. 1.- С. 68-69.
8. Аникеев В. Н., Докукин М. Ю. Разработка и создание электродуговых устройств для реализации технологических процессов в диапазоне давлений 10^{-2}...$1,5\ 10^5$ Па // Физика плазмы и плазменная технология.: Материалы Междунар. конф.- Минск, 1997.- Т. 4.- С. 736-739.
9. Dokukin M. Yu., Anikeev V. N., Khvesyuk V. I. Magnetic controlled hollow cathode arc discharge and its applications // 1998 Intern. Congress on Plasma Physics.: Proc.- Prague, 1998.- V. 22C.- P. 2730-2732.
10. Anikeev V. N., Dokukin M. Yu., Khvesyuk V. I. Small size electric arc melting furnace // 1998 Intern. Congress on Plasma Physics.: Proc.- Prague, 1998.- V. 22C.- P. 2748-2752.
11. Anikeev V. N., Dokukin M. Yu., Khvesyuk V. I. et al. Small size electric arc melting furnace with metal electromagnetic stirring // 14-th Intern. Symposium on Plasma Chemistry.: Proc.- Prague, 1999.- V. 4.- P. 1933-1938.

Подписано к печати *04.04.2000г.,* Объем 1.0 п.л. Тираж 100экз.

Типография · ГПНТБ России Заказ № 23/04