

На правах рукописи

Горячев Сергей Викторович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИКАТОДНОЙ ОБЛАСТИ
СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Объединённый институт высоких температур РАН.

Научный руководитель доктор физико-математических наук
Чиннов В.Ф.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Косый И.А.;

кандидат физико-математических наук
Савинов С.Ю.

Ведущая организация Физический факультет Московского
государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Защита состоится “22” декабря 2010 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании
Диссертационного совета Д 002.110.02 Учреждения Российской академии наук
Объединённый институт высоких температур РАН по адресу: 125412,
г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2010 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д. ф.-м. н.



А.Л. Хомкин

© Учреждение Российской академии наук Объединённый институт высоких
температур РАН, 2010

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время плазматроны различных типов находят широкое применение. Например, как источники низкотемпературной плазмы их используют в металлургии, для упрочнения поверхностей металлов, в процессах плазменного напыления материалов и получения мелкодисперсных порошков, для резки металлов и др. В плазмохимии для создания необходимых условий протекания химических реакций используются плазмохимические камеры с одним и более источниками плазмы. В связи с широким применением плазматронов широк и диапазон предъявляемых к ним требований. В некоторых случаях необходим большой энергозатрат – до сотен киловатт и больше, или длительная работа на умеренных токах порядка сотен ампер. Длительная работа плазматрона напрямую связана с ресурсом работы отдельных его элементов.

Одним из ресурсоёмких элементов конструкции является термоэмиссионный катод, основным его преимуществом является возможность достижения при определенных условиях рекордно малых величин удельной эрозии материала катода ($10^{-12} - 10^{-13}$ кг/Кл).

Представленная работа направлена на изучение процессов, происходящих на поверхности вольфрамового катода, и основных механизмов уноса материала катода в сильноточной азотной дуге, а также выработка по результатам исследований рекомендаций по увеличению ресурса вольфрамового катода в сильноточных азотных дугах.

Другим существенным вопросом является вопрос о параметрах плазмы, достигаемых в плазматронах. В диссертации развиваются методы экспериментального исследования параметров прикатодной области сильноточного дугового разряда в плазматроне с использованием 2D – спектроскопии. Представлены результаты по прямому измерению локальных значений n_e и T_e сильноионизованной азотной плазмы.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании области взаимодействия «эмитирующий катод – сильноионизованная движущаяся прикатодная плазма». Именно эта область интересна для исследования параметров плазмы, так как она определяет полную и удельную электрическую мощность, степень и эффективность нагрева плазмы, ресурс работы плазматрона [1]. На основе технологического плазматрона ОИВТ РАН [2] была создана группа исследовательских плазматронов с секционированным и сплошным каналами выходного

электрода, с оптическими окнами для наблюдения катода и прикатодной плазмы и области горения дуги.

В качестве основных диагностических средств исследования применялись высокоскоростные цветные и монохроматические видеокамеры, а также система спектральных измерений, в состав которой вошли дифракционный спектрограф ДФС – 452 и фотоприёмные устройства двух типов: ПЗС линейки или охлаждаемая ПЗС матрица.

В диссертации решались следующие задачи:

- разработка системы оптических и спектральных исследований области взаимодействия «катод – прикатодная плазма» в сильнотоочной электрической дуге в составе высокоскоростных видеокамер и дифракционного спектрографа с ПЗС матрицей;
- выполнение скоростной визуализации поверхности вольфрамового – термоэмиссионного катода и прилегающей к нему плазмы аргона и азота с плотностями тока $10 - 100 \text{ кА/см}^2$;
- получение результатов по величине эрозии катода и исследование её механизмов в ходе ресурсных испытаний катода из спечённого вольфрама;
- оптимизация геометрии вольфрамового катода, учитывающая различные назначения плазматронов;
- развитие методических основ использования высокоскоростной камеры в качестве микропирометра с высоким пространственным и временным разрешением;
- развитие созданной в ОИВТ РАН [3] программы автоматической обработки экспериментальных данных спектральных исследований, включающей расшифровку спектров с использованием баз данных об атомных линиях веществ, определение температуры и концентрации электронов развитыми методами экспресс – диагностики;
- разработка методов матричной спектроскопии плазмы с использованием восстановленных из поперечных наблюдений локальных контуров спектральных линий, с целью прямого измерения локальных значений n_e и T_e сильноионизованной азотной плазмы;
- развитие новых возможностей использования высокоскоростных видеокамер применительно к нестационарному эксперименту по омическому и лазерному нагреву образцов с целью определения их теплофизических свойств.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных измерительных средств, методик

измерения и согласием с доступными данными других авторов. Качество и надежность регистрации многообразных поверхностных явлений и эрозионных процессов были обусловлены тем, что она выполнялась с высоким пространственным (не хуже 30 мкм) и временным разрешением (до 2 мкс). Проведённые измерения сопровождались оценками их погрешности и установлением взаимного соответствия (непротиворечивости) исследуемых характеристик, явлений и параметров.

Научная новизна работы. При выполнении каждой из поставленных в работе задач были получены новые научные и практически важные результаты:

1. В результате исследований поверхности термоэмиссионного катода создана база данных по феноменологическому описанию явлений на катоде объемом более 600 Гбт, включающая данные о процессах эрозии материала и её количественных характеристиках. Эта база данных может быть использована для развития теоретических моделей работы термоэмиссионного катода.
2. Новым и практически важным результатом явилось создание алгоритма и метода использования высокоскоростной цветной цифровой камеры в качестве микропиометра с временным разрешением в несколько мкс и пространственным разрешением в 20 – 30 мкм. Впервые были получены данные о поле температур на поверхности катода с учётом экранирующего действия собственного излучения плазмы. Развитый метод может быть эффективно использован для контроля состояния различных нагреваемых объектов
3. Развита методика матричной спектроскопии плазмы, основанные на анализе восстановленных локальных контуров спектральных линий. Они позволяют определять локальные параметры электронной компоненты плазмы без допущений о состоянии ЛТР, глубже исследовать термодинамическое состояние пространственно неоднородной сильноионизованной плазмы.
4. Опыт использования высокоскоростной визуализации при проведении нестационарного теплофизического эксперимента показал ее перспективность в исследовании фазовых превращений вещества.

Практическая значимость. В современных плазменных технологиях трудно переоценить практическое значение надёжной работы плазматронов; при этом важнейшем критическом фактором чаще всего является ресурс работы катодного узла и собственно катода. Приведём некоторые практически важные результаты, вытекающие из выполненного исследования

взаимодействующей системы «эмитирующий катод – сильноионизованная прикатодная плазма».

- Проведены испытания катодов, нацеленные на улучшение его конструкции. Одно из предлагаемых решений состоит в механической обработке наконечника вольфрамового катода с целью придания ему формы усеченного конуса с площадкой диаметром 0.5-0.6 мм.
- Разработанные оптические методы исследования прикатодной плазмы, приэлектродных процессов и способы построения систем пакетной обработки получаемых экспериментальных данных могут широко применяться при создании диагностических систем различных плазмафизических установок.
- Разработанный программный комплекс автоматизированной обработки экспериментальных данных спектральной 2D – диагностики может широко применяться в экспериментальных исследованиях различных нестационарных и пространственно неоднородных плазменных объектов.
- Предложенный в работе метод прямого определения концентрации электронов и электронной температуры может быть рекомендован для исследования спектральной диагностики многократно ионизованной плазмы.
- Разработанные в диссертации методы обработки и система методических рекомендаций при выполнении высокоскоростных измерений могут быть использованы в работе с любой фото- и видеорегистрирующей техникой для преобразования картин светимости исследуемого объекта в температурные поля на его поверхности.

Личное участие автора. Представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его равноправном участии. Автором лично разработаны методы и математические алгоритмы использования высокоскоростной камеры VS-FAST в качестве высокоскоростного микропирометра, для исследования температурных изменений на поверхности вольфрамового катода.

Диссертантом получены пространственные распределения локальных концентраций электронов, возбуждённых атомов и ионов плазмообразующего газа, материала катода (W) и температуры электронов.

В результате ресурсных испытаний выполнено феноменологическое описание основных механизмов эрозии термоэмиссионных катодов из спечённого вольфрама.

Систематизирована обширная информация по механизмам эрозии катода, процессам запуска и отключения технологического промышленного плазматрона.

Создана и отработана программа автоматической обработки экспериментальных данных спектральных исследований, включающая расшифровку спектра и проведение экспресс – определения температуры и концентрации электронов.

Создана и отработана программа преобразования картин светимости, получаемых с помощью высокоскоростной камеры VS-FAST, в поле яркостных и истинных температур поверхности.

Выработаны рекомендации по технологии изготовления катодов, выбору их геометрии и конструктивного устройства с учётом задач их практического применения.

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

1. Создание автоматизированной системы оптических и спектральных исследований области взаимодействия «катод – прикатодная плазма» в сильноточной электрической дуге в составе высокоскоростной цветной видеокамеры и дифракционного спектрографа с ПЗС матрицей;
2. Создание видеотеки процессов запуска, ресурсной работы и отключения сильноточных дуг с термоэмиссионным катодом объемом 600 Гбт, пригодной для детального анализа явлений на катоде и в прикатодной плазме;
3. Получение, на основе выполненной скоростной визуализации поверхности W катода и прилегающей к нему плазмы аргона и азота с плотностями тока $10 - 100 \text{ кА/см}^2$, количественных результатов по величине эрозии материала катода и её механизмах в ходе ресурсных испытаний;
4. Развитие методики и выполнение измерений поля температур поверхности термоэмиссионного катода в сильноточной электрической дуге с использованием в качестве высокоскоростного микропирометра трёхцветной высокоскоростной камеры VS-FAST, обеспечивающей временное разрешение до 2 мкс и пространственное разрешение не хуже 30 мкм.
5. Разработка методики и получение результатов прямого измерения локальных значений n_e и T_e сильноионизованной азотной плазмы, при поперечном наблюдении электрической дуги. Методика основана на получении локальных контуров спектральных линий NI и NII в результате абелевских преобразований 2D спектров при их ПЗС

регистрации. При этом $T_e(r)$ устанавливается в результате локального анализа выполнимости закона Больцмана для ионов в диапазоне энергий возбуждения $\Delta E_k \gg T_e$, а $n_e(r)$ – из штарковских полуширин линий NI и NII.

6. Экспериментальное доказательство новых возможностей развитых в работе средств скоростной визуализации применительно к нестационарному эксперименту по омическому и лазерному нагреву образцов с целью определения их теплофизических свойств.

Апробация работы и публикации. Результаты работы представлялись на 5-ой Курчатовской молодежной научной школе (РНЦ «Курчатовский институт») 2008 г., на XIV (2007 г.) и XVI (2009 г.) международных научно – технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», проводимых в МЭИ (ТУ), на XXXIV международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» МАТИ (2008 г.), на Всероссийской конференции по физической электронике ФЭ – 2006, ФЭ – 2008, ФЭ – 2010 (ДГУ, Махачкала), на Всероссийской научной конференции «Физика низкотемпературной плазмы» в 2007 г., на XXXVI (2009 г.) и XXXVII (2010 г.) международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, на XXIII (2008 г.), XXIV (2009 г.) и XXV (2010 г.) международной конференции «Уравнения состояния вещества» (Эльбрус), на Научно технической конференции «Проблемы термоядерной энергетике и плазменные технологии», МЭИ (ТУ), 2009 г., на 11-ой Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 2009 г.

По тематике диссертации опубликовано 25 печатных работ, из которых 20 – в материалах Всероссийских и Международных конференций, 5 статей в журналах и сборниках, в том числе 5 – в рецензируемых изданиях, входящих в список ВАК РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 5 таблиц и 101 рисунок. Список литературы включает 82 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований по теме диссертационной работы и изложено краткое содержание глав диссертации, сформулированы научная новизна выполненной работы, её научно-практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 приведена схема экспериментальной установки с описанием диагностической аппаратуры (рис. 1).

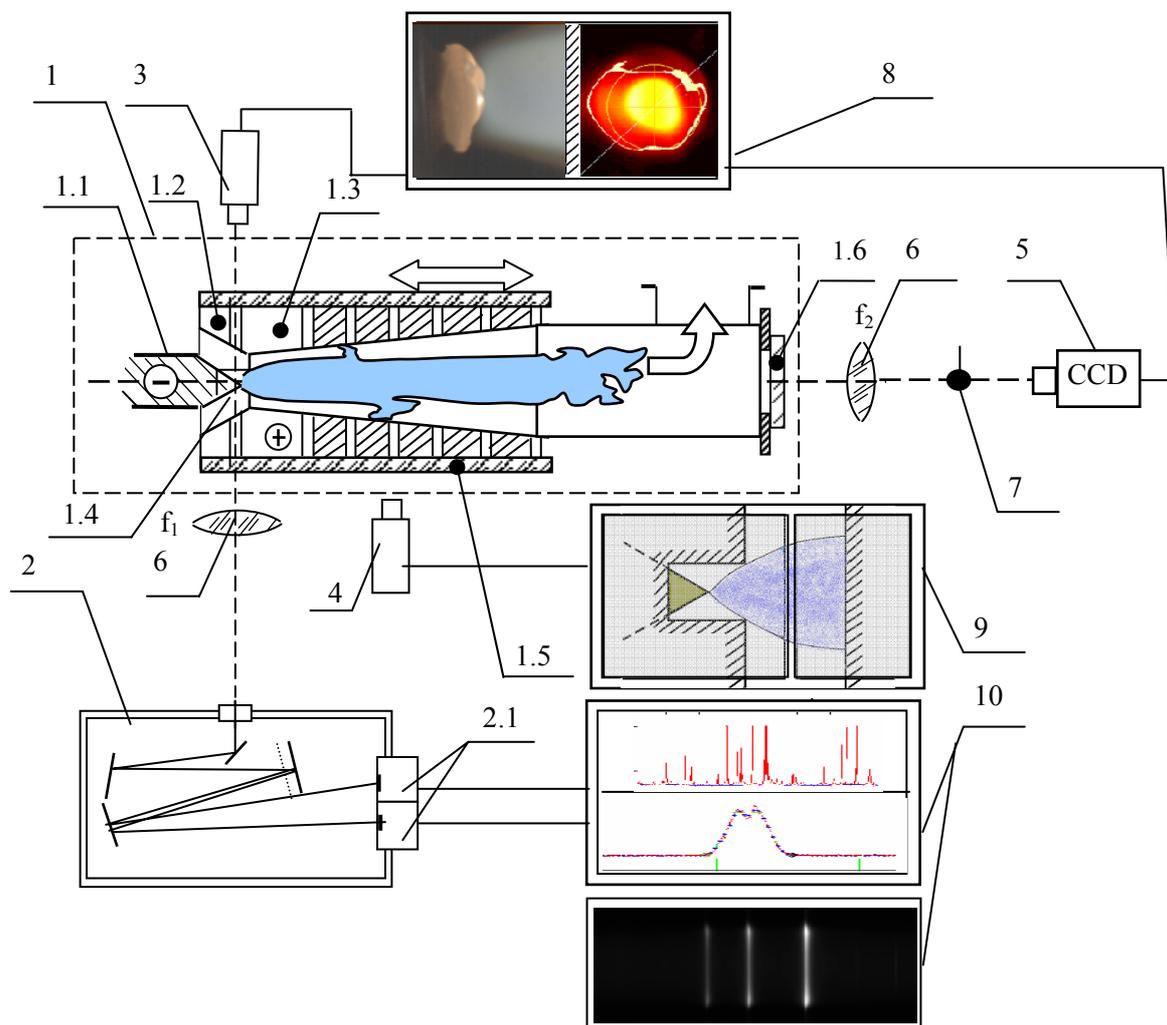


Рис. 1. Экспериментальная установка и диагностическая аппаратура:

1 – плазматрон; 1.1 – катод плазматрона; 1.2 – сопло со смотровыми отверстиями; 1.3 – секционированный анод плазматрона; 1.4 – вольфрамовый (W) наконечник катода; 1.5 – окна для наблюдения в межсекционных промежутках; 1.6 – торцевое смотровое окно. 2 – спектрограф ДФС-452; 2.1 – фотоголовка с ПЗС матрицей или с ПЗС линейками; 3 – высокоскоростная цветная CMOS видеокамера VS-FAST (ВидеоСпринт); 4 – высокоскоростная черно-белая CCD видеокамера SensiCAM QE; 5 – высокоскоростная черно-белая CCD видеокамера VS-249; 6 – линза; 7 – экранирующий элемент; 8 – пример получаемых видеоизображений с высокоскоростных камер 3,5; 9 – пример визуализации плазменной струи камерой 4; 10 – пример получаемых данных при помощи диагностических фото головок 2.1

Уделено особое внимание разработке сопла плазматрона (позиция 1.2, рис. 1) с двумя смотровыми отверстиями, не вносящими возмущения в плазменный поток, для проведения спектральной диагностики плазмы и наблюдениями за поверхностью вольфрамового катода.

Отработано функциональное взаимодействие измерительных систем и приборов для одновременной диагностики плазменной струи и прикатодных процессов исследуемой системы.

Предложен метод абсолютной калибровки получаемых спектров с помощью ленточной вольфрамовой лампы с известной истинной температурой, основанный на применении дискретного набора экранов для моделирования геометрии сложного смотрового отверстия в сопле плазматрона.

Приведены примеры экспериментальных данных, получаемых с помощью этих диагностических систем, и результаты их обработки разработанными программными комплексами. Рис. 2а, 2б содержат видеоряд ресурсных испытаний катода, проведённых в разрядах в азоте и в аргоне.

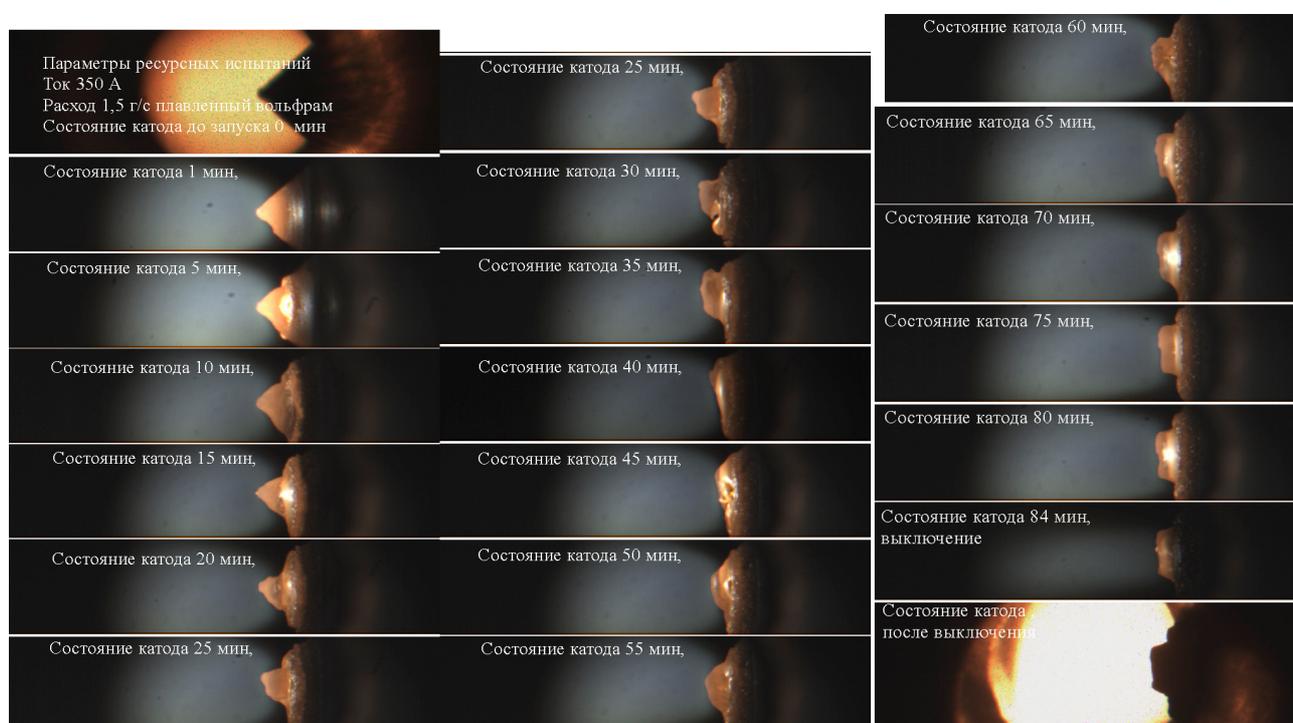


Рис. 2а. Видеоряд ресурсных испытаний катода в среде азота. Высота кадров на рисунках 2, 3 – около 1 мм

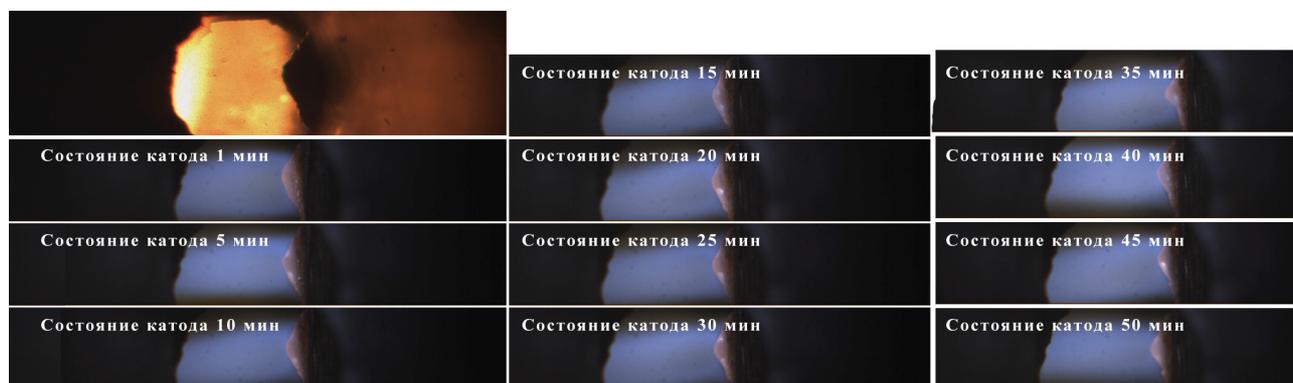


Рис. 2б. Видеоряд ресурсных испытаний катода в среде аргона

В главе 2 рассматриваются основные процессы, происходящие на поверхности термоэмиссионного катода. С помощью высокоскоростной цветной камеры VS-FAST (ВидеоСпринт) с частотой 3500 кадров/с, временным разрешением одного кадра 2 мкс и пространственным разрешением не хуже 30 мкм были проведены серии ресурсных испытаний катода, выполненного из нескольких модификаций спеченного вольфрама.

Анализ результатов высокоскоростной визуализации позволил систематизировать основные явления и процессы, наблюдаемые на поверхности вольфрамового катода.

Эффекты и явления, которые наблюдались на поверхности вольфрамового катода:

- Движение «волны прогрева» катода при запуске плазматрона и протекание «зонной переплавки» материала катода, погружённого в плазму.
- Остывание катода при выключении плазматрона: наличие или отсутствие жидкой фазы на поверхности катода при разных способах выключения плазматрона и различных токах дуги.
- Трещинообразование на твёрдой поверхности катода.
- Трещинообразование на расплавленной поверхности катода.
- Унос крупных фрагментов материала W – катода.
- Унос микрочастиц с твёрдой поверхности катода.
- Унос микрочастиц с расплавленной поверхности катода.
- Дегазация материала катода с образованием пузырей на расплавленной поверхности.
- Образование выступов полусферической формы на кончике W – катода.

Примеры наблюдаемых эффектов на катоде представлены на рис. 3.

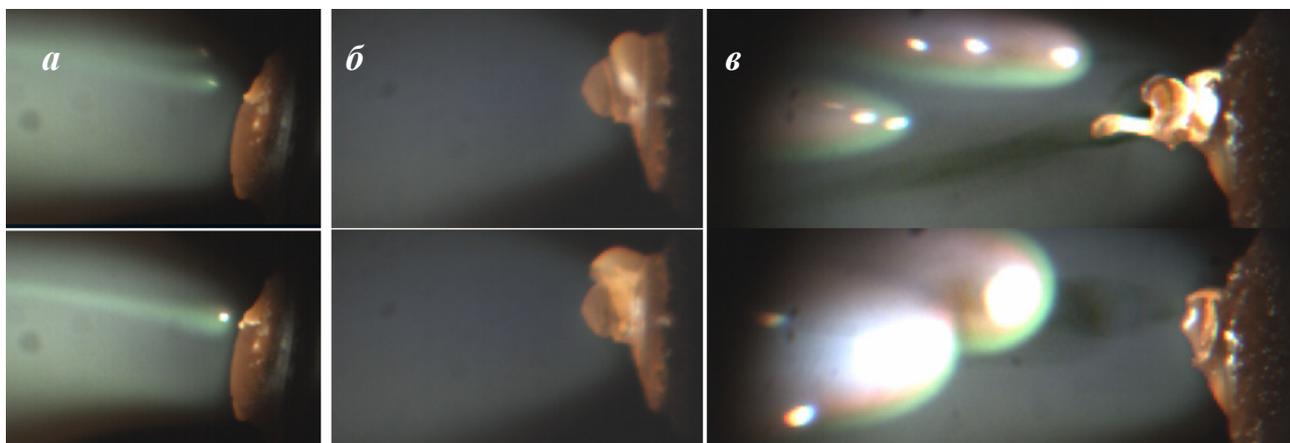


Рис. 3. Выброс макрочастиц (а); образование пузырей (б); отрыв кончика W – катода (в)

Наблюдение за поверхностью катода во время ресурсных испытаний позволило оценить как скорость эрозии материала катода, так и её изменение в процессе ресурсных двухчасовых испытаний.

Разработанный алгоритм позволил по набору видеок кадров поверхности катода оценивать убыль материала катода в процессе ресурсного испытания и проследить за изменениями формы поверхности катода.

Установлено, что появление жидкой фазы на поверхности вольфрамового катода характерно только для азотных дуг. По результатам ресурсных испытаний предлагаются методы увеличения ресурса W – катода при работе на токах свыше 200 А.

Глава завершается оценкой величины напряжённости электрического поля в азотной плазме прикатодного слоя с учётом эффекта Шоттки. Для расчёта поправки Шоттки выполнена экспериментальная оценка напряжённости электрического поля в прикатодном слое основанная на равенстве сил поверхностного натяжения жидкой полусферы на кончике нагретого катода и электрической силы «срыва» его поверхностного слоя. Эта напряжённость оказалась значительной $E=1.5$ МВ/см, и поправка на эффект Шоттки увеличила расчетное значение плотности тока термоэлектронной эмиссии в четыре раза. При этом экспериментальная оценка плотности тока даёт значение $J_{эксп}$ на порядок более значительное.

Глава 3 содержит результаты спектроскопии прикатодной плазмы с использованием ПЗС линеек и матриц. Подробно рассмотрен вопрос абсолютной калибровки измеряемых спектральных интенсивностей излучения, установлены пространственное и временное разрешения матричной системы сбора данных.

Результатом исследования прикатодной плазмы с использованием ПЗС линеек являются полученные распределения концентрации электронов на оси плазменного шнура вдоль продольной координаты $n_e(r=0,z)$, и распределение температуры электронов $T_e(r=0,z)$ по продольной координате, для различных рабочих токов плазматрона, см. рис. 4а, 4б.

Отрицательные значения Z на рис. 4. означают, что поперечное наблюдение плазмы осуществлялось и в области слева от острия катода при движении потока слева направо.

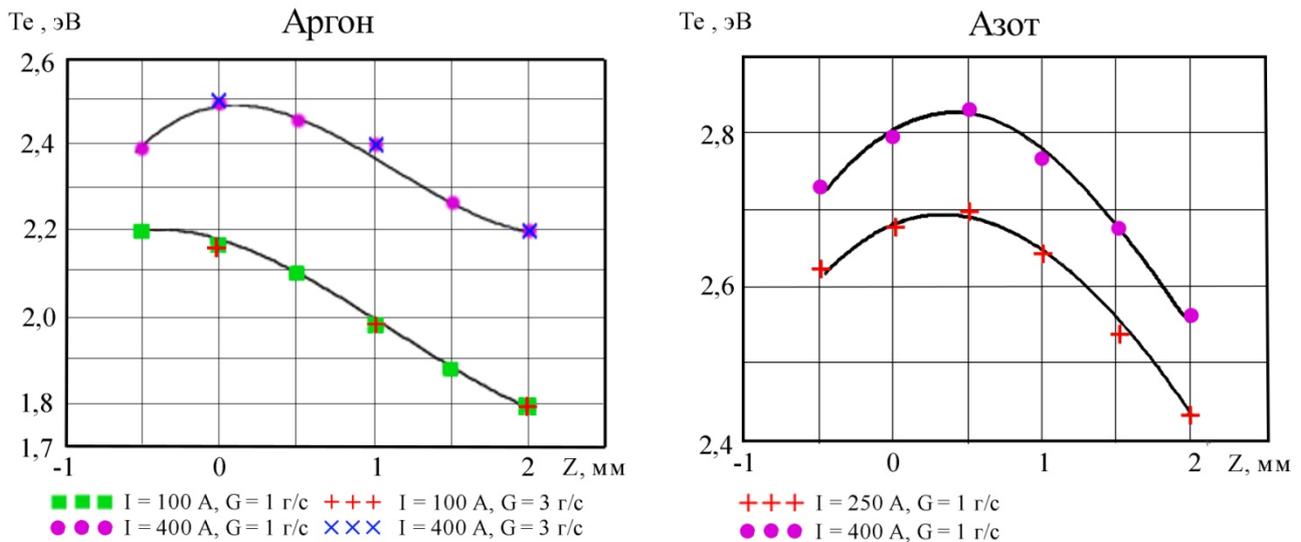


Рис. 4а. Распределение температуры электронов вдоль оси плазматрона Z

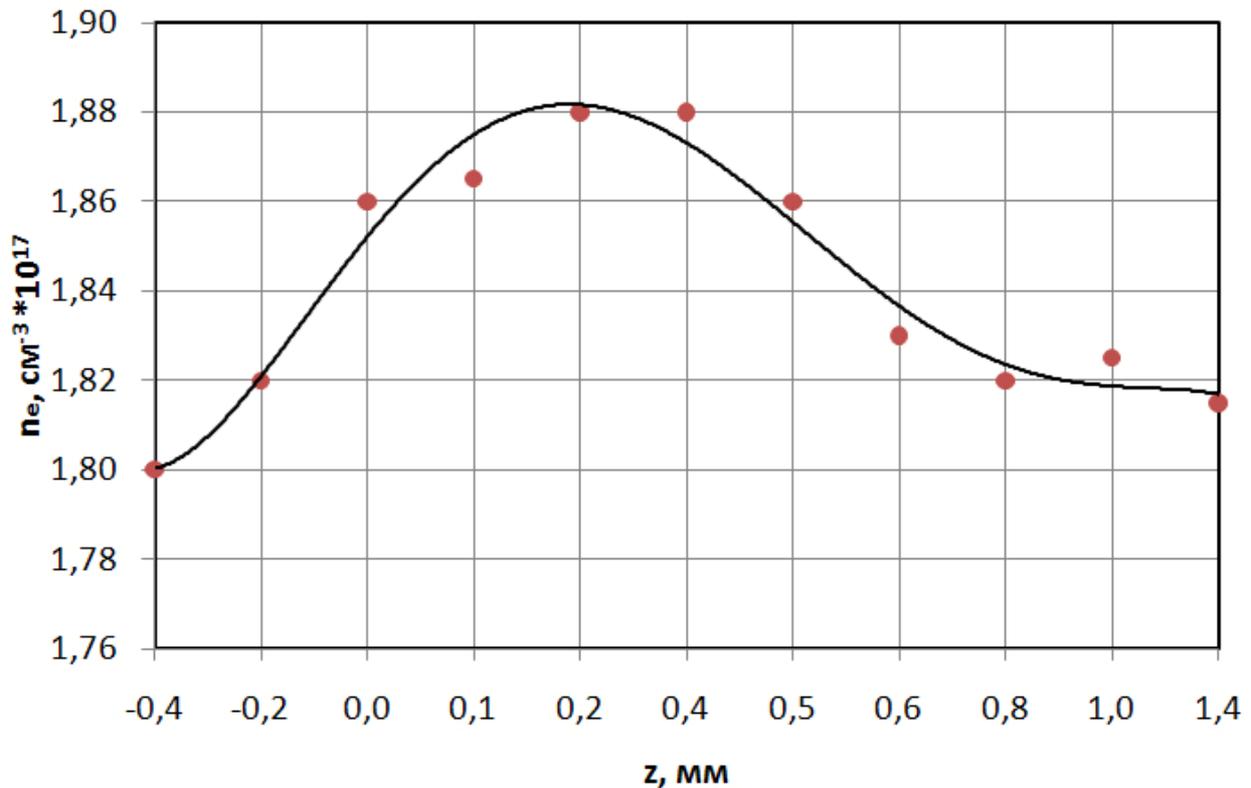


Рис. 4б. Распределение концентрации электронов в плазме азота вдоль оси плазматрона Z , при токе 350 А

Для получения радиальных распределений интенсивностей спектральных линий была использована ПЗС – матрица INSTASPEC IV (Oriel Corp., Германия), содержащая 1024×128 пикселей размером 25×25 мкм. Аппаратное разрешение системы ДФС – 452 с матрицей InstaSpec IV при работе с решеткой

1200 штр./мм составляет около 0.03 нм, а пространственное разрешение (при отображении объекта на входной щели в масштабе 1:1) порядка 50 мкм.

Исследование прикатодной плазмы с помощью данной ПЗС матрицы позволило, не используя Саха – больцмановское приближение, получать локальные параметры неоднородной плазмы.

Был разработан программный комплекс, позволяющий производить не только отождествление исследуемого спектра с базой табличных данных о спектральных линиях [4], но и для выбранной группы линий производить их абелевское преобразование для получения из хордового распределения интенсивности линии радиальное распределение её интенсивности. Алгоритм преобразования интенсивности одной из линий НИИ из хордового в радиальное распределение представлен на рис. 5, 6. Разработанный алгоритм также может применяться для построения преобразования Абеля для континуума.

На рис. 5 представлено: а) – разбиение 2D – изображения выбранной линии на спектральные участки $\Delta\lambda$; б) – получение хордовых распределений $\varepsilon_{\lambda}^{\wedge}(r)$ в пределах контура спектральной линии согласно соотношению $\Delta E_k \geq kT_e$;

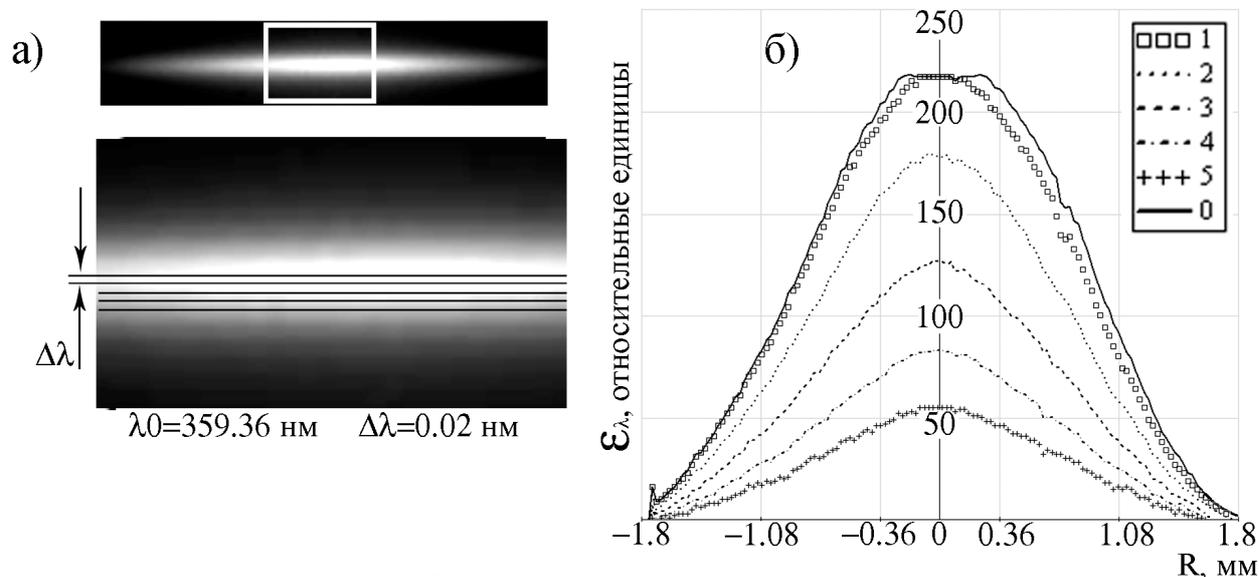


Рис. 5. последовательность получения картины радиального изменения контура на примере спектральной линии НИИ 359.36 нм

На рис. 6 представлено: в) – выполнение преобразований Абеля для хордовых распределений; г) – восстановление локальных контуров исследуемой спектральной линии.

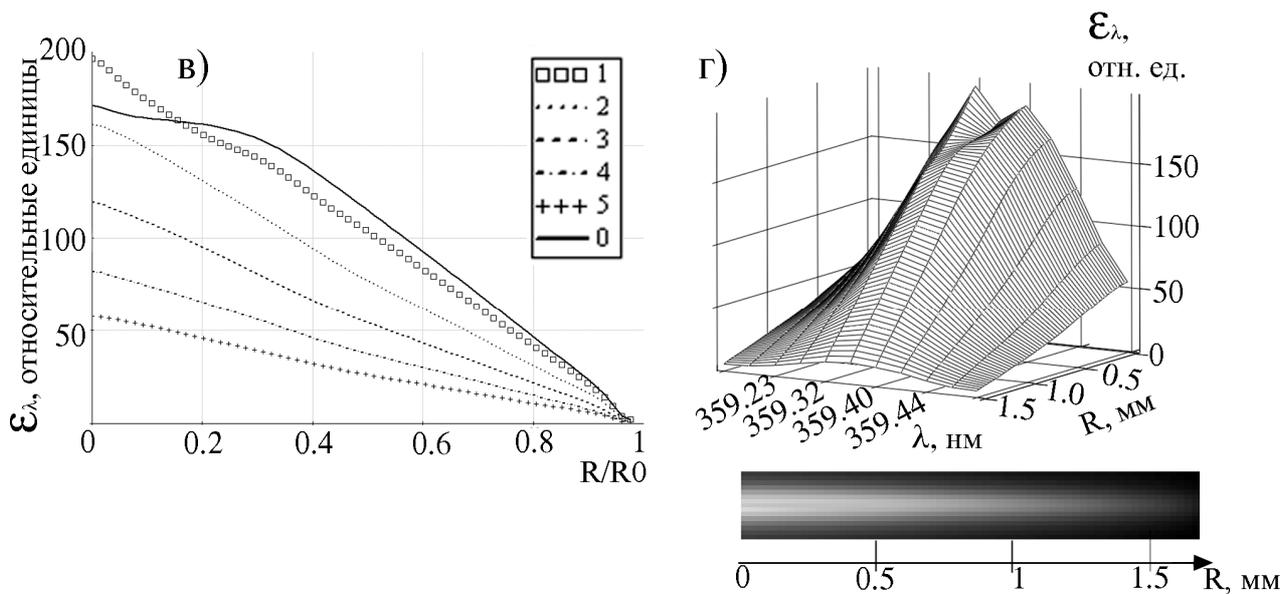


Рис. 6. последовательность получения картины радиального изменения контура на примере спектральной линии NII 359.36 нм

Таким образом, мы получаем изменения контура выбранной спектральной линии по радиусу дуги. Аналогичные преобразования могут быть выполнены для линий NI и NIII.

Пример распределения по радиусу дуги концентрации электронов $n_e(r)$ по локальным контурам линий NI и NII представлен на рис. 7.

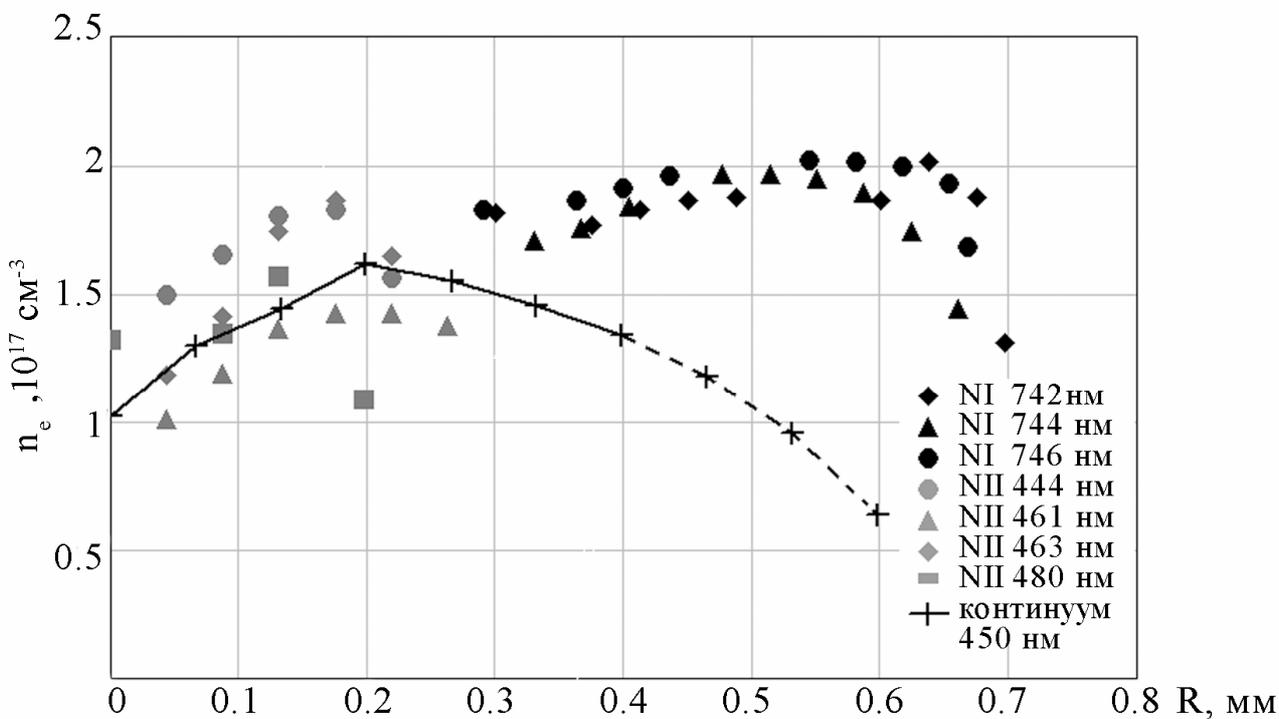


Рис. 7. Радиальные распределения концентрации электронов. $Z=1$ мм

На рисунке приведено сравнение зависимостей $n_e(r)$, полученных для тока дуги $I=300$ А, с использованием нескольких линий NI и NII, и интенсивности непрерывного излучения плазмы. Установлено, что при больших токах дуги максимальная концентрация электронов (для равновесной плазмы она соответствует электронной температуре 16 кК) смещается на периферию разряда; с дальнейшим повышением тока дуги ($I=400$ А) глубина приосевого снижения n_e растёт. Спектроскопически был исследован вопрос о возможной рециркуляции материала катода.

В главе 4 приводятся алгоритм и методика использования высокоскоростной камеры в качестве высокоскоростного микропирометра с хорошим пространственным и временным разрешением. Приводятся основные допущения и математический аппарат для разработанного программного преобразования картин светимости поверхности нагретых тел, получаемых с помощью высокоскоростной камеры VS-FAST, в картины полей истинной или яркостной температуры. В основе метода – сравнение спектральных интенсивностей излучения поверхности нагретого тела и эталонного источника с известной истинной температурой.

Расчётная формула для нахождения локальных значений температуры катода вытекает из закона Вина ($h\nu/kT \gg 1$),

$$T_k(x, y, z) = \frac{T_{эм}}{1 - \frac{\lambda T_{эм}}{c_2} \times \ln \left(\eta \times \frac{\varepsilon_{эм}(\lambda, T_{эм}) \times b_k(\lambda, T_k)}{\varepsilon_k(\lambda, T_k) \times b_{эм}(\lambda, T_{эм})} \right)},$$

где $b_k(\lambda, T_k(x, y, z))$ и $b_{эм}(\lambda, T_{эм})$ – соответственно локальное значение яркости свечения катода за вычетом «экранирующего» плазменного излучения и яркость эталонного источника излучения с истинной температурой $T_{эм}$; $c_2=hc/k$ – константа; η – коэффициент, учитывающий различия условий регистрации объекта и эталона; $\varepsilon_k(\lambda, T_k(x, y, z))$ и $\varepsilon_{эм}(\lambda, T_{эм})$ – степени черноты на исследуемой длине волны λ поверхности катода в функции локальной температуры катода T_k и вольфрамовой ленты при ее истинной температуре $T_{эм}$.

Для определения коэффициента η строилась с использованием тест-объекта регулируемой яркости тарировочная зависимость интенсивности свечения объекта от времени экспозиции кадра видеокамеры.

Калибровка предложенной методики была проведена на теплофизической установке по нагреву образца из промышленного титана BT1-0 в воздушной

среде атмосферного давления. Использовалась геометрия образца со щелевой полостью, имитирующей черное тело. Термограмма истинной температуры процесса изучалась с помощью быстродействующего монохроматического пирометра, настроенного на пирометрическую щель шириной в 1 мм, выполненную по образующей образца диаметром 11/10 мм и длиной 80 мм. Визуализация выполнена высокоскоростной цифровой цветной камерой VS-FAST (ВидеоСпринт). На рис. 8. представлена раскладка эксперимента по нагреву титанового образца.

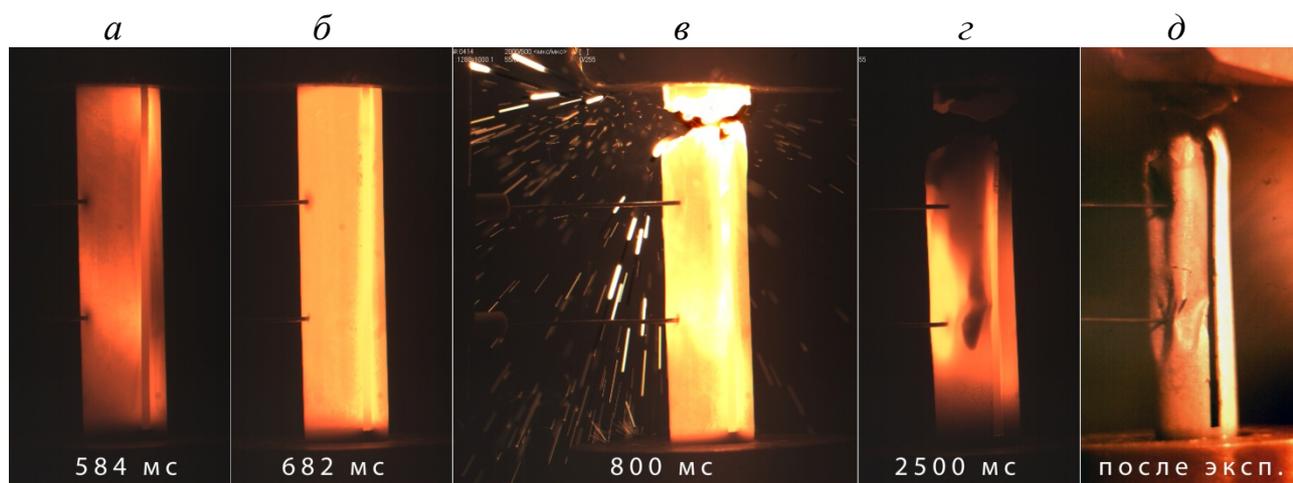


Рис. 8. Видеограмма процесса нагрева и разрушения образца. Длительность нагрева током 2000А – около 800 мс, время экспозиции кадра – 500 мкс

На рис. 8, *а*. наглядно видна неоднородность нагрева, которая впоследствии определила место разрыва образца на рис. 8, *в*. Кадр 8, *б* соответствует моменту перехода «солидус – ликвидус». Кадр 8, *д* выполнен с внешней подсветкой остывшего образца, – он находится как бы в футляре из оксидной плёнки TiO_2 .

Наряду с традиционной для подобных экспериментов информацией о свойствах образца в работе изучена стадия разрушения. Показано, что последняя носит квази-взрывной характер (стадия 8, *в*).

На рис. 9 приведены поля яркостной температуры для поверхности образца и истинной температуры для пирометрической щели исследуемого образца в разные моменты времени, соответствующие рис. 8, *а – в*.

Результаты проведённых измерений позволили установить температуру перехода «солидус – ликвидус»: она составила 1944 К. Данные, полученные с помощью высокоскоростной камеры и монохроматического эталонного пирометра в контрольной точке, совпали с точностью 5%.

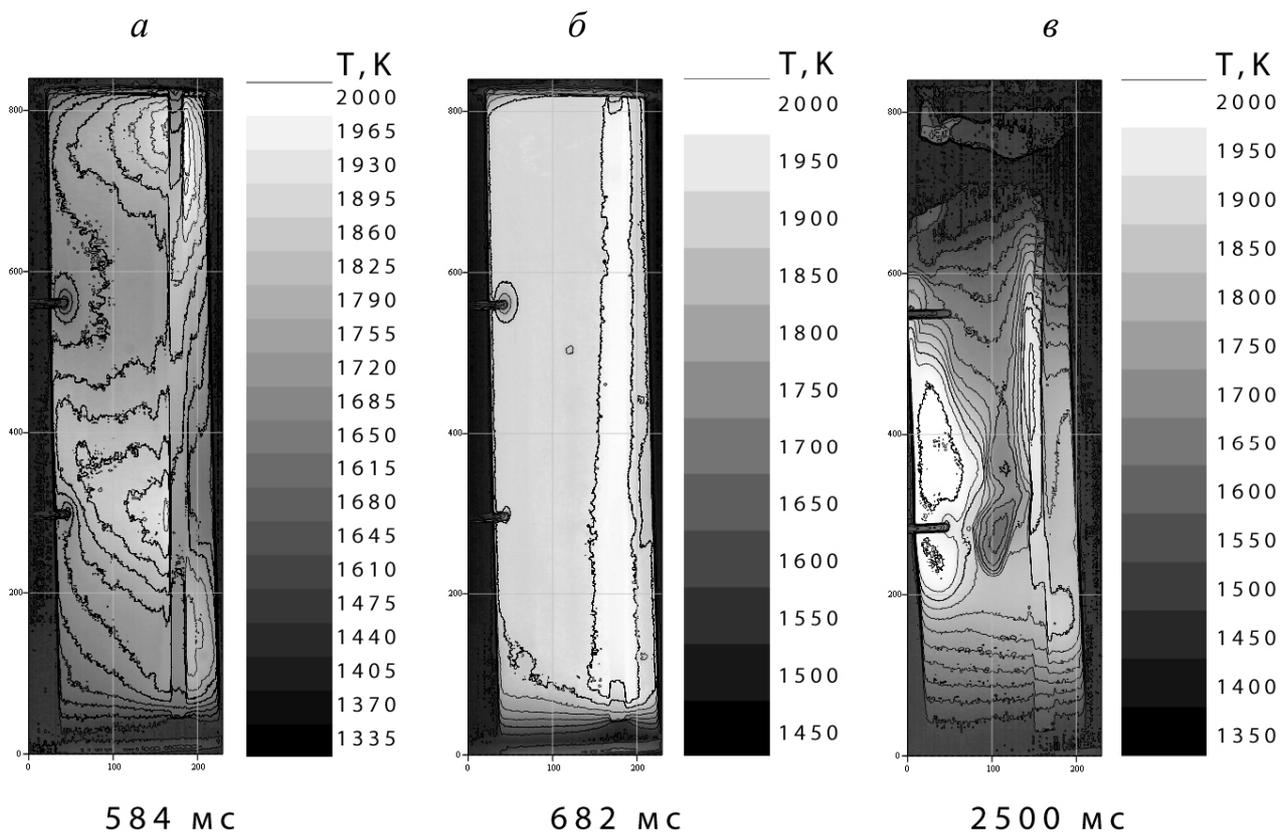


Рис. 9. Температурные поля исследуемого образца

Столь успешный тарировочный эксперимент позволил применить отработанную методику для исследования температурных полей на поверхности термоэмиссионного катода. В диссертации приводятся примеры температурных полей поверхности вольфрамового катода для разных токов дуги и типов плазмообразующего газа. Приводится сравнительная оценка градиента прогрева поверхности катода для разных плазмообразующих газов и уделяется внимание областям локальных перегревов поверхности катода, соответствующим наблюдаемой жидкой фазе на его поверхности.

На рис. 10 представлен пример температурного поля кончика вольфрамового катода при работе дуги на азоте. Можно видеть, что поверхность катода нагрета неоднородно (вид свечения – на вставке вверху справа), максимальное значение температуры составило около 3500 K (температура плавления вольфрама 3695 K).

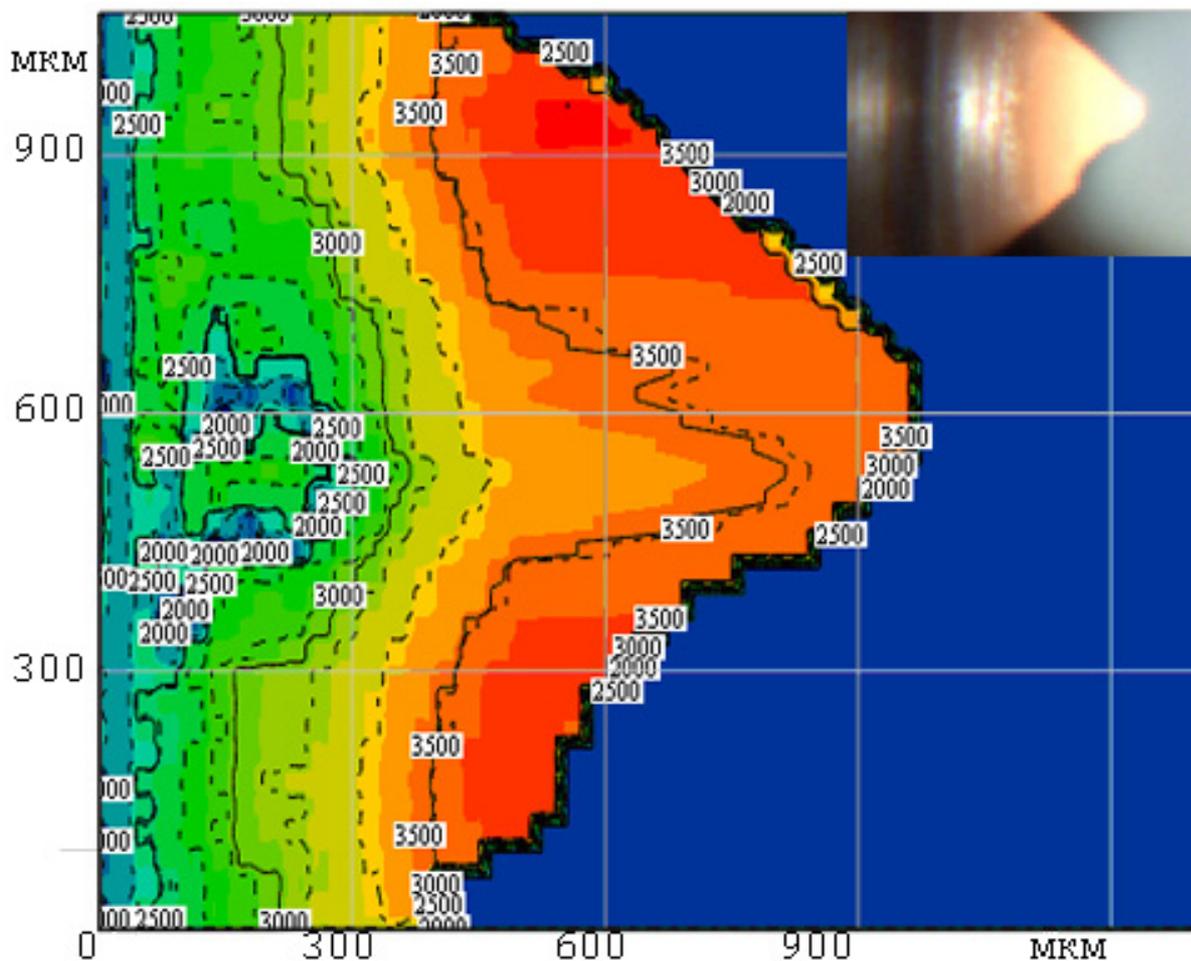


Рис. 10. Поле температур (в Кельвинах) кончика катода (рабочий газ – азот, ток дуги – 350 А)

В завершении четвёртой главы приводятся примеры температурных полей на поверхности вольфрамовых катодов в плазме азота и аргона с меняющейся в процессе работы дуги геометрией.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана и апробирована автоматизированная система оптических и спектральных исследований области взаимодействия «катод – прикатодная плазма» в сильноточной электрической дуге в составе высокоскоростной цветной видеокамеры и дифракционного спектрографа с ПЗС матрицей.

2. Впервые произведена высокоскоростная видеосъемка (частота кадров до 4000 к/с) процесса эрозии катода с пространственным разрешением порядка 0.03 мм и временным разрешением 2 мкс, которая позволила наблюдать в динамике поверхностные эрозионные процессы: эрозию катода при запуске и выключении плазматрона, трещинообразование на твёрдой и расплавленной поверхности катода, унос крупных фрагментов материала W – катода, дегазацию материала катода с образованием пузырей на расплавленной

поверхности, новообразования на кончике W – катода сильноточного плазматрона постоянного тока.

Получены количественные результаты по эрозии материала и её основным механизмам в ходе ресурсных испытаний катода из спечённого вольфрама.

3. Развита методика, создана и апробирована программа и проведено измерение поля температур поверхности термоэмиссионного катода в сильноточной электрической дуге с использованием в качестве высокоскоростного микропирометра трёхцветной высокоскоростной камеры VS-FAST.

4. Разработана методика, создан автоматический программный комплекс и получены результаты прямого измерения локальных значений n_e и T_e сильноионизированной азотной плазмы, при поперечном наблюдении электрической дуги. Методика основана на получении локальных контуров спектральных линий NI и NII в результате абелевских преобразований 2D спектров при их ПЗС регистрации.

5. Экспериментально показаны новые возможности развитых в работе средств скоростной визуализации применительно к нестационарному эксперименту по омическому и лазерному нагреву образцов с целью исследования их теплофизических свойств и поверхностных изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под/ред. В. Е. Фортова. Вводный том II. М.: Наука. 2000.
2. Григорьянц Р.Р., Исакаев Э.Х., Спектор Н.О., Тюфтяев А.С. Влияние раскрытия канала выходного электрода на характеристики плазматрона // ТВТ. 1994. Т. 32. № 4. С. 627.
3. Исакаев Э.Х., Маркин А.В., Хаймин В.А., Чиннов В.Ф. Автоматизированная система обработки спектров излучения плазмы // Приборы и техника эксперимента. 2001. Т. 44. Вып. 1. С.47.
4. NIST Atomic Spectra Database. Lines Data. (<http://physics.nist.gov>)

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих изданиях.

Журналы:

1. Горячев С. В., Исакаев Э. Х., Мясников М. И., Чиннов В. Ф. Исследование полей температуры на поверхности вольфрамового катода сильноточной

дуги с помощью высокоскоростной матрицы // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. №6. С. 820.

2. *Горячев С. В., Исакаев Э. Х., Мясников М. И., Чиннов В. Ф.* Спектральные измерения локальных параметров плазмы с использованием ПЗС-матриц // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105. №6. С. 918.
3. *Белялетдинов Т.Ш., Горячев С.В., Чиннов В.Ф., Щербаков В.В.* Исследование гомогенной и гетерогенной плазмы методами спектроскопии и скоростной визуализации // Вестник МЭИ. 2009. №4. С. 61.
4. *Горячев С. В., Пелецкий В. Э., Чиннов В. Ф.* Скоростная визуализация нестационарного теплофизического эксперимента как средство повышения его информативности и точности // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48 №1. С. 38.
5. *Белялетдинов Т. Ш., Горячев С. В., Ефимов А. В., Исакаев Э. Х., Чиннов В. Ф.* Спектральное определение локальных значений концентрации и температуры электронов в сильноионизованной азотной плазме с использованием ПЗС – матриц // Оптика и спектроскопия, 2010, Т. 109. № 5. С. 721.

Конференции:

1. *Андреенко Е.Н., Горячев С.В.* Скоростная визуализация искрового высокочастотного разряда // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика 12 международная научно техническая конференция студентов и аспирантов 2-3 марта 2006 г. Москва. МЭИ. С. 106.
2. *Горячев С.В., Глазков В.В, Исакаев Э.Х., Синкевич О.А., Тюфтяев А.С.* Численное моделирование течения аргона в расширяющемся канале плазматрона и нагрева частиц корунда, присутствующих в потоке // Материалы Всероссийской конференции по физической электронике. Махачкала, 23-26 октября 2006.
3. *Андреенко Е.Н., Горячев С.В., Исакаев Э. Х., Мясников М.И., Чиннов В.Ф.* Измерение температуры поверхности катода сильнотоочной дуги методом трехцветной высокоскоростной пирометрии // 5-ая научная школа – конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Алушта, Украина. 2007. С. 7-12.
4. *Белевцев А.А., Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Тазикова Т.Ф., Чиннов В.Ф.* Результаты скоростной визуализации поверхности вольфрамового катода сильнотоочной электрической дуги // ФНТП – 2007. 24-28 июля 2007. Петрозаводск. Россия. С. 24-28.
5. *Андреенко Е.Н., Горячев С.В., Мясников М.И., Чиннов В.Ф.* Исследование полей температур и эрозии катода в сильнотоочной электрической дуге //

- XIV международная научно – техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва. Россия. 28-29 февраля 2008. С. 93-95.
6. *Андреев Е.Н., Горячев С.В., Мясников М.И., Чиннов В.Ф.* Измерение температурных полей поверхности катода сильноточного плазматрона методом высокоскоростной пирометрии // XXXIV международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва. Россия. 2008. С. 125-126.
 7. *Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Мясников М.И., Чиннов В.Ф.* Исследование состояния и температуры поверхности катода сильноточной дуги методом высокоскоростной визуализации // XXIII международная конференция «Уравнения состояния вещества – 2008» Россия. Эльбрус. 2008. С. 217-218.
 8. *Горячев С. В., Сенченко В. Н., Чиннов В.Ф., Щербаков В.В.* Распознавание образов в задачах скоростной визуализации и спектроскопии // 9 Международная конференция «РОАИ-9-2008», Россия, Нижний Новгород, сентябрь 2008. Conference Proceedings, V. I. P.189-192.
 9. *Амиров Р.Х., Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Самойлов И.С., Чиннов В.Ф. и др.* Эрозия вольфрамового катода в плазматроне // Материалы V Всероссийской конференции по физической электронике ФЭ-2008, Россия. Махачкала. 2008.
 10. *Горячев С.В., Костановский А.В., Пресняков Д.В., Чиннов В.Ф.* Пространственно – временные изменения температуры тонкой пластины при лазерном нагреве // РКТС-12-2008. Москва. Тезисы докладов, С.108-109.
 11. *Горячев С.В., Пелецкий В.Э., Чиннов В.Ф., Шур Б.А.* Исследование динамики субсекундного омического нагрева и разрушения титанового трубчатого образца // РКТС-12-2008. Москва. Тезисы докладов, С.82-83.
 12. *Белялетдинов Т.Ш., Горячев С.В., Чиннов В.Ф.* Теоретическое и экспериментальное исследование процессов взаимодействия плазма – эмитирующий катод // 6-я Курчатовская молодёжная научная школа, Москва. 2008.
 13. *Горячев С. В., Сенченко В. Н., Чиннов В. Ф. , Щербаков В. В.* Высокоскоростная система для измерения параметров частиц в гетерогенных плазменных потоках // XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 9-13 февраля 2009 г.
 14. *Belevtsev A.A., Chinnov V.F., Goryachev S.V., Isakaev E.Kh.* The phase state of a tungsten cathode surface in high current atmospheric pressure electric arcs // Physics of extreme states of matter. Эльбрус. 2009.

15. *Chinnov V.F., Goryachev S.V., Senchenko V.N., Shcherbakov V.V.* Measuring system for investigation of heterogeneous plasma during plasma spraying // The Third Central European symposium on plasma chemistry, August 23-27, 2009. Kyiv. Ukraine.
16. *Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Чиннов В.Ф.* Исследование поверхности катода и прикатодной плазмы методами высокоскоростной визуализации и спектроскопии // Научно техническая конференция «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии» 17-18 сентября 2009, г. Москва. МЭИ.
17. *Белевцев А.А., Беляетдинов Т.Ш., Горячев С.В., Чиннов В.Ф.* Исследование состояния сильноионизованной неоднородной азотной плазмы атмосферного давления // Тезисы докладов XXXVII международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. г. Звенигород, 8-12 февраля 2010 г. С. 291.

Горячев Сергей Викторович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИКАТОДНОЙ ОБЛАСТИ
СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ

Автореферат

Подписано в печать 03.11.2010		Формат 60×84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 1.5	Усл.-печ.л. 1.3
Тираж 100 экз.	Заказ N 119	Бесплатно

ОИВТ РАН 125412, Москва, Ижорская ул., 13 стр. 2