

Струйный электрический разряд с жидкой плазмообразующей средой при взаимодействии с алюминием

© С.Ю. Петряков, Э.Р. Бельгибаев, Р.Р. Каюмов, А.Ф. Гайсин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Российская Федерация

Представлены результаты экспериментально-теоретического исследования струйного электрического разряда с жидкой плазмообразующей средой при взаимодействии с алюминием. Разряд реализован в конфигурации «струйный анод — алюминиевый катод» при атмосферном давлении в различных диапазонах таких параметров, как напряжение, скорость струи (диаметр струи 2 мм), удельная электропроводность раствора, температура. По данным высокоскоростной визуализации установлены две типовые геометрии канала: продольная — вдоль тела струи и приповерхностная — в форме конусообразного светящегося объема на границе «жидкость — газ — металл». Выявлен пороговый переход от электрохимического режима (около 200 В, пузырькообразование, без формирования разряда) к импульсно-плазменному (около 700 В) с токовыми импульсами амплитудой 1,0...1,2 А и длительностью до 500 мкс. Эмиссионная спектроскопия показала присутствие полос ОН (А-Х), N_2^+ (В-Х) и линий H I, Na I, N I, Al I; по Штарк-уширению линий водорода оценена концентрация электронов. Термография зафиксировала локальный максимум температуры струйного анода в зоне контакта около 64 °С со спадом к комнатному фону.

Ключевые слова: струйный электрический разряд, жидкая плазмообразующая среда, алюминий, эмиссионная спектроскопия, Штарк-уширение, концентрация электронов, термография, локальная модификация поверхности

Введение. В последние годы струйные разряды низкотемпературной плазмы с жидкой плазмообразующей средой [1–3] рассматриваются как удобный инструмент для локальной модификации поверхностей и управляемой доставки активных частиц в ограниченную зону. Их ключевая особенность — совмещенная роль жидкости как электрода и источника плазмообразующих компонентов, что обеспечивает богатую плазмохимию у подвижной межфазной границы «газ — жидкость — твердое тело» [4–6]. Такая конфигурация объединяет преимущества газоразрядных технологий (высокая реакционная способность, неравновесность, управление энергией и потоками зарядов) и жидкофазной химии (варьируемый состав, буферные и каталитические функции), позволяя тонко настраивать воздействие на материал без применения агрессивных травителей и массивного нагрева [7–9].

Применительно к алюминию интерес к струйным разрядам особенно велик. Поверхность алюминиевых сплавов практически мгновенно покрывается плотной нанометровой оксидной пленкой, определяющей

адгезию, смачиваемость, коррозионную стойкость и поведение при пайке, наплавке и нанесении покрытий. С одной стороны, этот оксид защищает металл, с другой — препятствует формированию прочных соединений и равномерному нанесению функциональных слоев. Традиционные методы подготовки алюминия — механическая абразивная обработка, щелочно-кислотные протравы — зачастую сопровождаются избыточным съемом материала, неоднородностью результата и экологическими ограничениями. Струйный электрический разряд с жидкой плазмообразующей средой предлагает альтернативу: локальную, дозируемую и, как правило, более экологичную модификацию оксидной пленки и приповерхностного слоя с возможностью адресного изменения их структуры и химического состояния [10–13].

Механика взаимодействия струйного разряда с алюминием принципиально связана с динамикой межфазной границы и конкуренцией нескольких переносов: ионно-электронного, теплового, массопереноса пароаэрозольных компонентов и реакционно-диффузионных процессов в оксиде. Типы и формы горения разряда, состав активных частиц и их поток к подложке определяются не только электрическими параметрами (мощность/напряжение, ток, частота, импульсность), но и гидродинамикой струи (расход, скорость, диаметр сопла, межэлектродный зазор) и физико-химическими характеристиками жидкости (электропроводность, рН, летучесть, поверхностное натяжение). Для алюминия дополнительно существенны высокая теплопроводность и низкая температура плавления по сравнению со сталями, в связи с чем предъявляются требования к ограничению теплового влияния и поддержанию устойчивого неразрушающего режима горения [14].

Несмотря на активное развитие направления, остается ряд открытых вопросов, критичных именно для алюминия. Недостаточно систематизированы области устойчивости струйного разряда при варьировании давления и состава окружающего газа, не полностью определены условия переходов между равномерным свечением и сжатыми/нитевидными формами горения, требуется проведение количественной оценки вклада пузырькообразования и электрокапиллярных эффектов в эволюцию оксидной пленки, а также роли аэрозольных потоков жидкости в процессе материалопереноса на поверхность. Для инженерных задач особенно значимы воспроизводимые «окна» режимов, связывающие управляемые изменения морфологии и химии оксида с целевыми свойствами — адгезией, смачиваемостью, коррозионной стойкостью и механической прочностью приповерхностного слоя — при минимизации термического воздействия и исключении дефектов типа подплавов и рекристаллизации [15–16].

Современная диагностическая база позволяет комплексно подойти к этой проблематике. Регистрация вольт-амперных характеристик

и высокоскоростная визуализация дают сведения о динамике разряда и характерном времени процессов. Оптическая эмиссионная спектроскопия и инфракрасная термография раскрывают состав активных частиц и тепловые потоки в зоне воздействия. Со стороны результата обработки применяются профилометрия и электронная микроскопия для оценки микрорельефа, измерения контактного угла для анализа смачиваемости, методы микро- и нанотвердости, а также электрохимические испытания для характеристики коррозионной стойкости алюминия и его сплавов. Численное моделирование, объединяющее электрические, гидро- и плазмохимические подсистемы, дополняет эксперимент и обеспечивает перенос разработанных режимов на различные сплавы и геометрии деталей.

Инженерная значимость исследований определяется широким спектром применения в авиакосмической и транспортной отрасли, в аддитивном и тонкопленочном производстве, а также при подготовке поверхностей под клеевые и паяные соединения. Локальность струи и гибкость выбора жидкой среды облегчают интеграцию установки в роботизированные линии и операции выборочного ремонта сложнопрофильных изделий. В связи с этим актуальными задачами являются построение режимных карт и разработка инженерных рекомендаций, позволяющих предсказуемо управлять состоянием оксидной пленки и приповерхностного слоя алюминия в зависимости от электрических и гидрогазодинамических параметров струйного разряда и состава жидкой плазмообразующей среды.

Настоящая работа направлена на экспериментально-теоретическое исследование струйного электрического разряда с жидкой плазмообразующей средой в процессе взаимодействия с алюминием.

Цель работы — установление форм горения и областей их устойчивости, определение электрофизических, спектральных и тепловых характеристик разряда. Полученные результаты предназначены для формирования научно обоснованных режимов и практических рекомендаций по локальной подготовке и модификации изделий из алюминия и его сплавов.

Экспериментальная установка. Зажигание и поддержание струйного электрического разряда с жидкой плазмообразующей средой при взаимодействии с поверхностью алюминиевой пластины осуществлялись на лабораторной установке, в которой струя электролита служила анодом, а алюминиевая пластина — катодом (рис. 1).

В качестве металлического катода использовалась алюминиевая пластина марки АМц-40, в качестве струйного анода — 3%-ный водный раствор NaCl на основе очищенной водопроводной воды. Перед запуском к соплу подачи электролита подводили положительный потенциал, после чего посредством регулирующего крана струя

направлялась на поверхность алюминиевой пластины, закрепленной в электролитической ячейке, заполненной рабочим раствором; к пластине подключали отрицательный потенциал.

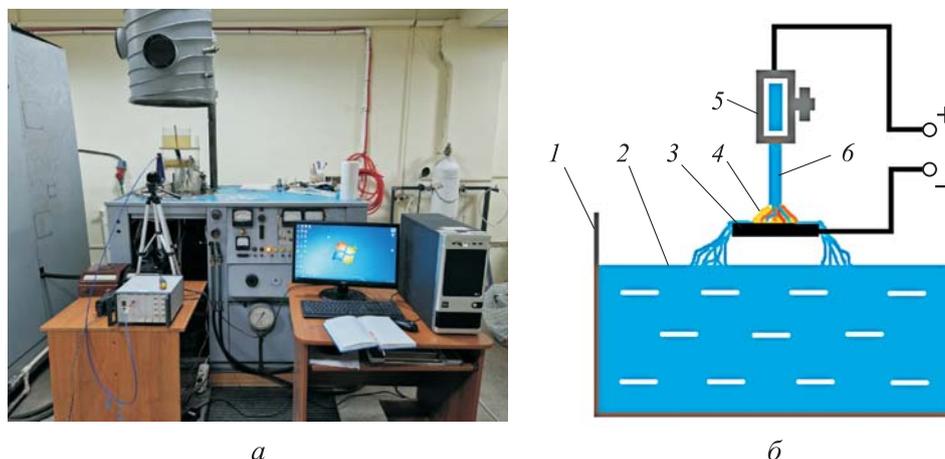


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки (а) и функциональная схема газоразрядной камеры (б) для поддержания струйного разряда с жидкой плазмообразующей средой в процессе взаимодействия с поверхностью алюминиевой пластины:

1 — электролитическая ячейка; 2 — электролит; 3 — алюминиевая пластина; 4 — зона горения разряда; 5 — сопло для подачи/регулировки струи электролита; 6 — струя электролита

Для обеспечения стабильности режимов предусмотрено термостатирование ванны: циркуляционный охладитель рефрижераторного типа поддерживал температуру электролита в заданных пределах, а обновление раствора в ячейке происходило через замкнутый контур подачи и откачки с фильтром грубой очистки для удаления механических примесей. Удаление паров электролита и продуктов разряда из рабочей зоны обеспечивалось стационарной вытяжкой с вентилятором. Все токоведущие части и корпусные элементы установки были заземлены.

Питание разряда осуществлял высоковольтный генератор мощностью до 40 кВт с плавной регулировкой напряжения до 4 кВ при номинальном токе до 10 А. Генератор включал высоковольтный и низковольтный регулируемые блоки, что позволяло задавать требуемые диапазоны напряжения и тока, а также подавать питание к диагностическому и вспомогательному оборудованию. Текущие значения напряжения и тока отображались стрелочными индикаторами на пульте, дублировались на управляющем компьютере, и их контролировал оператор.

Эксперименты проводились при следующих параметрах: напряжение $U = 0,1 \dots 1,1$ кВ; давление $p \approx 10^5$ Па (атмосферное); скорость струи электролита (анода) $v_a = 0,5 \dots 0,7$ м/с; диаметр струи $d = 2$ мм; длина свободной струи $l = 15$ мм; удельная электропроводность электролита $\sigma = 0,10 \dots 0,12$ Ом⁻¹·см⁻¹; температура электролита $T = 12 \dots 64$ °С.

Диагностический комплекс включал средства визуализации, теплового контроля и регистрации электрофизических параметров.

1. Высокоскоростная видеосъемка динамики факела и плазменных структур осуществлялась камерой Casio EX-F1 со скоростью 600 и 1200 кадр/с. Камеру устанавливали на штатив на расстоянии ~300 мм от зоны разряда, передача и обработка данных выполнялись на ПК с использованием ПО NX Link и Movavi Video Editor 14 Plus.

2. Для анализа распределения температуры на поверхности катода и в области анодной струи применяли тепловизионную камеру FLIR A6500sc (пространственное разрешение детектора 640×512 пикселей, спектральный диапазон 3,6...4,9 мкм) с калибровкой по многоволновому пирометру. Это позволяло компенсировать возможные погрешности, связанные с образованием оксидной пленки и изменением излучательной способности. Обработка термографических данных выполнялась в программном пакете ALTAIR v5.91.010.

3. Регистрация пульсаций, колебаний тока и напряжения разряда проводилась цифровыми осциллографами GDS-806S и GOS-6030. Для синхронизации электрических сигналов с оптическими событиями применяли фотодиодный датчик оптического излучения разряда, подключенный к осциллографам, что обеспечивало фиксацию моментов зажигания и переходов между формами горения.

4. Излучение плазмы разряда анализировалось методом эмиссионной спектроскопии на оптико-волоконном спектрометре марки PLASUS EC 150201 MC. Регистрация излучения разряда осуществлялось с помощью коллиматора для фиксации световых лучей в диапазоне длин волн от 195...1105 нм. Коллиматор подводился к зоне горения разряда на расстоянии 100...200 мм. Калибровка аппаратной функции системы проводилось снятием светового излучения от лампы марки «СИРШ 6-100». За аппаратную ширину была взята ширина минимальных, одиночных и самых узких линий спектра, которая оказалась равной $\Delta\lambda_g = 1$ нм. Исследуемое излучение собиралось со всего объема формируемого разряда, поэтому оценка состава и компонентов плазмы выполнена без привязки к определенной точке на разряде. Анализ полученных данных осуществлялся с помощью сопоставления исследуемого спектра с базой данных Национального института стандартов и технологий США (англ. The National Institute of Standards and Technology, NIST). Определение значений колебательной и вращательной температур тяжелой компоненты плазмы выполнялось путем сравнения экспериментально зарегистрированного молекулярного спектра с расчетной моделью в программе LIFBASE и в программе SPECAIR 2.2.0.0. Такой состав аппаратуры и выбранные режимы позволили проводить воспроизводимые измерения и сопоставлять электрические, спектральные, тепловые и визуальные признаки поведения струйного разряда на поверхности алюминия.

Обсуждение результатов. Формирование струйного разряда осуществлялось при подаче свободной струи электролита на поверхность алюминиевой пластины (рис. 2).

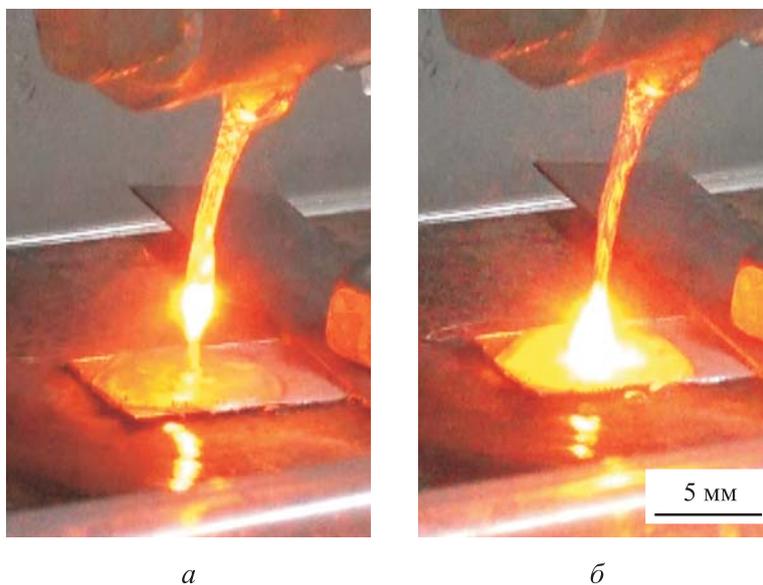


Рис. 2. Фотографии горения разряда между струйным анодом и алюминиевым катодом при $U = 700$ В, $I = 1,2$ А, $p = 10^5$ Па, $v_a = 0,5$ м/с (а) и $v_a = 0,7$ м/с (б)

По данным высокоскоростной видеосъемки было установлено, что плазменная зона может возникать в двух типичных геометриях: вдоль тела струи, когда канал разряда вытягивается по оси потока (рис. 2, а), и в приповерхностной области на границе контакта струйного анода с алюминиевым катодом, образуя локальный светящийся факел (рис. 2, б). Эти конфигурации соответствуют разному соотношению электрических и гидрогазодинамических параметров, определяющему место максимального усиления поля и условия локального пробоя.

Сопоставление с данными в приведенной литературе. Полученные в настоящей работе формы горения струйного разряда и пороговый характер перехода от электрохимического к импульсно-плазменному режиму качественно согласуются с результатами, известными для газожидкостных и плазменно-электролитных разрядов с жидкими электродами при атмосферном давлении и при взаимодействии с металлическими подложками [1–6, 10, 16]. Как и в ряде опубликованных исследований, ключевую роль в инициировании разряда играет формирование газопаровой оболочки на межфазной границе, приводящее к локальному усилению электрического поля и развитию микропробоев. Вместе с тем в случае алюминиевого катода

высокая теплопроводность и наличие стабильной оксидной пленки способствуют реализации импульсного режима без выраженного термического повреждения подложки и к формированию устойчивого приповерхностного конусообразного факела.

При установлении напряжения порядка ~ 200 В в зоне контакта струи и алюминиевой поверхности преобладают электрохимические процессы: наблюдаются интенсивное пузырькообразование и испарение электролита, характерные для режима, аналогичного электролизу. Разряд при этом не возникает, а ток проводимости остается квазистационарным; на осциллограмме фиксируется ток около 0,8 А (рис. 3, а).

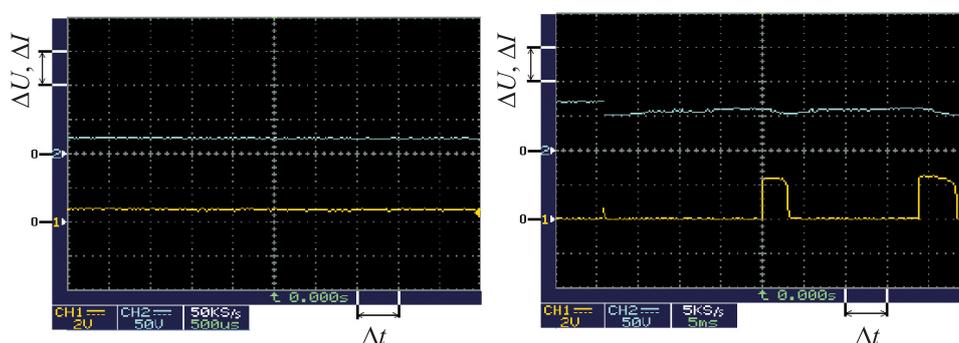


Рис. 3. Осциллограммы колебания тока и напряжения разряда между струйным анодом и алюминиевым катодом:
 $\Delta U = 500$ В, $\Delta I = 2$ А, $\Delta t = 500$ мкс

Газовые пузырьки и паро-аэрозольные включения периодически увеличивают эквивалентное сопротивление за счет уменьшения эффективного сечения и диэлектрической проницаемости, но локальная напряженность поля еще недостаточна для инициирования устойчивого газоразрядного канала.

Повышение напряжения до ~ 700 В приводит к качественно иной картине. В приконтактной области формируется тонкая газопаровая оболочка, возникающая из-за джоулева нагрева и испарения пленки электролита. Эта оболочка резко усиливает локальную напряженность поля на границе «жидкость — газ — металл» и инициирует микропробой. Электрический режим приобретает импульсный характер: регистрируются токовые импульсы амплитудой $\sim 1,0 \dots 1,2$ А и характерной длительностью до 500 мкс (рис. 3, б). Пульсации отражают автоколебательный цикл «рост газовой оболочки — пробой — частичный коллапс — восстановление проводящей пленки», на который накладываются гидродинамические возмущения струи и электрокапиллярные эффекты на ее мениске.

Существенную роль играет режим течения струи. При пониженной скорости подача переходит в струйно-капельный режим, и межкапельные зазоры формируют периодически возникающие микроразрядные промежутки. В этом случае канал зажигается между каплями вдоль траектории струи, что видно на видеоданных (см. рис. 2, а). При увеличении скорости струи и стабилизации ее формы зона максимальной напряженности смещается к поверхности катода, и разряд реализуется в приповерхностной конфигурации — в виде устойчивого конусообразного светящегося факела на кончике струи (см. рис. 2, б). Наблюдаемый желтый оттенок свечения соответствует излучению натрия в 3%-ном растворе NaCl, что дополнительно подтверждает вклад плазмохимии раствора в оптическую картину.

Механизм формирования струйного разряда на алюминии можно представить как последовательность стадий: электрохимическая активация и накопление газа/пара в приповерхностной зоне; образование тонкой газовой прослойки и локальное усиление электрического поля; инициирование микропробоя и развитие плазменного канала; частичный разогрев и деградация прослойки с последующим ее восстановлением под действием притока жидкости. Типы и формы разряда — межкапельные микропробои вдоль струи, продольный канал в теле струи и приповерхностный конусообразный факел — определяются комбинацией напряжения, скорости и устойчивости струи, диаметра сопла, зазора и электропроводности. Переход от электролитического к импульсно-плазменному режиму контролируется порогом по напряжению и тепловому состоянию контактной зоны, тогда как выбор геометрии канала задается преимущественно гидродинамикой струи и условиями формирования газопаровой оболочки у поверхности алюминия.

Эмиссионный спектр плазмы струйного разряда между электролитическим анодом и алюминиевым катодом с отождествленными линиями показан на рис. 4. В спектре уверенно регистрируются полосы OH (A–X), полосы ионной молекулы N_2^+ (B–X), а также атомарные линии H I, Na I, N I и Al I. Наличие интенсивных линий Na I в желтой области (≈ 589 нм) согласуется с использованием 3%-ного раствора NaCl и визуально наблюдаемым желтым оттенком факела, тогда как линии Al I указывают на возбуждение алюминия из приповерхностной зоны катода.

Аппаратное уширение оценивали по оптически тонкой атомарной линии Al I (669,7 нм); минимальная полуширина таких узких линий составила $\Delta\lambda_G \approx 1$ нм и далее принималась как гауссова компонента аппаратной функции. Наблюдаемая полуширина эмиссионных линий ($\Delta\lambda_F$) аппроксимировалась фойгтовым контуром, а лоренцева составляющая $\Delta\lambda_L$ (отвечающая, в частности, за давление и Штарк-уширение)

вычислялась из стандартного соотношения для связи фойгтовой, лоренцевой и гауссовой полуширин [17–18]:

$$\Delta\lambda_F \approx 0,5346 \cdot \Delta\lambda_L + \sqrt{0,2166 \cdot \Delta\lambda_L^2 + \Delta\lambda_G^2}.$$

Это позволило исключить вклад аппаратной функции из экспериментально измеренных ширин.

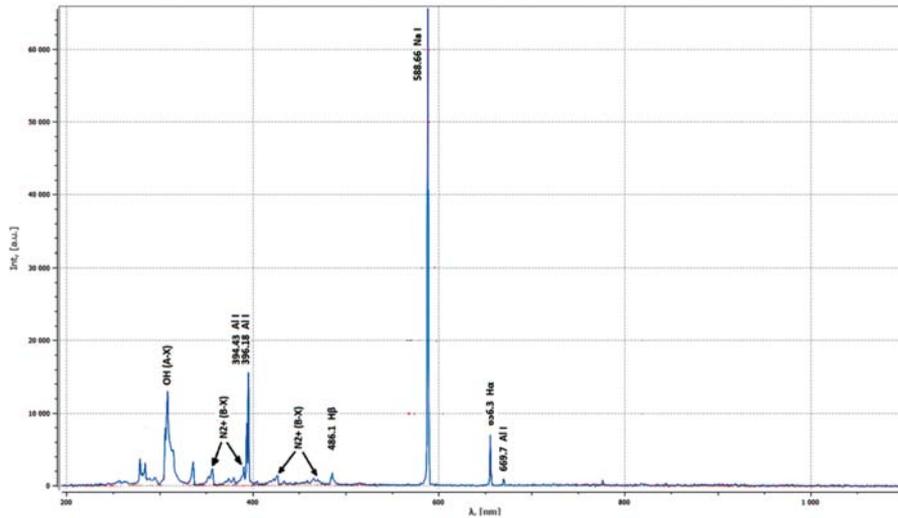


Рис. 4. Спектр излучение плазмы разряда между струйным анодом и алюминиевым катодом с отождествленными спектральными линиями

Концентрацию электронов определяли по полуширинам линий Бальмеровской серии водорода, преимущественно по H_β (как менее подверженной самопоглощению и переизлучению по сравнению с H_α). Для расчета использовали температурно-зависимое соотношение в форме справочника Г.А. Касабова [17, 18]:

$$n_e = 10^{13} (\Delta\lambda_L)^{\frac{3}{2}} \left[C_0(T) + \sum_{n=1}^m C_n(T) (\ln\Delta\lambda_L)^n \right],$$

где коэффициенты C_n брались для соответствующей линии (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты для расчета концентрации электронов по спектрам излучения водородных линий из серии Бальмера

Коэффициент C_n	H_α	H_β
C_0	671,4	36,56
C_1	-227,5	-1,45
C_2	44,72	-0,109
C_3	-2,325	0,005

Концентрация электронов, полученная по водородным линиям Бальмера

Линия из серии Бальмера	H_α	H_β
Полуширина фойгтовского контура, нм	1,054	1,983
Полуширина с учетом лоренцевской составляющей, нм	0,099	1,1452
Концентрация электронов, см^{-3}	$6,64 \cdot 10^{15}$	$1,76 \cdot 10^{16}$

Такой подход обеспечивает оценку n_e при атмосферном давлении, где доминирует линейный Штарк-механизм уширения линий водорода.

Получены значения концентрации электронов n_e плазмы разряда, генерируемого между струйным анодом и алюминиевым катодом (табл. 2). Для линии H_β измеренная полуширина фойгтовского контура составила $\Delta\lambda_F(H_\beta) = 1,983$ нм. После учета аппаратной составляющей получена лоренцева полуширина $\Delta\lambda_L(H_\beta) = 1,1452$ нм. Подстановка в формулу Касабова дает $n_e \approx 1,76 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Независимая оценка по H_α ($\Delta\lambda_F(H_\alpha) = 1,054$ нм; $\Delta\lambda_L(H_\alpha) = 0,099$ нм) приводит к меньшему значению $n_e \approx 6,64 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с ожидаемым влиянием самопоглощения и изменением излучательной способности в H_α и подтверждает предпочтительность H_β для количественной диагностики.

Состояние поверхности катода до и после воздействия. До воздействия струйного электрического разряда поверхность алюминиевого катода характеризуется наличием естественной оксидной пленки и сравнительно однородным микрорельефом, типичным для прокатного материала. После обработки разрядом, по данным визуальных наблюдений и диагностик, не выявлено признаков подплавления или макроскопического разрушения поверхности. Зафиксированные температурные уровни (до ~ 64 °С) соответствуют щадящему режиму локальной плазменно-жидкостной модификации, при котором происходит активация и изменение состояния оксидной пленки и приповерхностного слоя без термического повреждения основы. Присутствие линий Al I в спектре излучения указывает на вовлечение атомов алюминия в плазменные процессы, что может быть связано с модификацией оксидной пленки и приповерхностного слоя катода.

Термограммы поверхности струйного анода ($a-e$) в процессе горения электрического разряда представлены на рис. 5. В зоне формирования факела на контакте струи с алюминиевым катодом фиксируется локальный максимум температуры $T \approx 64$ °С. Вне плазменной зоны температура убывает к фоновому уровню, близкому к комнатному. Наблюдаемая картина соответствует локальному джоулеву нагреву и тепловыделению в приповерхностной газопаровой оболочке при одновременном интенсивном теплоотводе конвекцией

и испарением. Небольшая асимметрия изотерм вдоль оси струи и колебания уровня температуры на 2...3 °С связаны с переходом к струйно-капельному режиму и пульсациями разряда. Достигнутые температуры далеки от подплавления алюминия, но достаточны для ускорения десорбции, изменения состояния оксидной пленки и формирования градиентов свойств в приповерхностном слое.

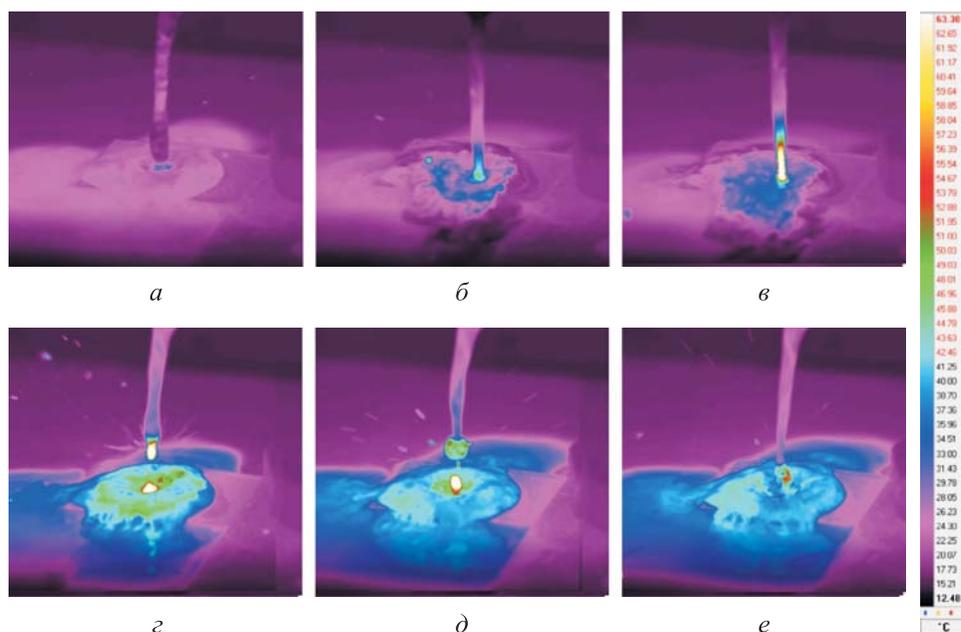


Рис. 5. Термограммы поверхности струйного анода в процессе горения электрического разряда

Закключение. Выполненные исследования показали, что струйный электрический разряд с жидкой плазмообразующей средой при взаимодействии с алюминием устойчиво реализуется в диапазоне параметров $U = 0,1 \dots 1,1$ кВ, $p \approx 10^5$ Па (атмосферное), $v_a = 0,5 \dots 0,7$ м/с, $d = 2$ мм, $l = 15$ мм, $\sigma = 0,10 \dots 0,12$ Ом⁻¹·см⁻¹ и $T = 12 \dots 64$ °С, причем наблюдаются две типовые геометрии разрядного канала: продольная вдоль тела струи и приповерхностная в форме конусообразного факела на границе «струя — алюминий». Установлен пороговый переход от электрохимического режима при 200 В (пузырькообразование, квазистационарный ток 0,8 А, без формирования разряда) к импульсно-плазменному при 700 В с токовыми импульсами 1...1,2 А длительностью до 500 мкс; ключевую роль играет газопаровая прослойка на границе «жидкость — газ — металл», задающая автоколебательный цикл «рост — пробой — коллапс — восстановление». По данным эмиссионной спектроскопии выявлен смешанный состав плазмы

(полосы OH(A-X) , N_2^+ (B-X) и линии H I, Na I, N I, Al I); желтый отенок факела обусловлен резонансными линиями Na I (≈ 589 нм), а присутствие Al I указывает на вовлечение материала катода в излучательную динамику. Оценка концентрации электронов по Штарк-уширению линий Бальмера с учетом аппаратной функции дала характерные для атмосферных микроплазм значения: по H_β $\Delta\lambda_L = 1,14$ нм, $n_e \approx 1,76 \times 10^{16}$ см^{-3} ; по H_α $\Delta\lambda_L = 0,099$ нм, $n_e \approx 6,64 \times 10^{15}$ см^{-3} , при этом диагностика по H_β предпочтительнее из-за меньшего влияния самопоглощения. Термография зафиксировала локальный максимум температуры струйного анода в зоне контакта $T \approx 64$ °C со спадом к комнатному фону; такие температуры ниже порога подплавления алюминия и достаточны для контролируемой модификации оксидной пленки и приповерхностного слоя без термического повреждения основы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20147, <https://rscf.ru/project/25-29-20147/>

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гайсин А.Ф., Кашапов Н.Ф. Исследование физических процессов в зоне газового разряда между жидкими электродами. *ПМТФ*, 2018, т. 59, № 4 (350), с. 19–22. DOI: 10.1134/S002189441804003X
- [2] Gaisin A.F., Son E.E., Efimov A.V., Gil'mutdinov A.Kh., Kashapov N.F. Spectral diagnostics of plasma discharge between a metal cathode and liquid anode. *High Temperature*, 2017, vol. 55, pp. 457–460. DOI: 10.1134/S0018151X17030087
- [3] Kashapov N.F., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, paper 494003. DOI: 10.1088/1361-6463/aae334
- [4] Bruggeman P., Kushner M.J., Locke B.R. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Sci. Technol*, 2016, vol. 25, art. 053002. DOI: 10.1088/0963-0252/25/5/053002
- [5] Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Мониц А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И. и др. Создание неравновесной плазмы в гетерофазных средах газ–жидкость при атмосферном давлении и демонстрация ее возможностей для стерилизации. *Физика плазмы*, 2006, т. 32, № 12, с. 1142–1152. DOI: 10.1134/S1063780X06120087
- [6] Баринов Ю.А., Школьник С.М. Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления. *Журнал технической физики*, 2016, т. 86, № 11, с. 155–158. DOI: 10.21883/jtf.2016.11.43833.1833
- [7] Самитова Г.Т., Гайсин А.Ф., Мустафин Т.Б., Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Весельев Д.А., Гайсин Ф.М. Некоторые особенности многоканального разряда в трубке при атмосферном давлении. *Теплофизика высоких температур*, 2011, т. 49, № 5, с. 788–792. DOI: 10.1134/S0018151X11050208

- [8] Сироткин Н.А., Титов В.А. Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока. *Прикладная физика*, 2016, № 6, с. 25–31.
- [9] Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Басыров Р.Ш., Гайсин Аз.Ф., и др. Электрические разряды переменного тока в газожидкостной среде раствора хлорида натрия при атмосферном давлении. *Терлофизика высоких температур*, 2021, т. 59, № 4, с. 634–637.
DOI: 10.31857/S0040364421040219
- [10] Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Желтухин В.С., Сон Э.Е. Высокочастотный разряд со струйным электролитическим электродом. *Физика плазмы*, 2022, т. 48, № 1, с. 71–78. DOI: 10.31857/S1063780X22010061
- [11] Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е., Петряков С.Ю. Высокочастотный емкостной разряд с проточными жидкими электродами при понижении давления. *Физика плазмы*, 2017, т. 43, № 7, с. 625–633.
DOI: 10.1134/S1063780X17070054
- [12] Аверин К.А., Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. Некоторые результаты исследования СВЧ-разряда в жидких тяжелых углеводородах. *Прикладная физика*, 2016, № 2, с. 41–45.
- [13] Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р., Купутдинова А.И., Марданов Р.Р. Плазменно-жидкостной рециклинг металлического порошка для 3D печати. *Физика и химия обработки материалов*, 2023, № 1, с. 37–44.
DOI: 10.30791/0015-3214-2023-1-37-44
- [14] Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х. Электролитно-плазменная обработка изделия, изготовленного с применением аддитивной технологии. *Физика и химия обработки материалов*, 2020, № 2, с. 28–34.
DOI: 10.30791/0015-3214-2020-2-28-34
- [15] Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х., Мирханов Д.Н. Электролитно-плазменная обработка поверхности детали, изготовленной с применением аддитивной технологии. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2018, № 2 (752), с. 69–74. DOI: 10.1007/s11041-018-0250-1
- [16] Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин А.Ф., Басыров Р.Ш., Кашапов Н.Ф. Разряд постоянного тока между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом. *ПМТФ*, 2022, т. 63, № 5 (375), с. 20–32.
DOI: 10.1134/S0021894422050029
- [17] Касабов Г.А. *Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы*. Москва, Атомиздат, 1973, с. 8.
- [18] Очкин В.Н. *Спектроскопия низкотемпературной плазмы*. Москва, Физматлит, 2006.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Петряков С.Ю., Бельгибаев Э.Р., Каюмов Р.Р., Гайсин А.Ф. Струйный электрический разряд с жидкой плазмообразующей средой при взаимодействии с алюминием. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 2. EDN BNDWLP

Петряков Сергей Юрьевич — ассистент кафедры технической физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. Область научных интересов: физика газового разряда.
e-mail: serioga_com@mail.ru

Бельгибаев Эдуард Рустемович — ассистент кафедры технической физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. Область научных интересов: физика газового разряда.
e-mail: erbelgibaev@kai.ru

Каюмов Рушан Рашитович — доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры технической физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. Область научных интересов: физика газового разряда. e-mail: rushan_250189033@mail.ru

Гайсин Алмаз Фивзатович — д-р техн. наук, доцент по специальности «Физика плазмы», заведующий кафедрой технической физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. Область научных интересов: физика газового разряда. e-mail: almaz87@mail.ru

Jet Electrical Discharge with a Liquid Plasma-Forming Medium in Interaction with Aluminum

© S.Yu. Petryakov, E.R. Belgibaev, R.R. Kayumov, A.F. Gaisin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, 420111, Russian Federation

The results of an experimental and theoretical study of a jet electrical discharge with a liquid plasma-forming medium interacting with aluminum are presented. The discharge was realized in the configuration “jet anode–aluminum cathode” at atmospheric pressure within different ranges of such parameters as voltage, jet velocity (jet diameter 2 mm), solution specific electrical conductivity, and temperature. Based on high-speed visualization data, two typical discharge channel geometries were identified: a longitudinal channel along the jet body and a near-surface channel in the form of a cone-shaped luminous volume at the liquid–gas–metal interface. A threshold transition from the electrochemical regime (approximately 200 V, bubble formation without discharge initiation) to the pulsed plasma regime (approximately 700 V) was revealed, characterized by current pulses with amplitudes of 1.0–1.2 A and durations of up to 500 μs. Emission spectroscopy revealed the presence of OH (A–X) bands, N₂⁺ (B–X) bands, and H I, Na I, N I, and Al I spectral lines. The electron concentration was estimated from Stark broadening of hydrogen lines. Thermographic measurements recorded a local temperature maximum of the jet anode in the contact zone of about 64 °C, followed by a decrease toward ambient temperature.

Keywords: jet electrical discharge, liquid plasma-forming medium, aluminum, emission spectroscopy, Stark broadening, electron density, thermography, local surface modification

The study was funded by the Russian Science Foundation Grant No. 25-29-20147.

Available at: <https://rscf.ru/project/25-29-20147/>

REFERENCES

- [1] Gaisin A.F., Kashapov N.F. Issledovanie fizicheskikh protsessov v zone gazovogo razryada mezhdru zhidkimi elektrodami [Investigation of physical processes in the gas discharge zone between liquid electrodes]. *PMTF — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2018, vol. 59, no. 4 (350), pp. 19–22. <https://doi.org/10.1134/S002189441804003X>
- [2] Gaisin A.F., Son E.E., Efimov A.V., Gil'mutdinov A.Kh., Kazhapov N.F. Spectral diagnostics of plasma discharge between a metal cathode and liquid anode. *High Temperature*, 2017, vol. 55, pp. 457–460. <https://doi.org/10.1134/S0018151X17030087>
- [3] Kashapov N.F., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, art. 494003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae334>
- [4] Bruggeman P., Kushner M.J., Locke B.R., et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, vol. 25, art. 053002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
- [5] Akishev Y.S., Grushin M.E., Karal'nik V.B., Monich A.E., Pan'kin M.V., Trushkin N.I., et al. Sozdaniye neravnovesnoy plazmy v geterofaznykh sredakh gaz–zhidkost' pri atmosfernom davlenii i demonstratsiya ee vozmozhnostey

- dlya sterilizatsii [Creation of non-equilibrium plasma in gas-liquid heterophase environments at atmospheric pressure and demonstration of its potential for sterilization]. *Fizika Plasmy — Plasma Physics*, 2006, vol. 32, no. 12, pp. 1142–1152. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06120087>
- [6] Barinov Yu.A., Shkolnik S.M. Razryad s zhidkim nemetallicheskim katodom (vodoprovodnaya voda) v potoke vozdukha atmosfernogo davleniya [Discharge with a liquid nonmetallic cathode (tap water) in an air flow at atmospheric pressure]. *Journal of Technical Physics*, 2016, vol. 86, no. 11, pp. 155–158. <https://doi.org/10.21883/jtf.2016.11.43833.1833>
- [7] Samitova G.T., Gaisin A.F., Mustafin T.B., Son E.Ye., Vesel'ev D.A., Gaisin F.M. Nekotorye osobennosti mnogokanalnogo razryada v trubke pri atmosfernom davlenii [Some features of a multichannel discharge in a tube at atmospheric pressure]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2011, vol. 49, no. 5, pp. 788–792. <https://doi.org/10.1134/S0018151X11050208>
- [8] Sirotkin N.A., Titov V.A. Eksperimental'noe issledovanie nagreva zhidkogo katoda i perenosa ego komponentov v gazovuyu fazu pod deystviem razryada postoyannogo toka [Experimental study of liquid cathode heating and transfer of its components to the gas phase under DC Discharge]. *Prikladnaya Fizika — Applied Physics*, 2016, no. 6, pp. 25–31.
- [9] Valiev R.I., Khafizov A.A., Bagautdinova L.N., Gaisin F.M., Basyrov R.Sh., Gaisin Az.F., et al. Elektricheskie razryady peremennogo toka v gazozhidkostnoy srede rastvora khlorida natriya pri atmosfernom davlenii [AC electric discharges in a gas-liquid medium of sodium chloride solution at atmospheric pressure]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2021, vol. 59, no. 4, pp. 634–637. <https://doi.org/10.31857/S0040364421040219>
- [10] Gaisin A.I.F., Gaisin F.M., Zheltukhin V.S., Son E.Ye. Vysokochastotnyy razryad so struynym elektroliticheskim elektrodom [High-frequency discharge with a jet electrolytic electrode]. *Fizika Plasmy — Plasma Physics Reports*, 2022, vol. 48, no. 1, pp. 71–78. <https://doi.org/10.31857/S1063780X22010061>
- [11] Gaisin A.I.F., Son E.Ye., Petryakov S.Yu. Vysokochastotnyy emkostnoy razryad s protochnymi zhidkimi elektrodami pri ponizhenii davleniya [High-frequency capacitive discharge with flowing liquid electrodes at reduced pressure]. *Fizika Plasmy — Plasma Physics Reports*, 2017, vol. 43, no. 7, pp. 625–633. <https://doi.org/10.1134/S1063780X17070054>
- [12] Averin K.A., Lebedev Yu.A., Shkhatov V.A. Nekotorye rezul'taty issledovaniya SVCh-razryada v zhidkikh tyazhelykh uglevodorodakh [Some results of studying microwave discharge in liquid heavy hydrocarbons]. *Prikladnaya Fizika — Applied Physics*, 2016, no. 2, pp. 41–45.
- [13] Gaisin A.F., Kayumov R.R., Kuputdinova A.I., Mardanov R.R. Plazmenno-zhidkostnoy retsikling metallicheskogo poroshka dlya 3D pechati [Plasma-liquid recycling of metal powder for 3D printing]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2023, no. 1, pp. 37–44. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2023-1-37-44>
- [14] Gaisin A.F., Gilmutdinov A.Kh. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka izdeliya, izgotovlennogo s primeneniem additivnoy tekhnologii [Electrolyte-plasma treatment of a product manufactured using additive technology]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2020, no. 2, pp. 28–34. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-2-28-34>
- [15] Gaisin A.F., Gilmutdinov A.Kh., Mirkhanov D.N. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka poverkhnosti detali, izgotovlennoy s primeneniem additivnoy tekhnologii [Electrolyte-plasma treatment of the surface of a part manufactured using additive technology]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov — Metal Science and Heat Treatment*, 2018, no. 2 (752), pp. 69–74. <https://doi.org/10.1007/s11041-018-0250-1>

- [16] Petryakov S.Yu., Mirkhanov D.N., Gaisin A.F., Basyrov R.Sh., Kashapov N.F. Razryad postoyannogo toka mezhdru metallicheskim anodom i zhidkim nemetallicheskim katodom [Direct current discharge between a metal anode and a liquid nonmetallic cathode]. PMTF — *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2022, vol. 63, no. 5 (375), pp. 20–32.
<https://doi.org/10.1134/S0021894422050029>
- [17] Kasabov G.A. *Spektroskopicheskie tablitsy dlya nizkotemperaturnoy plazmy* [Spectroscopic tables for low-temperature plasma]. Moscow, Atomizdat Publ., 1973, p. 8.
- [18] Ochkin V.N. *Spektroskopiya nizkotemperaturnoy plazmy* [Spectroscopy of low-temperature plasma]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006.

Petryakov S.Yu., Assistant of the Department of Technical Physics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests: gas discharge physics. e-mail: serioga_com@mail.ru

Belgibaev E.R., Assistant of the Department of Technical Physics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests: gas discharge physics. e-mail: erbelgibaev@kai.ru

Kayumov R.R., Associate Professor, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Physics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests: gas discharge physics.
e-mail: rushan_250189033@mail.ru

Gaisin A.F., Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor in Plasma Physics, Head of the Department of Technical Physics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests: gas discharge physics. e-mail: almaz87@mail.ru