

УДК 533.6.011:533.9:537.5

НЕВИДИМАЯ СТРУКТУРА КАТОДНОГО ПЯТНА СВАРОЧНОЙ ДУГИ С ВОЛЬФРАМОВЫМ АНОДОМ И ПЛЕНОЧНЫМ КАТОДОМ, ГОРЯЩЕЙ В ИНЕРТНОМ ГАЗЕ

© 2019 г. А. Е. Балановский*

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**E-mail: fuco.64@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2017 г.

После доработки 22.05.2018 г.

Принята к печати 05.06.2018 г.

Продемонстрирована принципиальная возможность исследования обратной стороны катодного пятна сварочной дуги с использованием высокоскоростной камеры. Впервые получены фотографии обратной поверхности катодного пятна сварочной дуги. Показано ее дискретное внутреннее строение. Выявлены отдельные структурные элементы катодного пятна. При горении сварочной дуги зафиксирован новый объект, который получил название “свободное катодное пятно”. Проведены оценки некоторых параметров катодных пятен (время жизни, диаметр лицевой и обратной сторон). Представлен новый концептуальный подход к изучению природы катодного пятна.

DOI: 10.1134/S0040364419010010

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] были представлены результаты экспериментов по определению методом автографов [2] пространственной формы и внутренней структуры катодных пятен, образующихся в процессе горения сварочной дуги на пленочных катодах. Вопросу о природе катодного пятна дугового разряда (вакуумная дуга, дуги в различных газах при атмосферном давлении, дуга высокого давления, дуга под слоем флюса и т.д.) посвящено большое количество работ [2–10]. В этих работах систематизированы и проанализированы теоретические и экспериментальные результаты с позиции физики процесса образования катодных пятен [6–10] и технологических аспектов применения в промышленности [3–5]. Но надо признать, что физическое определение катодного пятна в настоящее время отсутствует, и это связано, по-видимому, с тем, что его физические свойства изучены еще недостаточно полно [11–13]. В основном авторы различных работ пытаются объяснить природу высокой плотности тока в катодном пятне [2–13], при этом проанализированы все известные физические явления, которые могут обеспечить такие высокие плотности тока. Экспериментальные данные многочисленных работ [14–24] сводятся к констатации отдельных фактов: скорости движения катодных пятен, времени их существования, диаметра, определяемых по оптическим снимкам [14–19] или методом автографов [2, 20–23]. Для исследования динамики катодных пятен вакуумной дуги наиболее часто используются два метода: высокоскоростная фотография [7, 14–19] и анализ следов и отпечатков (метод автографов)

на поверхности катода, оставляемых катодными пятнами, с использованием оптической и электронной микроскопии [1, 7–10]. В последнее время метод автографов был модернизирован [20], что позволило изучать отдельный кратер, оставляемый на поверхности катода. Достоинства и недостатки каждого метода подробно рассмотрены в [9–11].

В работе [1] предполагается, что катодные пятна являются концентрированным источником тепла [25], следовательно, часть тепловой энергии после испарения пленки должна идти на нагрев и плавление подложки, на которую нанесена пленка; как результат такого воздействия на подложке должен остаться тепловой отпечаток катодного пятна. При экспериментальной проверке обнаружено [1], что катодное пятно сварочной дуги состоит из отдельных ячеек, имеющих субструктуру в виде множества токовых каналов. Проведены оценочные расчеты плотности тока в новых субструктурах катодного пятна сварочной дуги, которая составила 3.5×10^9 – 3.1×10^{10} А/см². Анализ полученных результатов позволил сформулировать гипотезу о существовании невидимой ранее обратной стороны катодного пятна, которое, с одной стороны, является неотъемлемой частью катода, а с другой стороны, должна существовать граница, разделяющая поверхность катода и само катодное пятно. В работе [11] отмечено, что граница катодного пятна на поверхности электрода условна, так как вдоль поверхности существует непрерывное распределение параметров, определяющих процесс токопереноса. В то же время авторы отмечают, что благодаря сильной зависимости эмиссии и степе-

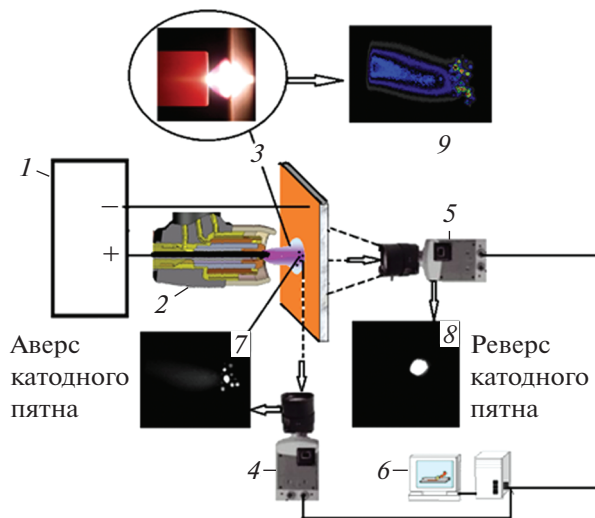


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по фиксации обратной стороны катодного пятна: 1 – источник сварочного тока; 2 – сварочная горелка; 3 – область регистрации пятна на лицевой стороне; 4, 5 – скоростные камеры; 6 – блок обработки изображений; 7, 8 – пример фото катодного пятна на лицевой и обратной сторонах стеклянной пластины; 9 – цветное фото катодных пятен на лицевой стороне.

ни ионизации плазмы от температуры эта граница может быть довольно четко определена как в экспериментах, так и при расчетах. Развивая эту идею, можно предположить, что катодное пятно имеет пространственную форму, где есть лицевая и невидимая обратная стороны пятна. Тепловые отпечатки катодного пятна, оставляемые на стекле после испарения медной пленки [1], позволяют зафиксировать их через стекло с обратной стороны.

Основная цель данной работы – создать методику визуализации обратной стороны катодного пятна и провести ее исследования. Представлены предварительные результаты экспериментальных исследований обратной стороны катодных пятен на пленочных катодах сварочной дуги, горящей в среде защитного газа (аргона).

МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В методическом плане экспериментальные работы подробно описаны в [26, 27]. Единственным отличием является размещение скоростной камеры с обратной стороны стеклянных образцов. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1, где показано размещение двух высокоскоростных камер, позволяющих одновременно регистрировать изображение лицевой (аверс) и обратной (реверс) сторон катодного пятна.

Образцы с пленочными катодами готовились методом термического испарения в вакууме [28] нанесением тонких (10–350 нм) слоев меди, золота, серебра на подложки из известково-натриево-

го стекла размером 25×60 мм толщиной 2 мм с использованием вакуумного универсального поста ВУП-5М. Напыление пленок проводилось при давлении остаточных газов $P = 1 \times 10^{-8}$ Па и температуре подложки $T = 70^\circ\text{C}$. Все подложки подвергались двойной предварительной очистке: сначала химическим травлением в растворе хромовой смеси ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - 100$ г, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 50$ г, вода дистиллированная – до литра), затем плазмохимической очисткой с использованием установки Nano Clean “Model 1070” (USA). Толщина нанесенных пленок определялась микроскопическим и гравиметрическим методами [28]. Для исследования алюминиевых пленок использовались готовые образцы из алюминиевых зеркал. Применялась сварочная дуга постоянного тока обратной полярности с током в пределах 2–60 А, которая горела вертикально между вольфрамовым неплавящимся электродом (диаметром 2.4 мм) и пленочным катодом в среде защитного газа аргона. Дуга горела стационарно. Общее время горения дуги составляло 0.03–1 с. Условия проведения эксперимента соответствуют реальному технологическому процессу сварки неплавящимся электродом (вольфрам) в среде защитного газа (аргон) на постоянном токе обратной полярности (минус на изделии), который используется в промышленности для сварки изделий из стали, алюминия, меди, титана. В международной классификации TIG (Tungsten Inert Gas) – ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа. Поскольку чаще всего в качестве материала для неплавящихся электродов применяется вольфрам, в немецкоязычной литературе принято сокращение WIG (Wolfram Inert Gas), иногда встречается обозначение GTA (GasTungsten Arc). В качестве источника питания сварочной дуги использовался стандартный промышленный сварочный источник тока с напряжением холостого хода 70 В и максимальным током 250 А. Для возбуждения сварочной дуги применялся высоковольтный искровой разряд, входящий в стандартный комплект оборудования для сварки. На участке пленки после высоковольтного импульса искра переходила в дугу. Катодное пятно начинало хаотично “бегать” по поверхности, удаляя на своем пути пленку металла и оставляя за собой четкие сквозные следы (рис. 2). Длина дуги варьировалась от 0.5 до 5 мм. Процесс горения дуги фиксировался цифровой зеркальной камерой α SONY 350. Для регистрации первой серии последовательных изображений в течение акта горения дуги использовались высокоскоростные камеры: PCO.1200hs, PCO.120c, объектив NIKON AF-S DX Zoom-Nikkor ED, КМОП (CMOS) матрица, размер пикселя – 12×12 мкм, разрешение – 1280×1024 пикселя, диапазон времени экспозиции – 1 нс – 5 с, время межкадрового просмотра – 75 нс, динамический диапазон – 59.6 дБ, спектральная чувствительность – 290–1100 нм. Максимальная скорость

съемки при максимальном разрешении $1280 \times 1024 - 501$ кадр/с. Максимальная скорость съемки при минимальном разрешении — 32000 кадр/с при 128×16 пикселей. Для регистрации второй серии экспериментов использовалась высокоскоростная камера Phantom v711, КМОП (CMOS) разрешение — 1280×800 пикселей, скорость съемки — 7530 кадр/с. Пропускная способность — 7 Гпикс/с с разрешением в 1 Мпиксель, размер пикселя — 20 микрон. Максимальная скорость съемки — 1400000 кадр/с. Минимальное время экспозиции — 300 нс. Подробно методика визуализации и обработка полученных изображений изложена в работах [26, 27]. Кроме того, учитывались методические рекомендации по оценке изображений и результаты работ различных авторов в этом направлении исследований [29–37]. Для измерения тока и напряжения использовался цифровой осциллограф TektronixTDC-1012 В. Поверхность пленочного катода после воздействия сварочной дуги исследовалась с помощью металлографического оптического микроскопа Альтами MET 1Т, сканирующего электронного микроскопа JEOL JIV-Z4500.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлено фото внешнего вида участка воздействия дуги с лицевой и обратной сторон (аверс — рис. 2а, реверс — рис. 2б) с демонстрацией расположения сварочной горелки. Хорошо видно, что в процессе горения сварочной дуги покрытие испаряется, а на стекле остаются следы от катодного пятна. Нанесенное покрытие исполняет роль защитного экрана, защищая объект съемки от мощного излучения столба дуги. Очевидно, что при съемке обратной стороны катодного пятна скоростная камера будет регистрировать только излучение, идущее от катодного пятна после того, как оно испарит пленку под собой, и его можно разложить по кадрам с целью точной интерпретации пространственных размеров катодного пятна. При проведении экспериментов получено более 500000 изображений сварочной дуги как с лицевой, так и с обратной стороны образцов. Основная трудность при анализе изображений заключалась в их интерпретации.

Регистрация первой серии экспериментов камерой PCO.1200hs. На рис. 3 представлена в виде графика покадровая разбивка формирования катодного пятна на поверхности медной пленки толщиной 100 нм. Дуга горела стационарно, сила сварочного тока — 10 А. В начальный момент (стадия 1) фиксации изображения с обратной стороны катодного пятна просматриваются контуры общего пятна нагрева в виде круга. В площади круга наблюдается четыре ярких точечных объекта и множество тусклых объектов, предположительно тоже точечных. Далее на стадии 2 картина меняется, остается только один яркий точечный объект. При этом площадь контура общего пятна



Рис. 2. Внешний вид пластинок с покрытием после горения сварочной дуги: рабочая зона съемки с лицевой (а) и обратной (б) сторон пластины.

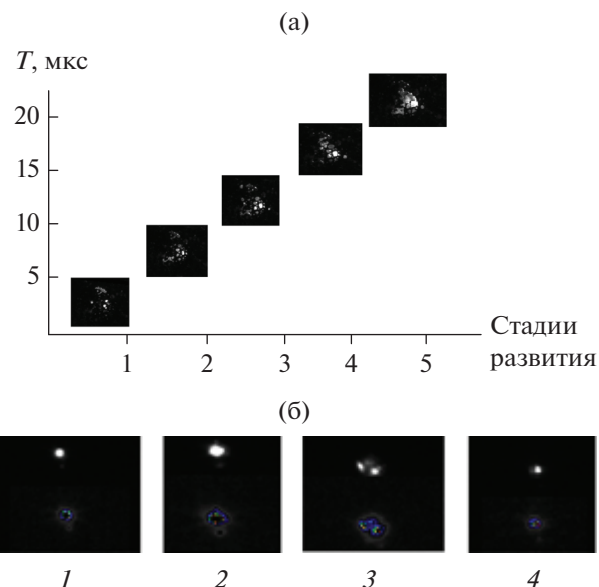


Рис. 3. Динамика развития катодного пятна на поверхности медной пленки с обратной стороны образца (а) и начальная стадия привязки пятна (б).

нагрева сохраняется, видны точечные объекты меньшей яркости, которые на предыдущей стадии ярко светились. С увеличением времени горения сварочной дуги отчетливо проступают контуры катодных пятен в площади пятна нагрева. На стадиях 3 и 4 площадь пятна нагрева покрыта яркими точечными объектами и по мере испарения пленки под катодными пятнами видны кусочки пленки, которые не попали в зону воздействия катодных пятен. Вокруг ярко светящихся точечных объектов хорошо видны темные контуры медной пленки. На стадии 5 диаметр светящихся объектов увеличился, большая часть медной пленки в контуре пятна нагрева испарилась.

На рис. 3б представлены результаты фиксации начального этапа образования катодного пятна, а именно появление первого изображения с обратной стороны. Сила сварочного тока — 20 А, толщина медной пленки — 110 нм. Использовались черно-белое и цветное изображения с фильтром градиента плотности яркости. Черно-белые и идентичные им цветные изображения для наглядности совмещены на одном снимке. На рис. 3б (кадры 1 и 2) представлены два катодных пятна из разных серий экспериментов, снятых в разные

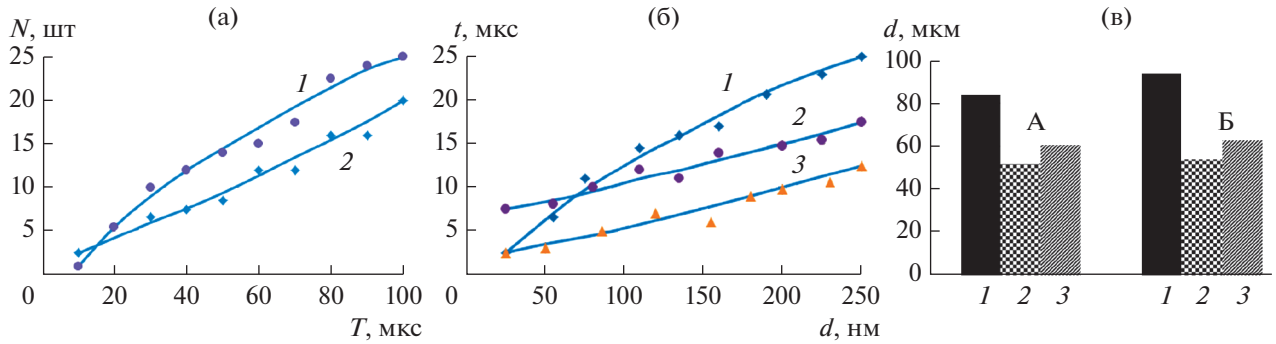


Рис. 4. Экспериментальные зависимости, полученные при визуализации обратной стороны катодного пятна: (а) – зависимость числа катодных пятен от времени экспозиции: 1 – пленка алюминия, 2 – пленка меди; (б) – зависимость средней продолжительности жизни катодного пятна от толщины пленки: 1 – алюминий, 2 – медь, 3 – серебро; (в) – сравнительная гистограмма соотношения диаметров катодного пятна при толщине медной пленки 250 (А) и 350 нм (Б): 1 – средний диаметр катодного пятна с лицевой стороны, 2 – с обратной стороны, 3 – средний диаметр теплового отпечатка катодного пятна на стекле.

интервалы времени. Начальный этап формирования катодного пятна совпадает. Черно-белое изображение показывает четкие контуры обратной стороны одного катодного пятна. Цветное изображение дает дополнительную информацию о том, что рядом находится еще один объект, более тусклый, чем основной. Однако он находится в пределах основного объекта съемки – катодного пятна. Более того, видны симметричные лучи, исходящие в разные стороны из серого контура цветного изображения. Разбегающиеся лучики – это следы катодных пятен по поверхности пленки с лицевой стороны. Пленка под ними не испарилась, но термический след от их движения зафиксирован оптической системой в виде серого фона на цветном снимке при съемке с обратной стороны образца. Подобные структуры приведены в работе [1]: на поверхности пленки есть катодное пятно (центральное), и от него в стороны почти симметрично разбегаются извилистые треки (других катодных пятен) неправильной формы.

На рис. 3б показана динамика развития катодного пятна, оно делится на два ярких пятна (кадр 3) почти круглой формы. На цветном изображении на сером фоне видно небольшое точечное пятно. По всей видимости, это пятно только начинает формироваться на лицевой поверхности образца, и с обратной стороны виден только тепловой отпечаток в связи с изменением температуры медной пленки. Затем два пятна гаснут, и рождается новое пятно (кадр 4), которое раньше только просматривалось. От него на цветном изображении тоже видно отделившееся новое формирующееся пятно (маленькая серая точка под цветным пятном). Статистическая обработка результатов съемки обратной стороны катодного пятна (более 100000 кадров) на данном этапе эксперимента позволила определить диапазон средних диаметров одиночного катодного пятна (ярко светящегося объекта) стационарно горящей дуги, который составил $d = 50\text{--}80$ μm . Диаметр формиру-

щегося пятна по результатам обработки серых зон на цветном фото – 5–15 μm .

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости некоторых параметров при исследовании обратной стороны катодного пятна. Согласно представлениям, развитым в работе [2], важное значение для анализа структуры катодного пятна имеет оценка времени их жизни. Проведенный анализ результатов видеоклипов дает времена жизни катодных пятен между 18 и 75 μs . Авторы работы [11] считают, что время существования пятна первого типа, т.е. время между двумя последующими делениями, не зависит от тока и увеличивается с ростом скорости нарастания тока. Для медного катода при $dI/dt = 10^5$ А/с время жизни пятна составляет 7.5 μs , при $dI/dt = 6 \times 10^5$ А/с оно равно 10.2 μs , а при $dI/dt = 6 \times 10^6$ А/с – 20 μs . Длительность существования режима горения дуги, при котором на катоде наблюдаются только пятна первого типа, зависит от теплофизических параметров материала катода и тока разряда [11, 30–37]. Автор работы [2] считает, что для более точного определения времени жизни можно оценить динамику роста количества катодных пятен.

В данной работе проведены исследования с учетом положений, описанных выше. Установлено, что с увеличением времени экспозиции количество катодных пятен возрастает (рис. 4а). На время жизни катодных пятен оказывает влияние толщина пленки (рис. 4б). Во всех случаях при равной толщине пленки, силе тока и длительности горения разряда средняя продолжительность жизни катодных пятен возрастает. Сравнение диаметров катодных пятен, определяемых по оптическому снимку с лицевой и обратной сторон катодного пятна, с измерением отпечатков (автографов), оставляемых на поверхности стекла, представлено на рис. 4 для различных толщин пленки меди (250, 350 нм). Выборка при сравнительном анализе составила восемь образцов, где четко удалось сопоставить результаты видеоряда

с автографами на стекле. Анализировать полученные результаты (рис. 4в) на данном этапе исследований рано, так как, по мнению автора, экспериментальных результатов для статистики еще недостаточно, а методика исследований только формируется. Отметим только факт минимального размера катодного пятна, получаемого при съемке с обратной стороны, по сравнению с классическими методами исследований.

На рис. 5 представлены результаты съемки обратной стороны катодного пятна при изменении длины дуги. Сила сварочного тока составляла 20 А. Толщина пленки – 100 нм. Время горения дуги – 0.3 с. С увеличением длины дуги перемещения и ветвистость катодного трека усложняются. Это объясняется увеличением напряжения на дуге. Известно [2], что в стадии увеличения напряжения усложняется поведение катодного пятна, а именно элементарных ячеек, входящих в его состав. Согласно [2], это является признаком форсирования процессов дугового цикла в пределах этих ячеек. На фото (рис. 5) видно, что необходимое число ячеек создается не сразу, а путем нескольких циклов деления. Процессу деления предшествуют увеличения в поперечном размере трека при движении пятна. Обращает на себя внимание факт локального испарения пленки в местах движения ячейки катодного пятна. Особенно это заметно на рис. 5в. Черные места в площади катодного пятна – это пленка, которая не испарилась, а катодное пятно просто обошло это место. Есть места на снимке, где катодные пятна обгибают участок пленки. На цветном снимке в нижней части черные области (кусочки пленки) хорошо просматриваются. Полученные фото обратной стороны катодного пятна (рис. 5) практически совпадают с фотографиями автографов, представленными в работе [2] на рис. 71. В [2] отмечается, что с увеличением толщины пленки след пятна становится крайне неоднородным по ширине и на обнаженных участках стекла остаются отдельные вкрапления непроплавленного металла в виде островов, свидетельствующих о наличии в пятне нескольких ячеек. Такой характер поведения катодного пятна указывает на то, что доставляемая катоду мощность претерпевает изменения во времени за счет изменения режима существования ячеек. Возможно, неоплавленные участки пленки соответствуют моменту деления ячейки либо замедлению движения [2].

На рис. 6 представлены результаты визуализации внутренней структуры обратной стороны катодного пятна, полученные на медной пленке толщиной 350 нм. Сила сварочного тока составляла 30 А, длина дуги – 2 мм, время горения – 1 с. Первое, что обращает на себя внимание, – это контрастность изображения извилистых треков на черно-белом фото. Изображение можно разделить на две зоны: ярко светящуюся, где, по всей видимости, находится катодное пятно (в момент съемки), и слабо светящуюся, где пятно было

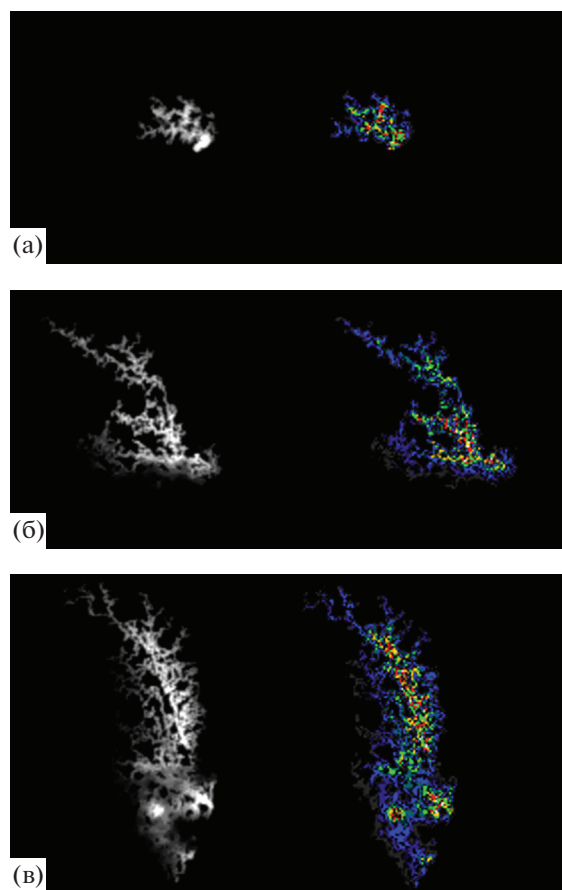


Рис. 5. Обратная сторона катодного пятна при увеличении длины дуги: (а) – 0.5 мм, (б) – 2, (в) – 3.

раньше и оставило треки. Второе, что наблюдается в классическом методе автографов [1, 2], – извилистый, хаотичный характер треков ячеек катодного пятна, оставляемый на поверхности пленки, сохраняется и при визуализации обратной стороны катодного пятна, но при этом есть “условный лидер” всех ячеек, который задает общее движение ячеек и группирует их хаотическое движение в ограниченной площади. На рис. 6 на черно-белом изображении в ярко светящейся зоне по ходу движения пятна видно, что в площади пятна проявляется внутренняя дискретная структура. На цветном снимке видна точечная структура света в площади круга, что указывает на существование внутренней дискретной структуры обратной стороны катодного пятна. Полученный результат о дискретной структуре обратной стороны катодного пятна подтверждает гипотезу внутреннего строения катодного пятна из множества токовых нитей (каналов), представленную в [1]. Необходимо отметить, что если выводы в [1] опирались на анализ косвенных фактов, базирующихся на исследовании отпечатков на поверхности медной пленки и стекла, то в данном эксперименте получено прямое подтверждение гипотезы. Для более точного обоснования дискретной

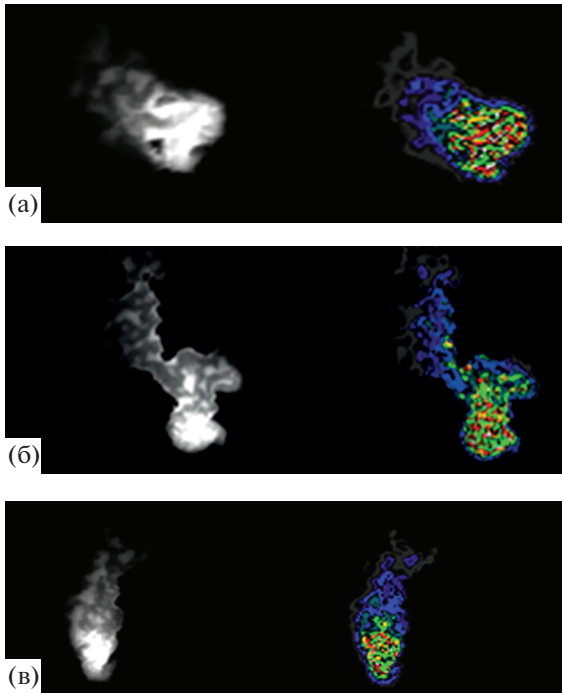


Рис. 6. Визуализация внутренней структуры обратной стороны катодного пятна в разные отрезки времени.

структуры катодного пятна было решено проверить гипотезу на медном покрытии толщиной 950 нм. При этом исходим из известного факта, что с увеличением силы тока диаметр катодного пятна увеличивается [2, 4–23]. Следующий момент отмечается в работе [11], где установлено время жизни (10^{-6} – 10^{-3} с) медленно перемещающихся по поверхности катода катодных пятен второго типа. В данной серии экспериментов сила тока была до 50 А, длина дуги составила 2.5 мм, время горения – 0.5 с. После включения дуги на поверхности образовалось одно пятно, которое совершало хаотические перемещения по поверхности пленки, оставляя четкий след на стекле после испарения пленки. Удалось зафиксировать четко обратную сторону катодного пятна (рис. 7а). На цветном фото видна его дискретная структура, при этом в процессе движения пятна заметен след по ширине дорожки меньше его диаметра. В связи с тем, что съемка велась во фронтальной плоскости, кадр с пятном нагрева (рис. 7а) не передает деталей объема. Если исходить из ширины трека, образовавшегося в ходе движения пятна, то истинный диаметр обратной стороны катодного пятна меньше, чем на фото.

Уникальное фото обратной стороны катодного пятна представлено на рис. 7б. Вверху виден светящийся факел вольфрамового электрода (положительный потенциал), внизу – факел катодного пятна, привязавшегося к поверхности пленки. Сварочная дуга горит между ними. Катодное пятно, привязавшееся к краю пленки ранее в ходе движения, уже очистило всю поверхность стекла

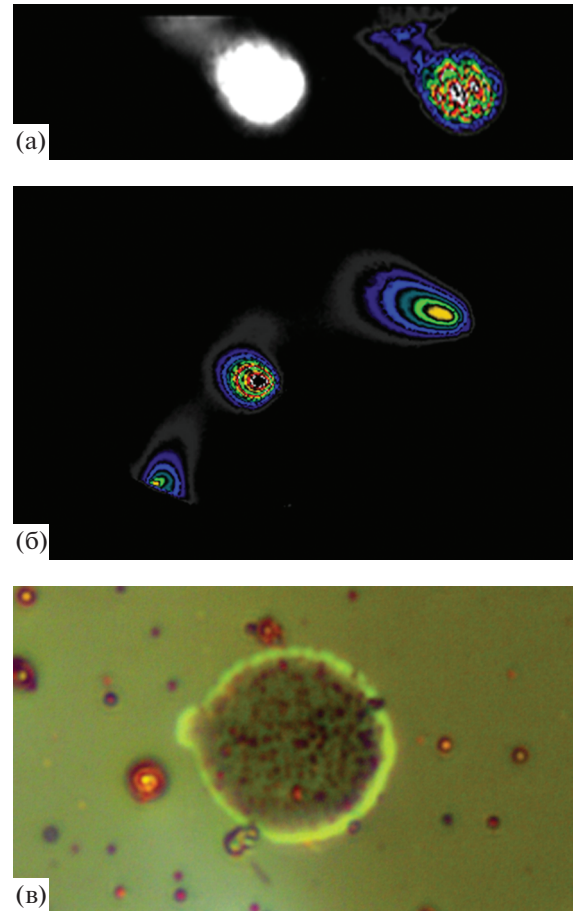


Рис. 7. Визуализация внутренней структуры обратной стороны катодного макротяна (а) и свободного катодного пятна (б), автограф свободного катодного пятна на стекле (в).

от пленки и остановилось на границе пятна нагрета, продолжая существовать на границе пленка–чистое стекло. В центре между ними, на чистой стеклянной поверхности, зафиксирован объект, который идентифицирован как “свободное” катодное пятно. В данном случае на рис. 7б представлена обратная сторона свободного катодного пятна. Почему свободное? Данное катодное пятно не является частью материала пленки и не является частью плазменного столба сварочной дуги, согласно классификации структуры катодного пятна, данного в работе [11], а находится в свободном от них пространственном положении. Возможно, частично через катодный факел на рис. 7б оно соединяется со столбом дуги, но в целом сформировано как самостоятельный объект. На рис. 7в представлен тепловой отпечаток, оставленный на стекле этим объектом. Предложенный термин “свободное катодное пятно” – это пока рабочее название, и в дальнейшем, после изучения его свойств, возможно, будет принят другой термин. Просмотрено более 50000 кадров с аналогичными результатами экспериментов,

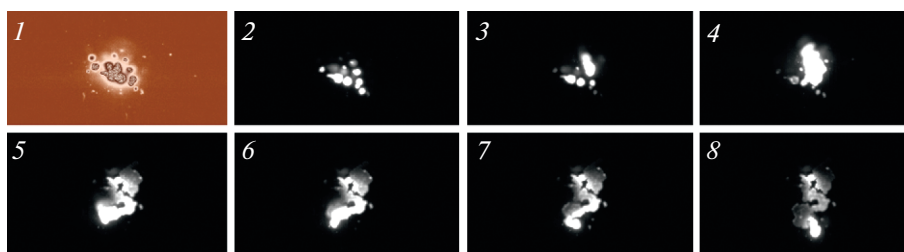


Рис. 8. Обратная сторона катодных пятен в динамике при токе 30 А, толщине серебряной пленки 120 нм (частота кадров – 79800 в секунду, время экспозиции – 0.001 с).

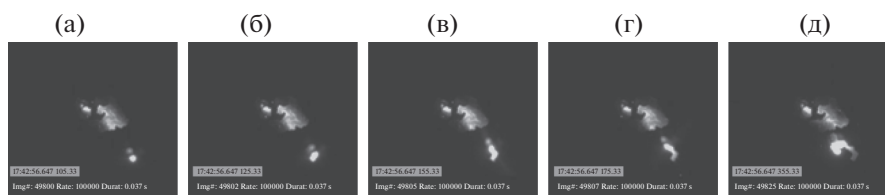


Рис. 9. Обратная сторона катодных пятен в динамике при токе 30 А и толщине медной пленки 140 нм (частота кадров – 100000 в секунду, время экспозиции – 0.0037 с).

выявлено 35 кадров, где встречаются такие объекты. Если в остальных случаях можно проследить динамику катодного пятна, то здесь такие объекты фиксируются только на одном кадре, следовательно, время их существования ничтожно мало, либо условия данных экспериментов не позволяют их изучать. Для дальнейшего изучения таких объектов необходимо усовершенствовать экспериментальную часть исследований.

Регистрация второй серии экспериментов камерой Phantom v711. Для второй серии экспериментов были подготовлены образцы с пленочными катодами из серебра и меди толщиной 100–250 нм. Условия проведения эксперимента аналогичны описанным выше. Сделана попытка детализировать динамику обратной стороны катодного пятна за счет повышения частоты покадровой съемки. Экспозиция любого кадра могла меняться в диапазоне от 50 нс до 100 мкс, временной интервал между кадрами мог задаваться в диапазоне от 50 нс до 200 мкс. Скорость съемки зависит от выбранного разрешения и в данном случае составляет 50000–100000 кадр/с. Сохраненный видеофайл разбивался на отдельные кадры, которые далее обрабатывались. Покадровая развертка изображения позволила оценить изменения на обратной стороне катодных пятен во времени и определить скорость их перемещения по поверхности катода с точностью до 10 мкс.

Следующие друг за другом кадры на рис. 8 дают представление о перемещении катодных пятен. На кадре 1 сделана компьютерная обработка изображения. Образовавшееся на первоначальном этапе привязки катодного пятна шаровидное скопление, – по всей видимости, капельная фаза из-за расплавления пленки, т.е. обратная сторона катодного пятна как источник концентрированного тепла вызывает гетерогенное плавление и диспергирование тонкой пленки на капли мик-

ронного размера [38]. Далее на кадрах 2–4 видно формирование одиночных катодных пятен, которые на кадре 4 объединились в одно большое пятно. Если в момент времени, соответствующий кадру 4, еще есть структура общего пятна, то уже на 5 видно сформированное единичное пятно на краю пленки, которое движется. На кадрах 6–8 отчетливо видно движение катодного пятна именно с обратной стороны. След от пятна и очищенная поверхность стекла от пленки хорошо заметны на кадрах 5–8. При частоте съемки 100000 кадр/с видно формирование одиночного катодного пятна на поверхности пленки меди (рис. 9). На рис. 9а в нижней части четко зафиксировано образование (привязка) начального катодного пятна, которое в дальнейшем движется, удаляя под собой пленку (рис. 9б–9д). Происходит резкое изменение направления движения (почти на 90°) на рис. 9б, 9в. В дальнейшем на рис. 9г, 9д направление движения катодного пятна меняется, но уже не так резко. Скорость его движения составила 150 м/с. Необходимо отметить, что на основании анализа экспериментальных данных в серии покадровой съемки рассчитанные значения скорости движения не совсем корректные, так как катодное пятно движется дискретно и на каждом участке движения его скорость не является постоянной, а резкое изменение направления движения (почти без инерционности) пока не поддается теоретическому объяснению.

Качественное описание новой концепции природы катодного пятна. Полученные в ходе экспериментов первые изображения обратной стороны катодного пятна были обработаны при помощи известных компьютерных программ, использовались фильтры рельефа и др. Это позволило получить новую качественную информацию о внутренней структуре обратной стороны катодного пятна. На

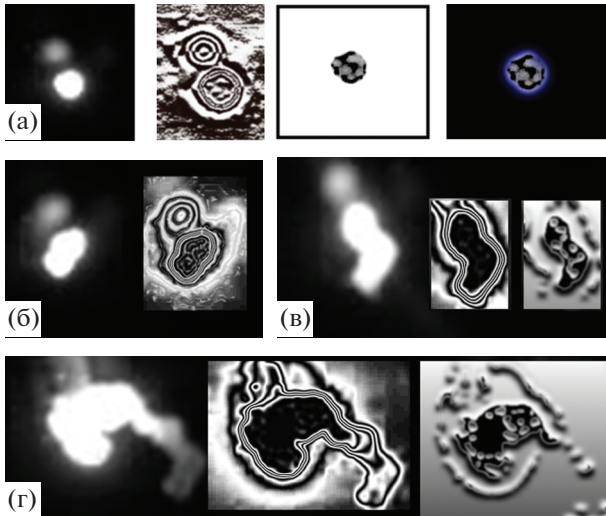


Рис. 10. Компьютерная обработка обратной стороны катодных пятен на медной пленке с рис. 9.

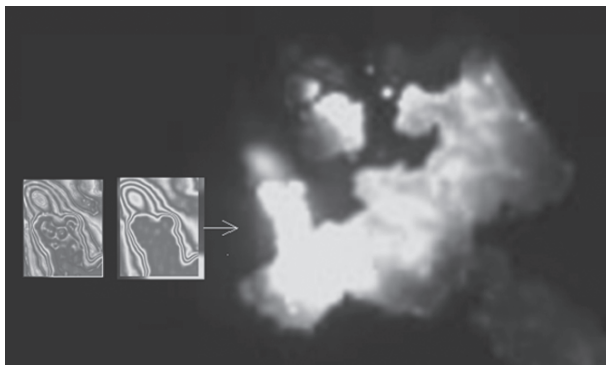


Рис. 11. Компьютерная обработка обратной стороны катодных пятен в центральной зоне привязки сварочной дуги.

рис. 10а показана внутренняя структура обратной стороны первичного катодного пятна кадра из рис. 9а. Видно, что на этапе привязки катодное пятно имеет форму круга, внутри которого наблюдаются дополнительные образования (сегменты, вероятнее всего, круглой формы). В целом катодное пятно чем-то (по цветовому распределению участков плотности яркости в площади пятна) напоминает футбольный мяч. Площадь участков внутренней структуры обратной стороны катодного пятна существенно меньше площади свечения до обработки. Можно предположить, что именно эти сегменты внутренней структуры пятна и создают столь интенсивное свечение. На рис. 10б показана внутренняя структура обратной стороны катодного пятна (рис. 9а), которое начало движение (рис. 9б). Видно, что произошли изменения в структуре: часть уже “старого” пятна (рис. 10а) еще продолжает существовать, а новая часть катодного пятна начинает двигаться в сторону. При этом на фото 10б (без обработки) виден общий яркий фон как будто бы большого по площади катодного пятна, но в реальности это не так.

Далее происходит резкое изменение в движении пятна (рис. 10в) (обработка фото рис. 9в). Внешние контуры светящегося объекта есть не что иное, как граница контакта катодного пятна с краями пленки. Внутренняя структура обратной стороны катодного пятна четко зафиксирована и представлена криволинейными углублениями вытянутой и округлой формы. На рис. 10г это еще более детально представлено, особенно четко видна периферийная граница катодного пятна, где уже нет пленки, а также пройденный след, который полностью чистый и не содержит остатков пленки. На рис. 11 показано, как происходит движение катодного пятна. По-видимому, это не дискретное движение, как принято считать [8–11], так как механизм движения больше напоминает движение амeboидной клетки [39]. Известно [39], что амeboидное движение — это перемещение клеток по твердой поверхности с помощью временно образующихся на поверхности клетки выростов, носящих название “псевдоподии” (т.е. ложноножки). В данных экспериментах зафиксирован именно такой механизм передвижения катодного пятна, когда сначала на поверхности пленки образуется небольшое светящееся пятно, которое связано с основным массивным пятном тонким (типа “жгута”) каналом небольшой светимости, куда в дальнейшем перемещается основное пятно. Однако данное положение требует дальнейшего экспериментального изучения и является пока предварительным наблюдением, относящимся только к данной серии экспериментов.

Отдельно необходимо рассмотреть результат, представленный на рис. 7б. На первый взгляд, он не возможен с позиции теории электричества, и его следует отнести к методической ошибке экспериментальной методики. В то же время, исходя из физики эмиссии электронов из твердого тела в дуговом разряде, процесс эмиссии в силу внутренней инерционности не прекращается после отключения тока [2, 9, 10]. Катодное пятно может существовать какое-то время на поверхности катода и после отключения тока. Такой факт экспериментально зафиксирован при изучении процесса разрушения вольфрамового катода при сварке алюминия на прямой полярности. В теории нет прямого запрета на существование такого объекта (рис. 7б), так как этот случай вообще не рассматривался. Всегда считалось, что катодные пятна — это результат изменения агрегатного состояния материала катода, и делались попытки теоретически описать состояние материала в нем путем последовательных переходов: твердое тело — жидкость — пар — плазма. Возможно, этого недостаточно, чтобы понять природу катодного пятна, и следует рассматривать его как функциональный элемент, главная функция которого состоит в обеспечении высокой плотности электрического тока и эмиссии электронов в дуговой промежутке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана принципиальная возможность изучения обратной стороны катодного пятна сварочной дуги. Описана экспериментальная методика ее, и представлены результаты визуализации. Получены экспериментальные зависимости средней продолжительности жизни катодного пятна от толщины пленки для различных материалов пленочных катодов при исследовании с обратной стороны. Экспериментально определено количество катодных пятен, фиксируемых с обратной стороны, в зависимости от времени экспозиции. Проведены сравнения результатов исследований геометрических размеров катодного пятна, получаемых при помощи классических и предлагаемого методов. Впервые представлены результаты экспериментов, визуализирующих свободное катодное пятно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балановский А.Е.* Структура катодного пятна сварочной дуги с неплавящимся электродом // ТВТ. 2018. Т. 56. № 1. С. 3.
2. *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
3. *Лесков В.Г.* Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 334 с.
4. *Мазель А.Г.* Технологические свойства сварочной дуги. М.: Машиностроение, 1969. 178 с.
5. *Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
6. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 734 с.
7. *Anders A.* Cathodic Arcs. From Fractal Spots to Energetic Condensation. Springer, 2008. 450 p.
8. *Месяц Г.А.* Эктон в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
9. *Раховский В.И.* Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, 1970. 536 с.
10. Вакуумные дуги. Теория и приложения / Под ред. Лафферти Дж. М.: Мир, 1982. 432 с.
11. *Любимов Г.А., Раховский В.И.* Катодное пятно вакуумной дуги // УФН. 1978. Т. 125. № 4. С. 665.
12. *Бейлис И.И.* Катодные пятна на металлических электродах вакуумного дугового разряда // ТВТ. 1977. Т. 15. № 5. С. 965.
13. *Эккер Г.* Теоретическое исследование катодного пятна в вакууме // ТВТ. 1978. Т. 16. № 6. С. 1297.
14. *Juttner B.* On the Variety of Cathode Craters of Vacuum Arcs and the Influence of the Cathode Temperature // Physica. C. 1982. V. 114. P. 225.
15. *Juttner B.* Nanosecond Displacement Times of Arc Cathode Spots in Vacuum // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 836.
16. *Vogel N., Juttner B.* Measurements of the Current Density in Arc Cathode Spots From the Zeeman Splitting of Emission Lines // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 922.
17. *Juttner B.* The Dynamics of Arc Cathode Spots in Vacuum // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 516.
18. *Juttner B., Kleberg I.* The Retrograde Motion of Arc Cathode Spots in Vacuum // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 2025.
19. *Jüttner B.* Cathode Spots of Electrical Arcs (Topical Review) // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 103.
20. *Puchkarev V.E., Myrzakaev N.M.* Cathode Spot Initiation Under Plasma // J. Phys. D: Appl. Phys. 1990. V. 23. P. 26.
21. *Daalder J.E.* Random Walk of Cathode Arc Spots in Vacuum // J. Phys. D: Appl. Phys. 1983. V. 16. P. 17.
22. *Daalder J.E.* Components of Cathode Erosion in Vacuum Arcs // J. Phys. D: Appl. Phys. 1976. V. 9. P. 2379.
23. *Daalder J.E.* Erosion Structures on Cathodes Arced in Vacuum // J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. V. 12. P. 1769.
24. *Beilisy I., Djakovz B.E., Juttner B., Pursch H.* Structure and Dynamics of High-Current Arc Cathode Spots in Vacuum // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. V. 30. P. 119.
25. *Балановский А.Е.* Упрочнение поверхности катода при взаимодействии с катодными пятнами дугового разряда // ТВТ. 1993. Т. 31. № 2. С. 328.
26. *Балановский А.Е.* Визуализация процесса нагрева и плавления металла в анодной области при дуговом разряде с неплавящимся электродом // ТВТ. 2016. Т. 54. № 5. С. 663.
27. *Балановский А.Е.* Возможности цифровой визуализации процесса нагрева и плавления металла при дуговом разряде с неплавящимся электродом // Сварочное производство. 2016. № 6. С. 31.
28. *Минайчев В.Е.* Нанесение пленок в вакууме. М.: Высшая школа, 1989. 110 с.
29. *Прозоров Е.Ф., Ульянов К.Н., Федоров В.А.* Изучение динамики катодных пятен в вакуумно-дуговом разряде с кольцевыми электродами // ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 176.
30. *Прозоров Е.Ф., Ульянов К.Н., Федоров В.А., Лондер Я.И.* Изучение процесса обрыва постоянного тока во внешнем неоднородном магнитном поле // ТВТ. 2011. Т. 49. № 5. С. 649.
31. *Зимин А.М., Иванов В.А., Ютнер Б.* Динамика катодных пятен на поверхности бериллия в дуговом вакуумном разряде // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2001. № 2. С. 50.
32. *Siemroth P., Schulke T., Witke T.* Microscopic High Speed Investigations of Vacuum Arc Cathode Spots // IEEE Trans. Plasma Sci. 1995. V. 23. P. 919.
33. *Fu Y.H.* The Influence of Cathode Surface Microstructure on DC Vacuum Arcs // J. Phys. D: Appl. Phys. 1989. V. 22. P. 94.
34. *Juttner B., Djakov B., Schulke T., Siemroth P.* Dynamics of Vacuum Arc Spots at a Point Cathode // Proc. 17th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Berkeley, CA, USA. 1996. P. 123.
35. *Schiilke T., Siemroth P.* Vacuum Arc Cathode Spots as a Self-similarity Phenomenon // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24. P. 63.
36. *Siemroth P., Schiilke T., Witke T.* Investigation of Cathode Spots and Plasma Formation of Vacuum Arcs by High Speed Microscopy and Spectroscopy // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. P. 571.
37. *Sato A., Iwao T., Yumoto M.* Relation between Surface Roughness and Number of Cathode Spots of a Low-Pressure Arc // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. V. 17. P. 5.
38. *Громов Д.Г., Гаврилов С.А.* Проявление гетерогенного механизма при плавлении малоразмерных систем // ФТТ. 2009. Т. 51. № 10. С. 2012.
39. *Романовский Ю.М., Теплов В.А.* Физические основы клеточного движения. Механизмы самоорганизации амебоидной подвижности // УФН. 1995. Т. 165. № 5. С. 555.