

Анализ результатов микроскопических исследований и измерения акустических характеристик показал высокую чувствительность и эффективность спектрально-акустического метода (рис. 5) для оценки изменений микроструктуры и полей внутренних напряжений.

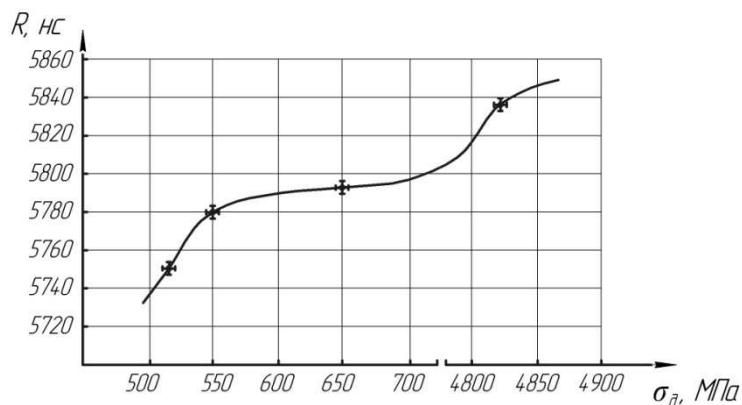


Рис. 5. Зависимость времени задержки волн Релея – R от среднего по материалу значения моментных напряжений – σ_{δ}

Литература.

1. Митенков, Ф.М. О новом методе контроле повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно-программных средствах для ее реализации / Митенков Ф.М., Углов А.Л., Пичков С.Н., Попцов В.М. // Проблемы машиноведения и надежности машин, 1998. – №3. – С.3–9.
2. Абабков, Н. В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля / Н. В. Абабков, А. В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов и др. // Вестн. КузГТУ. 2010. – № 5. – С. 101–106.
3. Углов, А.Л. Новая автоматизированная система неразрушающего контроля прочности и надежности элементов машин и конструкций / А. Л. Углов, В. М. Попцов // Машиностроитель, 1993. – №11. – С.2–4.
4. Смирнов, А. Н. Комплексный подход к оценке работоспособности элементов энергетического оборудования / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Извест. Сам. науч. центра РАН, 2010, – Т. 12, №1 (2). – С.520–524.
5. Смирнов, А. Н. Применение магнитошумового метода контроля для оценки качества наплавленного металла / А. Н.Смирнов, Н. В. Абабков // сб. науч. тр. Всероссийской конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов», ИрГТУ. – Иркутск, 2011. – С. 194–198.

МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

А.П. Степанов, ст. преподаватель, Ю.В. Соткина, инж.

*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451) 5-09-06
E-mail: apsuti@rambler.ru*

Экспериментально установлено, что свойства электрической дуги определяются процессами в небольшой, ярко светящейся области на катоде. Эта область получила название катодного пятна и включает в себя активную часть поверхности катода, нагретую до температур, намного превышающих температуру плавления, и прикатодную плазму, образующуюся в результате испарения активной части электрической дуги.

Катодные пятна (КП) бывают 1-го типа, существующие в низком вакууме и при наличии на катоде диэлектрических пленок или различных загрязнений. КП 2-го типа, образующихся на очищенных поверхностях и при высоком вакууме. КП 3-го типа, появляющиеся при больших токах, главным образом, на катодах с высоким упругим давлением паров. Для КП 1-го типа характерны высокая скорость перемещения и низкая эрозия. Внутренняя структура КП 1-го типа состоит из зна-

чительного числа (несколько десятков) одновременно существующих ячеек. На медном катоде КП состоят из фрагментов, а фрагменты, в свою очередь, имеют внутреннюю структуру в виде одновременно существующих ячеек.

КП 2-го типа обладают скоростями перемещения на два порядка меньшими и эрозией примерно на два порядка больше, чем КП 1-го типа. Тонкая внутренняя структура в виде ячеек просматривается сложнее. КП 3-го типа малоподвижны, с большим количеством капельной фазы, существуют преимущественно на легкоплавких металлах.

В работе [1] блуждание катодного пятна, объясняется двумя причинами: асимметрией распределения магнитного поля при ячейчатой структуре катодного пятна и нарушением симметрии распределения концентрации зарядов в ионизационной области. Катодные пятна находятся в постоянном движении по поверхности катода, однако это движение кажущееся, реально происходит отмирание одних пятен и рождение других. При этом одновременно может существовать несколько пятен (ячеек), количество которых зависит от тока дуги. Перемещение пятна характеризуется как беспорядочное, хаотическое.

Важным свойством катодного пятна является наличие внутренней структуры, проявляющееся в существовании отдельных ячеек или фрагментов катодного пятна. Наличие субструктуры катодного пятна было установлено экспериментально при исследовании эрозионных структур, оставляемых вакуумной дугой на тонкопленочных катодах. По данным [2] каждая ячейка катодного пятна переносит ток, равный удвоенному пороговому току горения дуги $2i_p$. Существование ячеек проявляется в виде микрократеров в месте присутствия пятна. Ячейчатая (дискретная) микроструктура катодного пятна проявляется при самых различных условиях горения дуги (ток $1 \div 10^3$ А, время $10^{-8} \div 10^{-2}$ с, разные катодные материалы и т. д.), а также проявляется в других формах газового разряда.

В ряде работ по исследованию высоковольтных наносекундных разрядов в воздухе атмосферного давления обнаружена микроструктура токовых каналов, представляющая собой совокупность тонких каналов микронного диаметра. Так в [3] при исследовании высоковольтного диффузного разряда обнаружены микроканалы диаметром $\Delta_{mic} = 5-10 \mu m$, объединенные в скопления $N \sim 1000$ штук при среднем расстоянии $D \sim 100 \mu m$ между ними.

Аналогичная микроструктура обнаружена в искровом разряде наносекундного диапазона, формируемом в однородном и резко-неоднородном промежутках [4]. На рис. 1, а приведен отпечаток токового канала искрового разряда на заземленном электроде. Амплитуда напряжения на промежутке 25 kV, длительность фронта нарастания 15 ns. Амплитуда тока искры 3 kA. Диаметр отпечатка канала $\Delta = 0,4$ мм. Видно, что искра обладает внутренней микроструктурой, представляющей собой скопление микроканалов диаметрами $\Delta_{mic} = 5-10 \mu m$, примерно равномерно распределенных по сечению канала. Среднее расстояние между каналами $20 \mu m$. В центральной части отпечатка в результате оплавления металла отдельные микроканалы сливаются, образуя кратеры диаметром 20–30 μm . Общее количество микроканалов $N = 600-900$ штук. Аналогичная картина регистрировалась и на потенциальном электроде.

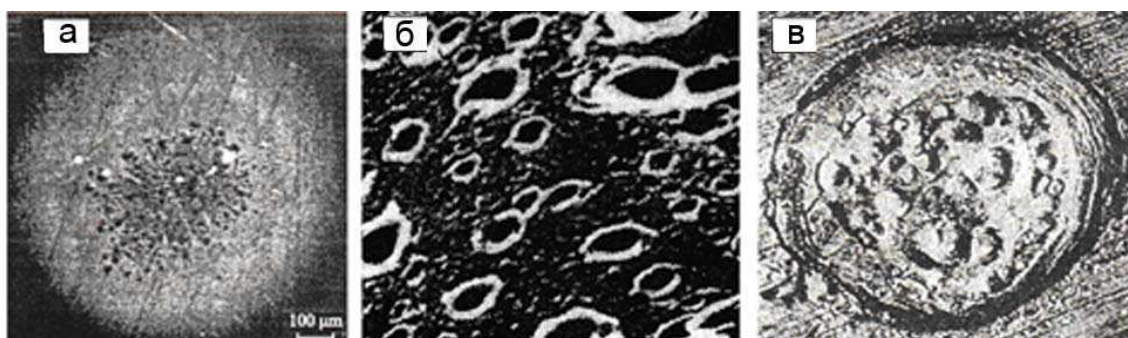


Рис. 1. Отпечатки: а) искры на заземленном электроде; б) катодного пятна вакуумной дуги; в) катодного пятна открытой сварочной дуги $I = 60$ А

На рис. 1, б показаны кратеры на оксидированном молибденовом катоде для катодных пятен первого типа электрической дуги в вакууме. Микрофотография получена при наложении тангенциального к поверхности катода магнитного поля [4].

В работе [5] установлено, что катодное пятно открытой сварочной дуги, горящей между металлическими электродами, состоит из автономных пятен. На рис. 1, в приведен отпечаток катодного пятна открытой сварочной дуги, горящей между электродами из стали Ст3 диаметром 10 мм. Режим горения импульсной дуги: $I_d = 60$ А, $U_d = 24$ В, время импульса $t_{и} = 0,01$ с.

Обобщая известные экспериментальные данные, можно отметить следующие основные закономерности катодных пятен: катодные пятна находятся в постоянном движении; плотность тока в катодных пятнах имеет очень большую, но конечную величину; катодное пятно имеет внутреннюю структуру, проявляющуюся в существовании отдельных ячеек или фрагментов пятна; время жизни ячеек катодного пятна ограничено.

Однако необходимо отметить, что корректного теоретического описания процессов, происходящих в катодном пятне, в настоящее время не существует. Остается неясным механизм замыкания тока дугового разряда на катодах из металлов с низкой температурой плавления и малой величиной удельной эрозии металла. Предложенные физические механизмы сводятся к тому, что поверхность металла в зоне катодного пятна расплавлена, а над поверхностью существует область пространственного заряда, которая определяет всю энергетическую ситуацию прикатодной области. Тем не менее гипотеза о существовании области пространственного заряда не позволяет объяснить всю совокупность явлений в прикатодной области. В подобных физических моделях [6] не учитывается наличие микроструктуры катода, а также закономерности протекания тока через микронеровности катода.

В настоящей работе предлагаются несколько положений, которые проясняют сложные физические процессы, происходящие в области катодного пятна.

Положение 1. При возбуждении в дуге и искровых разрядах на поверхности катода образуется совокупность эмиссионных центров (рис. 2), через которые течет основной ток катода.

Поверхность катода имеет микронеровности, окисные пленки и т.п. Электрическое поле у острия микронеровностей всегда намного сильнее, чем в других местах. При достижении напряженности внешнего электрического поля порядка $10^6 - 10^8$ В/см с выступов микронеровностей будет происходить эмиссия электронов. Под действием внешнего электрического поля электроны проводимости микроострий немедленно придут в упорядоченное, направленное движение и будут «стекают» с острия. Для проводников выполняется принцип электронейтральности: в отсутствие электрического тока заряды распределяются только на поверхности проводника. В толще металла электродов электрическое поле равно нулю. Следовательно, в результате ухода электронов с острия в области выступа появится локально некомпенсированный положительный заряд (рис. 2) и, следовательно, локальное электрическое поле.

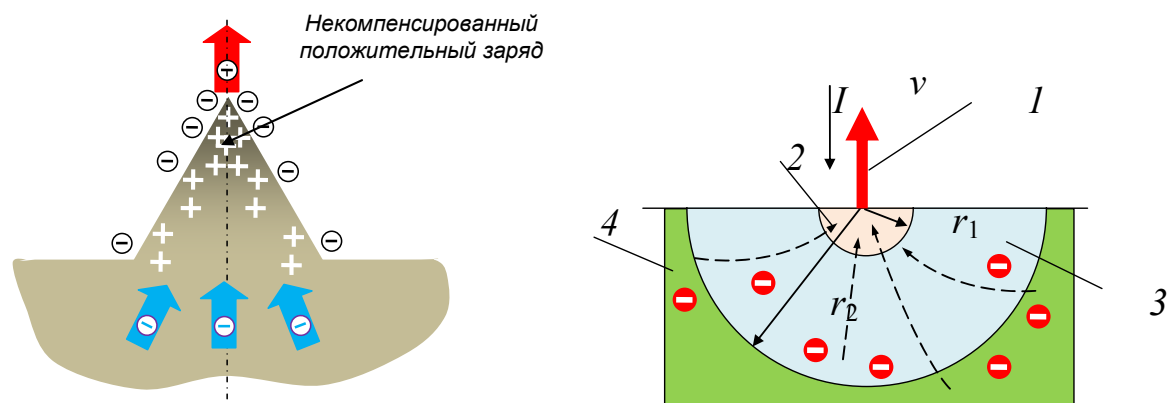


Рис. 2. Образование некомпенсированного положительного заряда в объеме эмиссионного центра катода: 1 – электронный токопроводящий канал; 2 – зона испарения и формирования токопроводящего канала; 3 – жидкая фаза; 4 – твердая фаза

Под воздействием сил этого поля электроны из приповерхностной зоны катода придут в движение. Они будут двигаться к направлению выступа для компенсации избыточного положительного заряда выступа. В итоге устанавливается динамическое равновесие между уходом электронов и их приходом, т. е. возникнет ток, текущий через микроострие. Под воздействием этого тока будет про-

исходить джоулев нагрев металла микронеровности катода, плавление и испарение микровыступов и образование кратера на поверхности катода.

Положение 2. При «стекании» электронов с микронеровности образуется тонкий токовый канал (токовая нить, микродуга), замыкающий межэлектродный промежуток. Ток дуги течет через ячейки – эмиссионные центры, поэтому в межэлектродном промежутке электрической дуги не происходит формирование объемного пространственного заряда.

При возбуждении дуги в межэлектродном промежутке образуется большое количество заряженных частиц, и существуют потоки электронов с микронеровностей. Потоки электронов аналогичны проводнику с током и, следовательно, будут создавать собственное вихревое магнитное поле. Так как токи с микронеровностей небольшие по величине, значит, и магнитное поле будет небольшим. Однако на эти небольшие поля тока электронов с микронеровностей накладывается очень сильное вихревое поле, обусловленное изменением напряженности электрического поля $\partial E/\partial t$ и электрических свойств среды $\partial \epsilon_a/\partial t$ в межэлектродном промежутке. Следовательно, движение электронов в межэлектродном промежутке аналогично движению заряженных частиц в вихревом магнитном поле проводника с током (рис. 3).

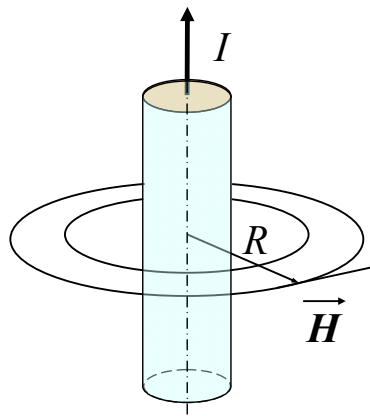


Рис. 3. Вихревое магнитное поле и поток электронов с микронеровностей

Качественно описать движение электронов, оказавшихся вблизи такого тока с острия микронеровности можно с помощью дрейфовой теории [7]. Скорость заряженных частиц при таком движении по величине и направлению определяется по формуле

$$\vec{u} = \frac{1}{2\omega H} (v_{\perp}^2 + 2v_{\parallel}^2) [\vec{h} \text{grad} \vec{H}]. \quad (1)$$

Здесь \vec{h} – единичный вектор вдоль направления \vec{H} . Результирующая траектория дрейфа электронов вблизи токовой нити изображена на рисунке 4, в.

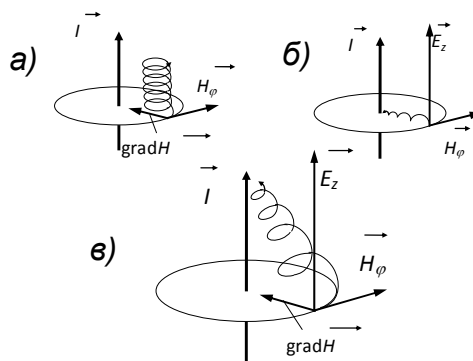


Рис. 4 Движение электрона в поле прямого проводника с током:
 а) чисто магнитный дрейф; б) дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях; в) результирующий дрейф

Количество электронов вблизи прямого тока будет лавинообразно увеличиваться. Сила тока будет резко возрастать, что приведет к еще большему возрастанию вихревого магнитного поля, и в конце этого переходного процесса движение электронов в токовой нити будет происходить по линии максимальной напряженности электрического поля с закручиванием в винтовую линию.

Положение 3. В момент возбуждения дуги образуется множество токовых нитей, при этом между ними происходит взаимодействие – притяжение и отталкивание. Эти процессы взаимодействия токовых нитей, а также процессы испарения электродного металла определяют динамику перемещения катодных пятен.

Токовая нить подобна проводнику с током. Известно, что проводники с током, текущим в одном направлении, притягиваются. При возбуждении дуги, с микронеровностей образуется множество токовых нитей, однако, одна из них, в месте максимальной напряженности электрического и магнитного полей, является основной. Другие токовые нити будут к ней притягиваться на основании закона Ампера и при этом происходит одновременно их закручивание (рис. 5).

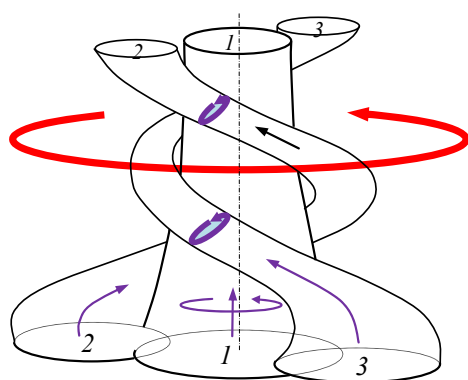


Рис. 5. Закручивание токовых нитей с микронеровностей катода

Притяжение токовых нитей происходит до тех пор, пока не начнут действовать кулоновские силы отталкивания и в итоге возникнет состояние динамического равновесия между силами притяжения и отталкивания. Образовавшийся электронный вихревой шнур будет состоящим из таких токовых нитей, пронизывающих весь его объем.

На катоде вследствие испарения вещества, микронеровности разрушаются, при этом напряженность поля уменьшается, ток с микронеровности прекращается, микродуга гаснет. Однако вблизи присутствует другой выступ шероховатости, на который перемещается (зажигается) микродуга. Происходит непрерывное перемещение микродуг, что является основной причиной блуждания катодного пятна. Катодное пятно перемещается по поверхности и является

источником высокоскоростных струй плазмы. Обычно горение дуги начинается с появления быстроперемещающихся пятен (скорость $\sim 10^3$ - 10^4 см/с), которые затем переходят в медленноперемещающиеся пятна (скорость 10 - 10^2 см/с). Выгорание катода происходит по микронеровностям, при этом образуются кратеры на поверхности катода.

Таким образом, при возбуждении дуги и искровых разрядах в результате эмиссии микронеровности поверхности катода становятся эмиссионными центрами, через которые течет основной ток. В результате на поверхности катода образуется совокупность эмиссионных центров – катодное пятно, которое представляет собой сильно разогретую область размером 10^{-3} - 10^{-4} см и к которой примыкает ярко светящаяся плазма, состоящая полностью или частично из материала катода.

Литература.

1. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 244 с.
2. Болотов А.В., Козырев А.В., Королев Ю.Д. Модель катодного слоя вакуумной дуги при немонотонном распределении потенциала в прикатодной плазме // Физика плазмы. – 1993. – Т. 19. – Вып. 5. – С. 709 – 803.
3. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. и др. Микроструктура токовых каналов и убегание электронов в высоковольтных диффузных разрядах атмосферного давления. Исследования по физике плазмы / под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. – Саров, 1998. – 368 с.
4. Месяц Г.А. Эктоны. Часть 2. – Екатеринбург: УИФ, Наука, 1994. – 249 с.
5. Норин П.А., Малышев Н.И. Структура, геометрические и физические характеристики катодного пятна открытой сварочной дуги // Сварочное производство. – 2001. № 9. – С. 3 – 5.
6. Болотов А.В., Козырев А.В., Королев Ю.Д. Модель катодного слоя вакуумной дуги при немонотонном распределении потенциала в прикатодной плазме // Физика плазмы. – 1993. – Т. 19. – Вып. 5. – С. 709 – 803.
7. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. – М., Наука, 1978 г. 225 с.