

04;12

## Структура группового катодного пятна на поверхности горячекатанных сталей

© С.Л. Пожаров, А.М. Миркаримов, И.В. Солдатов

Институт электроники АН Узбекистана,  
700143 Ташкент, Узбекистан

(Поступило в Редакцию 29 апреля 1997 г.)

Изложены результаты исследований катодного пятна на поверхности сталей. Выявлены особенности поведения по сравнению с результатами, полученными на чистых металлах.

### Введение

Интерес к исследованию динамики катодных пятен на различных поверхностях в значительной степени связан с решением прикладных задач, в частности с потребностями развития технологии вакуумно-дуговой обработки поверхности электропроводящих материалов [1-3]. Большинство известных экспериментальных результатов получены в исследованиях, проводимых на чистой поверхности металлов [4-7]. В то же время для практических целей важно знать особенности поведения катодных пятен на поверхностях, покрытых различными пленками, в частности достаточно толстыми слоями окалины. Такие работы по существу не проводились из-за сложности интерпретации результатов и их плохой воспроизводимости, связанной с неоднородностью окисленной поверхности.

Недавно сообщалось [8] о предварительных результатах исследований катодных пятен на поверхности горячекатанной стали, проведенных методом "автографов" [4]. Было установлено, что элементарные катодные пятна (ЭКП), называемые также ячейками [4], независимыми или отдельными катодными пятнами [5], на такой поверхности существуют в виде компактных групп, которые и определяют характер эрозии поверхности. Представление о таких компактных группах элементарных катодных пятен было введено ранее [5] и они были названы групповыми катодными пятнами (ГКП).

Целью данной работы является сообщение о результатах дальнейших более систематических исследований групповых катодных пятен. В качестве объекта исследований были выбраны образцы нержавеющей горячекатанных сталей 304 и 430.

### Экспериментальная методика

Идея исследования групповых катодных пятен методом "автографов" исключительно проста [4] и заключается в следующем. Групповое катодное пятно, перемещаясь по поверхности, оставляет на ней след, образующийся в результате эрозии поверхности. Если поверхность покрыта слоем окисла (окалиной), то эрозия поверхности включает удаление с нее окалины, в результате

чего образующийся след имеет очень четко очерченный контур. Измерение геометрических параметров следа (длина, ширина, площадь) при фиксированном времени горения разряда позволяет определить размеры ГКП и среднюю скорость его перемещения по поверхности. Геометрические параметры следов измерялись на автоматизированной системе обработки изображений с вводом изображений в компьютер с телевизионной камеры с заданным увеличением.

Использовалась импульсная система питания разряда, генерирующая импульсы прямоугольной формы с регулируемой длительностью  $T = 1-1000$  ms и амплитудой до  $I = 300$  A.

Независимо измерялись следующие параметры разряда: ток разряда  $I$ ; напряжение на разрядном промежутке  $U$ ; суммарный электрический заряд, прошедший через разряд за время одного импульса  $Q = \int_0^T I(t)dt$ , длительность разрядного импульса  $T$ .

Электродная система имела плоскую геометрию с межэлектродным зазором, много меньшим линейных размеров электродов, при этом катодом служил исследуемый образец. Экспериментальная установка позволяла проводить исследования как в условиях отсутствия внешнего магнитного поля, так и во внешнем магнитном поле.

В первом случае в вакуумной камере монтировалась кассетная система на 6 образцов, геометрия которой обеспечивала наиболее симметричное распределение локальных магнитных полей над поверхностью образца, создаваемых разрядным током и токоподводами. В этом варианте проводились исследования, связанные с определением наиболее вероятного значения тока на одно групповое пятно, а также другие параметры групповых катодных пятен в условиях их свободного перемещения по поверхности.

Во втором случае в вакуумной камере монтировался электромагнит, в зазоре которого размещался один исследуемый образец. Максимальная напряженность магнитного поля над поверхностью образца из немагнитного материала составляла  $H = 1.3 \cdot 10^5$  A/m. Над поверхностью образца из материала, обладающего ферромагнитными свойствами, эта величина составляла  $H = 8.6 \cdot 10^4$  A/m. В этом варианте исследовалась

зависимость ширины следа ГКП (его размеров) и скорости его перемещения от тока разряда, а также влияние магнитного поля на свойства ГКП.

Величина  $Q$  измерялась специальным прибором с относительной погрешностью 2%. Автоматизированная система обработки изображений позволяла измерять площадь очищенной поверхности с относительной погрешностью 5%, а линейные геометрические параметры следов ГКП с относительной погрешностью 3.5%. Длительность разрядных импульсов изменялась с шагом 1 ms и устанавливалась с точностью  $\pm 10 \mu\text{s}$ .

## Результаты исследований

В отсутствие внешнего магнитного поля при достаточно больших разрядных токах ( $> 100 \text{ A}$ ) "автограф" катодных пятен на поверхности (контур площади очищенной от окалины) имеет четко выраженную структуру в виде почти симметрично разбегающихся извилистых дорожек (треков) неправильной формы, на которых имеются ответвления. Характерный пример "автографа" приведен на рис. 1. При малых токах, например при  $I = 20 \text{ A}$ , подобная структура не наблюдается даже при больших длительностях разрядного тока: "автограф" имеет вид пятна неправильной формы. Интересной особенностью микрорельефа эрозированной поверхности является наличие аксиально-симметричных столбообразных выступов (протруссий) из оплавленного металла, достигающих высоты до нескольких десятков  $\mu\text{m}$ . В центре "автографа" и на широких участках трекв они расположены беспорядочно. На узких участках хорошо

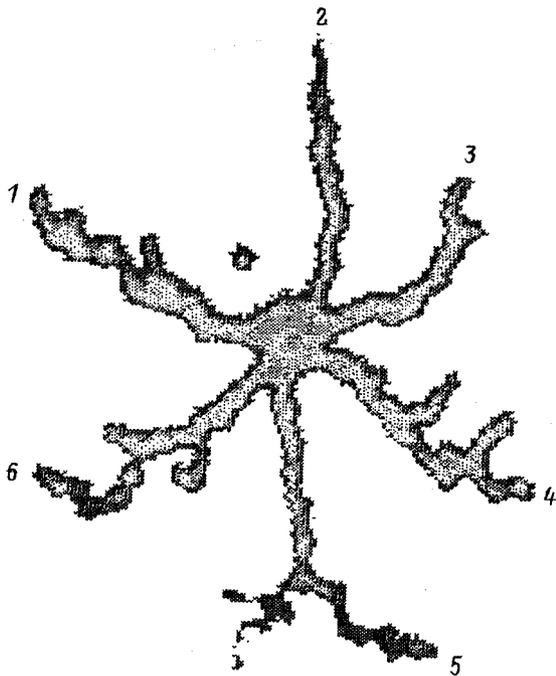


Рис. 1. "Автограф" групповых катодных пятен (1–6) на поверхности стали 430 при  $I = 150 \text{ A}$ ,  $T = 0.015 \text{ s}$ .

сформированных трекв протруссии располагаются преимущественно по осевой линии трека, иногда сливаясь и образуя структуру типа осевого гребня. Особенно четко это проявляется на треках, образующихся при наличии внешнего магнитного поля, о чем будет сказано ниже.

Измерения проводились при различных амплитудах (110–160 A) и длительностях (5–50 ms) разрядного тока. Определение наиболее вероятного значения величины тока ГКП  $i_g$  проводилось путем подсчета числа трекв  $N_k$  при каждом значении разрядного тока в предположении, что все треки образуются одновременно. Следует признать, что процедура подсчета числа трекв имеет весьма субъективный характер. Поэтому использовалось несколько критериев подсчета: например, учитывались только треки расходящиеся от центра (без учета ветвления); не учитывались короткие ответвления; учитывалась возможность движения вдоль трека одновременно двух ГКП, что проявлялось в виде одного сильно ветвящегося трека. Оказалось, что результат вычисления  $i_g$  несильно зависит от выбора критерия подсчета  $N_k$ . Величины  $i_g$ , определенные по разным критериям, заключены в следующих интервалах: для стали 430  $i_g = 25.1–28.7 \text{ A}$ , для стали 304  $i_g = 22.5–23.7 \text{ A}$ . Оценка наилучшего критерия подсчета  $N_k$  проводилась по минимуму величины

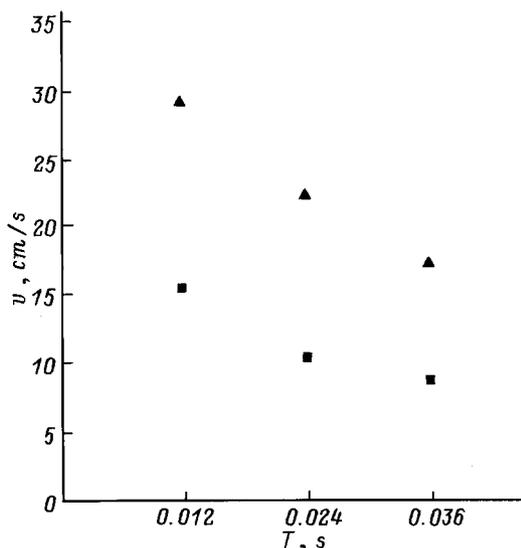
$$\Delta = \sum_{k=1}^n (N_k - I_k/i_g)^2 / (n - 1),$$

где  $n$  — число обработанных "автографов",  $I_k$  — разрядный ток при образовании  $k$ -го "автографа",  $N_k$  — число подсчитанных трекв в  $k$ -м "автографе".

В результате были приняты следующие значения: для стали 430  $i_g = 27.5 \pm 0.7 \text{ A}$ , для стали 304  $i_g = 23.7 \pm 1.0 \text{ A}$ . При этом дисперсия нормального распределения величины тока в ГКП составляет для стали 430  $D(i_g) = 6.8 \text{ A}^2$ , для стали 304  $D(i_g) = 15.2 \text{ A}^2$ .

Определялись средние значения ширины трекв ГКП ( $d$ ). Ширина каждого трека измерялась в десяти равноотстоящих точках. Результаты многих измерений, проведенных при разных токах и длительностях разрядного импульса, обрабатывались по методу наименьших квадратов. Какой-либо корреляции между шириной трека и величиной разрядного тока (числом трекв ГКП), а также длительностью разрядного импульса не обнаружено. Получены следующие значения: для стали 430  $d = (0.045 \pm 0.006) \text{ cm}$  при дисперсии нормального распределения  $D(d) = 0.0002 \text{ cm}^2$ , для стали 304  $d = (0.084 \pm 0.008) \text{ cm}$  при дисперсии нормального распределения  $D(d) = 0.0005 \text{ cm}^2$ .

Легко убедиться, что функция распределения ГКП по относительной величине текущего на них тока уже, чем функция их распределения по измеренной относительной ширине трека. Таким образом, по нашему мнению, больший разброс измеряемых ширин трека в значительной степени определяется наложением на радиальную составляющую хаотической составляющей скорости ГКП. Это также подтверждается характером



**Рис. 2.** Зависимость радиальной составляющей скорости групповых катодных пятен от длительности разрядного импульса для стали 304: ■ —  $v_{\min}$ , ▲ —  $v_{\max}$ .

микрорельефа поверхности в области заметных расширений треков (хаотическое расположение протруссий на поверхности).

Измерялись радиальные составляющие скорости ГКП. Обнаружена анизотропия скорости ГКП на поверхности исследованных образцов. Скорость ГКП в направлении проката выше, чем скорость в поперечном направлении. Радиальные составляющие скорости ГКП уменьшаются по мере их удаления от центра иницирования разряда, что соответствует представлению о влиянии суммарного магнитного поля, создаваемого ГКП, на движение самих ГКП. Зависимости радиальной составляющей скорости вдоль направления проката  $V_{\max}$  и в поперечном направлении  $V_{\min}$  от длительности разрядного импульса для обоих сортов стали приведены на рис. 2. Обработка результатов измерений площади, очищенной от окалины ( $S$ ), при различных  $Q = \int_0^T I(t) dt$  показала, что взаимосвязь между этими величинами при фиксированном токе и давлении хорошо аппроксимируется линейной зависимостью (коэффициент линейной корреляции не хуже 0.99)  $S = Q/q_{\text{eff}}$ . Таким образом, при фиксированном значении тока и давления  $q_{\text{eff}}$  является постоянной (не зависящей от времени) величиной. Постоянство  $q_{\text{eff}}$  во времени свидетельствует о постоянстве доли тока ГКП, производящего удаление окалины с поверхности.

Для стали 430  $q_{\text{eff}} = (11.8 \pm 1.5) \text{ C/cm}^2$ , а для стали 304  $q_{\text{eff}} = (13.8 \pm 0.6) \text{ C/cm}^2$ . Параметр  $q_{\text{eff}}$  имеет слабовыраженный максимум в области значений разрядного тока 140–150 А, оставаясь для остальных значений тока практически постоянной величиной.

Внешнее магнитное поле использовалось для создания направленного движения одиночного ГКП с целью последующего определения зависимости скорости пе-

ремещения и характерных размеров ГКП от текущего на него тока. Движение ГКП во внешнем магнитном поле происходит в направлении, противоположном силе Ампера.

Измерения проводились при трех значениях напряженности магнитного поля и 6–10 значениях разрядного тока. Минимальное значение напряженности магнитного поля выбиралось таким образом, чтобы образовывался прямолинейный трек приблизительно неизменной ширины с регулярным микрорельефом в виде осевого гребня, образованного близко расположенными и частично сливающимися протруссиями.

Были выбраны следующие значения напряженности магнитного поля ( $H$ ): для стали 430  $H_l = 2.23 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ ,  $H_m = 4.5 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ ,  $H_h = 6.75 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ ; для стали 304  $H_l = 2.4 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ ,  $H_m = 4.7 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ ,  $H_h = 8 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ . Значения разрядных токов выбирались в интервале  $i_g/2 < I < 2i_g$ , соответствующем области существования одиночного ГКП. Скорость ГКП в этих измерениях определялась как  $v = l/T$ , где  $l$  — длина трека,  $T$  — длительность разрядного импульса.

Выявились два вида зависимости средней ширины трека ( $d$ ) от разрядного тока  $I$ : линейная и зависимость вида  $d = k_d \sqrt{I}$ . Для стали 430 зависимость  $d$  от  $I$  оказалась ближе к линейной при всех напряженностях магнитного поля. Для стали 304 зависимость  $d$  от  $I$  ближе к линейной при низких напряженностях магнитного поля ( $H_l$ ), в то время как при больших ( $H_h$ ) она имеет вид  $d = k_d \sqrt{I}$ . Что же касается зависимости при средних значениях напряженности магнитного поля ( $H_m$ ), то имеющийся разброс экспериментальных данных не позволяет сделать однозначный выбор между этими двумя видами зависимости.

Результаты измерения скорости ГКП как функции разрядного тока показали, что регулярная зависимость наблюдалась только в одном случае, а именно для стали 304 при высокой напряженности магнитного поля и имела вид  $v = k_v \sqrt{I}$ . Для всех остальных случаев можно констатировать отсутствие зависимости скорости ГКП от тока.

При линейной зависимости  $d$  от  $I$  характерный микрорельеф трека (осевой гребень из сливающихся протруссий) не претерпевает качественных изменений. По мере уменьшения ширины трека уменьшаются масштабы осевого гребня. При переходе к зависимости вида  $d = k_d \sqrt{I}$  (сталь 304 при высокой напряженности магнитного поля) происходят качественные изменения микрорельефа, а именно исчезает четко выраженный осевой гребень, на дне трека появляется заметное количество оплавленной окалины.

Измерения величины  $q_{\text{eff}} = Q/S$ , где  $S$  — площадь трека, показали, что она не зависит от разрядного тока. При этом для стали 430 величина  $q_{\text{eff}}$  в пределах точности измерений также не зависит от напряженности магнитного поля и остается такой же, как и в отсутствие внешнего магнитного поля. В то же время для стали 304 происходит заметное снижение  $q_{\text{eff}}$  во внешнем магнитном

поле, причем наиболее сильное изменение происходит при переходе от полей средней напряженности к полям высокой напряженности. Значения параметров  $q_{\text{eff}}$  при различных напряженностях магнитного поля приведены в таблице.

В заключение данного раздела отметим, что существенный вклад в статистический разброс измеренных параметров ГКП могла внести неоднородность окалины на поверхности образцов. С целью выявления этого вопроса проводились измерения толщины окалины на большом числе образцов (по 22 образцам каждого сорта стали). Результаты оказались следующие: для стали 430 средняя толщина окалины  $7.0 \mu\text{m}$  при дисперсии нормального распределения по толщине  $2 \mu\text{m}^2$ , для стали 304 средняя толщина окалины  $7.6 \mu\text{m}$  при дисперсии нормального распределения по толщине  $0.7 \mu\text{m}^2$ .

## Обсуждение результатов

Рассматривая полученные результаты, мы будем исходить из наиболее распространенных представлений об элементарном катодном пятне (ЭКП) как о локально активном центре эмиссии, обеспечивающим протекание больших токов при сравнительно малом напряжении на разрядном промежутке. Согласно этим представлениям, ЭКП является существенно нестационарной и неустойчивой системой, зарождающейся, развивающейся и заканчивающей свое существование в фиксированной локальной области поверхности. Перемещение же ЭКП по поверхности следует рассматривать как результат последовательного образования новых ЭКП в непосредственной близости от исчезающих ЭКП. Характерные параметры ЭКП, такие как вероятность (частота) образования, время жизни, линейные размеры, средний ток зависят как от физических свойств поверхности в области его образования, так и от начальных локальных условий (плотность приповерхностной плазмы, температура) и не зависят от суммарного разрядного тока, т.е. разрядный ток прямо пропорционален числу ЭКП на катоде.

В отличие от ЭКП ГКП является устойчивой системой, существование которой поддерживается равновесием между скоростью образования и скоростью гибели составляющих его ЭКП. Перемещение ГКП по поверхности скорее всего объясняется различием вероятности образования ЭКП в некоторых избранных направлениях, связанным с неоднородным распределением плотности приповерхностной плазмы в локальных магнитных полях.

Можно предположить следующее качественное объяснение причины образования ГКП на поверхности, покрытой окалиной. Очевидно, изолированное ЭКП на такой поверхности не может обеспечить необходимые начальные условия для зарождения нового ЭКП с достаточно высокой вероятностью и тем самым создавать последовательно рождающиеся новые ЭКП в течение

сколько-нибудь длительного времени. Если же на поверхности имеется несколько достаточно близко расположенных ЭКП, то в результате их совместных действий на поверхности создаются более благоприятные условия зарождения новых ЭКП взамен исчезающих. Таким образом, группа ЭКП оказывается более жизнеспособной системой, чем изолированное ЭКП. Вместе с тем тот факт, что для каждого типа поверхности существует определенное наиболее вероятное значение тока ГКП (наиболее вероятное число ЭКП составляющих ГКП) при сравнительно небольшой дисперсии нормального распределения, свидетельствует, по-видимому, о действии внутри ГКП какого-то механизма, смещающего равновесие между скоростью образования и скоростью исчезновения ЭКП в зависимости от их числа. Когда ток ГКП (число ЭКП) меньше наиболее вероятного значения, скорость образования ЭКП выше, чем скорость исчезновения. В противном случае скорость образования становится меньше скорости исчезновения.

Результаты измерений зависимости ширины трека ГКП от тока во внешнем магнитном поле показали, что во всех случаях, за исключением стали 304 во внешнем магнитном поле высокой напряженности, ГКП имеет такую конфигурацию, когда ЭКП расположены вдоль линии контура ГКП по закону, не зависящему от тока. Другими словами, среднее расстояние между ЭКП ( $a$ ) остается постоянным при изменении тока на ГКП. Такую конфигурацию в дальнейшем будем условно называть одномерной. Крайними примерами одномерных конфигураций ГКП являются прямолинейный отрезок протяженностью  $\sim d$  или окружность диаметром  $\sim d$ . При этом

$$d = k_d I, \quad (1)$$

где  $k_d = a/fi_e$ ,  $i_e$  — средний ток ЭКП,  $f$  — геометрический фактор.

Зависимость вида

$$d = k_d \sqrt{I}, \quad (2)$$

полученная для стали 304 при высокой напряженности магнитного поля, соответствует такой конфигурации ГКП, когда ЭКП распределены по всей площади ГКП по закону, не зависящему от тока. Такую конфигурацию в дальнейшем будем называть двумерной. В этом случае

$$k_d = a/\sqrt{i_e},$$

где  $a$  — среднее расстояние между ЭКП, также не зависящее от тока на ГКП.

Представления о ГКП одномерной и двумерной конфигурации хорошо согласуются с результатами измерения скорости ГКП как функции тока.

Рассмотрим образование очищенной от окалины поверхности в виде прямолинейного трека как результат движения ГКП. Тогда площадь очищенной поверхности определяется выражением

$$S = vt, \quad (3)$$

где  $v$  — скорость перемещения ГКП.

Характер зависимости параметров ГКП от тока разряда, их конфигурация и значение параметров  $q_{\text{eff}}$  при различных напряженностях внешнего магнитного поля

Напряженность магнитного поля	Марка стали	304			430		
		Параметры	$d, \text{cm}$	$v, \text{cm/s}$	$q_{\text{eff}}, \text{C/cm}^2$	$d, \text{cm}$	$v, \text{cm/s}$
Низкая ( $H_l$ )	Характер зависимости конфигурация ГКП	$d = k_d I$	$v = \text{const}$	$8.1 \pm 0.5$	$d = k_d I$	$v = \text{const}$	$12.8 \pm 1.0$
		$k_d = (1.92 \pm 0.05) \cdot 10^{-3}$	$v = 62 \pm 4$		$k_d = (1.71 \pm 0.17) \cdot 10^{-3}$	$v = 46 \pm 7$	
Средняя ( $H_m$ )	Характер зависимости конфигурация ГКП	$d = k_d I$	$v = \text{const}$	$7.4 \pm 1.0$	$d = k_d I$	$v = \text{const}$	$11.1 \pm 1.1$
		$k_d = (1.31 \pm 0.12) \cdot 10^{-3}$	$v = 99 \pm 6$		$k_d = (1.01 \pm 0.10) \cdot 10^{-3}$	$v = 84 \pm 10$	
Высокая ( $H_h$ )	Характер зависимости конфигурация ГКП	$d = k_d \sqrt{I}$	$v = k_v \sqrt{I}$	$5.6 \pm 0.5$	$d = k_d I$	$v = \text{const}$	$10.2 \pm 0.8$
		$k_d = (5.93 \pm 0.23) \cdot 10^{-3}$	$k_v = 26.1 \pm 0.8$		$k_d = (0.98 \pm 0.06) \cdot 10^{-3}$	$v = 94 \pm 7$	

С другой стороны, очистку поверхности можно рассматривать как результат взаимодействия с окалиной ЭКП, образующих ГКП. В этом случае

$$S = \chi n \frac{s_e}{\tau_e} t, \quad (4)$$

где  $n$  — число ЭКП, образующих ГКП;  $\chi$  — эффективная доля ЭКП, взаимодействующих с окалиной ( $\chi \leq 1$ );  $s_e$  — площадь очищенной поверхности, образовавшаяся за время жизни ЭКП в результате его взаимодействия с окалиной;  $\tau_e$  — время жизни ЭКП.

Сравнивая правые части (3) и (4), находим

$$v = n \frac{1}{d} \chi \frac{s_e}{\tau_e} = \frac{I}{i_e} \frac{1}{d} \chi \frac{s_e}{\tau_e}.$$

Используя формулы (1) и (2), легко найти зависимость скорости ГКП от тока для различных структур

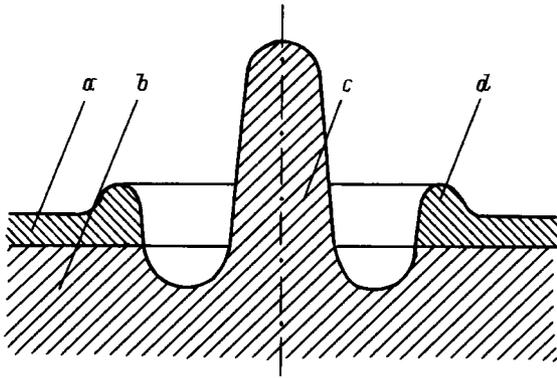
$$v = \begin{cases} \text{const} = \frac{I}{a} \chi \frac{s_e}{\tau_e} & \text{для одномерной конфигурации} \\ k_v \sqrt{I}, \quad \text{где } k_v = \frac{1}{a \sqrt{i_e}} \chi \frac{s_e}{\tau_e} & \text{для двумерной конфигурации.} \end{cases}$$

Характер зависимости от тока разряда параметров ГКП и его структура показаны в таблице. Во всех приведенных выше рассуждениях предполагалось, что основные параметры ЭКП не зависят от тока разряда.

Наблюдаемая аксиально-симметричная структура характерных элементов микрорельефа эрозированной поверхности — протруссий приводит к интуитивному представлению об аналогичной симметрии ГКП. Например, в случае одномерной конфигурации это предполагает ГКП кольцевой структуры с равномерным по окружности распределением ЭКП. Однако факт перемещения ГКП по поверхности находится в некотором противоречии

с этим интуитивным представлением. Как уже говорилось выше, движение ГКП обусловлено более высокой вероятностью образования новых ЭКП в направлении перемещения ГКП и, следовательно, в движущемся ГКП не может быть равномерного по линии контура или по площади ГКП распределения ЭКП. Можно, например, предположить, что при некоторой величине напряженности магнитного поля в области ГКП в одномерной конфигурации подавляющее большинство ЭКП будет сосредоточено на дуге окружности, обращенной в сторону движения ГКП. Наиболее четко элементарная структура микрорельефа эрозированной поверхности проявляется при малых длительностях разрядного импульса в отсутствие магнитного поля. При длительностях, меньших 1 ms, эрозированная поверхность имеет вид отдельных близко расположенных кратеров с наружным контуром, близким к окружности. Наблюдалась следующая динамика формирования кратеров. На начальной стадии развития разряда с увеличением времени происходит рост размеров кратеров. Дно кратера в центре имеет плоскую форму со значительным количеством расплавленной окалины и островками чистого металла. В дальнейшем происходит качественное изменение микрорельефа кратера без существенного изменения его размеров. В центре кратера возникает столбообразный выступ из оплавленного металла (протруссия), а по краям формируется четко выраженный бордюр из расплавленной окалины. Схема такого кратера приведена на рис. 3.

Были проведены приблизительные оценки времени формирования характерного микрорельефа: 50–100  $\mu\text{s}$  для стали 430, 100–150  $\mu\text{s}$  для стали 304. По нашему мнению, процессы формирования структуры ГКП и микрорельефа кратера непосредственно связаны между собой. При этом, по-видимому, в начальный момент ГКП имеет двумерную конфигурацию, а затем за конечное время релаксирует к одномерной конфигурации.



**Рис. 3.** Схема кратера (в разрезе) на заключительной стадии формирования характерного микрорельефа: *a* — слой окалины, *b* — металл, *c* — протруссия, *d* — бордюр из расплавленного окалины.

То, что в экспериментах во внешнем магнитном поле наблюдался переход от одномерной к двумерной конфигурации ГКП на стали 304 при высоких напряженностях магнитного поля, подтверждается не только зависимостью  $v$  и  $d$  от тока разряда, но и наблюдаемым при этом изменением микрорельефа треков.

Характерно, что микрорельеф трека, оставляемого на поверхности ГКП двумерной конфигурации, качественно подобен микрорельефу кратеров, образующихся на начальной стадии развития разряда. Значительное уменьшение величины  $q_{\text{eff}}$  при переходе от одномерной к двумерной конфигурации хорошо согласуется с качественным изменением микрорельефа очищенной поверхности, поскольку на образование протруссий должна расходоваться заметная доля энергии, затраченной на очистку поверхности.

Отсутствие эффекта изменения структуры ГКП на стали 430, по-видимому, можно объяснить меньшим временем релаксации ГКП и меньшей скоростью перемещения ГКП при высоких напряженностях магнитного поля на этой марке стали, чем на стали 304.

## Выводы

1. На поверхности горячекатаных сталей 304 и 430 элементарные катодные пятна в квазистационарном вакуумном дуговом разряде при больших токах существуют в виде компактных структурно упорядоченных групп — групповых катодных пятен. При этом свойства групповых катодных пятен характеризуются средними значениями диаметра, тока и скорости перемещения по поверхности со сравнительно небольшими дисперсиями нормального распределения.

2. При малых разрядных токах ( $I < 2i_g$ , где  $i_g$  — средний ток групповых катодных пятен) разряд содержит одно групповое катодное пятно. При больших токах ( $I > 2i_g$ ) наблюдается тенденция к делению группового катодного пятна. С изменением тока не наблюдается

качественных изменений в структуре группового катодного пятна. Среднее расстояние между элементарными катодными пятнами в групповом катодном пятне и их основные свойства не зависят от тока, текущего на групповое катодное пятно.

3. В большинстве проведенных исследований групповые катодные пятна имели одномерную конфигурацию. Образование групповых катодных пятен с одномерной конфигурацией однозначно связывается с формированием характерного микрорельефа эрозированной поверхности в виде аксиально-симметричных столбообразных выступов (протруссий) из оплавленного металла.

4. На стали 304 при высоких напряженностях магнитного поля наблюдается переход от одномерной к двумерной конфигурации группового катодного пятна. Изменение структуры группового катодного пятна сопровождается качественным изменением зависимостей ширины трека группового катодного пятна и скорости его перемещения от тока, текущего на групповое катодное пятно, изменением микрорельефа (исчезновением протруссий) и уменьшением удельных энергозатрат на очистку поверхности от окалины (уменьшением величины  $q_{\text{eff}}$ ).

В заключение считаем своим приятным долгом выразить благодарность разработчикам системы обработки изображений Т.А. Закирову, Р.Д. Садыкову и Е.И. Зятковой (Лаборатория прикладной физики ИЭ АН РУз) за помощь в проведении измерений.

## Список литературы

- [1] Bulat B.E., Mirkarimov A.M., Nagaibekov R.B. et al. Proc. TATF'96. 1996. P. 155–157.
- [2] Arifov U.A. et al. European Patent N 0468110. 1990.
- [3] Pozharov S.L. et al. Preliminary Patent of Uzbekistan N 600. 1992. Patent of Russian Federation. N 93003651/12. 1993.
- [4] Кецаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
- [5] Любимов Г.А., Раховский В.И. // УФН. 1978. Т. 125. № 4. С. 665–706.
- [6] Vacuum Arcs. Theory and Applications / Ed. J.M. Lafferty. New York: Wuley, 1980.
- [7] Bushik A.I., Bakuto T.A., Zacherilo P.S., Shilov V.A. // Intern. Symp. on Disch. and Electr. Insul. In Vacuum. St.Petersburg, 1994. P. 96.
- [8] Миркаримов А.М., Пожаров С.Л., Солдатов И.В. // УФЖ. 1996. № 4. С. 45–52.