

04;12

Устойчивость группового катодного пятна на поверхности горячекатаных сталей

© С.Л. Пожаров,¹ А.М. Миркаримов,¹ К. Такеда²¹ Институт электроники АН Узбекистана,
700143 Ташкент, Узбекистан² Department of Machine Intelligence and System Engineering, Akita Prefectural University, Honjyo,
Akita, 015-0055, Japan
e-mail: <ariel@uzsci.net>

(Поступило в Редакцию 13 марта 2002 г.)

Получено общее кинетическое уравнение для всех элементарных катодных пятен (ЭКП) внутри группового катодного пятна, которые позволяют оценить кинетические константы ЭКП при наличии определенных экспериментальных данных. Установлены некоторые особенности кинетики ЭКП. Предложено объяснение возможности устойчивого состояния ГКП.

Введение

Исследования групповых катодных пятен (ГКП) в вакуумном дуговом разряде (ВДР) на поверхности, покрытой окалиной [1,2], проводимые с целью развития технологии обработки поверхности вакуумным дуговым разрядом [3], выявили следующие их особенности. Во-первых, ГКП является устойчивой системой с характерным временем релаксации параметров порядка 100–200 μs . Во-вторых, устойчивое ГКП имеет конфигурацию, соответствующую расположению элементарных катодных пятен (ЭКП) вдоль линии контура, ограничивающую область ГКП по границе раздела между металлом и окалиной. Подобная конфигурация была названа одномерной. В-третьих, было установлено, что с изменением условий на поверхности может изменяться конфигурация ГКП и вместе с ней микрорельеф поверхности.

Целью данной публикации является попытка найти простое объяснение устойчивости ГКП, имеющее большое практическое значение. Для этого используется квазичастичное приближение при описании кинетики ЭКП внутри ГКП.

Кинетика элементарных катодных пятен

В качестве переменных состояния (фазовых переменных) ГКП могут быть выбраны число ЭКП в ГКП и какой-либо размер ГКП, например его периметр. При описании кинетики ЭКП на поверхности катода их можно представить как квазичастицы в двумерном пространстве, обладающие конечным временем жизни и способные порождать новые, себе подобные квазичастицы. Здесь мы используем те же представления и определения, касающиеся ЭКП, что и в [2].

В наиболее общей форме кинетические уравнения могут быть написаны следующим образом:

$$\frac{dN}{dt} = \sum_{i=1}^m k_i \frac{N^i}{V^{i-1}} + \frac{N}{V} \frac{dV}{dt}, \quad (1)$$

где N — число частиц, заключенных в объеме пространства взаимодействия V (в общем случае зависящего от времени, т.е. переменного), k_i — разность кинетических коэффициентов i -частичного образования и гибели частиц.

При хаотическом движении ЭКП по поверхности пространством взаимодействия является плоскость (двумерное пространство), имеющая соответственно размерность площади. При упорядоченном движении ЭКП вдоль линии контура, ограничивающего ГКП, пространством взаимодействия является линия (одномерное пространство), имеющая соответственно размерность длины, а объем пространства взаимодействия равняется периметру ГКП (L).

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением одно- и двухчастичных процессов в ГКП. Скорость изменения периметра ГКП (L) представляется следующим образом:

$$\frac{dL}{dt} = 2\pi v_e d_e \frac{N}{L} - \kappa = W(N, L), \quad (2)$$

где d_e — ширина металлической зоны, возникающей как результат очистки поверхности от окалины при однократном прохождении ЭКП вдоль линии контура ГКП; v_e — средняя скорость движения ЭКП вдоль контура; κ — параметр, определяющий скорость втекания расплавленной окалины внутрь ГКП.

Легко видеть, что система уравнений (1) и (2) не имеет нетривиальных общих стационарных решений. Таким образом, система, описываемая уравнениями (1) и (2), не имеет точки положения равновесия и является заведомо не устойчивой системой.

Таким образом, в одномерной модели ГКП, видимому, не учтен какой-то существенный фактор и она должна быть как-то скорректирована. Результаты исследования расхода энергии, развития микрорельефа ГКП привела нас к идее существования двух типов ЭКП внутри ГКП.

Первая группа ЭКП, постоянно находясь на границе между металлом и окалиной, осуществляет очистку поверхности. Вторая группа ЭКП существует на чистом металле и не принимает участие в очистке. По-видимому, именно эта группа ЭКП формирует микрорельеф внутри ГКП одномерной конфигурации в виде столбобразного выступа (гигантской протруссии).

При этом одновременно существование ЭКП в этих областях возможно лишь при каких-то особых условиях. Мы предположили, что такие условия могут возникать как следствие генерирования пограничными ЭКП приповерхностной плазмы в области чистого металла с концентрацией, достаточной для того, чтобы повысить вероятность образования ЭКП в этой области и сделать ее сравнимой с вероятностью образования ЭКП на границе металл-окалина. Вторая группа ЭКП образуется и существует в полосе очищенного металла шириной h , примыкающей непосредственно к границе металл-окалина. Некоторая критическая плотность приповерхностной плазмы над поверхностью чистого металла (n^*), ниже которой ЭКП на чистом металле не генерируется, определяет ширину (h) области существования ЭКП второй группы.

Таким образом, взаимодействие двух групп ЭКП ведет к нелинейному соотношению между N и L , к возникновению стационарных решений уравнений (1) и (2) и тем самым обеспечивает возможность существования устойчивого ГКП.

Связь между h и фазовыми переменными определяется без особого труда и выражается соотношением

$$h = \frac{\pi}{L} C\chi \frac{N}{n^*} + \frac{2\pi^3}{L^3} \left(C\chi \frac{N}{n^*} \right)^2. \quad (3)$$

Здесь χ — отношение числа ЭКП первой группы к общему количеству ЭКП в ГКП.

Далее приходим к кинетическому уравнению для ЭКП первой группы

$$\chi \frac{dN}{dt} = k_1^l \chi N + k_2^l \chi^2 \frac{N^2}{L} + \chi \frac{N}{L} W(N, L) \quad (4)$$

и к кинетическому уравнению для ЭКП второй группы

$$(1 - \chi) \frac{dN}{dt} = k_1^s (1 - \chi) N + k_2^s (1 - \chi)^2 \frac{N^2}{Lh} + (1 - \chi) \frac{N}{L} W(N, L). \quad (5)$$

Здесь нижние индексы на коэффициентах k определяют порядок реакций образования и гибели ЭКП, как в уравнении (1), а верхние индексы: l — принадлежность

к одномерной кинетике (одномерное пространство), s — принадлежность к двумерной кинетике (двумерное пространство). Общее кинетическое уравнение для всех ЭКП внутри ГКП

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N + \beta \frac{N^2}{L} + \gamma \frac{N^2}{\xi + \frac{2\pi}{L^2} \xi^2 N} + \frac{N}{L} W(N, L) = F(N, L), \quad (6)$$

где

$$\alpha = \chi k_1^l + (1 - \chi) k_1^s, \quad \beta = \chi^2 k_2^l, \\ \gamma = (1 - \chi)^2 k_2^s, \quad \xi = C\pi\chi \frac{1}{n^*}.$$

Оценки кинетических констант ЭКП

Практическое значение полученных уравнений заключается в том, что при наличии определенной экспериментальной информации они позволяют оценить кинетические константы ЭКП, т.е. решить своего рода обратную задачу.

Для решения данной задачи помимо факта устойчивости ГКП использовалась следующая, полученная ранее экспериментальная информация [2]: стационарные значения числа ЭКП и размеров ГКП; зависимость размеров ГКП от числа ЭКП в одиночном ГКП; качественные данные о микрорельефе, формируемом внутри устойчивого ГКП; оценка величины времени релаксации ГКП к его стационарному состоянию; количественные данные об эффективности очистки поверхности свободно перемещающимися ГКП.

Результат проведенных оценок: $\alpha = 8.415 \cdot 10^3 \text{ (s}^{-1}\text{)}$, $\gamma = 0.033 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}^5$, $(1 - \chi) \cdot k_1^s = -8.4 \cdot 10^2 \text{ (s}^{-1}\text{)}$, $\chi \cdot k_1^l = 9.26 \cdot 1063 \text{ (s}^{-1}\text{)}$.

Для независимой проверки полученных количественных данных были выполнены экспериментальные исследования вольт-амперных характеристик одиночного ГКП в большой серии измерений. Была обнаружена линейная слабо возрастающая зависимость с угловым коэффициентом наклона

$$\frac{dU}{dI} = 0.15 \pm 0.02 \text{ V/A.}$$

Оцененные кинетические константы с использованием некоторых данных из [4] позволяют вычислить эту величину независимо. Было получено

$$\frac{dU}{dI} = 0.23 \text{ V/A.}$$

Учитывая принятые приближения, согласие с экспериментом, очевидно, является приемлемым.

Выводы

1. Возможность устойчивого состояния ГКП объясняется наличием двух взаимодействующих групп ЭКП внутри ГКП. Первая группа находится на границе раздела между металлом и окалиной, ограничивающей ГКП. Вторая группа находится на чистом металле в полосе, примыкающей к границе раздела. При этом ширина ее зависит от числа ЭКП первой группы.

2. Проведены оценки кинетических констант ЭКП.

3. Установлена особенность кинетик ЭКП первой группы. Среди одночастичных процессов образования ЭКП преобладают над процессами гибели. Среди двухчастичных процессов процессы гибели ЭКП преобладают над процессами образования. В целом ЭКП первой группы вносят наибольший вклад в кинетику образования ЭКП внутри ГКП.

4. Особенность кинетики ЭКП второй группы заключается в следующем. Среди одночастичных процессов процессы гибели ЭКП преобладают над процессами образования. Среди двухчастичных процессов процессы образования ЭКП преобладают над процессами гибели.

Список литературы

- [1] Миркаримов А.М., Пожаров С.Л., Солдатов И.В. // Узб. физ. журн. 1996. № 4. С. 45–52.
- [2] Пожаров С.Л., Миркаримов А.М., Солдатов И.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 11. С. 57–62. Technical Physics J. American Phys. 1998. Vol. 43. N 11. P. 1323–13283.
- [3] Arifov U.A. et al. European Patent N 0468110. 1990. Pozharov S.L. et al. Patent of Russian Federation. N 93003651/12. 1993.
- [4] Пожаров С.Л. // Узб. физ. журн. 2000. Т. 2. № 3. С. 247–263.