

01;04;10

Самопроизвольное погасание дуги в эктонной модели

© С.А. Баренгольц, Г.А. Месяц

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: sb@nsc.gpi.ru

Поступило в Редакцию 8 ноября 2000 г.

Показано, что конечное время жизни эктона и связанная с этим цикличность процессов в катодном пятне вакуумной дуги определяет процесс самопроизвольного погасания вакуумной дуги. В рамках статистической модели, полученной на основе эктонного механизма функционирования катодного пятна, дано объяснение основным экспериментальным результатам.

Самопроизвольное погасание — одно из самых труднообъяснимых явлений, сопровождающих функционирование слаботочной вакуумной дуги. К настоящему времени не было предпринято даже попыток серьезного теоретического исследования этого явления. Вследствие этого богатый информационный материал, полученный в результате весьма трудоемких исследований, оказался не востребуемым. Это удивительно для практической важности проблемы.

Кесаев [1] внес, по-видимому, самый большой вклад в исследование проблемы самопроизвольного погасания дуги. Для широкого круга материалов катода им было доказано существование двух основных эмпирических соотношений, определяющих процесс самопроизвольного погасания дуги. Во-первых, он показал, что число дуг N , горящих в момент времени t , определяется случайным законом

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

где N_0 — общее число исследованных дуг, а τ — среднее время горения дуги. Во-вторых, им было установлено, что время τ зависит от тока

экспоненциально, т. е.

$$\tau = \tau_0 \exp [\varphi(i - i_{thr})], \quad (2)$$

где i_{thr} — пороговый ток дуги, τ_0 — средняя продолжительность разряда при токе $i = i_{thr}$.

В работах [2,3] развита эктонная модель катодного пятна вакуумной дуги. Ее основная идея состоит в том, что на поверхности катода появляются микровзрывы металла, обусловленные большой концентрацией энергии за счет джоулева разогрева. Эти микровзрывы сопровождаются испусканием порций электронов в течение $\sim 10^{-8}$ с в количестве $10^{11} - 10^{12}$ штук. Плазма, создаваемая этими взрывами, взаимодействует с твердой и жидкой поверхностью металла катода и приводит к новым микровзрывам. Таким образом, имеет место процесс самоподдержания дугового процесса, с которым связана внутренняя неустойчивость вакуумной дуги. Как было показано в [1], самопроизвольное погасание дуги и является одним из проявлений этой неустойчивости дуги.

Внутренняя неустойчивость процесса функционирования вакуумной дуги лежит в самой основе эктонной модели. На ее базе мы дали анализ явления самопроизвольного погасания дуги [4]. Причиной неустойчивости вакуумной дуги является конечное время жизни эктона и связанная с этим цикличность процессов в катодном пятне вакуумной дуги.

В основе эктонной модели лежит предположение, что катодное пятно вакуумной дуги состоит из отдельных ячеек. Каждая ячейка переносит ток, который не превышает удвоенного значения порогового тока i_{thr} . Ячейка имеет конечное время жизни t_c , которое называется циклом. Цикл состоит из двух стадий: первая стадия — это время t_e , в течение которого происходит непосредственное функционирование эктона, и вторая стадия меньшей длительности t_i , в течение которой происходит иницирование нового эктона взамен исчезнувшего. Следовательно, вероятность того, что эктона нет, равна:

$$\alpha = \frac{t_i}{t_e + t_i}, \quad (3)$$

а того, что эктон функционирует:

$$\beta = 1 - \alpha = \frac{t_e}{t_e + t_i}. \quad (4)$$

Величина α характеризует эффективность восстановительного механизма. Если ток дуги менее $2i_{thr}$ — двух пороговых токов, то в катодном пятне будет одна ячейка, в которой то исчезает, то возникает новый эктон. При $i \gg i_{thr}$ количество ячеек

$$L = \frac{i}{2i_{thr}}. \quad (5)$$

Для вероятности функционирования одновременно M ячеек, а следовательно и эктонов в момент времени t , можно записать [4]:

$$\omega = \left[\frac{L!}{M!(L-M)!} \beta^M \alpha^{L-M} \right]^{t/t_c}, \quad (6)$$

где t_c — длительность цикла. Определим момент погасания дуги как таковой, когда не функционирует ни одного эктона. Отсюда вероятность дуги в момент времени t

$$\omega = [1 - \alpha^L]^{t/t_c}. \quad (7)$$

Так как $\alpha^L \ll 1$ при $L > 1$, то из (7) следует

$$\omega \approx \exp\left(-\frac{t\alpha^L}{t_c}\right). \quad (8)$$

Следовательно, из N_0 зажженных дуг к моменту времени t горят

$$N \approx N_0 \exp\left(-\frac{t\alpha^L}{t_c}\right). \quad (9)$$

Это совпадает по форме с эмпирически установленным соотношением (1), где величина

$$\tau = \frac{t_c}{\alpha^L} \quad (10)$$

является средним временем горения дуги.

Нетрудно показать, что зависимости $\tau(i)$ в соотношениях (2) и (10) также совпадают по форме. Действительно, из (2) можно получить

$$\ln \frac{\tau}{\tau_0 \exp(-\varphi i_{thr})} = \varphi i, \quad (11)$$

а из (10) с учетом (5)

$$\ln \frac{\tau}{t_c} = \frac{\ln(\alpha^{-1})}{2i_{thr}} i. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что

$$\varphi = \frac{\ln(\alpha^{-1})}{2i_{thr}}, \quad (13)$$

а

$$t_c = \tau_0 \exp(-\varphi i_{thr}). \quad (14)$$

Подставляя (13) в (14), получим

$$t_c = \tau_0 \alpha^{1/2}. \quad (15)$$

Таким образом, нам удалось связать параметры эмпирических формул (1) и (2), полученных Кесаевым [1], с параметрами, характеризующими эктонную модель. Например, для вольфрама и меди $\alpha \approx 0.2$, а $t_c \approx 30$ ns. Следовательно, согласно (10), при $L = 2$ время $\tau \sim 10^{-6}$ s, что согласуется с экспериментальными результатами, приведенными в [5].

Работа поддержана грантами РФФИ–ИНТАС № 97–0663 и РФФИ № 9–02–18234.

Список литературы

- [1] Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
- [2] Mesyats G.A. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1995. V. 23. N 6. P. 878–883.
- [3] Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [4] Barendgolds S.A., Mesyats G.A., Chentsov A.V. // Proc. XVIII Int. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum. Eindhoven. 1998. P. 219–221.
- [5] Juttner B., Puchkarev V.F. // Handbook of vacuum arc. Science and technology. Ed. by Voxman R.L., Martin P.J., Sanders D.M. Park Ridge: Noyes Publications, 1995. P. 73–151.