

## Взаимодействие плазменных струй и капель в прикатодной области вакуумной дуги

Г. А. Месяц, С. А. Баренгольд\*<sup>1)</sup>

Институт электрофизики Уральского отделения РАН, 620016 Екатеринбург, Россия

\*Центр естественно-научных исследований Института общей физики РАН, 117942 Москва, Россия

Поступила в редакцию 28 января 2002 г.

С позиций эктонной модели катодного пятна рассмотрен процесс взаимодействия жидкометаллических капель и плазменных струй в прикатодной области вакуумной дуги. Показано, что разогрев капли, находящейся в зоне функционирования катодного пятна, может приводить к ее переходу в плазменное состояние.

PACS: 52.40.Hf, 52.80.–s

В работе [1] при исследовании параметров прикатодной плазмы с использованием скоростной лазерной диагностики были обнаружены плотные плазменные образования на расстояниях в несколько микрон от поверхности катода. Концентрация плазмы в этих сгустках оказалась близка к концентрации плазмы непосредственно в катодных пятнах и составляла величину  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Мы считаем, что возникновение плазменных образований вблизи катода связано с взаимодействием плазменных струй и капель, испускаемых катодным пятном вакуумной дуги. Рассмотрим этот эффект подробнее.

Известно, что катодное пятно вакуумной дуги испускает плазменные струи, скорость которых  $\sim 10^6 \text{ см/с}$ , и жидкометаллические капли, летящие со скоростью  $\sim 10^4 \text{ см/с}$  [2, 3]. Плазменные струи образуются за счет высокой концентрации энергии в микрообъемах катода из-за джоулева разогрева протекающим током высокой плотности. Высокая концентрация энергии приводит к взрывообразному разрушению катода, сопровождаемому взрывной электронной эмиссией. Выплескивание жидкого металла в виде капель и струй из области катодного пятна происходит под действием реактивной силы, возникающей при разлете высокоскоростных плазменных струй. Размеры капель зависят от тока дуги. При токах, близких к пороговому току дуги  $i_{thr}$ , для таких материалов, как медь, золото и палладий, распределение капель по размерам имеет максимум в районе 0.1–0.2 мкм, а число капель, вылетающих с катода на единицу протекшего заряда, составляет  $\sim 10^7 \text{ Кл}^{-1}$  [4]. Рост тока приводит к укрупнению капель, так при  $i \gg i_{thr}$  наблюдаются капли разме-

ром до десяти микрон. Почти 90% капельной массы вылетает под углом  $< 20^\circ$  к плоскости катода со скоростью  $\sim 10^3 - 10^4 \text{ см/с}$  [2, 3].

Катодное пятно обладает внутренней структурой, проявляющейся в существовании отдельных ячеек пятна, время жизни которых  $\sim 10^{-8} \text{ с}$  [2]. В связи с этим функционирование катодного пятна сопровождается циклическим испусканием плазменных струй и жидкометаллических капель. Кроме этого, само катодное пятно находится в постоянном хаотическом движении. Из-за большой разницы в скоростях разлета плазмы и капель может возникнуть ситуация, когда в каплю попадает струя катодной плазмы. Это явление напоминает нам выстрел охотника по летящей птице, поэтому мы назвали его “хантинг-эффектом”.

Рассмотрим незаряженную каплю, находящуюся в потоке квазинейтральной плазмы, испускаемой катодным пятном. Для плотности потока энергии  $P_i$ , передаваемой капле ионами плазменной струи в единицу времени, можно записать:

$$P_i = \frac{j_i(\bar{E}_i + \bar{U}_i - Z\varphi)}{eZ}, \quad (1)$$

где  $j_i$  – плотность ионного тока;  $Z$  и  $\bar{E}_i$  – средний заряд и энергия ионов;  $\varphi$  – работа выхода электрона.  $\bar{U}_i = \sum_i f_i U_i$  – средний потенциал ионизации;  $f_i$  – доля ионов с зарядом  $i$ .

При взаимодействии с каплей электроны передают ей кинетическую энергию и энергию, равную работе выхода электронов:

$$P_e = \frac{j_i(2kT_e + \varphi)}{e}, \quad (2)$$

где  $T_e$  – температура электронов.

<sup>1)</sup>e-mail: sb@nsc.gpi.ru

Исследование потока ионов из плазмы вакуумной дуги показало, что ионный ток в сторону анода пропорционален току дуги  $I$  с коэффициентом  $\alpha \approx 0.1$  [5]. Соответственно, для плотности ионного тока можно записать:

$$j_i = \alpha I/S, \quad (3)$$

где  $S$  – сечение плазменной струи в месте ее взаимодействия с каплей.

С учетом (1)–(3) выражение для удельной энергии  $w$ , полученной каплей радиусом  $R_d$  от плазменной струи, выглядит следующим образом:

$$w = \frac{3\alpha I(\bar{E}_i + \bar{U}_i + 2ZkT_e)}{4SZR_d\rho e}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала катода. Отметим, что согласно (4) удельная энергия обратно пропорциональна радиусу капли.

Анализ параметров плазменной струи, входящих в уравнение (4), проведем с помощью эктонной модели катодного пятна вакуумной дуги [2]. Согласно эктонной модели, катодное пятно состоит из отдельных ячеек, испускающих порцию электронов – эктон. Ток ячейки пятна приблизительно равен удвоенному пороговому току горения дуги. При увеличении тока дуги ячейки пятна группируются в непосредственной близости друг от друга, так как в этом случае реализуются энергетически более выгодные условия для воспроизводства эктонных процессов. При этом параметры плазмы формируются в результате функционирования единичной ячейки пятна при взрывообразном разрушении участка катода под действием тока высокой плотности. Моделирование эктонных процессов показало, что ионизационные процессы сосредоточены в узкой области порядка микрометра вблизи катода и в дальнейшем ионизационный состав дуговой плазмы практически не меняется [6]. Под действием градиента электронного давления ионы уже на расстоянии в несколько микрон приобретают скорости направленного движения на уровне  $10^6$  см/с. С учетом этого, для оценки параметров ионного потока  $\bar{E}_i$  и  $\bar{U}_i$ , входящих в уравнение (1), можно воспользоваться их значениями, измеренными вдали от катода. В качестве материала катода возьмем Си, как наиболее полно исследованный с точки зрения катодных процессов и свойств дуговой плазмы. Средняя кинетическая энергия ионов и средний потенциал ионизации для Си равны соответственно 56 и 20.4 эВ [7, 8]. Температура электронов вблизи катода  $\sim 3 - 4$  эВ [6]. Соответственно величина энергии (выражение в скобках (4)), передаваемой ионами и электронами капле, составляет  $\approx 90$  эВ для медного катода.

Капельная фракция эрозии катода играет важную роль в процессе самоподдержания дугового разряда [2]. В момент отрыва капли образуется тонкая перетяжка. Ток ионов из плазмы, замыкающийся на каплю, течет через перетяжку. Поскольку отношение площадей поверхности капли и сечения перетяжки может быть большим, в перетяжке достигается плотность тока, достаточная для ее взрыва и возникновения эктона. Характерное время эктонного процесса  $\sim 20 - 30$  нс [2]. При скорости  $10^4$  см/с капля удалится от поверхности катода на расстояние, не превышающее 2–3 мкм. Если капля диаметром 0.1–0.2 мкм после отрыва находится в области разлета плазменной струи, образующейся при функционировании эктона, то, согласно (4), при токе эктона 3.2 А за время 20–30 нс достигается величина  $w > 10^4$  Дж/г, даже в случае сферически-симметричного разлета плазмы, то есть при  $S = 2\pi r^2$ , где  $r$  – расстояние от катода. Такая величина удельной энергии соответствует температуре капли, превышающей 2 эВ и, как показано при исследовании электрического взрыва проводника и иницировании взрывной электронной эмиссии [2], достаточна для перехода из конденсированного в плазменное состояние.

Выше показана возможность образования плотной плазмы в процессе функционирования единичной ячейки пятна. Рост тока приводит к увеличению количества эктонов и укрупнению капель. Возникновение крупных плазменных сгустков на некотором удалении от поверхности катода возможно при переходе пятна на новое место, когда в зону его действия попадает капля, образованная при функционировании предыдущего катодного пятна. Этот процесс вполне вероятен, поскольку скорость перемещения пятна по поверхности катода ( $\sim 10^4$  см/с) сравнима со скоростью полета капли.

Рассмотрим взаимодействие капли с коллективизированной плазменной струей, созданной ансамблем одновременно функционирующих эктонов. Для оценки плотности ионного тока воспользуемся данными работы [9], согласно которым диаметр катодного пятна при токе 100 А составляет 10 мкм. В этом случае для капли радиусом  $R_d = 0.5$  мкм, находящейся на расстоянии 5 мкм от поверхности катода, и плазменной струи с углом разлета  $60^\circ$  [10] при  $t = 30$  нс удельная энергия превышает  $10^4$  Дж/г.

Таким образом, анализ, проведенный с позиций эктонной модели, показал возможность образования плотных плазменных сгустков вблизи катода за счет взаимодействия плазменных струй и капель, испускаемых катодным пятном вакуумной дуги.

1. А. В. Батраков, Б. Ютнер, С. А. Попов и др., Письма в ЖЭТФ **75**, 84 (2002).
2. Г. А. Месяц, *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга*, М.: Наука, 2000.
3. *Handbook of vacuum arc science and technology*, Eds. R. L. Boxman, P. J. Martin, and D. M. Sanders, Noyes Publications, Park Ridge, USA, 1995.
4. T. Utsumi and J. H. English, J. Appl. Phys. **46**, 126 (1975).
5. C. W. Kimblin. J. Appl. Phys. **44**, 3074 (1973).
6. С. А. Баренгольц, Г. А. Месяц, Д. Л. Шмелев, ЖЭТФ **120**, 1227 (2001).
7. G. Yu. Yushkov, E. M. Oks, A. Anders, and I. G. Brown, J. Appl. Phys. **88**, 5618 (2000).
8. I. G. Brown, Rev. Sci. Instrum. **65**, 3061 (1995).
9. J. E. Daalder, IEEE Trans. Pow. Appl. Syst. **PAS-93**, 1747 (1974).
10. M. P. Reese, Proc. IEE **110**, 793 (1963).