

Влияние пульсаций тока на эрозию вольфрамового катода

© Н.К. Митрофанов,¹ К.К. Забелло,¹ V.A. Nemchinsky,² С.М. Школьник¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Keiser University, Fort Lauderdale, FL,
33309, USA

e-mail: zabellok@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 15 июля 2015 г.)

Исследована эрозия термоэмиссионного вольфрамового катода. Определены режимы горения дуги, в которых потери массы катода определяет парогазовая эрозия. Показано, что она не зависит от амплитуды пульсаций тока дуги и составляла примерно 2 ng/C. Амплитуда пульсаций тока в экспериментах менялась от ± 1 до $\pm 50\%$.

1. Исследования эрозии термоэмиссионных катодов представляют не только физический, но и большой практический интерес, поскольку такие катоды используются в различных дуговых аппаратах для резки и сварки металлов. Исследования ведутся не один десяток лет и дали значительные научные и практические результаты, однако все еще остаются далеко не завершенными [1].

Известно, что на эрозию термокатода влияет много различных факторов. Эрозия зависит от материала катода и технологии его изготовления, природы рабочего газа (при этом в случае катода на основе вольфрама большую роль могут играть даже небольшие примеси паров воды или кислорода), геометрии катода (его диаметра и длины выступающей из держателя части), способа заделки катода в держатель, формы привязки дуги к катоду, газодинамики рабочего газа в межэлектродном промежутке и др. [2]. В ряде работ обнаружено влияние пульсаций тока на эрозию [3,4]. Как следует из результатов работы [3], для вольфрамовых катодов это влияние может быть сильным — при невысоких частотах (50–100 Hz) пульсации амплитудой больше 30 % увеличивают эрозию на порядок величины и более. Согласно [4], влияние пульсаций на эрозию катода из торированного вольфрама значительно слабее.

Сильное влияние пульсаций тока на эрозию вольфрамового катода, обнаруженное в работе [3], пока не было подтверждено в других работах. Между тем оно имеет важное прикладное значение, поскольку усиливает требования к источникам питания. Причиной пульсаций тока может быть также и шунтирование дуги в канале плазмотрона.

Целью настоящей работы было исследование влияния на эрозию амплитуды пульсаций при ее изменении в широких пределах. Эксперименты проводились при частоте пульсаций 100 Hz. Амплитуду пульсаций тока $\alpha = \Delta I/I$ изменяли в пределах от ± 1 до $\pm 50\%$. Все остальные условия экспериментов оставались при этом неизменными.

Отметим, что в большинстве технических устройств, использующих термоэмиссионные катоды, необходимо минимизировать эрозию. Потому режимы с большим

вкладом капельной эрозии для прикладных целей обычно не представляют интереса. Соответственно и в физических исследованиях эрозийных процессов необходимо отличать режимы с чисто парогазовой эрозией и с капельной эрозией. Во многих исследованиях, к сожалению, доля капельной эрозии не контролировалась.

2. Эксперименты были выполнены на установке, подробно описанной в работе [5], здесь же мы укажем лишь основные ее параметры. Свободногогорящая аргоновая дуга горела при атмосферном давлении в водоохлаждаемой камере из нержавеющей стали объемом около 5 л. Камера снабжена смотровыми окнами. Электроды были расположены вертикально (катод внизу). Перед экспериментом камера откачивалась при прогреве до давления $p \sim 0.1$ Pa. После откачки камера промывалась аргоном и затем заполнялась до рабочего давления, превышающего атмосферное на несколько процентов. Использовался аргон марки ОЧ.

Катодный стержень был изготовлен из прутка вольфрама марки ВА (99.95%, основная примесь — молибден) диаметром 3 mm. Плотность использованных нами образцов составляла 18.6 ± 0.6 g/cm³. Отрезок прутка длиной 25 mm запрессовывался в медный водоохлаждаемый держатель. Длина выступающей части катодного стержня составляла 20 mm. Рабочий конец стержня не затачивался и имел по краю закругление радиусом ≈ 0.2 –0.3 mm. Использовался медный водоохлаждаемый плоский анод диаметром 60 mm. Межэлектродный промежуток — расстояние от кончика катодного стержня до плоскости анода — составлял 10 mm.

Двуполупериодный выпрямитель (выходное напряжение ≈ 80 V) был нагружен батареей конденсаторов, емкость которой варьировала для изменения амплитуды пульсаций тока. Дуга подключалась к батарее последовательно с переменным балластным сопротивлением, обеспечивавшим ступенчатое изменение тока в пределах до 200 А. Поджиг разряда осуществлялся обрывом тока (≈ 50 А) во вспомогательной цепи.

В эксперименте измерялись ток (с помощью калиброванного шунта) и напряжение горения дуги. Измерения проводились каждые 2 min. Примеры осциллограмм

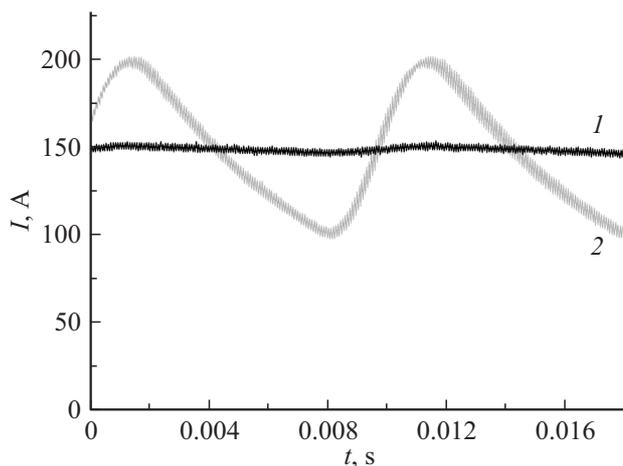


Рис. 1. Осциллограммы тока дуги при различных амплитудах пульсаций: 1 — $\alpha = 1\%$, 2 — $\alpha = 33\%$.

тока приведены на рис. 1. Эрозия определялась путем взвешивания на весах ЛВ-210А. Каждое взвешивание повторялось 10 раз. Результаты усреднялись. Погрешность оценивалась по разбросу результатов и составляла не более ± 0.1 mg. В процессе горения дуги за ней велось визуальное наблюдение. Увеличенное в 2 раза изображение дуги создавалось с помощью линзы на экране, расположенном против одного из окон камеры. После завершения измерений поверхность катода анализировалась с помощью оптического микроскопа.

3. Эксперименты проводились при токах $I \approx 120\text{--}150$ А. Для каждого эксперимента использовался новый катодный стержень. Отметим, что во всех экспериментах привязка дуги к катоду имела диффузный характер. Термин „диффузный“ здесь имеет тот же смысл, что и в [5]. Дуга горела устойчиво (без обрывов тока), но катодная привязка время от времени смещалась в пределах торца катода.

В первой серии экспериментов длительность горения дуги составляла ≈ 1 h. При визуальном наблюдении за дугой было обнаружено, что через 35–40 min после поджига дуги на катоде появлялся выступ с характерным размером порядка радиуса катодного штыря, к которому и была привязана дуга. Выступ мог разгладиться из-за внезапного перемещения привязки (в пределах торца катода), однако наблюдались и другие процессы — вытягивание и отрыв части выступа.

После завершения экспериментов на поверхности анода были обнаружены капли катодного материала. Наиболее крупные капли имели размер $\sim 100\text{--}300$ μm , а остальные — 1–30 μm . Более мелкие капли мы не имели возможность зарегистрировать. В тех случаях, когда происходил отрыв выступа, количество крупных капель увеличивалось. Часть капель могла быть вынесена через боковую поверхность, потому надежно определить долю капельной эрозии невозможно. Для определения парогазовой эрозии катода было необходимо избежать или минимизировать образование капель.

С этой целью в последующих экспериментах проводился непрерывный визуальный контроль состояния катода и время горения дуги ограничивалось моментом, когда становится заметно изменение формы катода. Опыт показал, что ограниченная таким образом длительность горения дуги составляет 30–35 min. В таком режиме была проведена вторая серия экспериментов, в которой значения амплитуды пульсаций изменялась в широком диапазоне. Ниже приведены результаты, полученные во второй серии экспериментов.

Примеры зависимости напряжения дуги от времени приведены на рис. 2. Видно, что в течение первых 10–12 min напряжение на дуге возрастало примерно на 2 В, а далее стабилизировалось. В ряде экспериментов в некоторые моменты времени наблюдались подъемы напряжения (~ 1 В), которые спустя некоторое время исчезали. Как показали визуальные наблюдения, подъемы напряжения связаны с изменением положения привязки дуги на катоде, в результате которого канал дуги отклонялся от вертикали. Другой причиной изменения напряжения могло быть изменение формы привязки дуги к аноду. Возрастание напряжения в начале эксперимента сопровождалось уменьшением тока на несколько ампер. После стабилизации напряжения стабилизировался и ток.

Прошедший через катод заряд в разных экспериментах менялся в пределах от $\approx 2 \cdot 10^5$ до $\approx 3 \cdot 10^5$ С. Уменьшение массы катода менялось от ≈ 0.5 до ≈ 1.0 mg. При определении эрозии была учтена стартовая эрозия — потеря массы в процессе горения нестационарных катодных пятен, образующихся при поджиге путем обрыва тока во вспомогательной цепи. Необходимость определения стартовой эрозии связана с высокой скоростью эрозии в нестационарных катодных пятнах ($\sim 10^{-5}\text{--}10^{-4}$ г/С), горящих на катоде несколько десятых долей секунды после поджига дуги [6]. Для

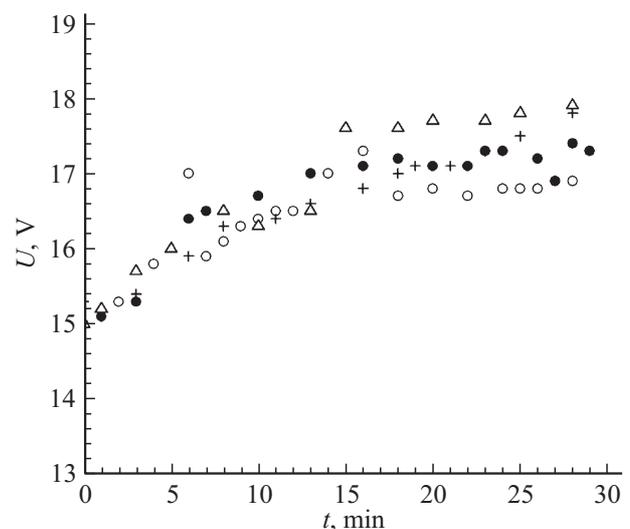


Рис. 2. Зависимость напряжения дуги от времени. \circ — $\alpha = \pm 1\%$, $I = 114$ А; $+$ — $\alpha = \pm 25\%$, $I = 121$ А; \bullet — $\alpha = \pm 40\%$, $I = 133$ А; Δ — $\alpha = 49\%$, $I = 118$ А.

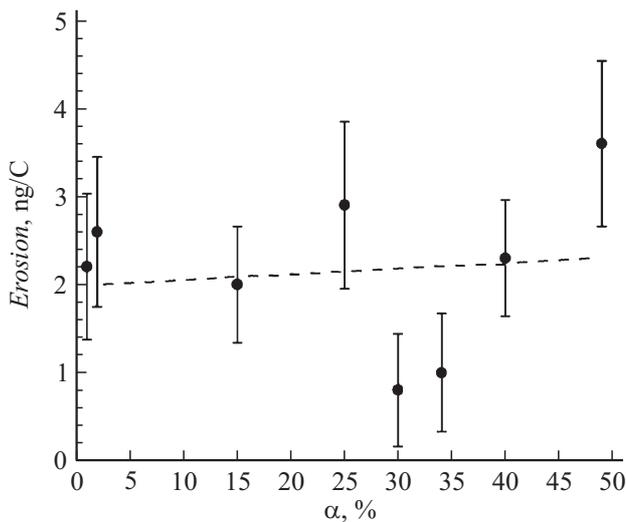


Рис. 3. Зависимость эрозии катода от амплитуды пульсаций.

определения стартовой эрозии были определены потери массы нескольких катодов в экспериментах, в которых разряд гасился немедленно после перехода в термоэмиссионный режим. Среднее значение полученной таким способом стартовой эрозии составило 0.2 mg.

Во второй серии экспериментов в отличие от экспериментов первой серии на поверхности анода не было обнаружено крупных капель, а количество мелких капель было невелико: не более 1–3 штук. Это позволяет считать, что вкладом капельной эрозии можно пренебречь и считать, что зафиксированная нами эрозия является парогазовой. Полученные в этой серии результаты измерений эрозии представлены на рис. 3. Значительная погрешность полученных нами результатов связана с малыми потерями массы и не слишком высокой точностью взвешивания. Малые потери массы в наших экспериментах объясняются вынужденным ограничением времени горения дуги.

Как уже было отмечено выше, катодная привязка совершала спонтанные перемещения в пределах торца катода. Поэтому весь торец катода к концу эксперимента был оплавлен. На фоне этого оплава обычно был хорошо различим отпечаток дуги на том месте, которое привязка занимала непосредственно перед отключением тока. Отпечаток имел блестящую поверхность, в то время как окружающая его часть поверхности была шероховатой. Плотность тока, оцененная по размеру отпечатка, составляла $j \approx 3\text{--}4 \text{ kA/cm}^2$ и в пределах этого разброса не зависела от амплитуды пульсаций.

4. Полученные результаты показывают, что стационарному состоянию дуги с вольфрамовым катодом предшествует переходная стадия, длящаяся 10–12 min (рис. 2). Это известный результат, который объясняется тем, что после разогрева катода в нем начинаются процессы рекристаллизации, следствием которых является изменение работы выхода [6]. Затем устанавливается стационарное состояние, в котором напряжение и ток мало ме-

няются, а эрозия происходит в парогазовой форме. Полученная нами оценка плотности тока ($j \approx 3\text{--}4 \text{ kA/cm}^2$) находится в хорошем согласии с полученными ранее значениями плотности тока в диффузной привязке к вольфрамовому катоду в стационарной стадии горения дуги [5]. Очевидно, что длительность стадии, в которой парогазовая эрозия играет основную роль, зависит от тока, размеров катода и т.д., однако исследование этих вопросов не являлось предметом настоящего исследования.

Как видно из рис. 3, средняя величина эрозии по результатам восьми экспериментов составила $\approx 2 \text{ ng/C}$, что существенно ниже большинства значений этой величины, приведенных в обзоре [6]. Можно предположить, что в перечисленных в [6] работах не было уделено достаточно внимания образованию капель. Из рис. 3 видно, что, несмотря на немалый разброс результатов и большое значение погрешности определения эрозии, зависимости эрозии от амплитуды пульсаций тока нет. В работе [1] высказано предположение, что так называемый „open blanket effect“ (эффект открытого одеяла) может быть привлечен для объяснения увеличения эрозии при увеличении амплитуды пульсаций тока. Резкое возрастание эрозии связано с тем, что так называемый „рециклинг ионов“ перестает работать, если разогретая часть катода не закрыта плазмой. Для уменьшения эрозии необходимо, чтобы незакрытая плазмой поверхность (поверхность, открывающаяся при уменьшении тока в процессе пульсаций) быстро остывала. С другой стороны, в той же работе отмечено, что, поскольку вольфрам имеет высокую теплопроводность, которая в несколько раз выше теплопроводности, например тория или гафния, то эффект открытого одеяла едва ли может играть роль на вольфрамовых катодах. По нашему мнению, возрастание эрозии при увеличении амплитуды пульсаций связано с ростом капельной фазы эрозии, роль которой часто не контролируется. Парогазовая фаза эрозии не зависит от амплитуды пульсаций тока.

Список литературы

- [1] Nemchinsky V. // IEEE Trans. Plas. Sci. 2014. Vol. 42. N 1. P. 199–215.
- [2] Гордеев В.Ф., Пустогаров В.А. Термоэмиссионные дуговые катоды. М.: Энергоатомиздат, 1988. 191 с.
- [3] Гаврюшенко Б.С., Пустогаров А.В. Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов. Новосибирск, 1977. С. 85–122.
- [4] Harris W.J., O'Hair E.A., Hatfield L.L., Kristiansen M. // Proc. 23th IEPC. Vol. 3. Sep. 1993. P. 1–13.
- [5] Митрофанов Н.К., Школьник С.М. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 6. С. 34–44.
- [6] Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В. и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 88–108.