

04;12

Влияние величины тока и температуры рабочего газа на эрозию электродов разрядной камеры мощных импульсных плазмотронов

© А.В. Будин, В.А. Коликов, Ф.Г. Рутберг

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
191186 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: rutberg@iperas.spb.su

(Поступило в Редакцию 11 декабря 2006 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований эрозии различных материалов, использовавшихся для изготовления электродов разрядных камер мощных импульсных плазмотронов — основной составной части электроразрядных легкогазовых ускорителей тел. Получены зависимости величины удельной эрозии от амплитуды разрядного тока и среднемассовой температуры рабочего газа (водорода). Эксперименты проводились при значениях разрядного тока 300–1400 кА, среднемассовой температуры газа 700–4500 К, электрического заряда 70–700°С, начального давления водорода до 42 МПа и импульсного давления в разрядной камере 100–520 МПа.

PACS: 52.50.Nr, 52.77.Fv, 52.80.-s

Введение

Важным, с точки зрения понимания процессов, протекающих в разрядной камере мощных импульсных плазмотронов, как составной части электроразрядных легкогазовых ускорителей и при ускорении метаемых тел, является знание количественных характеристик и основных механизмов эрозии материалов электродной системы. Дело в том, что металл, испарившийся или выброшенный с электродов в виде расплава, влияет на характеристики дуги, такие как напряженность электрического поля, излучательные и динамические характеристики и т.д. [1–4], и на параметры рабочего газа: теплоемкость, теплопроводность, плотность, вязкость, что должно сказываться на процессах теплопереноса в разрядной камере [5].

Кроме того, присутствие в рабочем газе паров металла электродов приводит к увеличению его молекулярной массы и уменьшению скорости распространения звука, что снижает скорость метания и эффективность процесса ускорения тел [6].

В то же время исследования процессов, происходящих в разрядных камерах мощных импульсных плазмотронов, в том числе на электродах, представляют существенный интерес с точки зрения физики сильноточных разрядов в газах.

Наряду с интегральной величиной эрозии для характеристики процессов, происходящих в разрядных камерах импульсных плазмотронов, существенный интерес представляет отношение массы испарившегося металла к массе металла, выброшенного в виде расплава, или коэффициент выброса. В работах [7,8] указывается, что в диапазоне токов от 70 до 800 кА коэффициент выброса не зависит от электрического заряда и составляет: для меди — 40, молибдена — 40 и титана — 20%.

Другой величиной, характеризующей эрозию электродных материалов, может служить эрозионная стойкость R_e [7]:

$$R_e = \frac{cT_m}{kU_e},$$

где c — теплоемкость; T_m — температура плавления; k — коэффициент выброса; U_e — приэлектродное падение напряжения.

Многokратное изменение величины эрозии материала одного из электродов наблюдалось при замене материала противоположного электрода, что обусловлено увеличением или уменьшением интенсивности воздействия электродных струй на противоположный электрод за счет изменения атомной массы металла [7]. Это положение согласуется с выводами, сделанными в работе [9], где также установлена зависимость величины эрозии от расстояния между электродами.

В работе [10], где исследовался характер оплавления металлокерамических материалов, было установлено, что энергия, вводимая в такие материалы, меньше, чем энергия, вводимая в однородные материалы. Причиной этому, как утверждают авторы, служат тепловые потоки в поверхностных слоях материала, способствующие фиксации катодных пятен в местах с облегченными условиями парообразования и эмиссии электронов. Кроме того, в этом случае не образуется сплошной ванны расплава, что уменьшает выброс расплавленного металла и, следовательно, его эрозию.

В работах [11,12] исследовалась эрозия и разрушение электродных материалов при величине тока от 230 до 500 кА. Утверждается, что вынос расплавленного металла из ванны расплава обусловлен взаимодействием магнитного поля с током, протекающим в жидком металле. Таким образом, на основании краткого обзора работ, посвященных эрозии электродов в сильноточных разрядах, можно сделать вывод о том, что факторами,

ответственными за эрозию материала электродов, является выброс расплавленного металла из ванн расплава, его испарение и электродные струи.

Экспериментальная установка

Исследования влияния величины разрядного тока и температуры рабочего газа на удельную эрозию электродных материалов проводились на мощных импульсных плазмотронах, электроразрядных легкогазовых ускорителях и диагностической разрядной камере (рис. 1), разработанной для моделирования и исследования процессов, происходящих в разрядных камерах ускорителей.

Питание плазмотронов, ускорителей и диагностической разрядной камеры осуществлялось от конденсаторной батареи (напряжение 10 кВ, энергоемкость 6 МДж), разделенной на шесть автономных модулей, что позволяло формировать разрядный импульс тока и использовать отдельные модули батареи для питания менее энергоемких нагрузок.

Корпус камеры (5), как и разрядные камеры плазмотронов и ускорителей, изготовлен из термообработанной стали. Электродная система разрядной камеры, представленной на рис. 1, аналогична используемым в ускорителях, но может быть изменена в зависимости от условий проводимых экспериментов. Она состоит из катода (7) и двух сменных пластин (8), являющихся анодом, которые крепятся к верхней и нижней внутренним поверхностям разрядной камеры. К боковым сторонам камеры крепятся крышки (9), имеющие для визуализации процесса горения дуги (в зависимости от типа разрядной камеры) две продольные щели или окна круглой формы. В качестве материала окон использовался плексиглас толщиной 30 мм, уплотняемый резиновыми жгутами. Рабочий объем разрядной камеры 1.4 дм³. В верхней стенке камеры, в отверстиях (6), устанавливалось до четырех пьезоэлектрических датчиков импульсного давления Т-500 или Т-6000 с граничной частотой 250 кГц.

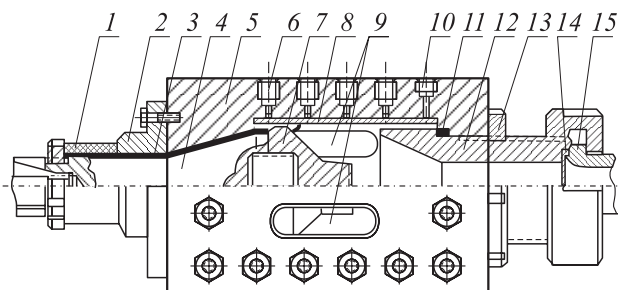


Рис. 1. Диагностическая разрядная камера: 1 — изоляционная втулка, 2 — контакт, 3 — изоляция электрододержателя, 4 — электрододержатель, 5 — корпус камеры, 6 — гнездо датчика давления, 7 — катод, 8 — сменный анод, 9 — смотровые окна, 10 — отверстие для подачи газа, 11 — уплотнение, 12 — державка диафрагменного узла, 13 — гайка, 14 — диафрагма, 15 — выпускная труба.



Рис. 2. Электроды разрядных камер: а — катоды, б — аноды.

Разрядный ток измерялся поясом Роговского, падение напряжения на дуге — резистивным делителем напряжения. Кроме того, через окна в боковых крышках (9) с помощью высокоскоростной (до 10^6 кадров в секунду) камеры ЖЛВ-2 проводилась съемка процесса горения дуги и приэлектродные явления. В оптических измерениях использовался эталонный источник света Подмошенского с яркостной температурой до $4 \cdot 10^4$ К. Регистрация параметров эксперимента осуществлялась с помощью осциллографов С9-8, а обработка полученных данных — с помощью персонального компьютера. Погрешность измерения давления, тока и напряжения не превышала 3% во всем диапазоне измеряемых параметров.

За время проведения исследований было опробовано более 30 вариантов разрядных камер, различающихся формой и материалом электродов (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

Результаты выполненных исследований показывают, что при величинах заряда до 700 С суммарная масса эродированного материала электродов находится в линейной зависимости от заряда (рис. 3).

В работе [7] также представлены зависимости эрозии электродов из меди, молибдена и титана, полученные в условиях импульсного колебательного разряда, от

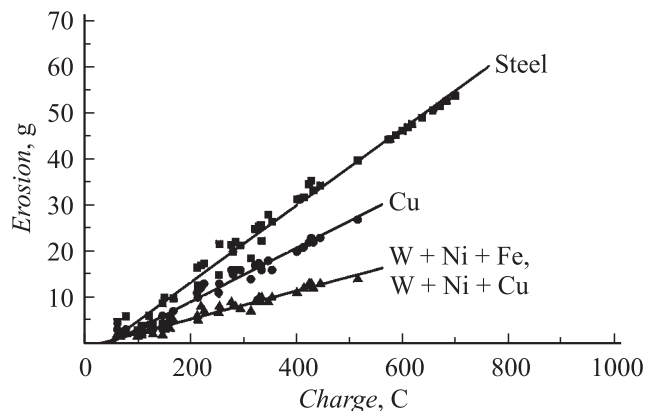


Рис. 3. Зависимость суммарной эрозии электродов от заряда.

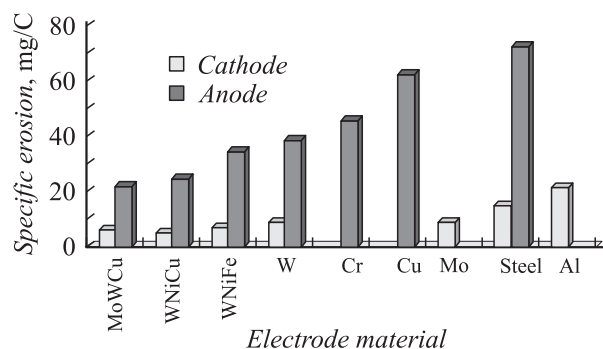


Рис. 4. Удельная эрозия материалов катода и анода.

величины заряда при токе до 0.8 МА и заряде до 70 С. Утверждается, что при величинах заряда в интервале от 10 до 40 С происходит скачкообразное возрастание эрозии, и при величине заряда более 40 С зависимости для всех металлов линейные. Таким образом, из результатов, представленных на графике (рис. 3), и того факта, что в данной работе мы используем для количественной оценки эрозии ее удельную величину, следует, что на представленные ниже зависимости величина электрического заряда не влияет.

На рис. 4 представлена диаграмма значений удельной эрозии сплава алюминия Д16 (Al), легированной стали (Steel), молибдена (Mo), меди (Cu), хрома (Cr), вольфрама (W), псевдосплава вольфрама, никеля и железа — ВНЖ (W + Ni + Fe), псевдосплава молибдена, вольфрама и меди — МВД (Mo + W + Cu) и псевдосплава вольфрама, никеля и меди — ВНДС (W + Ni + Cu), использованных нами в качестве материалов для изготовления электродов при проведении исследований мощных импульсных плазмотронов и электроразрядных ускорителей [13]. Диаграмма, так же как и представленные ниже зависимости, получена на основании обработки данных более 200 экспериментов.

В диаграмме представлены усредненные экспериментальные данные, соответствующие разрядному току 0.8 МА, электрическому заряду 360 С и среднемаассовой температуре рабочего газа 2300 К. Обращает на себя

внимание то, что удельные величины анодной эрозии в среднем в 4.5 раза превышают катодную. По-видимому, это может быть объяснено тем, что площади анодного и катодного пятен привязки дуги, измеренные методом „автографов“, находятся приблизительно в таком же соотношении, как и значения эрозии. Кроме того, величина падения напряжения у анода также существенно выше, чем у катода, а следовательно, энерговыделение на аноде должно быть выше [14]. Анализ экспериментальных данных по удельной эрозии показал, что ее величина зависит как от разрядного тока, так и от среднемаассовой температуры рабочего газа.

На рис. 5 представлены зависимости удельной эрозии материалов, использованных в качестве катодов, от амплитудного значения разрядного тока. Как видно из графика, при общем для всех зависимостей растущем характере наивысшей эрозионной стойкостью обладает ВНДС, а наименьшей — алюминий. Однако алюминиевый сплав Д16 обладает одним положительным качеством: он не осаждается на внутренних стенках канала ускорителя (как, например, медь или сталь) и поэтому может быть использован в экспериментах, где не требуются сверхвысокие скорости метания, в качестве материала катодов.

На рис. 6 представлены зависимости удельной эрозии стали, меди, вольфрама, ВНЖ и ВНДС при использовании их в качестве материала анода от амплитуды тока. Здесь, так же как и в предыдущем графике, зависимости растущие, а наименьшей эрозионной стойкостью, в отсутствие алюминия, который не использовался для изготовления анодов, обладает сталь. Однако использование стали оправданно и целесообразно в тех случаях, когда среднемаассовая температура рабочего газа по условиям опыта не должна превышать температуры ее кипения — 3000 К. В некоторых опытах аноды изготавливались из латуни Л62, которая обладает очень высокой удельной эрозией ~ 180 mg/C, в связи с чем от ее использования, даже в сочетании со вставками из ВНЖ, пришлось отказаться.

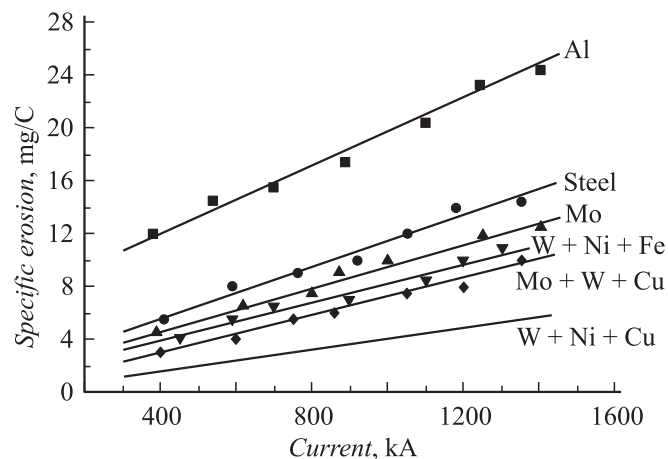


Рис. 5. Зависимости удельной эрозии катодных материалов от тока.

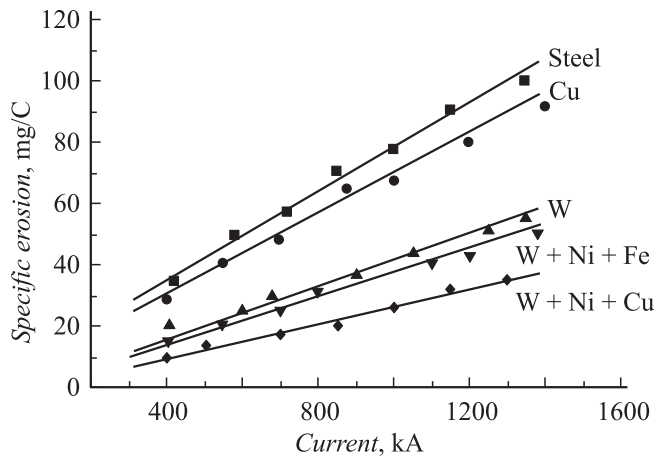


Рис. 6. Зависимости удельной эрозии анодных материалов от тока.

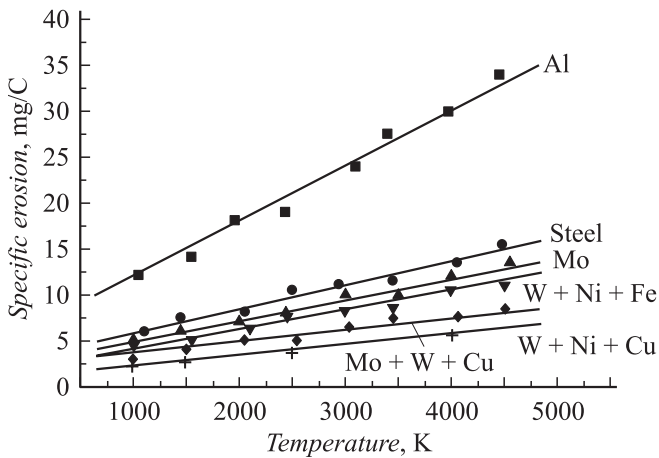


Рис. 7. Зависимость удельной эрозии катодных материалов от среднemasовой температуры газа.

Среднемассовая температура рабочего газа в диапазоне от 1000 до 4500 К существенно влияет на физико-химические свойства материала электродов, в том числе на величину удельной эрозии. На рис. 7 представлены зависимости удельной эрозии Al, стали, Mo, ВНЖ, МВД и ВНДС от среднemasовой температуры рабочего газа при использовании их в качестве материала катода.

На рис. 8 представлены зависимости удельной эрозии стали, меди, ВНЖ, ВНДС, МВД и плазменно напыленных вольфрама и его смеси с углеродом от среднemasовой температуры рабочего газа при использовании их в качестве материала анода.

На основании представленных графиков можно констатировать, что для всех четырех групп зависимостей высшей эрозионной стойкостью обладают сплавы на основе вольфрама, а низшей — алюминий, сталь и медь, при этом характер изменения величины удельной эрозии во всех случаях практически линейный. Обращает на себя внимание различие в степени изменения удельной

эрозии от температуры для анодов и катодов. Так, средняя величина удельной эрозии для всех использованных в качестве катодных материалов в рассматриваемом диапазоне температур увеличивается приблизительно в 2.5–3.5 раза, а анодных в 3–5 раз. Такое различие, на наш взгляд, может быть обусловлено интенсивным тепловым воздействием высокотемпературного газового потока, истекающего из разрядной камеры, на анод, который расположен в сопловой части разрядной камеры, в то время как катод расположен в „донной“ части разрядной камеры и такому воздействию со стороны газа практически не подвергается.

Таким образом, основными процессами, определяющими эрозию электродов в рассматриваемых случаях, являются выброс материала электродов из ванн расплава и его испарение. В выполненных экспериментах из-за высокой плотности потока энергии, достигающей 10^8 W/cm^2 [15], через несколько микросекунд образуется общая ванна расплава с диаметром, близким к диаметру пятна привязки дуги. Выброс расплава начинается после того, как магнитная (компенсирующая газодинамическое давление расплава в ванне) сила перестает действовать на поверхность расплавленного металла из-за перемещения пятна привязки дуги по электроду [2,4].

Оценки показывают, что глубина проплавления материала катода при действующем значении тока 0.7 МА, длительности импульса тока 1 ms и диаметре пятна привязки дуги $\sim 2 \text{ cm}$ составляет около 1.5 mm [15,16], что для вольфрама соответствует величине удельной эрозии $\sim 10 \text{ mg/C}$, которая удовлетворительно согласуется с данными экспериментов (рис. 4).

Кроме того, при малых величинах межэлектродного расстояния ($\leq 10 \text{ mm}$) величина эрозии может меняться за счет переноса металла с одного электрода на другой, например с анода на катод. Так, в некоторых экспериментах, выполненных с использованием высокоэрозионно-стойких материалов, наблюдался прирост массы катода за счет этого явления, достигающий 2g.

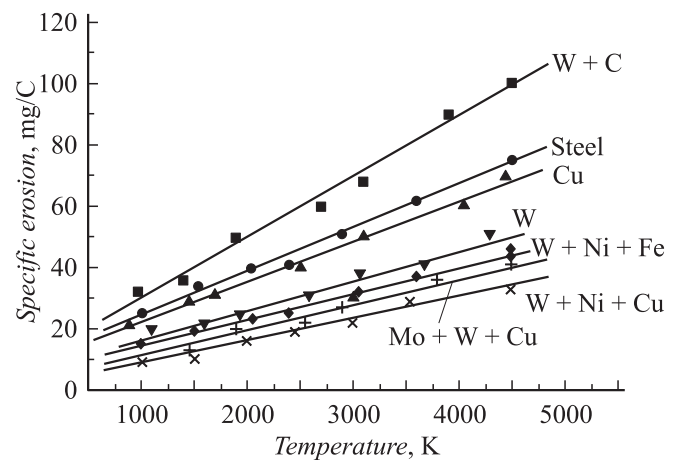


Рис. 8. Зависимость удельной эрозии анодных материалов от среднemasовой температуры газа.

Заключение

Установлено, что эрозия электродных материалов линейно зависит от заряда в диапазоне его изменения от 70 до 700 С и не сказывается на величине удельной эрозии.

На основании данных более чем 200 опытов получены зависимости удельной эрозии сплава алюминия Д16, легированной стали, молибдена, меди, хрома, вольфрама, псевдосплава вольфрама, никеля и железа, псевдосплава молибдена, вольфрама и меди, псевдосплава вольфрама, никеля и меди, плазменно напыленного вольфрама и плазменно напыленной смеси вольфрама и углерода, использованных нами в качестве электродов в мощных импульсных плазмотронах и электроразрядных легкогазовых ускорителях, работающих на водороде, от амплитудного значения разрядного тока и среднемаассовой температуры рабочего газа при давлении в разрядной камере от 100 до 520 МПа и величине разрядного тока от 300 до 1400 кА.

Установлены факторы, влияющие на характер эрозии электродных материалов и обуславливающие механизм их износа. Определены некоторые особенности эрозии анодных и катодных материалов в импульсных плазмотронах, заключающиеся в различии размеров пятен привязки дуги к электродам и в условиях обдува электродов высокотемпературным газом.

Авторы выражают благодарность А.А. Богомазу за участие в обсуждении результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке президиума РАН, программа П-09 „Исследование вещества в экстремальных условиях“; Российского фонда фундаментальных исследований, проекты №№ 05-02-16033 и 05-08-01125; Федерального агентства по науке и инновациям, государственный контракт № 02.445.11.7384.

Список литературы

- [1] *Rutberg Ph.G., Budin A.V., Kolikov V.A. et al. // 4th Europ. Symp. on ELT. Celle, Germany, 1993. Paper № 501. P. 5.*
- [2] *Rutberg Ph.G., Bogomaz A.A., Budin A.V. et al. // IEEE Transact. on Pl. Sc. 2003. Vol. 31. N 2. P. 957.*
- [3] *Цветков И.В. // Физ. плазмы. 1993. Т. 19. № 10. С. 1281.*
- [4] *Рутберг Ф.Г., Богомаз А.А., Будин А.В. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 1. С. 28.*
- [5] *Rutberg Ph.G., Bogomaz A.A., Budin A.V., Kolikov V.A. // Int. J. of Impact Engineering. 1995. Vol. 17. P. 93.*
- [6] *Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg Ph.G. // IEEE Trans. on Pl. Sci. 2006. Vol. 34. N 4. P. 1693.*
- [7] *Белкин Г.С., Киселев В.Я. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 5. С. 977.*
- [8] *Белкин Г.С., Киселев В.Я. // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 2. С. 384.*
- [9] *Donaldson A.L., Kristiansen M., Watson A. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22. N 6. P. 1441.*
- [10] *Белкин Г.С., Данилов М.Е. // Электричество. 1972. № 8. С. 45.*
- [11] *Watson A., Donaldson A.L., Ikuta K., and Kristiansen M. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22. N 6. P. 1799.*
- [12] *Donaldson A.L., Engel T.G., Kristiansen M. // IEEE Trans. on Magn. 1989. Vol. 25. N 1. P. 138.*
- [13] *Рутберг Ф.Г., Будин А.В., Коликов В.А. и др. // ТВТ. 1994. Т. 32. № 4. С. 628.*
- [14] *Бакит Ф.Г., Бородин В.С., Воронов А.М. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 11. С. 190.*
- [15] *Пинчук М.Э., Богомаз А.А., Будин А.В. и др. // Физ. экстр. сост. вещества. Черноголовка: Ин-т проблем хим. физ. РАН, 2006. С. 162.*
- [16] *Богомаз А.А., Будин А.В., Коликов В.А. и др. // ДАН. 2003. Т. 388. № 1. С. 37.*