

06

Влияние технологии изготовления композитного сплава железо—медь на его эрозионные свойства в сильноточной дуге высокого давления

© А.В. Будин, М.Э. Пинчук, В.Е. Кузнецов, Ф.Г. Рутберг

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
E-mail: pinchme@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2014 г.

Проводится сравнение электроэрозионных характеристик материала на основе псевдосплава меди и железа CuFe (85/15%), получаемого методом послойной лазерной наплавки, с эрозией материалов CuW (25/75%) и CuFe (70/30%), произведенных традиционным методом порошкового сплавления. Эрозия электродов измерялась для дуг в диапазоне амплитуд тока от 50 до 150 кА при давлении воздуха от 20 Па до 2 МПа. Получены зависимости удельной эрозии от величины тока и давления газа. Новый материал обладает удельной эрозией $\sim 1 \text{ mg/C}$ на уровне материалов, произведенных по традиционному порошковому процессу.

Работа мощных электроразрядных устройств с большими токами сопровождается значительным износом электродных узлов [1–5].

Одно из направлений повышения экономичности и ресурса сильноточной высоковольтной аппаратуры — разработка и применение новых композиционных материалов для контактов и электродов [2,6]. Эффективность использования композиционных материалов в качестве контактных и электродных материалов в значительной мере определяется составом [2] и технологией их производства [2,6,7]. При подборе компонентов композиции придерживаются условия: один из компонентов должен обеспечивать высокую электрическую проводимость материала, второй — его механическую прочность и тугоплавкость [2]. Микроструктура контактных композиций представляет собой тонкую равномерную смесь двух или более фаз, из которых одна значительно более тугоплавкая, чем другая. При переходе одной из фаз в жидкое

состояние она капиллярными силами удерживается в порах более тугоплавкой фазы [2].

В настоящее время на смену традиционным технологиям порошковой металлургии [8] создания композитных материалов приходят новые, в частности лазерные технологии [7,9–10], которые позволяют в короткие сроки и с минимальными затратами создавать материалы с заранее заданными свойствами.

Предметом настоящего исследования в представленной работе являлся композиционный материал, CuFe (85/15%), полученный путем 3D лазерного синтеза (лазерная послойная наплавка) в ФГУП ЦНИИ КМ „Прометей“ [11]. Образцы материала изготавливались методом лазерной наплавки металлического порошка с размером частиц от 30 до 140 мкм в среде аргона. Данный метод производства позволяет менять состав компонентов по объему образца, подавая в зону наплавки вещество в соответствующих пропорциях, что открывает практически неограниченные возможности по интеллектуальному синтезу электродного материала. Небольшое изменение состава [12] позволяет менять физические свойства образца по объему. Также можно сформировать в месте контакта, механического прижима, сварки или пайки электрода с электрододержателем (контактодержателем) область с веществом высокой проводимости, а композиционные слои сформировать в области, подверженной непосредственному воздействию электрического разряда.

В настоящей работе использовались образцы равномерного состава.

Эксперименты проводились в разрядной камере, изготовленной из нержавеющей стали, имеющей объем $\sim 500 \text{ см}^3$. Электроды расположены соосно. Катод изолировался от корпуса камеры; анод гальванически соединялся с корпусом, который служил обратным токопроводом. Камера имеет два окна для оптической диагностики, отверстие для измерения импульсного давления, отверстие для откачки и закачки воздуха и выходное отверстие, закрываемое лавсановой диафрагмой.

Электроды из исследуемого материала представляли собой цилиндры диаметром 25 мм и высотой 20 мм. Они навинчивались на специальные держатели на катоде и аноде, межэлектродное расстояние составляло $20 \pm 0.5 \text{ мм}$. В качестве материала электродов использовались псевдосплавы, полученные методом порошкового спекания: CuW (BM25 — 25/75%) и CuFe (70/30%), и CuFe (85/15%), полученный путем 3D лазерного синтеза.

Композит CuW был выбран для сравнения как материал с заведомо высокой эрозионной стойкостью [13], широко распространенный в электронике больших мощностей. Данные об эрозии псевдосплава CuFe(70/30%) использовались для определения влияния технологии изготовления материалов с близким химическим составом на их эрозионные свойства. Величина эрозии электродов измерялась путем их взвешивания до и после одного разрядного импульса на высокоточных весах Shimadzu AUW220D. Величина эрозии усреднялась по нескольким экспериментам.

В качестве источника энергии использовалась конденсаторная батарея емкостью 19 мF, которая заряжалась до напряжения 1.0, 1.4 и 2.0 кV, при этом запасенная энергия составляла соответственно 100, 190 и 380 кJ. КПД энергоуклада в дугу лежал в пределах 30–40%. Форма монополярного импульса тока близка к полупериоду синусоиды. Длительность импульса тока составляла 0.5–0.7 мs, амплитуда — 60–150 кA, падение напряжения на дуге — 350–750 V, сопротивление дуги — 5–10 мΩ, протекающий заряд — 25–50 C.

В качестве рабочей среды служил воздух под начальным давлением P_0 от 100 Па до 2 МПа. Разряд в вакууме (~ 100 Па) инициировался самопробоем разрядного промежутка; при атмосферном и более давлении воздуха — при помощи медной проволоочки диаметром 0.3 мм, длиной 30 мм и массой 15–20 мг. Когда в результате нагрева электрической дугой давление в камере достигало 3–4 atm, рвалась лавсановая диафрагма, и газ из разрядной камеры вытекал в буферный объем.

Одним из существенных механизмов эрозии в сильноточных дугах являются электродные струи [14–16]. Электродные струи формируются в первые микросекунды с момента инициирования разряда [16]. Этот эффект наиболее выражено проявляется при плотностях тока свыше 10^5 A/cm² и времени действия тока на электроды свыше 100 μs [16]. В описываемых экспериментах такой концентрации теплового потока на электрод не достигается. Согласно кадрам высокоскоростной съемки, интенсивных электродных струй не развивается. Разряд имеет однородный канал с равномерной привязкой к поверхности электродов и относительно медленным ее перемещением по поверхности. В значительной степени это обусловлено тем, что на композиционных материалах электродные пятна в импульсных разрядах не имеют тенденции к группированию, что равномернее распределяет тепловую

4* Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 23

нагрузку по поверхности, нежели для чистых металлов [2]. Оценки плотности тока во всем диапазоне начальных условий дают величину 30–50 кА/см², что характерно для дуг с тепловыми электродными пятнами.

На рис. 1–3 представлены данные об удельной эрозии электродов, изготовленных из различных материалов (1 — CuFe(85/15%), лазерная наплавка; 2 — CuFe(70/30%), порошковое прессование; 3 — CuW(ВМ25 — 25/75%), порошковое прессование), в зависимости от действующего значения тока J_{ac} и начального давления газа P_0 в разрядной камере.

Из полученных результатов следует, что удельная эрозия как для CuFe, так и для CuW плавно возрастает с ростом амплитуды протекающего тока и ростом давления. Резкого роста эрозии в диапазоне амплитуд тока до 150 кА не наблюдается.

Наши данные по эрозии для материалов, изготовленных согласно традиционным технологиям, в целом соответствуют данным [2] (для CuFe) и [1,3] (для CuW). Значения удельной эрозии [1] выше наших значений, полученных нами, что, по-видимому, является следствием малости разрядного промежутка в [1] и большей длительности импульса тока. Данные об эрозии в [3] являются несколько ниже наших, что может быть связано с малой длительностью импульса тока при меньших амплитудах тока.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос о погрешности, вносимой иницирующей проволочкой в результаты измерения веса электронов после эксперимента, т.к. ее масса сравнима с величиной эрозии. При оценке достоверности полученных результатов принимались во внимание два обстоятельства: во-первых, прилипание материала проволочки к электродам может лишь увеличивать их массу и, во-вторых, оно носит случайный характер и может быть исключено путем отбора близких значений эрозии при одинаковых условиях эксперимента. К тому же был зарегистрирован ряд случаев (при малом зарядном напряжении и большом давлении), когда проволочка взрывалась, а разряд не подхватывался. При этом никакого увеличения массы электродов не наблюдалось, а присутствовал лишь небольшой износ (0.5–1.0 мг). Можно считать, что присутствие проволочки при иницировании разряда не вносит каких-либо заметных погрешностей в измерение удельной эрозии электродов.

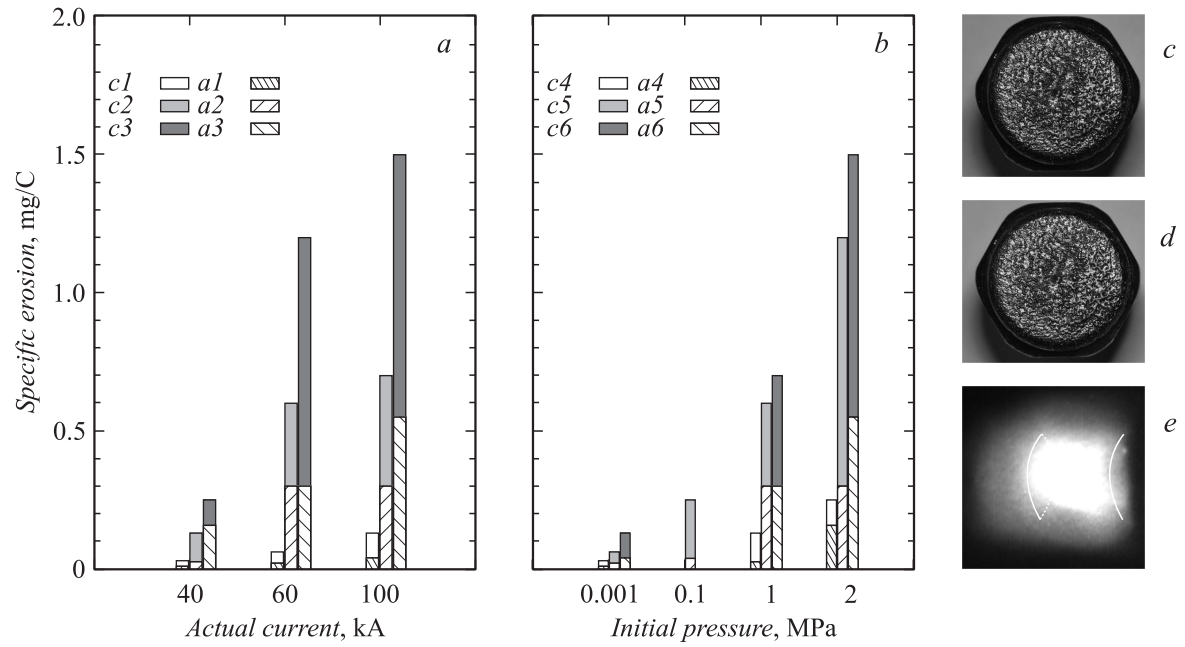


Рис. 1. Удельная эрозия электродов из композитного сплава железо–медь, полученного методом лазерной наплавки, в зависимости от действующей величины тока J_{ac} (a) и начального давления газа P_0 (b): $c1$ — катод, $P_0 = 0.01$ МПа; $c2$ — 2 МПа; $c3$ — 2 МПа; $a1$ — анод, $P_0 = 0.01$ МПа; $a2$ — 1 МПа; $a3$ — 2 МПа; $c4$ — катод, $J_{ac} = 40$ кА; $c5$ — 60 кА; $c6$ — 100 кА; $a4$ — анод, $J_{ac} = 40$ кА; $a5$ — 60 кА; $a6$ — 100 кА. Фотография анода (c), катода (d) после разряда и скоростное фото канала разряда (e) через $100 \mu s$ после инициирования для разряда с $J_{ac} = 60$ кА при $P_0 = 0.1$ МПа (анод слева, катод справа, белыми линиями обозначен контур торцов электродов).

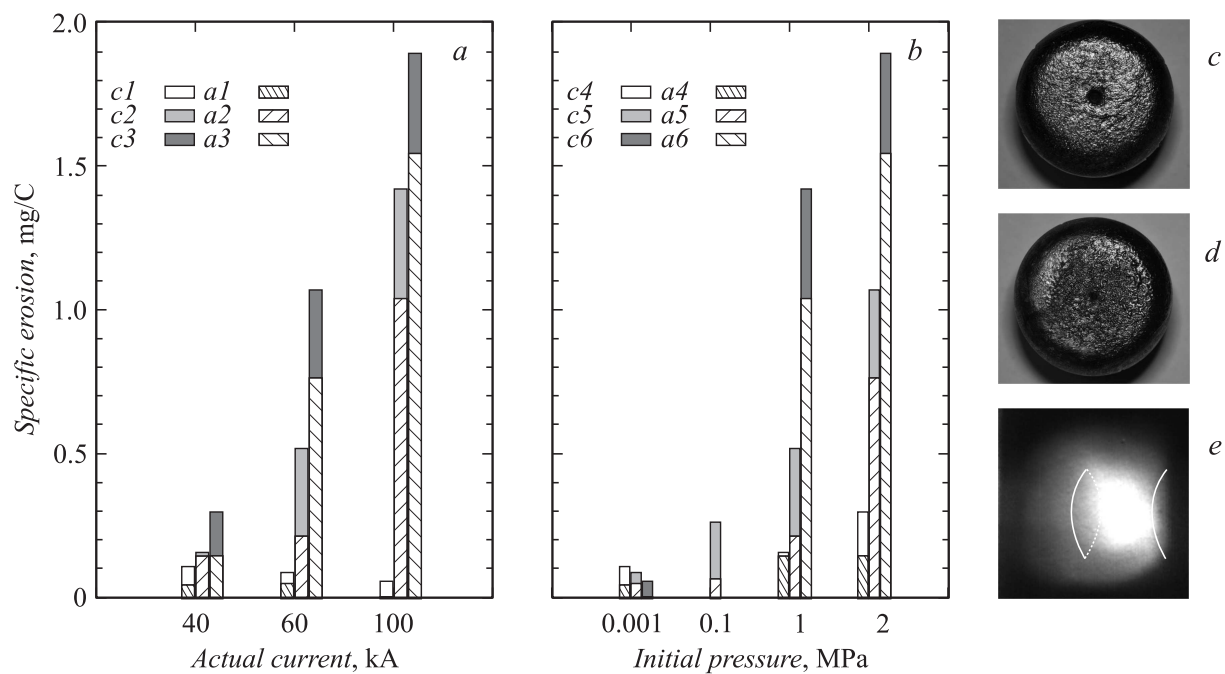


Рис. 2. Удельная эрозия электродов из композитного сплава железо–медь, полученного методом порошкового прессования (все обозначения и параметры аналогичны приведенным на рис. 1).

Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 23

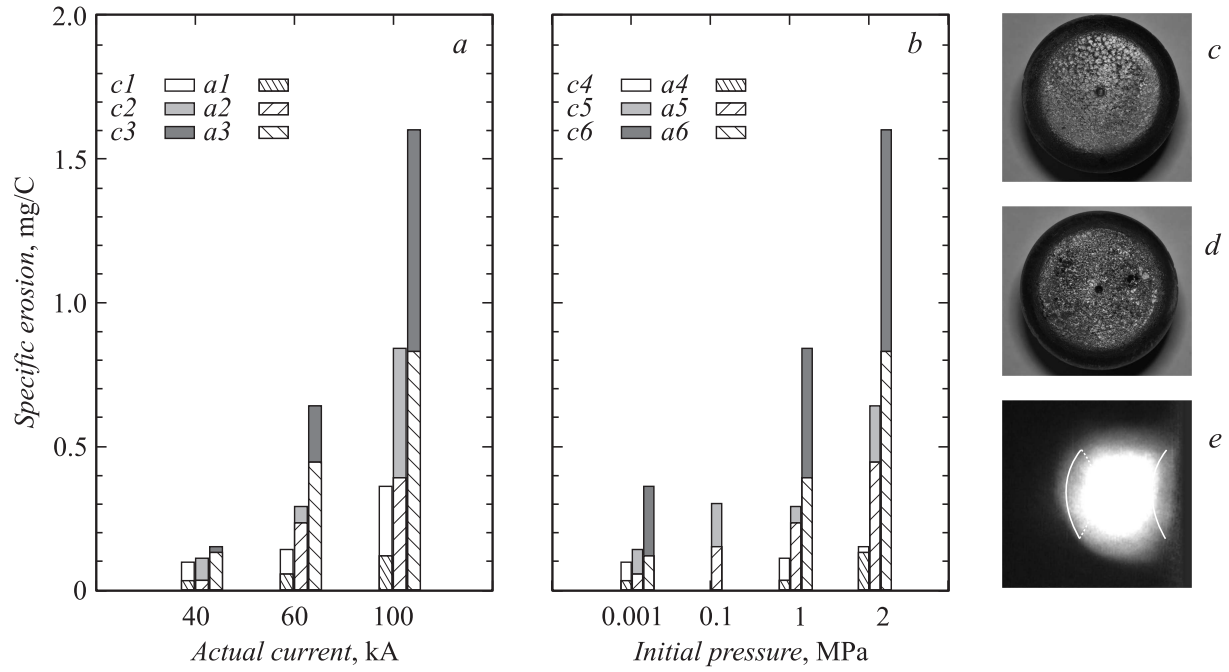


Рис. 3. Удельная эрозия электродов из композитного сплава вольфрам–медь, полученного методом порошкового прессования (все обозначения и параметры аналогичны приведенным на рис. 1).

Эрозия исследуемого материала CuFe(85/15%), изготовленного методом послойной лазерной наплавки, соответствует уровню эрозии материалов, полученных традиционным методом порошкового прессования, в аналогичных условиях эксплуатации. При этом лазерная технология дает широкий выбор по модификации состава и других свойств материала по объему образца. Это позволяет адаптировать материал для конкретного электроразрядного устройства.

Список литературы

- [1] *Wilson W.R.* // Power Apparatus and Systems. Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1955. Vol. 74. N 3. P. 657–664.
- [2] *Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А.* Электрическая эрозия высоковольтных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 251 с.
- [3] *Donaldson A., Hagler M.O., Kristiansen M., Jackson G., Hatfield L.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1984. V. 12. N 1. P. 28–38.
- [4] *Будин А.В., Коликов В.А., Левченко Б.П., Леонтьев В.В., Макаревич И.П., Рутберг Ф.Г., Широков Н.А.* // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32. № 4. С. 628–630.
- [5] *Будин А.В., Коликов В.А., Рутберг Ф.Г.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 8. С. 49–53.
- [6] *Bobby Gene Watkins* II. Materials selection and evaluation of Cu-W particulate composites for extreme electrical contacts. PhD thesis, Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, May, 2011. 169 p.
- [7] *Ping Shen, Jiandong Hu, Zuoxing Guo, Qingfeng Guan* // Metallurgical and Material Transactions. A. 1999. V. 30A. P. 1999-2229–1999-2235.
- [8] *Вишняков Л.Р., Грудина Т.В., Кадыров В.Х., Карпинос Д.М., Олейник В.И., Сапожникова А.Б., Тучинский Л.И.* Композиционные материалы. Справочник. Киев: Наук. думка. 1985. 592 с.
- [9] *Шишковский И.В., Ядроитцев И.А., Смуров И.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 24. С. 15–21.
- [10] *Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Ильичев И.Н., Мисюров А.И., Панченко В.Я.* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. С. 69–77.
- [11] www.crisp-prometey.ru
- [12] *Диаграммы состояния двойных металлических систем.* В 3-х томах. Т. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. 1024 с.
- [13] *Bregel T., Krauss-Vogt W., Michal R., Saeger K.E.* / Electrical Contacts, 1990. Proceedings of the Thirty-Sixth IEEE Holm Conference on ... and the Fifteenth International Conference on Electrical Contacts, 20–24 Aug 1990. P. 569–573.

- [14] Султанов М.А., Киселевский Л.И. // Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4. № 3. С. 375–381.
- [15] Богомаз А.А., Будин А.В., Коликов В.А., Пинчук М.Э., Позубенков А.А., Рутберг Ф.Г. // ДАН. 2003. Т. 388. № 1. С. 37–40.
- [16] Pinchuk M.E., Bogomaz A.A., Budin A.V., Rutberg P.G. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. N 99, doi: 10.1109/TPS.2014.2316064.