

04;12

Эрозионные характеристики композитных материалов на основе меди в дуге переменной длины с поперечным продувом газа

© А.В. Будин¹, М.Э. Пинчук^{1,2,¶}, Н.К. Куракина^{1,2}

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «НПК «ЮниЛабс», Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: pinchme@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2018 г.

Представлены данные по эрозии электродов из композитных псевдосплавов на основе меди в процессе размыкания контактов при амплитуде тока до 150 кА в среде азота при давлении ~ 2 МПа с поперечным продувом газа через дугу. Приведены электроэрозионные характеристики псевдосплава меди и железа CuFe (85/15%), получаемого методом лазерной послойной наплавки, а также псевдосплавов CuFe (70/30%) и CuW (25/75%), произведенных традиционным методом порошкового сплавления. Удельная эрозия составляет величину ~ 1 мг/С и несколько превышает эрозию для фиксированного разрядного промежутка.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46605.17389

Во всех мощных выключающих электрических аппаратах независимо от их типа процесс отключения нагрузки сопровождается горением электрической дуги [1]. Гашение дуги, по-видимому, останется главным надежным и экономически выверенным способом прерывания тока в высоковольтных цепях в ближайшие десятилетия [1].

Тем не менее для существующих отработанных конструкторских и технологических решений [2] в области аппаратостроения помимо естественной модернизации требуются кардинальные изменения вследствие ряда международных решений. Страны, ратифицировавшие Киотский протокол [3] и Парижское соглашение [4], взяли на себя обязательство ограничить выработку и использование парниковых газов, к которым относится элегаз — одна из доминирующих рабочих сред [2,5] для выключателей высокого напряжения. Эти политические решения привели к модификации ряда технических стандартов МЭК [5], что мотивировало на широкое проведение исследовательских работ, содействующих внедрению новых подходов в области электроники больших мощностей.

Кроме того, рост токов короткого замыкания в больших развивающихся энергетических системах [6] вследствие увеличения плотности генерации и энергопотребления в перспективе потребует способности отключать токи, превышающие 100 кА [6] для сетей 110–220 кV.

Из отмеченного выше следует, что наиболее актуальными направлениями исследований в области мощной высоковольтной коммутирующей аппаратуры в различных сферах применения становится поиск новых сред дугогашения [5,7], новых изоляционных [5,8] и электродных [9] материалов, оптимально подходящих для работы в этих средах [10] для различных приложений [11–13].

Выбор материала электродов диктуется в том числе и газовым наполнением рабочего объема. Основным материалом электродов в мощных элегазовых коммутаторах в настоящее время выступает CuW [9,13], в вакуумных — CuCr [14]. При использовании окислительных сред эрозионная стойкость CuW падает [15,16].

Повышения эксплуатационных характеристик электродов пытаются добиться использованием других составов [17,18], привлечением новых технологий производства [17], применением наноразмерных комплексов [19].

В настоящей работе представлены результаты исследования эрозии композитных псевдосплавов на основе меди в процессе размыкания контактов. Сплав CuFe показал себя конкурентным электродным материалом для электродов в среде воздуха, азота при фиксированных разрядных промежутках [17].

Далее представлены данные по эрозионным свойствам псевдосплава меди и железа CuFe (85/15%), получаемого методом лазерной послой-

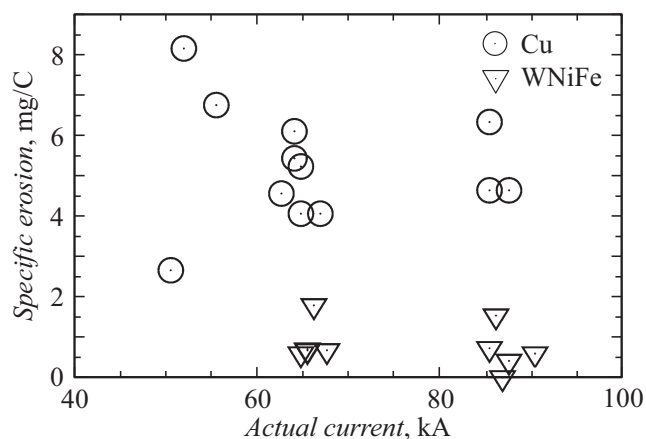


Рис. 1. Удельная эрозия катода: Cu — медь, WNiFe — сплав ВНЖ.

ной наплавки, а также псевдосплавов CuFe (70/30%) и CuW (25/75%), произведенных традиционным методом порошкового сплавления после опрессовки под давлением, в процессе размыкания контактов при токе до 150 кА в среде азота при давлении ~ 2 МПа с поперечным продувом газа через дугу. В работе использовались образцы равномерного состава.

Дуга зажигается при размыкании контактов и к окончанию протекания тока контакты расходятся на расстояние ~ 4 см. Рабочей средой служил азот. Давление газа в разрядной камере в процессе горения дуги составляло 1–3 МПа.

В качестве источника энергии использовалась конденсаторная батарея емкостью 40 мФ, которая заряжалась до напряжения 1.0, 1.5 и 2.0 кВ, при этом запасенная энергия составляла 20, 45 и 80 кДж. Форма монополярного импульса тока близка к полупериоду синусоиды. Длительность импульса тока составляла 1.0–1.5 мс, амплитуда 80–150 кА, действующее значение тока 55–110 кА, падение напряжения на дуге в максимуме тока 350–750 В, протекающий заряд составлял 40–100 С. В качестве катода выступал массивный кольцеобразный электрод из сплава вольфрам–никель–железо (ВНЖ). Цилиндрический анод из испытываемого материала первоначально вставлялся в отверстие ка-

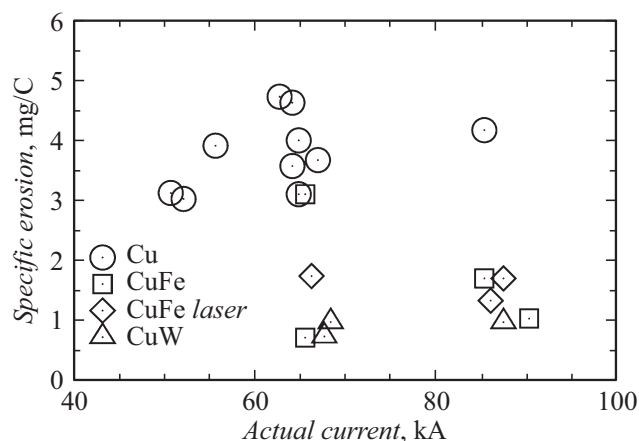


Рис. 2. Удельная эрозия анода: Cu — медь, CuFe — псевдосплав медь–железо в пропорции 70/30%, полученный методом порошкового прессования с последующим спеканием, CuFe laser — псевдосплав медь–железо (85/15%), полученный методом лазерной послойной наплавки, CuW — псевдосплав медь–вольфрам (25/75%), полученный порошковым прессованием с последующим спеканием.

тогда, и при выдвигании при потере механического контакта между электродами зажигалась дуга.

Детальное описание установки представлено в [20,21].

Отлаточные эксперименты проводились с медными электродами, и значения эрозии медных электродов стали контрольными величинами для сопоставления с данными работ [22–25]. В наших экспериментах эрозия медного анода не менялась при использовании катода из ВНЖ или меди. Для унификации условий исследуемый материал испытывался в паре с катодом из ВНЖ.

Данные по удельной эрозии катода и анода представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

На поверхности электродов наблюдались сплошные протяженные зоны с бороздками оплавленного вещества в направлении потока газа. При изменении величины тока удельная эрозия не менялась. Это характерно для дуг с пятнами привязки с плотностью тока 30–50 кА/см², что позволяет исключить при заданных параметрах

влияние на эрозию магнитогидродинамических сил с сопутствующими этому влиянию эффектами [26]. По сравнению с результатами [17] удельная эрозия незначительно выше. Это увеличение можно связать с воздействием потока газа на поверхность электродов при дуге через дугу.

Катодная и анодная эрозия для фиксированного разрядного промежутка [17] при давлениях 1–2 МПа и действующем токе 50–100 кА приблизительно равны друг другу по величине. Катодная и анодная эрозия медных электродов на рассматриваемой установке также близки друг к другу по величине (рис. 1 и 2).

Данные по эрозии произведенных на основе традиционных технологий материалов соответствуют [22–25].

Материал, полученный методом лазерной наплавки, обладает эрозией на уровне материалов, произведенных с помощью традиционного порошкового процесса. Использование лазерной 3D-наплавки позволяет создавать на напряженных контактных поверхностях протяженные слои эрозионно-стойкого композита для формирования контактов сложной формы, что необходимо в ряде приложений [12,22,25].

Работа проводилась в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 31 „Фундаментальные исследования физико-технических проблем энергетики“. Работа также частично поддержана грантом РФФИ (проект № 16-08-00767-а).

Список литературы

- [1] Current Zero Club (CZC); www.currentzeroclub.org
- [2] *Тонконогов Е.Н.* Выключатели переменного тока высокого напряжения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 262 с.
- [3] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (1998); http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php
- [4] Paris Agreement within the United Nations Framework Convention on Climate Change (2015); http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php
- [5] *Glaubitz P., Stangherlin S., BIASSE J.M., Meyer F., Dallet M., Pruefert M., Kurte R., Saida T., Uehara K., Prieur P., Ito H., Kynast E., Janssen A., Smeets R., Dufournet D.* // *Electra*. 2014. N 274. P. 34–39.
- [6] *Александров А.С., Жуков В.В.* // *Вестн. МЭИ*. 2012. № 2. С. 58–66.

- [7] *Seeger M., Smeets R., Yan J., Ito H., Claessens M., Dullni E., Falkingham L., Franck C.M., Gentils F., Hartmann W., Kieffel Y., Jia S., Jones G., Mantilla J., Pawar S., Rabie M., Robin-Jouan P., Schellekens H., Spencer J., Uchii T., Li X., Yanabu S.* // Plasma Phys. Technol. 2017. V. 4. N 1. P. 8–12; <https://ppt.fel.cvut.cz/articles/2017/seeger.pdf>
- [8] *Hama H., Okabe S., Berg T., Girodet A., Juhre K., Kessler J., Kindersberger J., Koltunowicz W., Lopez-Roldan J., Neuhold S., Neumann C., Pietsch R., Riechert U., Schichler U.* // Electra. 2014. N 273. P. 56–61.
- [9] *Watkins B.G.* II. Materials selection and evaluation of Cu–W particulate composites for extreme electrical contacts. PhD thesis. Georgia Institute of Technology, 2011. 169 p.
- [10] *Zhon L., Wang X., Wu Y., Rong M., Zhang X., Xiang X., Zhao Y., Liu S.* // 3rd Int. Conf. on electric power equipment–switching technology (ICEPE-ST). Busan, 2015. P. 321–324. DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2015.7368386
- [11] *Wu J., Han R., Ding W., Qiu A.* // IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulation. 2017. V. 24. N 4. P. 2164–2171. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006254
- [12] *Rutberg Ph.* Physics and technology of high-current discharges in dense gas media and flows. N.Y.: Nova Science Publ., Inc., 2009. 214 p.
- [13] *Bregel T., Krauss-Vogt W., Michal R., Saeger K.E.* // Proc. of the Thirty-Sixth IEEE Holm Conf. on electrical contacts, and the Fifteenth Int. Conf. on electrical contacts. IEEE, 1990. P. 569–573.
- [14] Electrical contacts principles and applications/ Ed. P.G. Slade. CRC Press, 2014. 1210 p.
- [15] *Субботин Д.И., Кузнецов В.Е., Литвякова А.И., Черепкова И.А., Су-ров А.В., Наконечный Г.В., Сподобин В.А.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 11. С. 1637–1640.
- [16] *Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Popov S.D., Surov A.V., Nakonechny Gh.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. N 10. P. 1681–1696.
- [17] *Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Рутберг Ф.Г.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 23. С. 49–57.
- [18] *Ковшечников В.Б., Литвинов Н.И., Наконечный Г.В., Овчинников Р.В., Суров А.В.* // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2005. № 1. С. 56–59.
- [19] *Забелло К.К., Полуянова И.Н., Яковлев В.В., Школьник С.М.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 22. С. 18–25.
- [20] *Budin A.V., Pinchuk M.E., Leks A.G., Leont'ev V.V., Kurakina N.K., Kiselev A.A., Simakova Y.V., Frolov V.Ya.* // Plasma Phys. Technol. 2017. V. 4. N 2. P. 120–123. DOI: 10.14311/ppt.2017.2.120
- [21] *Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Леонтьев В.В., Куракина Н.К.* // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 6. P. 61–66. DOI: 10.7868/S0032816217060039

- [22] *Wilson W.R.* // IEEE Trans. Power Appar. Syst. Pt III. 1955. V. 74. N 3. P. 657–664. DOI: 10.1109/AIEEPAS.1955.4499130
- [23] *Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А.* Электрическая эрозия высоковольтных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
- [24] *Donaldson A., Hagler M.O., Kristiansen M., Jackson G., Hatfield L.* // IEEE Transact. Plasma Sci. 1984. V. 12. N 1. P. 28–38.
- [25] *Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А., Резников Б.И.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 19. С. 96–104.
- [26] *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.