

УДК 536.77

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ В ВАКУУМНОЙ ДУГЕ В ЗОНЕ ВЗРЫВНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

© 2020 г. А. И. Кудюкин¹, *, М. Н. Махмудов¹, Е. Н. Моос¹, В. А. Степанов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина”, Рязань, Россия

*E-mail: a.kudykin@365.rsu.edu.ru

Поступила в редакцию 09.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Обнаружено, что в сплаве $Cu_{0,6}-Cr_{0,4}$ после многократного воздействия дугового вакуумного разряда увеличивается атомная концентрация меди и, соответственно, уменьшается концентрация хрома на поверхности. Масс-спектрометрия показала наличие в вакуумных приборах фрагментов молекул типа C_xH_y и молекул, десорбируемых со всех деталей камеры, ионов различных соединений (CO_2 , H_2O , N_2 и их полиатомные композиции). Обнаружено малое накопление технологических примесей (Ag, S, Fe, Ca и др.) от предшествующих операций.

DOI: 10.31857/S0367676520060150

ВВЕДЕНИЕ

Известны работы как по исследованиям вакуумной дуги (ее свойств в зависимости от токов и материала электродов [1–5]), так и по эрозии поверхности различных сплавов под действием этой дуги [6–13], что говорит об актуальности и востребованности данной темы. При возникновении дуги в вакуумной дуговой камере (ВДК) поверхностные слои контактов подвергаются сильному перегреву [4], что провоцирует мгновенное (взрывное) расплавление и испарение металлов с поверхности контактов. Очевидно, что при температурах, превышающих температуры плавления материалов ($Cu - 1083^\circ C$, $Cr - 1615^\circ C$), на электродах следует ожидать необратимых изменений элементного состава, что, в свою очередь, должно сказаться на работоспособности самой дугогасительной камеры.

Для сплавных композиций вакуумных прерывателей неизвестно, в частности, как изменяется морфология поверхности контактов и состав в условиях интенсивных энергетических потоков. Цель работы заключалась в исследовании особенностей модификации состава и структуры материалов электродов вакуумного дугового выключателя, а также изменений состава остаточной атмосферы под действием дугового вакуумного разряда.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗЦЫ

Поверхность электрода изучали методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеноспек-

трального микроанализа (РСМА) совместно с растровым методом исследования морфологии поверхности образцов до и после воздействия дугового разряда с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV.

В процессе производства при пайке и отжиге в технологической среде водорода происходит обезгаживание металлов и очистка от поверхностных окислов. Режиму непосредственно самой пайки оболочки предшествовали два режима выдержки деталей в атмосфере водорода (при температуре $700^\circ C$ в течение 10 мин и при температуре $750^\circ C$ в течение 15 мин).

После выдержки приборов в водородной печи при температуре $810^\circ C$ продолжительностью 5 мин. ВДК нагревалась до температуры порядка $815^\circ C$ (температуры плавления припоя). После того как металлокерамические узлы оболочки дугогасительной камеры соединялись, устанавливался режим, направленный на постепенное охлаждение изделия.

В литературе отсутствуют сведения по встраиванию квадрупольных систем масс-анализа в технологию производства вакуумных высоковольтных дугогасительных камер для контроля состава среды зоны электродов, что составило особенность исследований предпринятой работы. В работе применялся квадрупольный масс-спектрометр КМС-250 (разработка Рязанского предприятия “Шибболет”), который регистрировал состав остаточных и рабочих газов ($10^{-5}-10^{-6}$ Па) на различных технологических операциях производства

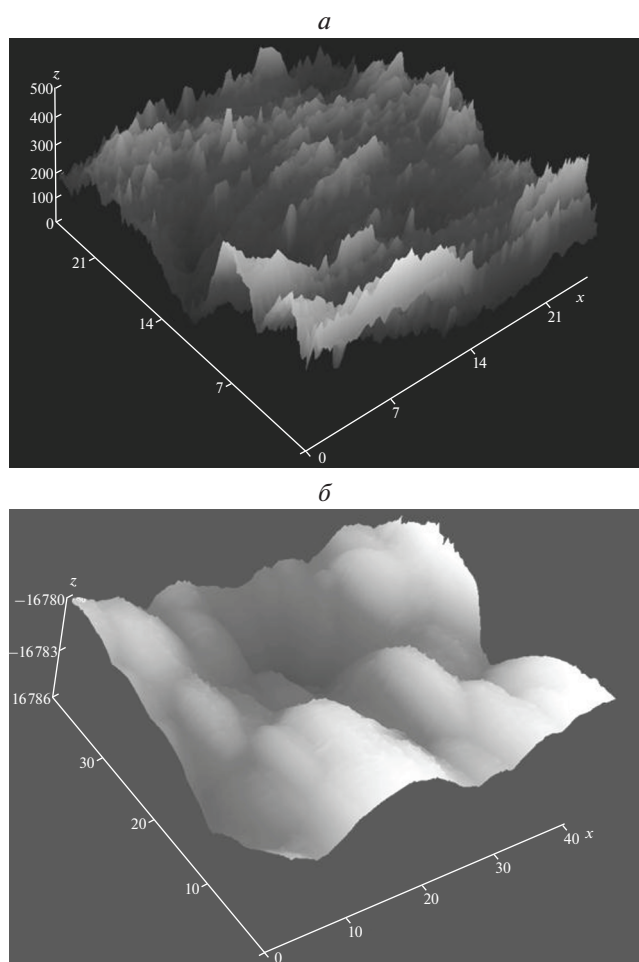


Рис. 1. Поверхность электродов до (а) и после (б) начала рабочего цикла.

ВДК (операции пайки узлов, прогрева КДВ и формирование герметичной керамической оболочки и др) и после их завершения.

Из-за различия теплофизических свойств фаз в системе сплава Cu–Cr и их температурных изменений при фазовых трансформациях, сопровождающих плавление и испарение, нагрев зоны катодного пятна дугового разряда рассчитать затруднительно. Поэтому экспериментально исследовались изменения морфологии (методом АСМ) и состава поверхности электродов (методом РСМА) после воздействия на них вакуумного дугового разряда. Изменением величины ускоряющего напряжения электронов зонда, изменяющего глубину его проникновения (при анализе методом РСМА глубина сбора информации о составе составляла до 2 мкм при напряжении до 30 кэВ), скрайбированием участков поверхности выявлялись изменения в атомных концентрациях основных и примесных составляющих контактов, как по

глубине, так и по поверхности. В частности, методом РСМА изучали перераспределение атомных компонент в зоне взрывного расплавления электродов. Полученные результаты атомного состава электродов усреднялись программным обеспечением для каждого спектра сканирования и представлены в работе в виде усредненных значений. Методом АСМ получены характерные изображения участков поверхности электродов (рис. 1) до и после ресурсных испытаний прибора. Из них следует, что структура поверхности контактных материалов на основе композиции Cu–Cr до включения прибора в рабочий режим фрактальна, максимальные вершины неровностей не превышают 500 нм и располагаются близко (через единицы мкм) друг к другу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РСМА

Из полученных методом РСМА результатов следует, что в момент плавления происходит перераспределение атомов меди от центра (точки воздействия плазменной дуги) к периферийным зонам с более низкой температурой (рис. 2). Рельеф, полученный при сканировании поверхности электродов ВДК в местах локального взрывного плавления, дополнялся растровым исследованием морфологии (в разных режимах ускоряющих напряжений) для анализа состава поверхности и объема образцов. Благодаря этому можно было наблюдать результаты перераспределения атомов от центра к краю пятен дуги в электродах на основе системы Cu–Cr с превышением атомной концентрации меди (71.8 вместо 53.7 ат. %) от начального ее значения. Очевиден факт сегрегации атомов материала электродов не только в системе объем-поверхности, но и в пятне взрывного расплавления электродов (сегрегация по поверхностным зонам).

Наиболее существенные изменения поверхности электрода наблюдаются в зонах взрывного оплавления. Эта область принимает на себя энергетические потоки за счет воздействия ионов, ускоренных в прикатодном пространстве, и инициирования дугового разряда автоэлектронами. В центрах термоэмиссии (выступах поверхности) формируются высокие плотности тока, стимулирующие нагрев этой зоны. Энергия этих двух потоков, вызванных авто- и термоэлектронной эмиссиями, приводит к резистивному нагреву в зоне плавления. Этот процесс сопровождается резким увеличением объема зоны пятна дуги, что приводит к разбрызгиванию области воздействия дуги. Отметим, что в области плавления концентрация кислорода уменьшается более чем в два раза (от 4.9 до 2.2 ат. %). Этот результат очевидно связан с плавлением вещества в условиях вакуума, что приводит к сублимации окисных поверхностных элементов.

Перераспределение меди и хрома происходит при превышении скорости поступления тепловой энергии над теплоотведением в поверхностном слое композиционного сплава. Неоднородность элементного состава по поверхности можно объяснить сегрегационными процессами, которые зависят от поверхностного натяжения, температур плавления и окисляемости конкурирующих компонент хрома и меди. За счет известного эффекта сегрегации концентрация меди увеличивается по сравнению с объемом.

Электронное зондирование образцов выявило зоны, в которых концентрация меди снижается с 92.4 до 78.2 ат. % с увеличением глубины до 2 мкм, что указывает на резко выраженный процесс ее сегрегации на поверхность. Это можно объяснить тем, что одна из причин сегрегационного процесса в изучаемой сплавной системе обусловлена меньшей величиной поверхностного натяжения атомной компонентой меди по сравнению с хромом, что обеспечивает понижение энергии сплавной композиции в целом. Переход в жидкое состояние приводит к процессу расслаивания сплава. Очевидно, что кинетически значительное увеличение коэффициента диффузии атомов меди в жидком виде (составляющего 10^{-5} – 10^{-4} $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) способствует данному перераспределению основных составляющих сплава.

Кроме того, изучение морфологии поверхности и ее состава показывает на крайне неоднородный характер, особенно в местах расплавления электродов.

Медь при протекании физико-химических реакций в большей степени (исходя из величины изобарно-изотермического потенциала) склонна к окислению, что объясняет, в том числе, процесс выхода (сегрегацию) атомов Cu из объема электрода на поверхность. Кислород предпочтительно сконцентрирован в зонах с преобладанием легко окисляемых компонентов (в анализируемой системе – это медь).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Причина развития дуговой стадии разряда обусловлена полевой эмиссией в зоне и в окрестности поверхности эмиттера с большими факторами усиления поля в области прикатодной напряженности (электрическое поле в этой зоне концентрируется на малом межэлектродном пространстве дугового разряда, примыкающего к катоду). Поэтому даже при падении напряжения в дуге величиной ~ 10 – 20 В, напряженность электрического поля у катодов достигает 10^5 В · см $^{-1}$ и более. Формирование дуги обеспечивается превышением пороговых значений токов и напряжений для данных условий вследствие ионизации и зависит от параметров цепи и условий, а гашение

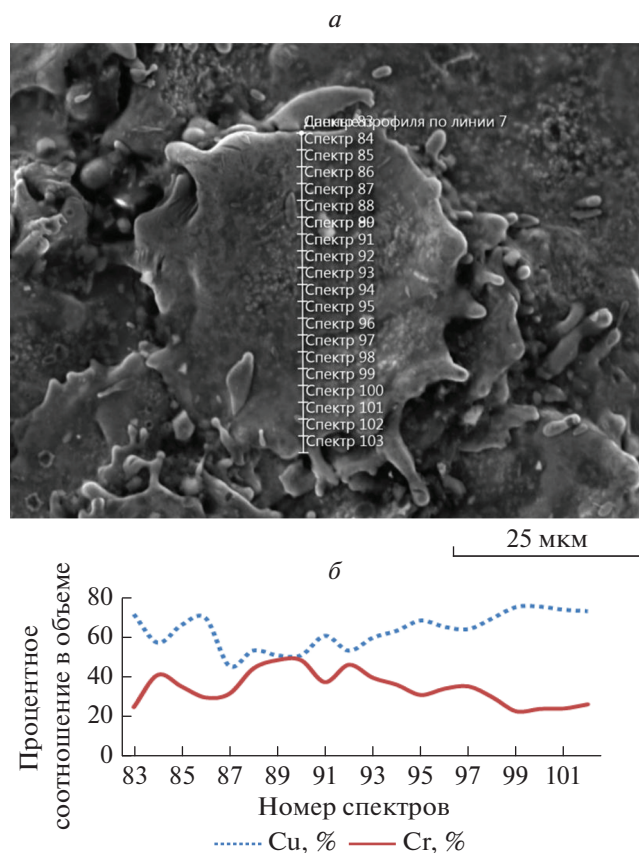


Рис. 2. Морфология оплавленной зоны (а) и распределение ее элементного состава (б).

дуги переменного тока достигается деионизацией плазмы между электродами и нулевыми мгновенными значениями тока в цепи дугового разряда. Высокая плотность тока дуги приводит к разогреву центров эмиссии вплоть до их расплавления, что сопровождается ростом десорбции и ионизации атомов – вначале атомов и молекул поверхностных адсорбированных слоев. В результате с поверхности электродов за счет термодесорбции в остаточную атмосферу вакуумной камеры добавляются молекулы адсорбатов. Это приводит к локальному повышению давления газовой атмосферы в области развивающейся дуги, снижает напряжение горения, ускоряет развитие разряда и дополнительно инициирует формирование дугового разряда.

Также зафиксировано, что формирование (развитие) рельефа и состава поверхности электродов происходит в момент нагрева и плавления электрода и “растекания” меди от центра (точки воздействия плазменной дуги) к зонам с более низкой температурой, что вынуждает элементы большей частью концентрироваться в однородные области меди и хрома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования обнаружено доминирование атомов меди в характере перераспределения атомных компонент электродного материала между объемными и поверхностными слоями и внутри зоны поверхностного расплавления, а также в зоне взрывного расплавления электродов под действием вакуумного дугового разряда. Регистрация ионных составляющих масс-спектра квадрупольной системой в остаточной атмосфере вакуумной камеры на всех технологических этапах дает возможность обнаружить воздействие предшествующей стадий обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерошкин М.В., Киселев Г.В., Моос Е.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 6. С. 686; *Eroshkin M.V., Kiselev G.V., Moos E.N.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. № 6. P. 485.
2. *Борисовский П.А., Киселев Г.В., Киселева Л.И. и др.* // Поверхн. Рентг., синхр. и нейтр. исслед. 2017. № 5. С. 82.
3. *Бучин В.А., Зерцер М.П.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 4. С. 92.
4. *Воронин А.В., Александров А.Е., Бер Б.Я. и др.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 3. С. 51; *Voronin A.V., Aleksandrov A.E., Ber B.Y. et al.* // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 2016. V. 61. № 3. P. 370.
5. *Venilov M.S., Marotta A.* // J. Phys. D. 1995. V. 28. P. 1869.
6. *Venilov M.S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 22. P. 73.
7. *Смоланов Н.А.* // Поверхн. Рентг., синхр. и нейтр. исслед. 2018. № 6. С. 83.
8. *Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. и др.* // Поверхн. Рентг., синхр. и нейтр. исслед. 2016. № 1. С. 15; *Dukhopel'nikov D.V., Vorob'ev E.V., Ivakhnenko S.G. et al.* // J. Surf. Invest. X-Ray. Synchrotron. Neutr. Techniq. 2016. V. 10. № 1. P. 10.
9. *Арустамов В.Н., Ашууров Х.Б., Миркаримов А.М. и др.* // Поверхн. Рентг., синхр. и нейтр. исслед. 2013. № 11. С. 95.
10. *Данилов М.Е.* В кн. Сб. ст. сотруд. ВЭИ им. В.И. Ленина "Вакуумные дугогасительные камеры". Рязань: Издат. дом, 2008. С. 68.
11. *Репин П.Б., Егоров Н.В.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 2. С. 48; *Repin P.B., Egorov N.V.* // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 2015. V. 60. № 2. P. 206.
12. *Селикатова С.М., Лукацкая И.А.* // В кн. Сб. ст. сотр. ВЭИ им. В.И. Ленина "Вакуумные дугогасительные камеры". Рязань: Издат. дом, 2008. С. 18.
13. *Kudyukin A.I., Moos E.N., Rott A.T. et al.* // Proc. 11th Int. Vacuum Electron Sources Conf. Arc Interaction with Electrodes. 2016. P. 41.
14. *Николаев А.Г., Окс Е.М., Фролова В.П. и др.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 5. С. 681; *Nikolaev A.G., Oks E.M., Frolova V.P. et al.* // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 2017. V. 62. № 5. P. 701.
15. *Казakov А.В., Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Окс Е.М.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 2. С. 55; *Kazakov A.V., Medovnik A.V., Burdovitsin V.A., Oks E.M.* // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 2015. V. 60. № 2. P. 213.
16. *Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 5. С. 39; *Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu.* // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 1998. V. 43. № 5. P. 514.
17. *Визир А.В., Окс Е.М., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 3. С. 356; *Vizir' A.V., Oks E.M., Shandrikov M.V., Yushkov G.Y.* // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 2017. V. 62. № 3. P. 380.