

Электродуговой разряд и вторичная структура в рабочем слое контактов на основе Мо и Си

Р. В. Минакова, А. Н. Веклич*, А. В. Лебедь*, В. Ф. Борецкий*,
В. Е. Осидач*, П. В. Сорока*, И. Л. Бабич*, А. П. Кресанова,
М. Е. Головкова

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
Киев, e-mail: 29mp@ipms.kiev.ua

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, Украина,
e-mail: van@univ.kiev.ua

Исследованы структура и некоторые свойства КМ на основе меди и молибдена. Установлено образование в КМ с содержанием меди 46% и более структуры матричного типа. Показана возможность повышения свойств КМ при введении легирующих элементов и борсодержащих добавок, определяющих параметры плазмы и состояние поверхности электродов, которое связано с формированием вторичной структуры.

Ключевые слова: КМ Си—Мо, матричная структура, борсодержащие добавки, плазма дуги, вторичная структура, износ.

Введение

В современной энергетике, электротехнике, сварочном и других производствах с помощью различного вида устройств коммутируется практически сплошной спектр токов и напряжений в диапазонах 10^{12} — 10^6 А и 10^7 — 10^6 В. Расширение номенклатуры и рост производства коммутационных аппаратов требуют обеспечения надёжности контактных узлов, что связано с разработкой электроэрозионно стойких материалов. Основными материалами, удовлетворяющими требованиям, которые предъявляются к контактам средне- и тяжелонагруженных коммутационных аппаратов, являются КМ в системах меди, серебра и металлов VIa группы (Сг, Мо, W).

Работы по изысканию новых материалов на основе вольфрама сдерживаются дефицитностью этого металла вследствие ограниченных мировых запасов. Разработки КМ на основе хрома осложняются склонностью материалов системы медь—хром к потере гетерогенности структуры при высокой температуре [1]. Это неизбежно происходит в рабочем слое электродов в условиях воздействия дугового разряда. Поэтому целесообразно использование взамен указанных металлов VIa группы молибдена, как менее дефицитного и более стабильного в системе с медью, что не противоречит мировой тенденции.

Цель настоящей работы — изучить влияние состава КМ на основе меди и молибдена на структуру, физико-химические и функциональные свойства электродов и контактов из них.

© Р. В. Минакова, А. Н. Веклич, А. В. Лебедь, В. Ф. Борецкий,
В. Е. Осидач, П. В. Сорока, И. Л. Бабич, А. П. Кресанова,
М. Е. Головкова, 2014

Состав и свойства КМ на основе Cu и Mo Изготовление и особенности структуры КМ

Объектами данного исследования выбраны медь-молибденовые КМ, которые для достижения необходимого уровня свойств, кроме основных элементов, содержали: никель и кобальт (1—6% (мас.)), специальные добавки — LaB_6 (1—3%), С — (1%), VN (до 1%). Материалы для исследования изготавливали методами порошковой металлургии, в том числе прессованием, твердофазным спеканием, горячим прессованием, жидкофазным спеканием и капиллярной пропиткой.

Природа и содержание добавок в КМ были выбраны на основе известных [2] и собственных экспериментальных данных, полученных при исследовании. В частности, было известно, что никель и кобальт могут использоваться как технологические добавки, приводящие к снижению краевого угла смачивания жидкой медью частиц тугоплавкой составляющей (металлов VIa группы), уплотнению материалов. Этому способствует процесс подготовки порошков совместным восстановлением оксидов (молибдена, никеля, кобальта, меди), который определяет возможность формирования твердых растворов металлов меди и никеля, меди и кобальта в пределах растворимости и образования поверхностно-активного слоя металлов группы железа на тугоплавких частицах. В данной работе использованы технологические ограничения, которые препятствуют распределению никеля или кобальта преимущественно внутри тугоплавких частиц (рис. 1, б) и повышают эффективность их использования.

Структуру и плотность КМ в системах Cu—Ni—Mo и Cu—Co—Mo рассматривали с точки зрения взаимной растворимости Mo и элементов двойных сплавов Ni—Cu и Co—Cu. Неограниченная взаимная растворимость никеля и меди и заметная растворимость молибдена в никеле [3] могут способствовать активному массопереносу молибдена и росту его частиц в КМ. Кобальт ограниченно растворим в меди, что усложняет перенос молибдена через легкоплавкую составляющую. Однако, как будет показано далее, обусловленная поверхностной активностью адгезия кобальта на границах частиц молибдена может приводить к расщеплению этих границ и диспергированию КМ под влиянием разряда.

При изготовлении медных образцов прессованием, твердофазным спеканием и горячим прессованием не удастся избежать остаточной пористости. Содержание пор в объеме образца колеблется в пределах 2—5%.

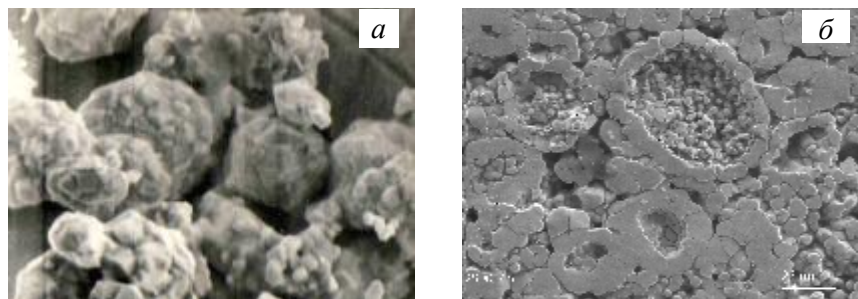


Рис. 1. Сфероидизация тугоплавких частиц в процессе восстановления порошков из оксидов (а) и распределение никеля в них (б).

В условиях жидкофазного спекания КМ Си—Мо пористость образцов обусловлена влиянием примесей в порошках и среде термической обработки. Плотность может изменяться в условиях, допускающих формирование (по содержанию кислорода и температурно-временным условиям) молибдатов меди. Содержание пор в матрице КМ не превышает 3%.

Наличие LaB_6 в КМ на основе Си и Мо не оказывает заметного влияния на размер частиц тугоплавкой составляющей. Однако в процессе формирования композита Си—Мо вокруг частиц LaB_6 наблюдается образование новой дисперсной фазы (по-видимому, La_2O_3), которая, распределяясь в легкоплавкой составляющей, может влиять на свойства КМ.

Свойства КМ на основе меди и молибдена

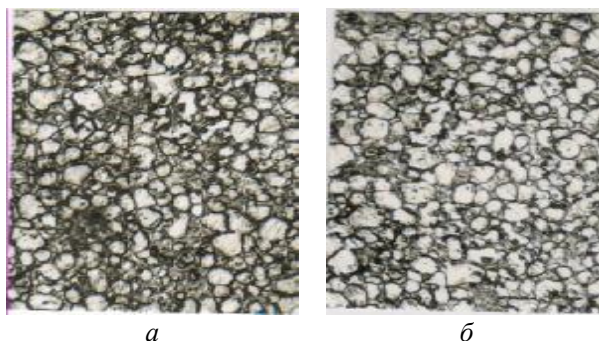
Для полученных материалов определяли плотность, твердость, удельное электросопротивление, горячую твердость, сопротивление окислению (таблица). Как следует из таблицы, плотность растет в присутствии поверхностно-активных элементов (никеля и кобальта) и снижается с усложнением состава, конкурентным влиянием на межфазное взаимодействие основных составляющих композиции, добавок и среды. Характер изменения твердости и электросопротивления соответствует особенностям структурных изменений КМ.

Изучено влияние температуры испытаний на условный предел текучести в интервале температур -196 — 400 °С. Отсутствие температурной зависимости условного предела текучести, характерное для ГЦК

Состав и свойства КМ на основе Си и Мо

Материал	Плотность, г/см^3	Твёрдость НВ, МПа	Удельное сопротивление, $\cdot 10^{-8}$ Ом·м
Cu—Mo	9,2	160	4,0
Cu—Mo—2Ni	9,5	170	8,6
Cu—Mo—6Ni	9,5	190	10,2
Cu—Mo—2Ni—2 LaB_6	9,3	190	11,0
Cu—Mo—6Ni—1 LaB_6 —1C	9,2	240	14,0
Cu—Mo—2Co	9,6	212	6,8
Cu—Mo—2Co—2 LaB_6	9,3	220	7,5
Cu—Mo—2Co—2CaO	8,9	226	9,1
Cu—Mo—0,5BN	9,5	165	4,3

Рис. 2. Микроструктура КМ на основе Си—Мо (а) и Си—Мо—2Co (б), $\times 200$.



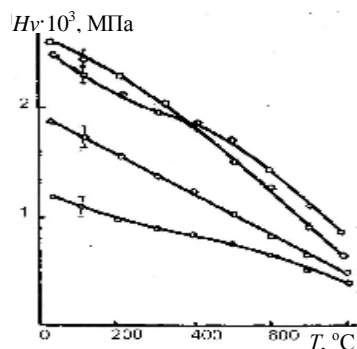


Рис. 3. Влияние легирующих элементов и специальных добавок на горячую твёрдость КМ на основе Cu—Mo: 1 — Cu—6Ni—1LaB₆—1C—Mo; 2 — Cu—2Co—Mo; 3 — Cu—6Ni—Mo; 4 — Cu—Mo.

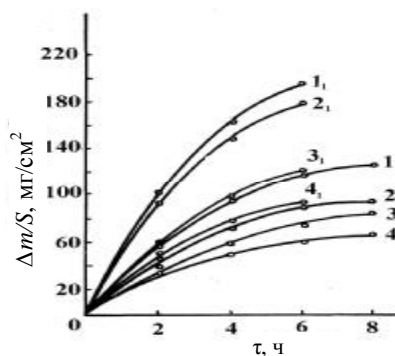


Рис. 4. Влияние состава КМ на основе меди и молибдена на их окислительность: 1 — Cu—0,5BN—Mo; 2 — Cu—2Co—Mo; 3 — Cu—1LaB₆—2Ni—Mo; 4 — Cu—1LaB₆—6Ni—1C—Mo; 1—4 — 500 °C; 1₁—4₁ — 600 °C.

металлов [4], позволяет утверждать, что в исследуемых КМ формируется матричная структура (рис. 2).

Изучены особенности влияния легирующих элементов и специальных добавок на горячую твердость (рис. 3). Данные, приведенные на этом рисунке, свидетельствуют об эффективности выбранных добавок. Эти добавки повышают окислительность исследуемых КМ, усложнение их состава остаётся эффективным при повышении температуры (рис. 4). После окисления на воздухе при 700 °C в течение 2 ч привес образцов из КМ уменьшается в такой последовательности: Cu—Mo (260 мг/м²); Cu—2Ni—Mo (110 мг/м²); Cu—0,5BN—Mo (95 мг/см²); Cu—6Ni—1LaB₆—Mo (42 мг/см²). В присутствии углерода сопротивление окислению растет у КМ Cu—6Ni—1LaB₆—Mo. Для выяснения природы окислительности КМ на основе Cu и Mo проведен рентгенофазовый анализ продуктов их окисления. Установлено, что при нагреве исследуемых КМ до 400 °C происходит преимущественно окисление меди с образованием Cu₂O.

При повышении температуры и медь и молибден окисляются одновременно с образованием молибдатов, основными из которых являются CuMoO₄, Cu₃Mo₃O₁₂ и высший оксид Cu₂MoO₅. Оксид молибдена, защищающий материал до 600 °C, при более высокой температуре эту способность утрачивает из-за высокой скорости испарения. При температуре выше 700 °C процесс окисления ускоряется с образованием легкоплавких эвтектик молибдатов, в том числе и эвтектики MoO₃—CuMoO₄. При введении Ni и Co также образуются молибдаты. Изменение их цвета (на зелёный — в присутствии никеля и на розовый — в присутствии кобальта), по-видимому, обусловлено тем, что катионы никеля и кобальта входят в молибдаты с образованием твёрдых растворов замещения, например (Cu, Ni)₂Mo₄O₁₆. При введении LaB₆ скорость окисления снижается. Согласно работе [5], окисление LaB₆ начинается при температуре 700 °C и сопровождается формированием соединений xLa₂O₃·yV₂O₃. Структурное многообразие боратов лантана усложняет их идентификацию.

Функциональные свойства электродов из КМ на основе меди и молибдена

На основании собственных и литературных данных проанализированы особенности структурных изменений и стойкость контактов силовых аппаратов при коммутации больших токов. Проведенный анализ особенностей разрушения контактов Cu—Mo в широком диапазоне нагрузок позволил предположить такую последовательность основных процессов электроэрозии.

1. Локализация пятна разряда в области, ограниченной валиком выдавленного и застывшего расплава на основе меди.
2. Разрыхление, рост глубины проплавления, образование низкоплавких молибдатов, их испарение и разбрызгивание.
3. Структурирование рабочего слоя: формирование вторичной структуры и её разрушение.

В настоящей работе особенности структурных изменений в рабочем слое электродов из порошковых КМ на основе меди и молибдена в зависимости от состава этих КМ изучали с помощью комплексного металлографического и электронно-микроскопического анализов, традиционно применяемых в работах в данном направлении.

Отличительной особенностью методики, используемой в данной работе, является привлечение эмиссионной спектроскопии, которая позволяет получить пространственные профили температуры и электронной концентрации в плазме электрической дуги, горящей на воздухе между электродами из КМ [6, 7]. Результаты, полученные методами эмиссионной спектроскопии, в сочетании с данными металлографических исследований структурных изменений в рабочем слое позволяют выявить механизмы электрической эрозии в зависимости от состава материала и параметров разряда, роль структурных составляющих, возможность и целесообразность управления ними.

Медные электроды

Электрическая дуга силой тока 30 А инициировалась на воздухе между торцевыми поверхностями неохлаждаемых электродов независимо от состава КМ. Диаметр стержневых электродов и разрядный промежуток составляли 6 и 8 мм соответственно. Температуру плазмы определяли методом относительных интенсивностей спектральных линий меди [8]. Представленные результаты указывают на взаимосвязь температуры плазмы и наличия слоя наработки или вторичной структуры на поверхности электродов. То есть параметры плазмы зависят от состава КМ и состояния поверхности электродов, которое обусловлено термическим воздействием плазмы дугового разряда.

Анализ состояния поверхности медных катода и анода показал, что независимо от полярности электроды претерпевают ударное воздействие разряда. Оно заключается в разбрызгивании расплава с образованием "бахромы" у каждого участка, где перемещается опорное пятно дуги, как на катоде, так и на аноде (рис. 5, а, б). На катоде бахрома по краю разрыхляется из-за накопления примесей и привязки разряда к местам, обогащенным ими (рис. 5, б). Локализация разряда, неоднородность влияния теплового поля и высокие скорости охлаждения электродов

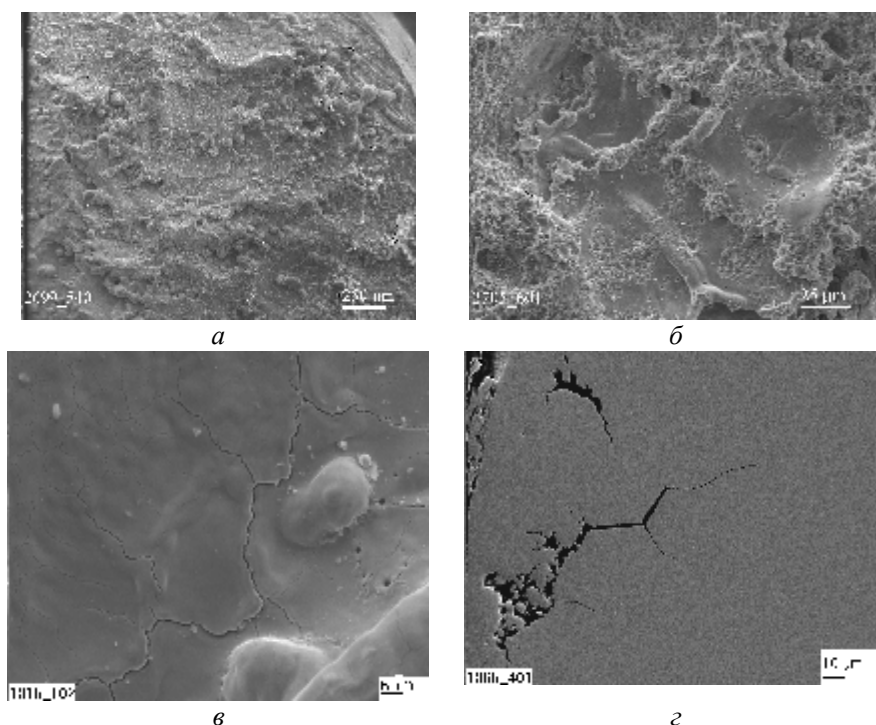


Рис. 5. Поверхности медных электродов: *a* — анода; *б* — катода; *в*, *з* — следы термоусталостного разрушения электрода.

приводят к появлению на их поверхности сетки трещин термической усталости (рис. 5, *в*) независимо от полярности, распространяющихся по границам зерен и вызванное ими порообразование (рис. 5, *з*).

Температуру плазмы определяли методом относительных интенсивностей спектральных линий меди, а электронную концентрацию — по уширению контура спектральной линии Cu I 510.5 нм [8]. Полученные радиальные профили температуры и электронной концентрации (рис. 6) в среднем сечении электрической дуги позволяют рассчитать состав плазмы и, в частности, содержание меди.

Установлено отсутствие заметного влияния морфологии структуры поверхности гомогенного материала электрода на эти параметры, в пользу чего свидетельствует стабильность параметров плазмы в течение всего времени горения разряда.

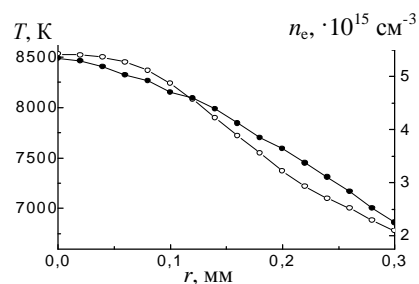


Рис. 6. Радиальные профили температуры (○) и электронной концентрации (●) в плазме электрической дуги, горящей между медными электродами [8].

Электроды из КМ Cu—Mo

Анализ микроструктуры поверхности и приповерхностного объема рабочего слоя электродов Cu—Mo, прошедших испытание, позволил обнаружить морфологическое разнообразие структурных изменений под влиянием дугового разряда. Под воздействием высокотемпературного поля разряда на воздухе происходят окисление и взаимодействие структурных составляющих КМ Cu—Mo, которые начинаются вдоль границ фаз на основе Cu и Mo (рис. 7, *a*) и сопровождаются образованием молибдатов и их эвтектик вдоль поверхности электрода (рис. 7, *б*). Как видно на этом рисунке, продукты взаимодействия оксидов образуют однородный по составу и массивный по объему слой вторичной структуры над исходной.

Вторичная структура представляет собой композиционный материал из матрицы и пронизывающих ее анизотропных кристаллов различных размеров с продольными каналами, закрытыми с двух сторон. Такие кристаллы с четко выраженным переменным сечением по длине могут быть разрозненными или образовывать пучки (рис. 8, *a*).

В области привязки разряда к поверхности электрода такие пучки выходят с открытыми полостями каналов (рис. 8, *б*). В этой области наблюдается наибольшая разница в размерах сечения по длине этих кристаллов. Толщина стенки канала кристаллов становится неоднородной, растет возможность их разрушения у поверхности. В рабочем слое анодов присутствуют крупные анизотропные кристаллы (рис. 8, *в*), форма которых может быть результатом их аномального роста. Еще одним видом кристаллов, занимающих большие объемы матрицы, являются дендрито-подобные (рис. 8, *г*).

Исследования [8] позволили сравнить содержание металлов в плазме электродугового разряда между медными и композитными электродами Cu—Mo (рис. 9, *a*, *б*). Большое количество меди в плазме в случае композитного материала Cu—Mo объясняется наличием характерной вторичной структуры. Так происходит испарение молибдатов и эвтектик на их основе с рабочего слоя электродов, где образуются массивные ванны расплавов, способствующих снижению электроэрозионной стойкости электродов.

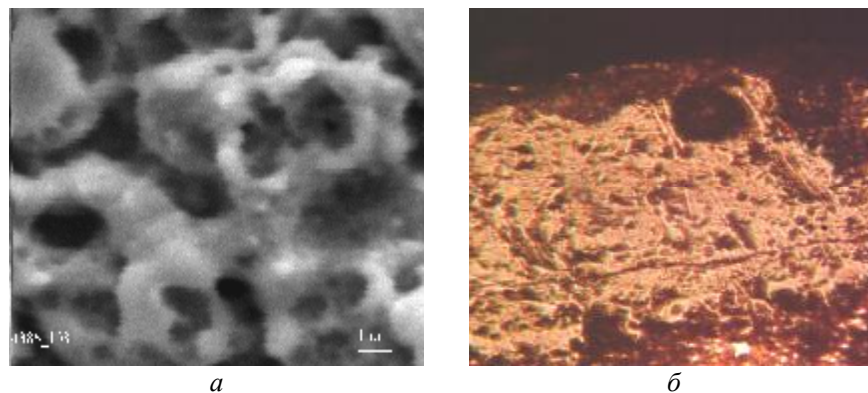


Рис. 7. Образование жидкой фазы в системе Cu—Mo—O на границах зёрен основных составляющих (*a*) и во вторичной структуре рабочего слоя (*б*).

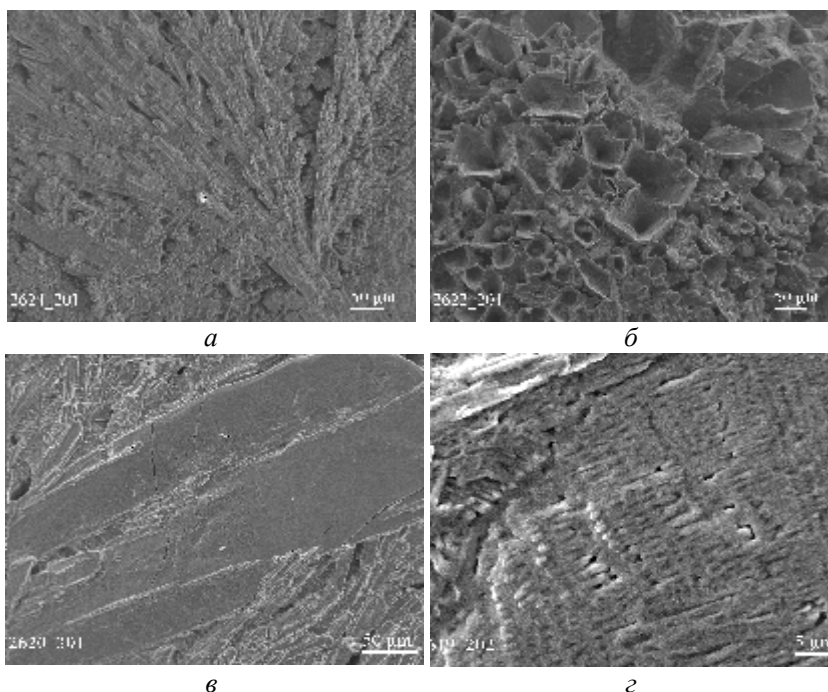


Рис. 8. Разнообразие форм структурообразующих кристаллов: *a* — пучки кристаллов в матрице КМ; *б* — кристаллы со вскрытыми торцами у рабочей поверхности; *в* — кристалл аномального роста; *г* — дендрито-подобные кристаллы на поверхности матрицы.

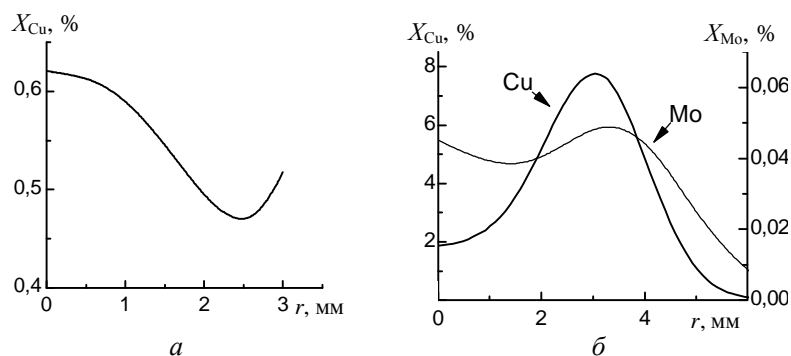


Рис. 9. Содержание меди в плазме электродугового разряда при силе тока 30 А для электродов Cu (*a*) и Cu—Mo (*б*) [8].

Электроды из КМ Cu—Co—Mo

Легирование КМ Cu—Mo кобальтом, слабо растворимым в меди, но межфазноактивным (рис. 10, *a*, *б*), приводит к изменению характера окисления структурных составляющих в тепловом поле разряда.

Структурные особенности поверхности позволяют предположить, что процессы окисления составляющих на начальных стадиях происходят раздельно. Тугоплавкая составляющая окисляется в газовой фазе (ее поверхность чистая, сглаженная, без каверн), а межфазная граница и легкоплавкая составляющая покрываются сфероидальными частицами

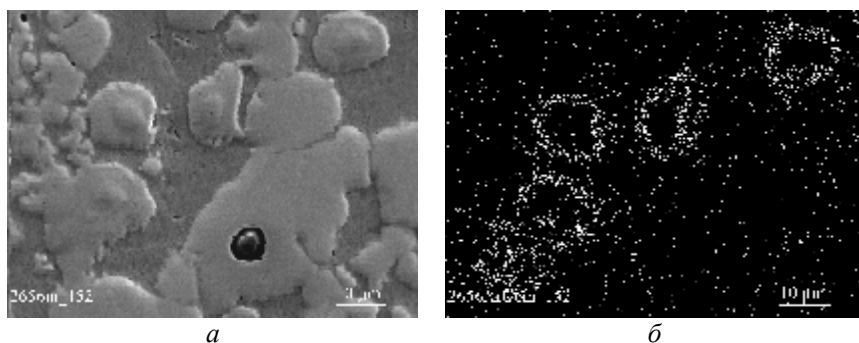


Рис. 10. Межфазная активность кобальта в исходной структуре КМ Cu—Co—Mo (*а*), выявляемая в рентгеновских лучах кобальта (*б*).

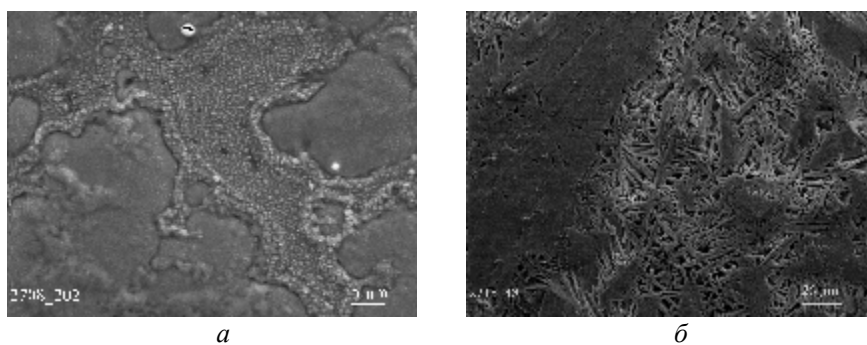


Рис. 11. Морфология структуры композита в рабочем слое электрода на начальных стадиях окисления (*а*) и на стадиях формирования расплава и его кристаллизации (*б*).

(они светлые) (рис. 11, *а*). Под воздействием дугового разряда смешение паровых потоков у поверхности способствует образованию на поверхности образца разных видов продуктов взаимодействия — твердого, твердожидкого и расплава. Последние два состояния формируются вдоль границ меди и молибдена. Объем расплава далее увеличивается и становится матричной фазой (рис. 11, *б*). В этом слое при кристаллизации образуются анизотропные кристаллы с полыми каналами вдоль большей оси. Под влиянием тепла дугового разряда происходят рост и уплотнение этих кристаллов (рис. 12).

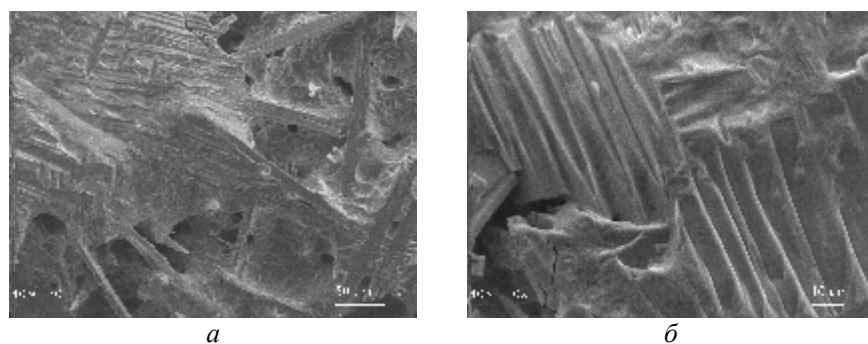


Рис. 12. Анизотропные кристаллы в рабочем слое электрода из КМ Cu—Co—Mo: *а* — катод; *б* — анод.

Исследование содержания молибдена показало однородность его распределения в матричном сплаве и колебание содержания по длине кристаллов, что, по-видимому, обусловлено структурой этих кристаллов и содержанием примесей в них. Кобальт, как межфазно-активный элемент, равномерно распределяется в теле и рабочем слое электрода. Однако этот слой вторичной структуры у поверхности электродов, по-видимому, в силу насыщения примесями слабо связан с матричной структурой, поэтому под воздействием термической усталости скалывается.

Вскрытая исходная структура в результате локальной привязки дугового разряда может покрываться новым слоем вторичной структуры, толщина которого в рабочем слое электродов из КМ Cu—Co—Mo переменная.

Электроды из КМ Cu—LaB₆—Mo

Как упоминалось ранее, введение гексаборида лантана LaB₆ в КМ Cu—Mo существенно повышает ряд свойств нового композита, в том числе окалиностойкость. Это, как можно предполагать, происходит из-за воздействия его на формирование и природу продуктов окисления. Частицы гексаборида лантана нередко находятся в порах без признаков адгезии с матричным материалом (рис. 13, *а, б*). Этот факт увеличивает роль процессов переноса продуктов реакции со средой: у частиц гексаборида наблюдается скопление частиц, по визуальным признакам, оксида лантана (рис. 14). Плавление LaB₆ происходит при температуре 2740 °С, что существенно выше температуры плавления молибдатов, например CuMoO₄ — 820 °С.

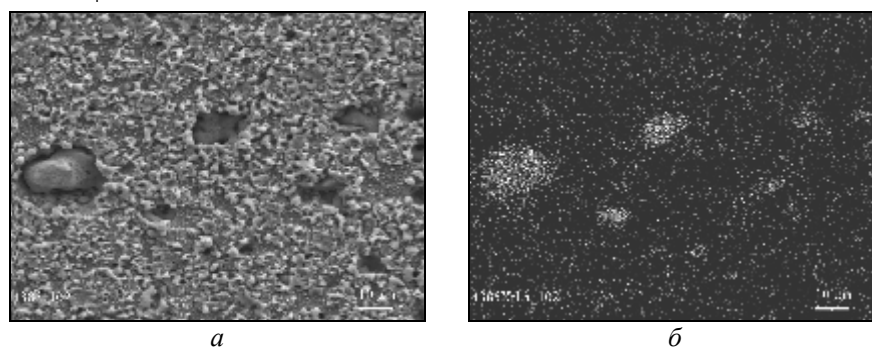


Рис. 13. Микроструктура КМ Cu—Mo—LaB₆ во вторичных электронах (*а*) и в характеристическом рентгеновском излучении лантана (*б*).

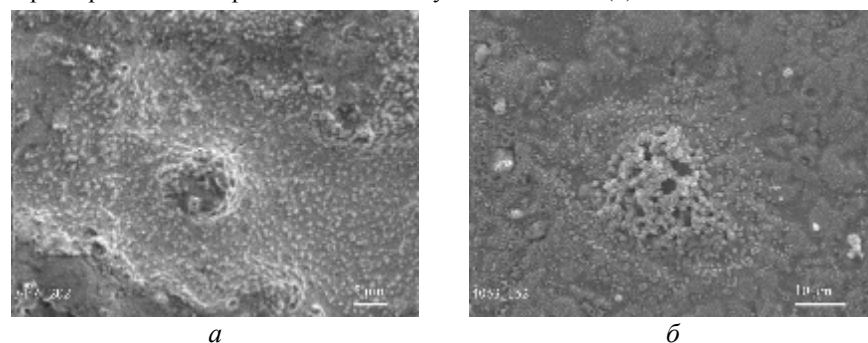


Рис. 14. Образование частиц новой фазы у включений LaB₆ (поверхность образца).

Окисление гексаборида лантана, согласно литературным данным [5], происходит с образованием La_2O_3 и легколетучего B_2O_3 . Учитывая участие кислорода в формировании молибдатов и летучесть оксидов молибдена и бора, можно предположить, что именно эти процессы окисления и испарения в тепловом поле разряда будут увеличивать долю паровой и снижать количество жидкой фазы в продуктах эрозии в рабочем слое электродов.

В приповерхностном слое жидкая фаза на катоде и аноде кристаллизуется в виде разориентированных анизотропных кристаллов с продольными каналами (рис. 15, *а, б*), распределение и ориентация которых аналогична одному из известных морфологических типов структуры эвтектических сплавов [9]. В сечении электродов эти кристаллы образуют вторичную структуру. Её особенностью является неоднородность, обусловленная перемещением основания разряда и вызванными этим процессами: формированием матрицы, в которой распределяются кристаллы новой анизотропной фазы (рис. 16); диспергированием конгломератов тугоплавкой составляющей на основе молибдена под влиянием расклинивающего действия расплава матрицы; испарением продуктов реакций (рис. 16, *а, б*), а также формированием новой дисперсной оксидной фазы — La_2O_3 .

Как уже упоминалось, в работе использовали методы оптической эмиссионной спектроскопии для получения пространственных профилей температуры и электронной концентрации в плазме электрической дуги, горящей на воздухе между электродами из композиционных материалов [10]. На рис. 17 показаны радиальные профили распределения температуры плазмы электродугового разряда при силе тока 30 А между электродами Cu—Mo—LaB_6 при разных режимах горения дуги.

Анализ представленных результатов указывает на взаимосвязь температуры плазмы и слоя наработки или вторичной структуры на поверх-

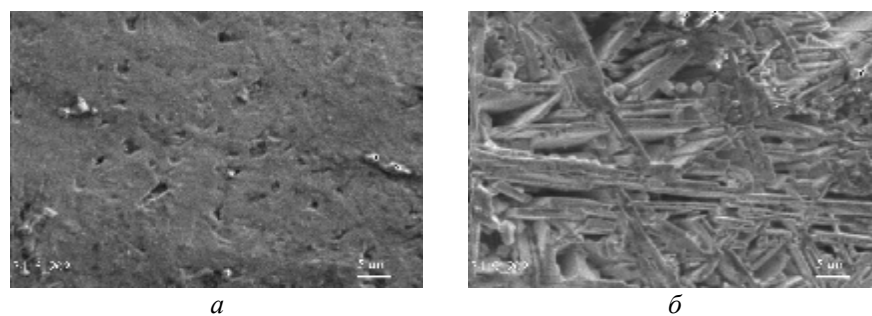


Рис. 15. Вторичная структура на поверхностях катода (*а*) и анода (*б*).

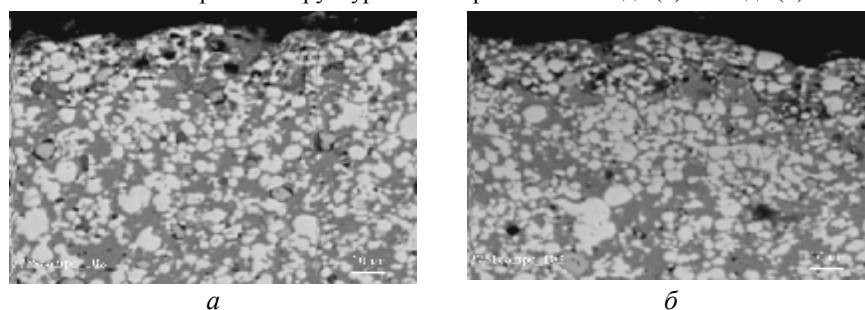


Рис. 16. Диспергирование структуры и рост пористости КМ в рабочих слоях катода (*а*) и анода (*б*).

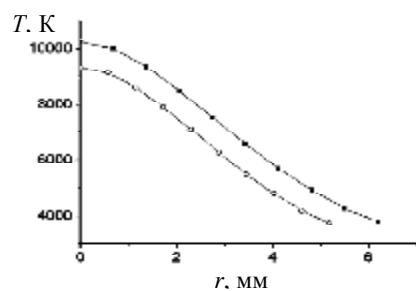


Рис. 17. Радиальные профили температуры плазмы электродугового разряда силой тока 30 А между электродами Cu—Mo—LaB₆ до наработки вторичной структуры (○) и при ее наличии на поверхности электрода (■) [10].

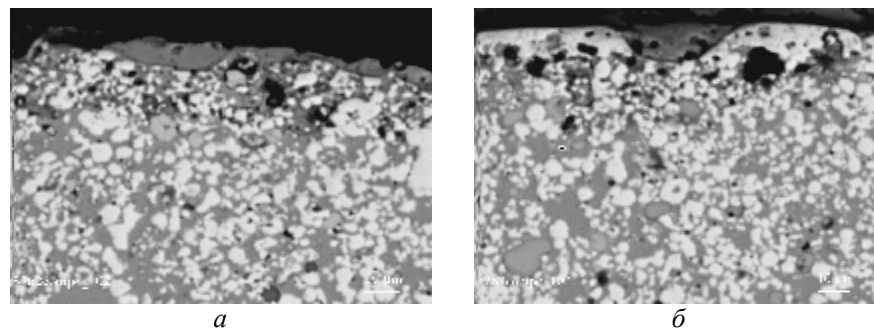


Рис. 18. Особенности вторичной структуры катода и анода из КМ, содержащего гексаборид лантана.

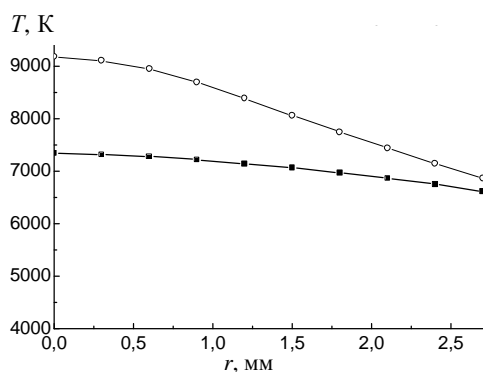
ности электродов. То есть параметры плазмы зависят от состава КМ и состояния поверхности электродов, которое, в свою очередь, обусловлено термическим воздействием плазмы дугowego разряда. В случае дуги между электродами из Cu—Mo—LaB₆ формирование микроструктуры на их поверхности приводит к повышению температуры плазмы. Это вызвано уменьшением количества паров металлов в плазме. То есть в этом случае вторичная структура или слой наработки препятствует эмиссии металлов в межэлектродный промежуток и, следовательно, обеспечивает повышение эрозионной стойкости электродов. Установлено, что в присутствии гексаборида лантана содержание молибдена в плазме снижается: в рабочем слое наблюдаются уплотнение и спекание тугоплавкой составляющей КМ. Толщина вторичной структуры в этом случае наименьшая (рис. 18).

Влияние добавки гексаборида лантана в КМ на свойства плазмы электродугового разряда

Наличие добавки гексаборида лантана в КМ Cu—Mo—Co оказывает влияние на свойства плазмы электродугового разряда. Так, была исследована плазма электродугового разряда силой тока 3,5 и 30 А между неохлаждаемыми электродами Cu—Mo—Co и Cu—Mo—Co—LaB₆ в потоке аргона [11]. Следует отметить, что конструкция электродного узла не обеспечивала полной изоляции поверхности электродов аргоном от атмосферного воздуха.

Температуру плазмы определяли согласно диаграммам Больцмана с использованием спектральных линий меди [12]. При силе тока 3,5 А радиальные распределения температуры плазмы отличались незначительно. При увеличении разрядного тока до 30 А температура плазмы для электродов Cu—Mo—Co—LaB₆ значительно выше, чем для Cu—Mo—Co

Рис. 19. Радиальные профили температуры плазмы электродугового разряда силой тока 30 А между электродами Cu—Mo—Co (■) и Cu—Mo—Co—LaB₆ (○).



(рис. 19). Это позволяет предположить, что содержание паров металла в плазме ниже для разряда между электродами КМ с добавкой гексаборида лантана.

Состав плазмы электродугового разряда в состоянии локального термодинамического равновесия определяют с использованием системы уравнений, состоящей из уравнений Саха для каждого из компонентов плазмы, уравнений электронейтральности и состояния идеального газа. Входными параметрами для такой системы являются распределения температуры и электронной концентрации, а также соотношение между концентрациями компонентов, которые устанавливались методами спектроскопии. Решение данной системы уравнений позволяет определить относительное содержание меди X_{Cu} и молибдена X_{Mo} в плазме разряда:

$$X_{Cu} = \left(\frac{N_{Cu} + N_{Cu^+}}{\Sigma N_i} \right) \cdot 100\%, \quad X_{Mo} = \left(\frac{N_{Mo} + N_{Mo^+}}{\Sigma N_i} \right) \cdot 100\% .$$

где N_{Cu} , N_{Mo} и N_{Cu^+} , N_{Mo^+} — концентрации атомов и ионов меди и молибдена соответственно; ΣN_i — сумма концентраций атомов и ионов всех компонентов плазмы.

Как видно на рис. 20, относительное содержание меди и молибдена в плазме разряда между электродами Cu—Mo—Co—LaB₆ меньше, чем для Cu—Mo—Co электродов. Особенно следует отметить снижение относительного содержания молибдена в плазме для электродов с добавкой гексаборида лантана. Изменение эрозионных свойств в зависимости от наличия LaB₆, очевидно, можно объяснить отличиями структуры рабочего слоя на поверхности электрода. Так, как уже упоминалось, на поверхности электрода Cu—Mo—Co—LaB₆ наблюдается уплотнение и спекание тугоплавкой составляющей КМ, то есть молибдена.

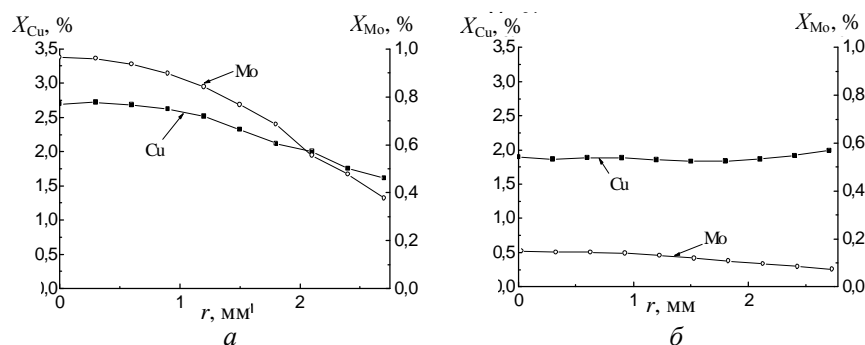


Рис. 20. Относительное содержание меди и молибдена в плазме электродугового разряда между электродами Cu—Mo—Co (а) и Cu—Mo—Co—LaB₆ (б) [10].

Выводы

Исследованы КМ на основе меди и молибдена. Показано, что для материалов исследуемых составов характерно отсутствие температурной зависимости условного предела текучести. Это является признаком матричного типа структуры материалов.

Изучено влияние состава КМ на их свойства. Показано, что из использованных добавок наибольшее влияние на высокотемпературные свойства оказывает гексаборид лантана и соединения бора. Введение LaB_6 повышает окалиностойкость КМ благодаря образованию на поверхности образца слоя молибдатов меди с пленкой оксида бора.

Вторичные структуры, которые формируются в рабочем слое электродов под действием электродугового разряда, в зависимости от состава существенно отличаются. Так, в КМ Cu—Mo и Cu—Mo—Co в рабочем слое формируются легкоплавкие молибдаты меди и эвтектик, что приводит к образованию массивных ванн расплавов, способствующих выносу материала в плазму.

Для Cu—Mo—Co—LaB_6 в рабочем слое наблюдается формирование La_2O_3 и легколетучих V_2O_5 и MoO_3 . В связи с этим можно предположить, что именно процессы окисления и испарения в тепловом поле разряда будут увеличивать долю паровой и снижать количество жидкой фазы в продуктах эрозии в рабочем слое электродов. Таким образом, введение гексаборида лантана в КМ Cu—Mo—Co уменьшает глубину необратимых структурных изменений в рабочем слое контактов и электродов и, следовательно, их износ под влиянием дугевого разряда.

1. *Payne A. P. Metastable copper-chromium alloy films / A. P. Payne, V. M. Clemens // J. Mater. Res. — 1992. — 7, No. 6. — P. 1370—1376.*
2. Спеченные материалы для электротехники и электроники / Под ред. Г. Г. Гнездина. — М. : Металлургия, 1981. — 343 с.
3. *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: (Справ.) / Под ред. Н. Х. Абрикосова. — М. : Наука, 1979. — 350 с.*
4. *Мильман Ю. В. Предел текучести // Физика тв. тела. — (Энци. словарь). — К. : Наук. думка, 1998. — Т. 2. — С. 123.*
5. *Падерно Ю. Б. Высокотемпературное окисление монокристаллического гексаборида лантана / Ю. Б. Падерно, Э. Т. Пугач, В. И. Лазаренко // Порошковая металлургия. — 1984. — № 4. — С. 74—79.*
6. *Веклич А. М. Методика спектроскопічної діагностики плазми електричної дуги / А. М. Веклич, В. Є. Осідач // Вісник Київського університету. Радіофізика та електроніка. — 2003. — Вип. 5. — С. 12—14.*
7. *Веклич А. М. Визначення електронної концентрації в плазмі електродугового розряду / А. М. Веклич, В. Є. Осідач // Вісник Київського університету. Фіз.-мат. науки. — 2004. — Вип. 2. — С. 428—435.*
8. *Бабич И. Л. Плазма электрической дуги между электродами из композиционных материалов на основе меди / [И. Л. Бабич, А. Н. Веклич, Р. В. Минакова, В. Е. Осідач] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2006. — С. 36—42.*
9. *Таран Ю. М. Структура эвтектических сплавов / Ю. М. Таран, В. И. Мазур. — М. : Металлургия, 1978. — С. 311.*
10. *Babich I. L. Plasma of electric arc between composition electrodes / [I. L. Babich, V. Ye. Osidach, V. I. Sobovoy, A. N. Veklich] // Proc. of the 20th Symposium on Plasma Physics and Technology. 10—13 June 2002, Prague, Czech Republic // Czechoslovak J. of Phys. — 2002. — 52, Supplement D. — P. D731—D735.*

11. Veklich A. N. Investigations of thermal plasma with metal impurities. Part I: The influence of electrodes composition on plasma properties / [A. N. Veklich, A. V. Lebid, P. V. Soroka et al.] // Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Phys. — 2012. — **18**, No. 6. — P. 202—204.
12. Бабіч І. Л. Спектроскопія плазми електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO / [І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич та ін.] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2010. — С. 82—115.

Електродуговий розряд і вторинна структура в робочому шарі контактів на основі Cu і Mo

Р. В. Мінакова, А. М. Веклич, А. В. Лебідь, В. Ф. Борецький, В. Ф. Осідач,
П. В. Сорока, І. Л. Бабіч, О. П. Кресанова, М. Є. Головкова

Досліджено структуру і деякі властивості КМ на основі міді та молибдену. Встановлено формування матричної структури в КМ при вмісті міді 46% (мас.) і більше і можливість суттєвого підвищення функціональних властивостей КМ при введенні легуючих елементів і спеціальних добавок: борвміщуючі добавки визначають параметри плазми і стан поверхні електродів (формування вторинної структури) і знижують знос електродів.

Ключові слова: КМ Cu—Mo, матриця, легуючі елементи, борвміщуючі добавки, плазма дуги, вторинна структура, знос.

Arc discharge and secondary structure in the working layer of contacts on Cu and Mo base

R. V. Minakova, A. N. Veclich, A. V. Lebid, V. F. Boretskiy, V. E. Osidach,
P. V. Soroka, I. L. Babich, A. P. Kresanova, M. E. Golovkova

The structure and properties of some of the CM on the basis of copper and molybdenum were investigated. Established the formation of the matrix structure at CM 46% by weight of copper and opportunity of significant increase in the functional properties of the CM with the introduction of alloying elements and special additives, boron-containing additives determine the plasma parameters and the state of the electrode surface (formation of secondary structure) and reduce electrode wear.

Keywords: CM Cu—Mo, matrix, alloying, boron-containing additives, plasma of arc, secondary structure, wear.