



УДК 669.187.001.2

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ И МОЛИБДЕНА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ, КОНДЕНСИРОВАННЫЕ ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ. СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИЯ

Часть 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ИСПАРЕНИЯ-КОНДЕНСАЦИИ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, И. Н. Гречанюк, Р. В. Минакова

Дано обоснование выбора состава, структуры и технологии изготовления композиционных материалов на основе системы Cu–Mo способом электронно-лучевого высокоскоростного испарения-конденсации, показаны особенности технологического процесса и реализующего его оборудования. Приведены результаты исследования структуры парофазных композиционных материалов на основе меди и молибдена, их свойств, сравнительные данные о поведении материалов различного происхождения (порошковых и конденсированных) в условиях воздействия дугового разряда. Обоснована целесообразность выбора парофазных композиционных материалов как альтернативы металлокерамическим с учетом опыта разработки и использования порошковых композиционных материалов в качестве электрических контактов.

The grounds are given for selection of composition, structure and technology of manufacture of composite materials using the method of electron beam high-speed evaporation-condensation, the specifics of technological process and equipment for its realization are shown. Results of examination of structure of vapor-phase composite materials on the base of copper and molybdenum, their properties, comparative data about the behavior of materials of different origin (powder and condensed) under the conditions of arc discharge action are given. Rationality of selection of vapor-phase composite materials as an alternative to metal-ceramic materials is grounded with allowance for the experience of development and use of powder composite materials as electric contacts.

Ключевые слова: композиционные материалы; порошковая металлургия; электронно-лучевое испарение-конденсация; электрические контакты

Испарение и последующая конденсация материалов в вакууме — относительно молодое направление в материаловедении. Оно связано с использованием физико-технологических свойств электронного луча [1], отличающегося наиболее высокой эффективностью при металлообработке, по сравнению с другими известными концентрированными потоками энергии (лазером, плазмой). Электронный луч имеет наибольший коэффициент поглощения энергии. Диапазон мощности и концентрация энергии в луче

значительны (мощность электронных лучей 1 МВт и более). В связи с этим нагрев материала до заданной температуры, плавление, испарение происходят с очень высокими скоростями. Эти особенности луча, используемые при обработке материалов в вакууме, снижают возможность их загрязнения примесями, делают электронный луч идеальным источником энергии в металлообработке [1]. Электронно-лучевое высокоскоростное испарение с последующей конденсацией в вакууме является одним из составляющих технологического процесса, применяемого при получении тонких (до 5 мкм) пленок для радиотехники, микроэлектроники, вы-



числительной техники и др. [2, 3], а также толстых (более 5 мкм), используемых в качестве эффективных защитных и износостойких покрытий [4–9].

Прогнозная оценка мирового производства металлических материалов с использованием различных групп технологических процессов (традиционной металлургии и осаждения из паровой фазы, включая тонкие пленки, получаемые способом магнетронного распыления металлических мишеней) до 2010 г. свидетельствует о дальнейшем росте производства новых материалов, производимых способом осаждения паровой фазы в вакууме [10].

Создание многокомпонентных покрытий, предназначенных для повышения электроэрозионной стойкости электрических контактов коммутационных аппаратов, является перспективным. Научный и производственный опыт, полученный при разработке подобных покрытий, наиболее полно обобщен в монографии [11]. Основное внимание здесь уделено покрытиям из сплавов на основе меди, легированных оловом, хромом, алюминием, никелем и титаном. Покрытия наносили на заготовки изделий путем испарения конечных навесок. Установлено, что покрытия системы Cu–Sn повышают работоспособность контакт-деталей переменных непроволочных композиционных резисторов, а Cu–Cr–Al — керметных резисторов.

О возможности использования высокопрочных пленок системы Cu–0,5 % Al₂O₃ в качестве покрытий электрических контактов отмечается в работе [12]. Важно подчеркнуть, что осажденные в вакууме покрытия значительно превосходят соответствующие гальванические по уровню износостойкости, особенно ее температурной стабильности.

Несмотря на очевидные преимущества, вакуумные покрытия не всегда экономически оправданы, поскольку коэффициент использования пара при осаждении покрытий обычно не превышает 20 %. С другой стороны, непреодолимые трудности при испарении из одного источника материалов на основе меди или серебра с добавками тугоплавких металлов вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, циркония, гафния в том или ином соотношении, соответствующем составу современных электроконтактных материалов, возникают из-за разности в упругости паров компонентов. Из-за невозможности испарения многокомпонентных материалов с большими скоростями, значительных безвозвратных потерь при испарении сохранилась конкурентоспособность способов порошковой металлургии при изготовлении композиционных материалов (КМ) с металлической матрицей типа псевдосплавов для средне- и тяжело нагруженной коммутационной техники.

В Украине разработка КМ для электрических контактов способами порошковой металлургии была начата в конце 1940-х г. под руководством И. Н. Францевича, результаты которой обобщены

в работе [13] и развиты его учениками [14–18]. Технологические особенности получения материалов для электрических контактов, их эксплуатационные характеристики и области применения подробно освещены в публикациях [15–19].

Несмотря на возможность довольно широкого выбора материалов для электрических контактов различного назначения проблема создания высоконадежных электрических контактов до конца так и не решена, поскольку требования, предъявляемые к материалу контактов, зависят от типа коммутационного аппарата и изменяются по мере его совершенствования и замены новым. Удовлетворить эти требования могут материалы, характеризующиеся оптимизированной структурой и соответствующим комплексом электрических, химических, механических и других свойств, обеспечивающих заданные электроэрозионную стойкость, срок службы и надежность контактов.

Определяющее влияние на эксплуатационные характеристики материалов оказывает структурный фактор. Электроэрозионная стойкость контакт-деталей — структурно-чувствительный параметр. Скорость эрозии контакт-деталей из КМ W–Cu зависит, например, от содержания микропор: слабо — при содержании пор до 2 %, увеличивается при 2...4 %, резко возрастает при свыше 4 % пор [16, 20]. Электроэрозионная стойкость высокопрочных контактов из КМ на той же основе зависит от дисперсности тугоплавкой составляющей, которую оптимизируют в соответствии с коммутируемым током. Для токов, превышающих 1000 А, рекомендуется использовать контакт-детали из КМ W–Cu, средний размер частиц в которых составляет не менее 20 мкм [21]. Увеличение электроэрозионной стойкости средненагруженных и слаботочных контактов из КМ в системах Ag–Me, Ag–MeO при повышении их дисперсности способствует снижению интенсивности плазменных потоков [22]. Высокодисперсные КМ на основе серебра с добавкой никеля и оксида кадмия широко применяются в промышленности [15].

Контакты КМК-А10 и КМК-А20, изготовленные из порошков на основе серебра в системах Ag–Me, Ag–MeO, полученных способом химического осаждения, имеют в 1,5...2,0 раза большую износостойкость и срок службы, чем контакты из порошков, выполненных при помощи механического смешивания [19].

Значительный научный и практический интерес представляет использование высокоскоростного электронно-лучевого испарения и конденсации металлов и неметаллов для формирования покрытий на рабочей поверхности контактов и получения массивных конденсированных КМ для электрических контактов. Лабораторные образцы КМ толщиной до 1...12 мм дисперсно-упрочненного и микрослой-

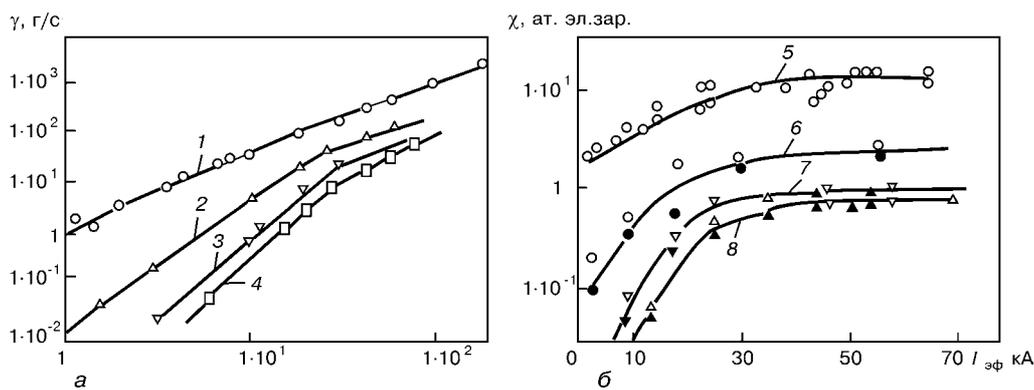


Рис. 1. Зависимость скорости электрической эрозии γ (а) и коэффициента электропереноса χ (б) от тока для контактов из меди (1, 5), КМ Мо-30Cu (2, 6); W-30Cu-3Ni (3, 7); W-50Cu-2Ni (4, 8)

ного типов с 1970-х гг. исследуют в Институте электросварки НАН Украины [23], Королевском авиационном научно-исследовательском институте Министерства обороны Великобритании [24] и в ряде других научно-исследовательских лабораторий. Однако о серийном выпуске подобных материалов ничего не известно.

Прежде чем приступить к разработке промышленной электронно-лучевой технологии изготовления КМ для электрических контактов следовало решить целый ряд прикладных и научных задач, одной из которых является экономическая. По стоимости электроконтактные материалы, получаемые способом испарения и последующей конденсации металлов и неметаллов в вакууме, должны быть сопоставимы с подобными материалами, изготавливаемыми при помощи порошковой металлургии. Наибольший интерес представляет разработка и использование для электрических контактов КМ, не содержащих драгоценных металлов. По эксплуатационной надежности конденсированные электроконтактные материалы не должны уступать спеченным порошковым композициям. Для этого необходимо было решить вопросы выбора составов и структуры электроконтактных материалов, исследования их физико-механических и эксплуатационных характеристик, разработки рекомендаций и создания воспроизводимой промышленной технологии изготовления конденсированных КМ.

Материалы, получаемые способами порошковой металлургии без драгоценных металлов, довольно широко распространены при производстве контактов коммутационных аппаратов. К ним следует отнести контакты на основе вольфрама и меди (КМК-Б25, КМК-Б45); молибдена и меди (КМК-БМо50, КМК-БМо80) [15, 25]. Порошковые КМ этих марок содержат 20... 80 мас. % тугоплавкой составляющей; 0,5... 12 мас. % легирующих элементов (никеля, кобальта, серебра и др.), а также функциональные добавки. Данные составы обеспечивают хорошее смачивание и возможность получения структуры матричного и каркасно-матричного типов. КМ примерно с 50 и 70 % W(Mo), чаще всего применяемые в промышленности, имеют структуру мат-

ричного типа с конгломератами, цепочками или отдельными зернами тугоплавкой составляющей, диспергированными в зернах-колониях матрицы. Такой характер структуры основных составляющих и фазовый состав легкоплавкой, зависящий от природы легирующих элементов, влияет на электросопротивление, механические (твердость, сопротивление изгибу, растяжению в интервале температур 196... 600 °С) и химические (сопротивление высокотемпературному окислению при температурах 20... 800 °С) свойства [16, 25].

Контакты из этих КМ в средне- и тяжелонагруженных выключателях замыкают и размыкают электрические цепи в различных условиях: на воздухе, в масле, элегазе (SF_6), вакууме и др. [14, 26, 27].

В воздушных масляных и элегазовых выключателях электроэрозионный износ контактов связан со взаимодействием материала поверхности контактов с раскаленными, ионизированными, химически активными газовыми потоками.

Помимо физических процессов, происходящих под воздействием электрической дуги, на рабочих поверхностях контактов и в межконтактном зазоре протекают химические, способствующие возникновению новых соединений — продуктов взаимодействия материала контакта с окружающей атмосферой.

Условия протекания химических реакций в данном случае особые, поскольку взаимодействуют ионизированные газы, находящиеся в составе плазмы столба дуги и в окружающем его пространстве, а также пары материалов контактов. Продукты взаимодействия (оксиды, карбиды, нитриды, гидриды, сульфиды и др.) оседают на поверхности контактов, образуют более или менее плотные пленки, корки и конгломераты, увеличивающие переходное сопротивление контактов. Отрицательное действие указанных образований уменьшается, если входящие в их состав соединения нестойкие, легко испаряются либо хрупкие, неплотно прилегают к поверхности контактов, удаляются при замыкании контактов, их взаимном проскальзывании или под воздействием парогазовых струй, возникающих при дугогашении.



В связи с этим необходимо, чтобы материал для контактов воздушных выключателей отличался высокой коррозионной стойкостью, его оксиды были летучими, а конструкция контактного узла обеспечивала возможность механической «самоочистки».

При использовании контактов системы W–Cu продуктами окисления чаще всего являются оксиды WO_3 и Cu_2O [19, 27]. Их удельное сопротивление изменяется в достаточно широких пределах: для WO_3 от 1 (при сильном отклонении) до $1 \cdot 10^{12}$ Ом/см (при стехиометрическом составе), а для Cu_2O — соответственно от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^{10}$ Ом/см.

Особенности эксплуатационных свойств высокопрочных W–Cu контактов при работе на воздухе обусловлены совместным влиянием процессов формирования вторичной структуры в рабочем слое под воздействием дугового разряда, ее окисления и разрушения. Установлено, что при появлении в составе вторичной структуры жидкой фазы, распределяющейся вдоль рабочей поверхности контактов, скорость электрической эрозии снижается, и коэффициент выброса стабилизируется (рис. 1) [16].

При коммутации тока на воздухе подобные процессы зафиксированы и в рабочем слое контактов из псевдосплавов Mo–Cu. Молибден и медь растворимы ограничено [28], в то время как их оксиды взаимодействуют и образуют стойкие соединения ($CuMoO_4$, $Cu_3Mo_2O_9$ и др.) [29, 30], которые при температуре выше $700^\circ C$ способствуют возникновению легкоплавкой эвтектики в системе MoO_3 – Cu_2O , приводящей к уменьшению коррозии при температуре более $800^\circ C$.

Установлено, что оксидная пленка, имеющая состав эвтектики или псевдоэвтектики в системе MoO_3 – Cu_2O [29, 30], легко растекается по поверхности контакта, заполняя неровности. Отслаиваясь после кристаллизации от поверхности контакта из-за слабой адгезии, пленка способствует эффекту «самоочистки» и снижению уровня переходного сопротивления контактной пары [25].

Металлы и КМ, предназначенные для работы в окислительных средах, защищают от окисления посредством легирования либо нанесения покрытий. В ходе исследования КМ системы Mo–Cu установлена возможность повышения их сопротивления высокотемпературному окислению при легировании никелем и (в меньшей степени) кобальтом. На основании данных рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов можно предположить, что это различие обуславливается особенностями распределения никеля и кобальта в системе Mo–Cu, их влиянием на диффузию кислорода и состав продуктов взаимодействия при нагреве на воздухе в исследуемом интервале температур [31].

Дальнейшему повышению жаростойкости способствует введение в КМ системы Mo–Cu–Ni углерода и гексаборида лантана. Привес образцов после

окисления на воздухе при температуре $700^\circ C$ в течение 2 ч для композиции Mo–Cu составил 260, а Mo–Cu–Ni–C–LaB₆ — 42 мг/см^2 . Кроме жаростойкости, КМ электроконтактного назначения должны удовлетворять требованиям к уровню твердости, прочности, пластичности, электро- и теплопроводности и других свойств.

При изучении влияния легирования на горячую твердость КМ системы W(Mo)–Cu установлено, что добавки в порядке эффективности влияния можно расположить в следующей последовательности: никель, кобальт, серебро, цирконий, титан, РЗМ (La, Ce), Y, Zr(Ti) – РЗМ [32]. В таком же порядке на $200 \dots 400^\circ C$ увеличивается и температура начала разупрочнения указанных композиций.

При получении материалов способом электронно-лучевого испарения-конденсации компонентов и соединений, взаимно нерастворимых или ограниченно растворимых друг в друге в жидком и твердом состоянии, установлено, что уровень механических свойств зависит от особенностей контактного взаимодействия на межфазной границе, определяемого краевым углом смачивания металлическими расплавами соответствующих тугоплавких металлов и соединений [23].

Если в качестве упрочняющей фазы для конденсированных из паровой фазы материалов использовать вещества с краевым углом смачивания матричными сплавами более 90° , беспористые материалы получить невозможно из-за образования пор на межфазной границе [33]. Поры, формирующиеся в КМ в таких условиях, приводят к резкому снижению прочности и электроэрозионной стойкости [16]. Краевой угол смачивания жидкой медью вольфрама и молибдена в вакууме зависит от температуры эксперимента и составляет при 1100 и $1250^\circ C$ соответственно 50 и 12 ; 18 и $4 \dots 5^\circ$ [34].

Таким образом, для формирования КМ на основе меди в качестве дисперсного наполнителя, кроме вольфрама, можно использовать молибден. Его преимущество обусловлено и более низкой температурой плавления (для молибдена 2614 , для вольфрама $3384^\circ C$) и более высокой упругостью пара при температуре расплава. Повышение температуры расплавленной ванны затрудняет получение КМ способом высокоскоростного испарения-конденсации из-за перегрева и выхода из строя медных водоохлаждаемых тиглей, из которых осуществляется испарение расплавов в промышленных электронно-лучевых установках [7]. Выполненный анализ позволил в качестве основы при получении КМ посредством высокоскоростного испарения-конденсации выбрать систему Cu–Mo. Исходя из особенностей влияния добавок на электропроводность легированных сплавов на основе меди [15] и коррозионную стойкость композиций Cu–Mo–Zr, Cu–Mo–Y, Cu–Mo–Zr–Y [35] для дополнительного легирования

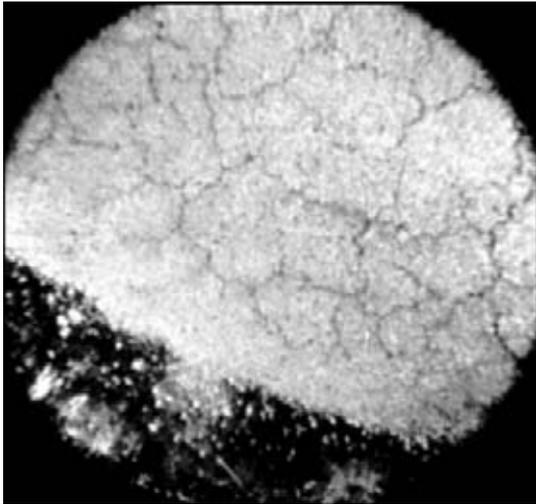


Рис. 2. Сетка микротрещин, образовавшихся в результате термоусталостного разрушения рабочего слоя контакта из КМ W-Cu-Ni, $\times 32$

КМ на основе меди и молибдена с целью улучшения их функциональных характеристик выбраны цирконий и иттрий.

При коммутации электрического тока в жидкой и газовой средах, а также в вакууме за время, связанное с формированием, горением и гашением дуги в межконтактном промежутке [14, 26], на поверхность контактов воздействует интенсивный тепловой поток, электро-, газо- и гидродинамические силы, обуславливающие сложные физико-химические

процессы, протекающие в неравновесных условиях, а также деструкцию и разрушение рабочего слоя этих контактов. С увеличением мощности теплового потока длительность термического влияния, например проплавления материала контактов, превышает время действия теплового источника дуги [26]. В этих условиях в рабочем слое происходят процессы плавления, «выпотевания», перемещения (под воздействием плазменных струй), выброса, испарения легкоплавкой составляющей, а также консолидации за счет капиллярных сил тугоплавкой составляющей, формирования протяженных областей вторичной структуры. Все это способствует полному разрушению исходной структуры в рабочем слое в течение даже первого цикла коммутации тока, что согласуется с изменением коэффициента выброса (рис. 1, б) [36].

При быстром охлаждении, особенно с увеличением тока того же единичного импульса, во вторичной структуре развивается система дефектов в виде раковин, пор, единичных микротрещин, их сетки (мозаики) в консолидированном (после спекания, оплавления) слое на основе тугоплавкой составляющей (рис. 2). Структурные изменения в рабочем слое при повышении напряжения путем возбуждения дугового разряда взрывом медной проволоки [36] происходят при меньших значениях тока импульса [37]. При этом, кроме «мозаики», образованной системой трещин термоусталостного разру-

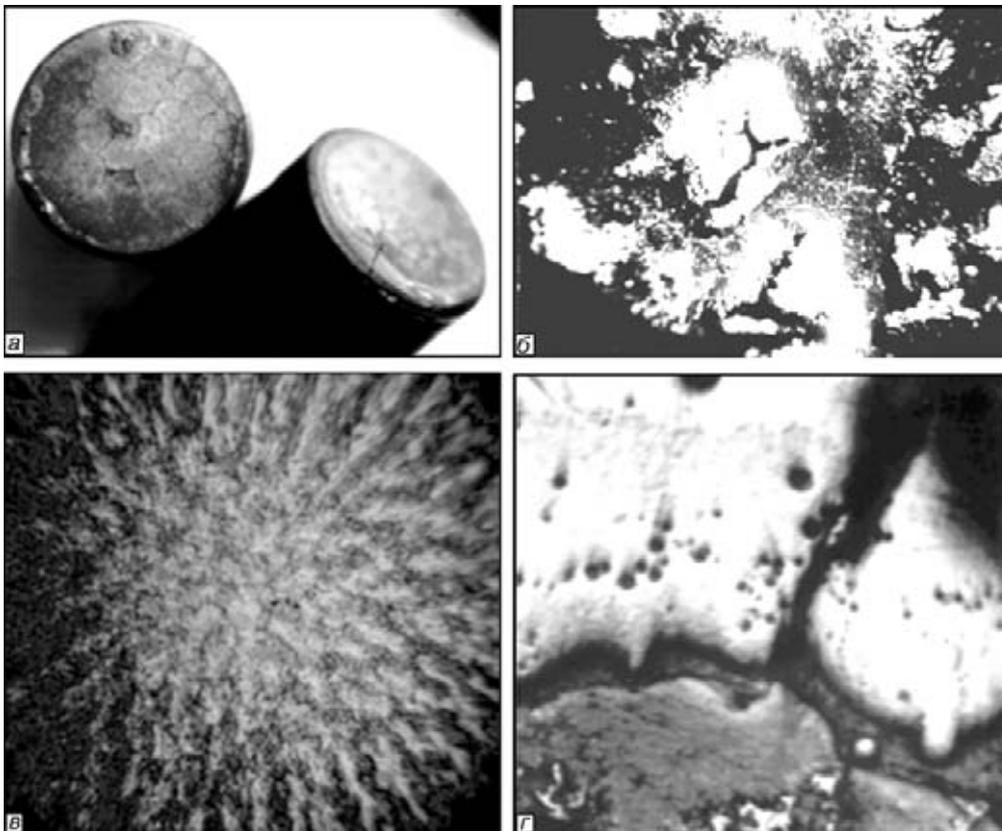


Рис. 3. Особенности разрушения КМ из W-Cu-Ni: а — термоусталостное разрушение и макроскалывание рабочего слоя контакта, $\times 2$; б — локальное взрывообразное разрушение рабочего слоя контакта, $\times 32$; в — радиальный (ручьистый) унос рабочего слоя контакта, $\times 32$; г — хрупкое термоусталостное разрушение и «шелушение» рабочего слоя контакта, $\times 100$

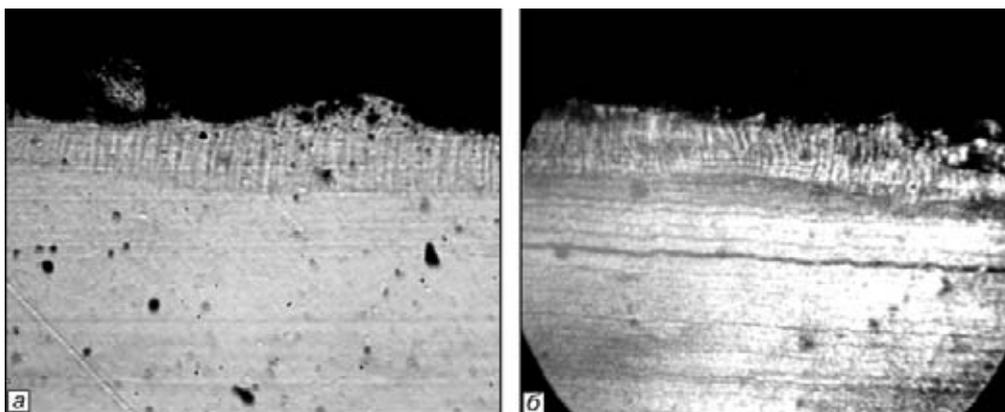


Рис. 4. Микроструктура ЗТВ в рабочем слое контакта из конденсированного КМ на основе меди и молибдена: *а* — без травления; *б* — химическое травление, $\times 100$

шения, фиксируется макроскалывание рабочего слоя вдоль кромки контактов цилиндрической формы (рис. 3, *а*), локальное взрывообразное разрушение (рис. 3, *б*), радиальный (ручьистый) унос (рис. 3, *в*), «шелушение» рабочего слоя (особенно при коммутации тока в масле) (рис. 3, *г*) и др.

Изменение формы контактов (цилиндрической с плоской на цилиндрическую с полусферической рабочей поверхностью) исключает трещинообразование вдоль кромки, но не устраняет склонности к термоусталостному разрушению.

С увеличением коммутируемого тока размер ячеек «мозаики» и глубина трещин растут. В этих условиях оказывается возможным макроскалывание рабочего слоя контактов. Предполагается, что такое катастрофическое изменение рельефа поверхности происходит в том случае, когда невозможно «увязание» в исходном материале рабочего слоя термоусталостной трещины, возникающей в зоне термического влияния разряда. Согласно уравнению Гриффиса-Орвана-Ирвина, это может быть связано с уменьшением эффективной поверхностной энергии образования трещин в исходном материале, например в результате накопления примесей вдоль границ, в том числе границ зерен-колоний [38]. Вызванное особенностями структурно-фазовых изменений в рабочем слое термоусталостное разрушение может приводить к потере работоспособности контактов в результате повышения переходного сопротивления, перегрева, сваривания контактов.

Признаки термической усталости материала под влиянием теплосмен зафиксированы нашими [35–37] и зарубежными [21, 27] исследователями. Тем не менее, перечень контрольных параметров нормативной документации чаще всего ограничивается химическим составом, плотностью, электропроводностью, твердостью при комнатной температуре, в некоторых случаях, — прочностью при растяжении, ударной вязкостью исходных материалов. Ограничению состава контрольных параметров способствуют методические сложности установления корреляционных соотношений свойств (в том числе термостойкости исходной и вторичной структур).

Критерием термостойкости является количество циклов изменения температуры до появления трещины или полного разрушения. В условиях резких локальных теплосмен, связанных с тепловым воздействием дугового разряда, возникают термические напряжения, уровень которых может превышать временное сопротивление материала рабочего слоя со вторичной структурой.

В работе [39] приведен параметр R , характеризующий сопротивление материалов действию термических напряжений: $R = \sigma(l - \mu) / E\alpha$, где σ — предельное напряжение; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости при растяжении; α — коэффициент термического расширения.

Для предельного напряжения КМ характерна локальная микронеоднородность, обусловленная формой, размерами, распределением структурных составляющих [40]. Неоднородность предельных напряжений и деформаций, свойственная исходной и вторичной структурам, способствует зарождению, росту трещин в рабочем слое контактов. В связи с этим срок службы электрического контакта из порошкового и конденсированного КМ будет зависеть от способности вторичной структуры к релаксации напряжений, возникающих под влиянием дугового разряда, а исходной структуры — к релаксации напряжений у вершины трещины, возникающей во вторичной структуре, и торможению этой трещины. И во вторичной, и в исходной структурах склонность к разрушению при теплосменах зависит от уровня свободной поверхностной энергии границ [38].

Технология высокоскоростного электронно-лучевого испарения-конденсации является альтернативой порошковой металлургии: в едином пространстве достигается термическое диспергирование расплава и консолидация дисперсного потока частиц (без специального формования для получения высокоплотного состояния материала) с ограниченным содержанием примесей. Особенностью парофазных КМ является их слоистая структура с градиентом химического состава по толщине. В работе [41] установлено более эффективное упрочнение КМ непрерывными волокнами, чем дискретными.



Результаты настоящих исследований согласуются с данными изучения микрослойных материалов на основе железа и меди, для которых установлено более эффективное повышение прочности, по сравнению с дисперсно-упрочненными материалами системы Fe-Cu [42]. Микроскопический предел упругости как одна из характеристик прочности трехслойных конденсатов Fe-Cu-Fe и Cu-Fe-Cu, полученных электронно-лучевым испарением и последующей конденсацией в вакууме, зависит от чередования слоев [43]. Эти результаты свидетельствуют о новых размерных факторах структуры, влияющих на свойства конденсатов.

Предварительные исследования влияния условий испытания электрических контактов из парофазных КМ на основе меди и молибдена на структуру рабочего слоя показали, что изменения химического состава слоев могут ограничивать зону термического влияния разряда. У парофазных конденсатов этому соответствуют меньшие приповерхностные объемы вторичной структуры (рис. 4) и характерное для контактов из КМ, изготовленных способом электронно-лучевого высокоскоростного испарения-конденсации, повышение стойкости, по сравнению с порошковыми, в ряде типов коммутационных аппаратов.

Выводы

1. Проанализировано состояние разработки КМ с использованием электронного луча как наиболее эффективного источника энергии при металлообработке.

2. Представлены результаты исследования порошковых КМ электротехнического назначения (особенностей химических процессов окисления КМ Cu-Mo и влияния легирующих элементов на них) с целью обоснования выбора состава, структуры и технологии изготовления КМ способом электронно-лучевого высокоскоростного испарения-конденсации.

3. Показана роль структурных изменений в условиях воздействия дугового разряда; установлены особенности термоусталостного разрушения порошковых КМ в рабочем слое контактов и его влияние на работоспособность этих контактов.

4. Проиллюстрированы особенности теплового воздействия на рабочий слой контактов из парофазных конденсатов, а также возможности ограничения зоны теплового влияния дуги при создании слоистых градиентных парофазных КМ.

5. Показаны перспективы использования парофазных КМ как альтернативы порошковым КМ в качестве контактов коммутационных аппаратов.

1. Зуев И. В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. — М.: МЭИ, 1998. — 162 с.
2. Технология тонких пленок: Справ. В 2 т. / Под ред. Л. Майсела и З. Гленга. — М.: Сов. Радио, 1977. — Т. 1. — 662 с.
3. Там же. — Т. 2. — 764 с.

4. Ройх И. Л., Колтунова Л. Н. Защитные вакуумные покрытия на стали. — М.: Машиностроение, 1971. — 297 с.
5. Самсонов Г. В., Эпик А. П. Тугоплавкие покрытия. — М.: Металлургия, 1973. — 398 с.
6. Шиллер З., Гайзиг Г., Панцер З. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.
7. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 230 с.
8. Повышение качества поверхности и плакирование металлов: Справ. / Под ред. А. Кушнера. — М.: Металлургия, 1984. — 376 с.
9. Bunshah R. F. Vacuum evaporation — history recent developments and applications // Zeitschrift fur Metallkunde. — 1984. — 75, № 11. — P. 840–846.
10. Мовчан Б. А. Неорганические материалы, осаждаемые из паровой фазы в вакууме // Современное материаловедение в XXI веке. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 318–332.
11. Косторжицкий А. И., Лебедиский О. В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. — М.: Машиностроение, 1987. — 207 с.
12. Ильинский А. И. Структура и прочность слоистых и дисперсно-упрочненных пленок. — М.: Металлургия, 1986. — 140 с.
13. Францевич И. Н. Электрические контакты, получаемые методами порошковой металлургии // Порошк. металлургия. — 1980. — № 8. — С. 36–47.
14. Раховский В. И., Левченко Г. В., Теодорович О. К. Разрывные контакты электрических аппаратов. — М.; Л., 1966. — 295 с.
15. Спеченные материалы для электротехники и электроники: Справ. / Под ред. Г. Г. Гнесина. — М.: Металлургия, 1981. — 343 с.
16. Композиционные материалы для контактов и электродов / Р. В. Минакова, М. Л. Грекова, А. П. Кресанова, Л. А. Крячко // Порошк. металлургия. — 1995. — № 7/8. — С. 32–52.
17. Тушинский Л. И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. — М.: Металлургия, 1988. — 206 с.
18. Композиционные материалы: Справ. / Под ред. Д. М. Карпиноса. — Киев: Наук. думка, 1985. — 591 с.
19. Материалы в приборостроении и автоматике: Справ. / Под ред. Ю. М. Пятна. — М.: Машиностроение, 1982. — 527 с.
20. Jmm R., Stempel G. Der Einfluss des porositat auf einige Eigenschaften von W-Cu kontakt-werk stoffen // Z Werkstofftechnik. — 1976. — 7, N 1. — S. 376–380.
21. Gessinger F. N. Melton K. N. Burn-off of W-Cu contact materials in an electrical arc // Powder Metallurgy Intern. — 1977. — 9, N 2. — P. 67–72.
22. Leis P., Schuster K. K. Der Einfluss des Kontaktmaterials auf die Austildung von Plasmastraahlen // Electric. — 1979. — 33, N 10. — S. 514–516, 559.
23. Мовчан Б. А., Гречанюк Н. И. Новые материалы и покрытия, получаемые по электронно-лучевым технологиям: Сб. тр. ЭЛТ-88 (31 мая–4 июня 1988 г., Варна, Болгария). — Варна, 1988. — С. 1005–1023.
24. Фаткуллин О. Х. Новые конструкционные порошковые материалы и их применение // Итоги науки и техники. Порошк. металлургия. — Москва: ВИНТИ, 1991. — Т. 5. — С. 140–177.
25. Минакова Р. В., Кресанова А. П., Гречанюк Н. И. Композиционные материалы для контактов и электродов. Материалы на основе Мо // Электрические контакты и электроды: Сб. науч. тр. — Киев, 1996. — С. 95–105.
26. Белкин Г. С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах. — Москва: Знак, 2003. — 237 с.
27. Slade P. G. Arc erosion of tungsten based contact materials. A review // Intern. j. of Refractory & Hard Metals. — 1986. — 5, N 4. — P. 208–214.
28. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: Справ. / Под ред. Н. Х. Абрикосова. — М.: Наука, 1979. — 35 с.
29. Mackey T., Ziolkowski I. Subsolidus phase diagram of Cu₂O-CuO-MoO₃ system // J. Solid. Stat. Chem. — 1980. — N 31. — P. 135–143.
30. Mackey T., Ziolkowski I. Phase relations in the cupric molybdates-cuprous molybdates system // Ibid. — P. 145–151.
31. Контактное взаимодействие, структура и свойства композиции молибден-медь-никель (кобальт) / Р. В. Минакова, Н. Д. Лесник, А. П. Кресанова и др. // Адгезия расплавов и пайка материалов. — Киев: Наук. думка, 1986. — Вып. 17. — С. 70–73.
32. Композиционные материалы для сильноточных контактов и электродов / Р. В. Минакова, И. Н. Францевич,



- Н. Д. Лесник и др. // *Materialy V Konferencja metallurgii prozkow w Polsce*. — 1979. — Т. 2. — С. 457–472.
33. *Еременко В. Н., Найдич Ю. В., Лавриненко И. А.* Спекание в присутствии жидкой металлической фазы. — Киев: Наук. думка, 1962. — 123 с.
34. *Найдич Ю. В.* Контактные явления в металлических расплавах. — Киев: Наук. думка, 1972. — 196 с.
35. *Коррозия композиционных материалов на основе меди, используемых для электрических контактов* / И. Н. Гречанюк, В. Г. Гречанюк, Б. Г. Емельянов, И. Ф. Руденко // *Электрические контакты и электроды*. — Киев, 1998. — С. 140–144.
36. *Сравнительное исследование эрозионных процессов на медных и металлокерамических электродах в сильноточной квазистационарной дуге* / В. П. Игнатко, В. А. Кухтиков, А. П. Кресанова, Р. В. Минакова // *Электрические контакты (теория и применение)*. — М.: Наука, 1972. — С. 71–84.
37. *Влияние условий возбуждения разряда на дуговую эрозию контактов* / Р. В. Минакова, А. А. Флис, В. А. Кухтиков, В. П. Игнатко // *Электрические контакты и электроды*. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 79–84.
38. *Das E.S.P., Marcinkowski M. J.* Accommodation of the stress field at a grain boundary under heterogeneous shear by initiation of microcracks // *J. Appl. Phys.* — 1972. — 43, N 11. — P. 4425–4434.
39. *Третьяченко Г. Н.* Термостойкость // *Энциклопедия неорганических материалов*. — Киев: ГРУСЭ, 1977. — Т. 2. — С. 549–550.
40. *Минаков В. П., Поляков Л. М., Троиц А. С.* Механические свойства тонких медных прослоек в композициях // *Пробл. прочности*. — 1975. — № 10. — С. 71–74.
41. *Мовчан Б. А.* Размерно-структурные зависимости прочности двухфазных неорганических материалов. — Киев, — 1990. — 24 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; 90-1).
42. *Могильникова Т. Т., Нероденко Л. М., Мовчан Б. А.* Микроскопический предел упругости двухфазного материала Cu–68 % Fe, полученного электронно-лучевым испарением в вакууме // *Пробл. спецэлектрометаллургии*. — 2002. — № 2. — С. 19–21.
43. *Могильникова Т. Т., Нероденко Л. М., Мовчан Б. А.* Микроскопический предел упругости осажденного из паровой фазы трехслойного материала системы Fe–Cu // *Соврем. электрометаллургия*. — 2004. — № 1. — С. 16–18.

Научно-производственное предприятие «Геконт», Винница
Поступила 13.01.2005

Установка Л-5,

предназначенная для получения композиционных материалов дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов

Установленная мощность, кВт ...	280
Ускоряющее напряжение электронных пушек, кВ	20
Количество и номинальная мощность электронных пушек, кВт ..	8×60
Диаметр подложки для конденсации, мм.....	1000
Толщина конденсата, мм	0,1...7,0
Скорость конденсации, мкм/мин:	
для металла.....	50
для керамики.....	5
Количество тиглей, шт.:	
Ø 100 мм.....	2
Ø 70 мм	2
Длина испаряемых слитков, мм	500
Площадь, занимаемая установкой, м ²	80

