



СОВРЕМЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОММУТАЦИОННОЙ И СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ.

Сообщение 1.

ПОРОШКОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Е.В. ХОМЕНКО, Н.И. ГРЕЧАНЮК, В.Г. ЗАТОВСКИЙ

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины.
03142, Киев-142, ул. Кржижановского, 3. E-mail: homhelen@mail.ru

В статье представлены современные разработки в области порошковых композиционных материалов типа псевдосплавов на основе Cu (Ag) и тугоплавких металлов W (Mo, Cr), используемых в качестве электроконтактных материалов и сварочных электродов. Кратко описаны основные требования, предъявляемые к материалам дугогасительных контактов и электродов для контактной сварки. Приведены основные сведения от мировых производителей относительно составов и регламентируемых характеристик данного типа материалов и перечислены основные технологические схемы их изготовления. Указаны определенные технологические трудности получения нанодисперсных композитов, тормозящие их производство в промышленных масштабах. Отмечено, что применение метода механического легирования в процессе высокоэнергетического размола порошков позволяет получать медь, дисперсно-упрочненную тугоплавкими оксидами и карбидами (Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , SiO_2 , и др.) с температурой рекристаллизации, близкой к температуре плавления меди и более высоким, по сравнению с хромистыми и хромоциркониевыми бронзами, уровнем электропроводности, прочности и жаростойкости. Библиогр. 41, табл. 5, рис. 4.

Ключевые слова: порошковые композиционные материалы на основе меди, коммутационная и сварочная техника

В настоящее время трудно представить себе область техники, где не используют композиционные материалы (КМ). Широкая область применения обусловлена их высоким уровнем эксплуатационных свойств, значительно превышающих таковые для металлов и сплавов, а также сочетанием высокой прочности и жесткости, сопротивления усталостному разрушению с жаропрочностью и износостойкостью [1–3].

В коммутационной и сварочной технике наибольшее распространение получили порошковые КМ металломатричного типа на основе меди и серебра, упрочненные частицами тугоплавких металлов и химических соединений. Благодаря уникальным сочетаниям свойств металломатричные КМ используют в качестве контактов и электродов, работающих в условиях совместного воздействия высоких температур, механических напряжений, ударных нагрузок в различных газовых средах. Матрица обеспечивает высокий уровень тепло- и электропроводности, а тугоплавкая фаза – высокую твердость, эрозионную, механическую и термическую стойкость. Данные системы относятся к виду псевдосплавов, которые получают преимущественно методом порошковой металлургии. Под понятием псевдосплав принято понимать гетерогенную систему, представленную компонентами, которые не взаимодействуют или слабо вза-

имодействуют друг с другом в широком интервале температур, сохраняя, таким образом, в смеси свои индивидуальные свойства [4].

КМ на основе меди или серебра и тугоплавких металлов VIa группы (Cr, Mo, W) нашли применение в качестве дугогасительных контактов для коммутации больших (25 кА и выше) токов в сетях высокого (до 570 кВ) напряжения [5–8]. Дугогасительные контакты являются наиболее ответственными деталями коммутационных аппаратов, принимающими на себя основное воздействие электрической дуги замыкания и размыкания [9–11]. Для эффективной работы эти контакты должны иметь хорошую тепло- и электропроводность, высокие температуры плавления и кипения, большие значения работы выхода электронов и потенциала ионизации, значительную усталостную прочность и стойкость к окислению при высоких температурах; низкие значения контактного сопротивления, малую растворимость газов и др. свойства [4, 10]. Металлы с хорошими проводящими свойствами (Ag, Cu, Au, Pt и др.) характеризуются низкими температурами плавления и рекристаллизации, высокой склонностью к свариванию, малой прочностью и низкой термостойкостью, в связи с чем их применение весьма ограничено. Тугоплавкие металлы, такие, как W, Mo, Re, Ta, Cr и др., отличаясь высокими механическими характеристиками, имеют недостаточную тепло-



и электропроводность. Сплавление легкоплавких и тугоплавких металлов, как правило, сопряжено с технологическими трудностями, связанными с существенными различиями их физико-химических характеристик [12, 13]. К тому же при сплавлении имеет место частичное растворение элементов в жидкой и твердой фазах, что может приводить к потере их индивидуальных свойств [14]. Производство порошковых псевдосплавов является примером эффективного использования метода порошковой металлургии, позволяющего регулировать свойства материала достаточно экономными и относительно простыми средствами, за счет выбора исходного сырья и технологической схемы изготовления.

Технология получения этих материалов включает этапы смешения и прессования порошков, последующей термической обработки (спекания) и доуплотнения с целью достижения максимальной плотности, близкой к теоретической (рис. 1) [1–17].

Предварительно спрессованная механическая смесь порошков может подвергаться спеканию в твердом состоянии (ТФС) или в присутствии жидкой фазы (ЖФС). Преимущества ТФС заключаются в том, что состав композита не ограничен содержанием легкоплавкой фазы. Однако, как правило, за один цикл не удается достичь максимальной плотности и требуется деформационная или термодформационная обработка. Технология ЖФС позволяет ускорить процессы диффузии компонентов в материале и обеспечивает возможность максимального его уплотнения в процессе спекания. Атмосфера спекания зависит от назначения изделий, и, как правило, является восстановительной или дегасирующей средой (водород, вакуум). Для улучшения смачивания жидкой фазой поверхности тугоплавкой фазы в процессе ЖФС используют такие легирующие добавки, как Fe, Co, Ni, Ti, Zr и др. (до 1...3 % мас.) [4, 18, 19]. Эта технология ограничивает содержание жидкой фазы (не более 50 % по объему) для предотвращения потери формы изделия. Оптимальным технологическим приемом является пропитка расплавами Ag(Cu) или их сплавами тугоплавкого каркаса, сформированного с добавлением легкоплавкой компоненты или без нее (рис. 1, справа). Данный процесс не требует ограничения объема жидкой фазы и может обеспечить плотность, близкую к теоретической. Кроме того, избыток жидкой фазы при пропитке может быть использован как переходной проводящий слой на обратной поверхно-

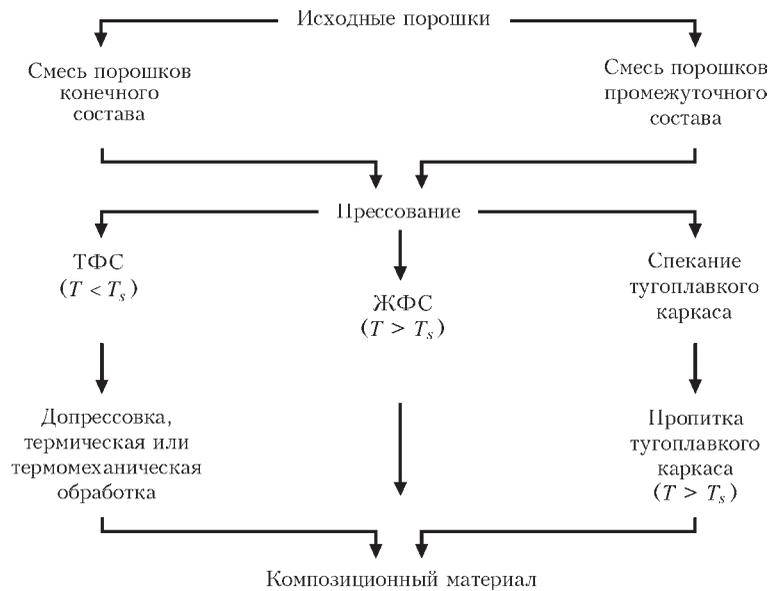


Рис. 1. Технологическая схема получения КМ Ag (Cu)–W (Mo, Cr) (T_s — температура плавления легкоплавкой фазы), ТФС и ЖФС — твердофазное и жидкофазное спекание, соответственно)

сти контактов для приваривания к токоведущим частям установки.

Применительно к КМ часто обнаруживаются корреляции между служебными характеристиками контактов и уменьшением размеров частиц тугоплавкой фазы до микронного и субмикронного размеров [20–22]. В связи с этим перспективной технологией получения КМ Ag(Cu)–W(Mo, Cr) является горячее динамическое прессование, при котором механическая смесь порошков конечного состава за одну операцию подвергается высокоскоростному прессованию и термической обработке в вакууме. В результате такой комплексной обработки обеспечивается дегазация порошков, сохраняется их высокая дисперсность, формируется высокоплотный материал с повышенной прочностью и твердостью и удовлетворительным уровнем электропроводности [23].

В производстве технические характеристики КМ, как правило, регламентируются по составу, плотности, удельному электросопротивлению и твердости (табл. 1–3). Выбор материала и технологической схемы получения определяется условиями эксплуатации контактов. Для всех материалов характерна общая тенденция роста характеристик твердости и эрозионной стойкости и снижения тепло- и электропроводности с увеличением содержания тугоплавкой фазы. Природа тугоплавкого наполнителя, схема получения КМ также оказывает влияние на характер изменения его свойств.

КМ Ag–WC характеризуются большей твердостью и меньшим удельным электросопротивлением по сравнению с КМ Ag–W в аналогичном концентрационном интервале содержания матрицы, при этом схема пропитки обеспечивает получение высокоплотного материала с большими



Таблица 1. Основные свойства КМ Ag–W, Ag–WC и Ag–Mo (материалы фирмы DODUCO [24])

Материал	Содержание серебра, мас.%	Плотность, г/см ³	Удельная электропроводность		Твердость HV10 (по Виккерсу)
			% IACS	МСм/м	
AgW 50/50 SIWODUR 50-1	48...52	13,0...13,4	45	26	120...140
AgW 40/60 SIWODUR 60-1	38...42	14,0...14,4	41	24	140...160
AgW30/70 SIWODUR 70-1	28...32	15,0...15,4	34	20	160...190
AgW20/80 SIWODUR 80-1	18...22	15,8...16,3	31	18	180...230
AgWC60/40 SIWODUR C 40-1	58...62	11,6...11,9	41	24	130...160
AgWC50/50 SIWODUR C 50-1	48...52	12,0...12,4	38	22	140...170
AgWC40/60 SIWODUR C 60-1	38...42	12,4...12,8	36	21	150...180
AgWC84/16C2 SIWODUR C16/C2-2	80...84	9,8	60	35	55
AgWC 73/27C3 SIWODUR C16/C3-2	68...72	9,6	36	21	50
AgMo 50/50 SILMODUR 50-1	48...52	9,9...10,2	34	20	120...140
AgMo 40/60 SILMODUR 60-1	38...42	9,9...10,2	31	18	130...170
AgMo 30/70 SILMODUR 70-1	28...32	10,0...10,4	29	17	140...180

Примечание. В окончании названия марки КМ обозначен метод изготовления: 1 — пропитка; 2 — ТФС с последующей допрессовкой.

Таблица 2. Основные свойства КМ W–Cu (материалы фирмы «Plansee Group» [25])

Материал	Состав, мас. % *		Плотность, г/см ³	Электропроводность, МСм/м	Твердость по Виккерсу HV30	Прочность на сжатие, МПа	Стойкость к оплавлению	Размер зерна W, мкм
	W	Cu						
A15Ni	85	15	15,7	17	205	250	Отлично	до 50
A20Ni	80	20	15,2	18	200	200	Очень хорошо	до 50
A20NiF	80	20	15,2	18,5	190	240	->-	20...25
FG20	80	20	15,2	18,5	220	350	Отлично	4...8
A25NiF	75	25	14,5	21	190	160	Хорошо	20...25
A30Ni	70	30	14,0	23	135	60	->-	до 50

* Все составы КМ дополнительно легируются Ni (менее 1 мас. %).

Таблица 3. Основные свойства КМ Cr–Cu и качественная оценка служебных характеристик дугогасительных контактов из них (материалы фирмы «Plansee Group» [26])

Характеристика	Материал			
	CC-98	CC-75	CC-70	CC-57
Cr (мас. %)	2	25	30	43
Cu (мас. %)	98	75	70	57
O (мас. %)	0,150	0,650	0,675	0,700
H (мас. %)	0,005	0,005	0,005	0,010
N (мас. %)	0,015	0,100	0,105	0,110
Плотность (г/см ³)	8,70	8,05	7,90	7,60
Твердость HV30	110 (HB 2,5)	70	75	85
Электропроводность	Отлично	Отлично	Очень хорошо	Хорошо
Стойкость к оплавлению	o	Очень хорошо	Отлично	Отлично
Способность к прерыванию тока	o	Отлично	->-	->-
Ток прерывания	o	Хорошо	Очень хорошо	->-
Износостойкость	o	->-	->-	->-
Устойчивость к свариванию	o	Очень хорошо	->-	->-

Примечание. o – CC-98 применяется в качестве подложки для контакта с токоведущими частями вакуумной камеры.

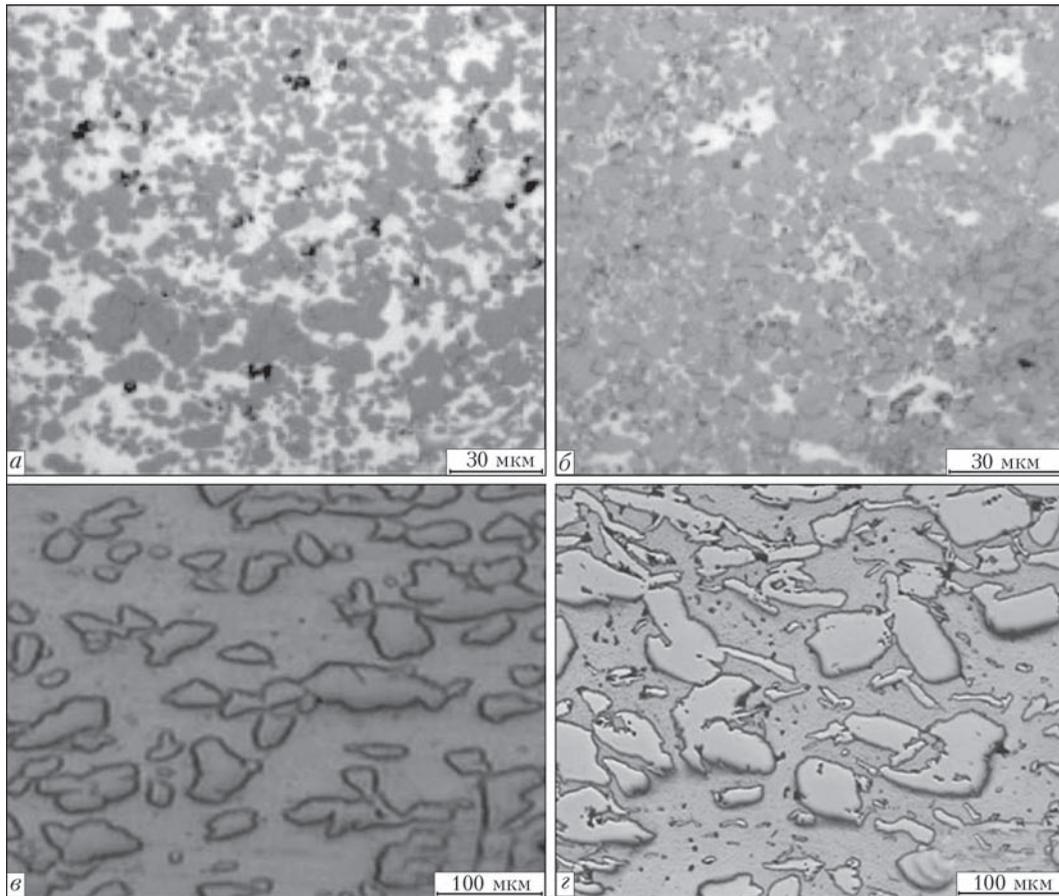


Рис. 2. Типичная микроструктура КМ SIWODUR75 1 (Ag/W 25/75) (а), SILMODUR65 (Ag/Mo 35/65) (б), CC-75 (Cu/Cr 75/25) (в) и CC 57 HMA (Cu/Cr 57/43) (г) (материалы фирмы DODUCO [24, 26])

значениями твердости, тепло- и электропроводности по сравнению с материалами, полученными по схеме ТФС с допрессовкой (см. табл. 1). Для КМ W–Cu характерно существенное улучшение прочностных характеристик при уменьшении размеров зерен вольфрама (см. табл. 2). Структура порошковых КМ Ag(Cu)–W(Mo,Cr) характеризуется наличием двух и более фаз на основе тугоплавкого и легкоплавкого компонентов с частицами от субмикронных размеров до 300...500 мкм (рис. 2). В зависимости от требований к уровню тепло- и электропроводности, а также к эрозивной стойкости и механическому износу, КМ может состоять из каркаса проводящей фазы с диспергированными в ней тугоплавкими частицами, либо из тугоплавкого каркаса, капилляры которого заполнены легкоплавкой фазой, возможно также одновременное существование двух взаимопроницающих каркасов легкоплавкой и тугоплавкой составляющих.

Получение КМ с ультрадисперсными частицами тугоплавкой фазы сопряжено с технологическими трудностями, связанными с необходимостью защиты порошков от окисления, получения равномерного распределения компонентов в смеси, сохранения заданной дисперсности структуры и достижением максимально возможной плотно-

сти [27–29]. Это требует проведения подготовительных технологических операций, таких, как, например, плакирование тугоплавкой компоненты межфазноактивными элементами для улучшения адгезионных характеристик на границе матрицы с тугоплавкой фазой [30], длительного высокоэнергетического размола, имеющего целью механическое легирование и получение композиционных порошков промежуточного состава [31], совместное восстановление кислородсодержащих соединений тугоплавких и легкоплавких компонентов [32].

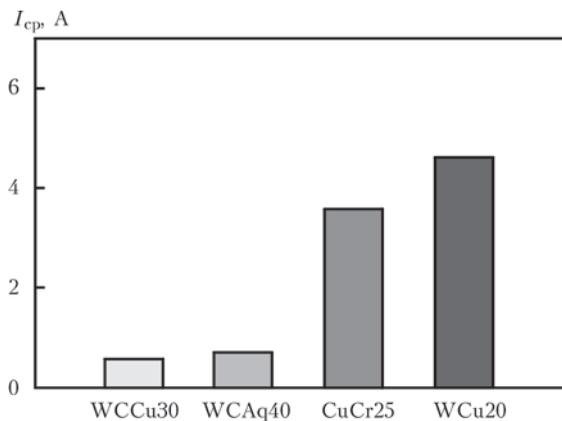


Рис. 3. Ток среза для различных контактных материалов при испытаниях вакуумного контактора 24 кА/24 кВ при максимальном токе 30 А [26]



Таблица 4. Технические характеристики КМ «эльконайт» производства фирмы CMW Inc. (США) [38]

Материалы Elkonite (обозн. CMW Inc.)	Состав, мас. %	Плотность, г/см ³	Удельная электропроводность, % IACS	Удельная теплопроводность (20 °С), Вт/м·К	Предел прочности при изгибе, МПа	Твердость (по Роквеллу)
1W3	55W:45Cu	12,50	53	310	758	HRB 77
3W3	68W:32Cu	13,93	50	280	896	HRB 90
5W3	70W:30Cu	14,18	48	280	965	HRB 95
10W3	75W:25Cu	14,84	43	260	1030	HRB 98
10W53	75W:25Cu	14,79	28	150	1380	HRB 109
30W3	80W:20Cu	15,56	41	250	1170	HRB 103
TCS	50WC:50Cu	11,26	45	290	1100	HRB 94
TC10	56WC:44Cu	11,64	42	280	1240	HRB 100
TC20	70WC:30Cu	12,65	30	240	1380	HRC 37

Таблица 5. Технические свойства дисперсно-упрочненных КМ на основе меди (ДУКМ) торговой марки ООО «Диск-ком-сварка» (Россия) [40]

Характеристика материала	Тип ДУКМ торговой марки ДИСКОМ						
	Cu-Al-C-O		Cu-Ti-C-O				Cu-Al-Ti-C-O
	C16.101	C16.106	C16.201	C16.202	C16.204	C16.205	C16.404
Плотность, г/см ³	8,70	8,57	8,69	8,55	8,67	8,55	8,65
Твердость <i>HB</i> 5/750/30	185	140	159	147	218	228	193
Электропроводность, % IACS	50,0	85,0	73,0	79,0	56,0	55,0	65,0
Теплопроводность, Вт/м·К	185	-	302	305	265	230	271
Предел прочности при сжатии, МПа	1010	1410	1170	1040	1060	1070	955
Относительная осадка до разрушения, %	36,0	59,0	45,0	42,0	27,5	26,5	30,0
Предел прочности при растяжении:							
при 20 °С	717	492	490	510	740	785	700
при 500 °С	154	-	118	128	199	233	220
Относительное удлинение, %:							
при 20 °С	8,7	15,0	17,0	10,2	8,7	6,5	10,9
при 500 °С	5,2	-	3,2	6,5	5,1	4,0	7,3
Температура рекристаллизации, °С	930	870	930	880	960	970	940

При выборе состава для контактов также учитываются специфические требования, обусловленные условиями работы контакт-деталей. В частности, для отключения больших токов в вакууме необходимо, чтобы материал дугогасительных контактов содержал минимальное количество газообразующих примесей, в частности, кислорода, азота и водорода (см. табл. 3), при этом, изменяя состав КМ, можно контролировать эмиссионные свойства контактов с целью обеспечения срез тока вблизи нулевого значения (рис. 3).

К недостаткам КМ этого класса следует отнести то, что с увеличением содержания тугоплавкого компонента ухудшается возможность механической обработки, а с увеличением легкоплавкого компонента возрастает тенденция к свариванию при токах короткого замыкания. Кроме того, необходимо учитывать среды, в которых происходит дугогашение. Так, при работе контактов Ag-W в кислородсодержащих средах на их поверхности образуются вольфраматы серебра (Ag₂WO₄), что увеличивает переходное сопротивление [33]. В работе [34] показано, что в присутствии слабых электромагнитных полей, возникающих, например, при размыкании дугогасительных Ag-W контактов, наблюдается формирование так называемых конусов Тейлора на поверхности вольфрама, которые увеличивают вероятность пробоя после

повторного зажигания дуги. Предполагается, что поверхностное натяжение жидкого вольфрама в среде, содержащей кислород, может иметь значение на несколько порядков ниже, чем вольфрама в вакууме, поскольку подобные эксперименты с другими металлами (Ta, Mo, Nb, Cu) на воздухе и вольфрама в вакууме не выявили наличие конусов Тейлора. КМ Ag-Mo характеризуются более стабильным контактным сопротивлением на воздухе по сравнению с КМ Ag-W, благодаря тому, что оксиды молибдена менее стабильны и в процессе коммутации тока имеет место эффект самоочищения поверхности рабочего слоя.

В сварочной технике порошковые КМ на основе меди составляют особую группу материалов, часто используемых при стыковой сварке вставок литевых форм оплавлением и сопротивлением, при точечной сварке черных металлов и нержавеющей стали, рельефной сварке литевых форм и др. В общем случае сварочные электроды должны иметь высокую тепло- и электропроводность, высокие жаропрочность, твердость и температуру рекристаллизации, а также малую склонность к массопереносу через контакт электрод – деталь. Часто этим требованиям удовлетворяют гартуванная медь или ее сплавы с присадками Cr, Cd, Ni, Be, Si и др. (бронзы) [35, 36]. Однако при сваривании малодеформируемых металлов с малой

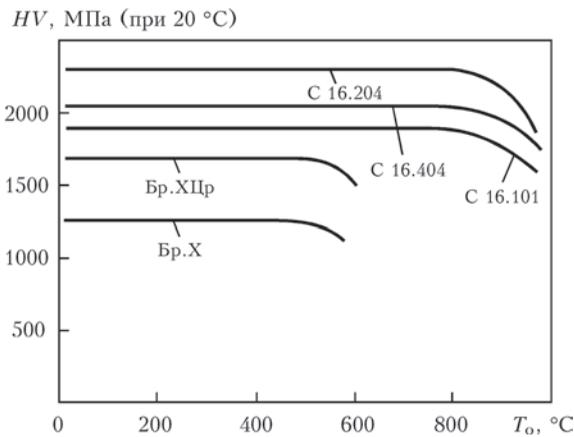


Рис. 4. Изменение твердости различных материалов на основе меди в зависимости от температуры отжига [40]

проводимостью, различной толщины, разнородных или толстостенных материалов и др., возникает необходимость в электродах с повышенной твердостью, прочностью и жаростойкостью в сочетании с относительно низкой электропроводностью ($\leq 75\%$ от меди). В подобных условиях часто используют комбинированные электроды, состоящие из электрода-вставки из тугоплавкого металла (W, Mo) или КМ на его основе, помещенного в медную основу с системой охлаждения. Такая конструкция обеспечивает существенно больший срок службы по сравнению со сплошными медными электродами. Для сварочных электродов используют КМ W(WC)–Cu с содержанием тугоплавкой составляющей 55 мас % и выше (табл. 4). КМ данного типа применяют также в качестве электродов для электроэрозионной обработки и иногда называют общим термином «элконайт» («эльконайт», «элконит») [37, 38]. Варьируя состав, можно существенно повышать прочность КМ, сохраняя высокий уровень электропроводности (табл. 4).

Относительно новым классом для электродов контактной сварки являются дисперсно-упрочненные материалы на основе порошковой меди с диспергированными в ней частицами тугоплавких фаз — оксидов и карбидов (Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , SiO_2 , SiC и др.) [39–41]. Использование метода высокоэнергетического размолва порошков с механическим легированием меди оксидами позволило получить КМ с высоким уровнем прочностных характеристик и температурой рекристаллизации, близкой к температуре плавления меди (табл. 5). Термическая стабильность и дисперсность оксидов обеспечивает большую жаростойкость ДУКМ по сравнению с хромистыми и хромоциркониевыми бронзами (рис. 4).

Выводы

Порошковые композиционные материалы металломатричного типа на основе меди с тугоплавким

наполнителем относятся к классу псевдосплавов и могут эффективно работать в условиях высоких температур, механического и электроэрозионного износа и воздействия различных сред. Благодаря уникальности своих свойств эти материалы используются для производства дугогасительных контактов высоковольтными выключателями и для изготовления сварочных электродов для контактной сварки.

Основные технологические схемы производства, использующие методы порошковой металлургии, включают предварительное смешивание порошков исходных компонентов промежуточного или конечного состава с последующим спеканием при температурах ниже или выше температуры плавления легкоплавкой составляющей. Производство нанодисперсных КМ данного класса сопряжено с определенными сложностями, вызванными необходимостью защиты от окисления порошков, получения равномерного распределения компонентов в смеси, сохранения дисперсности структуры и достижения максимально возможной плотности.

Относительно новым классом для электродов контактной сварки являются дисперсно-упрочненные материалы на основе порошковой меди с диспергированными в ней оксидами и карбидами (Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , SiO_2 , SiC и др.), с повышенным уровнем прочности и жаростойкости.

1. *Композиционные материалы*. Кн. в 8 т. / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока Т. 3. Применение композиционных материалов в технике. – М.: Машиностроение, 1978. – 511 с.
2. *Тучинский Л.И.* Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
3. *Композиционные материалы*. Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
4. *Спеченные материалы для электротехники и электроники*. Справочник / Г.Г. Гнесин, В.А. Дубок, Г.Н. Братерская и др. – М.: Металлургия, 1981. – 344 с.
5. *Евдокунин Г.А., Тилер Г.* Современная вакуумная коммутационная техника среднего напряжения. – СПб: Изд-во Сизова М.П., 2000. – 114 с.
6. *Вакуумная коммутационная техника и компоненты для сетей среднего напряжения*. Siemens. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: https://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollectionDocuments/en/mv/indoor-devices/vacuum-switching-technology-and-components_ru.pdf.
7. *Slade P.G.* Electric Contacts for Power Interruption. A Review. Proc. 19 Int. Conf. on Electric Contact Phenom. Nuremberg (Germany) 1998. – P. 239–245
8. *Contact Materials for Electrical Engineering*. Electrical Contacts Wiki. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php/Contact_Materials_for_Electrical_Engineering.
9. *On the application of W/Cu materials in the fields of power engineering and plasma technology* / Т. Bregel, W. Krauss-Vogt, R. Michal, K.E. Saeger // IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol. – 1991. – V.14. – P. 8–13.
10. *Намиткоков К.К.* Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
11. *Вторичная структура в рабочем слое электрических контактов из композиционных материалов и их функциональные свойства* / Р.В. Минакова, Е.В. Хоменко, Г.Е. Копылова и др. // Электрические контакты и электроды. – Киев: ИПМ НАН Украины, 2012. – С. 38–47.



12. *Лившиц Б.Г.* Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 295 с.
13. *Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысльский И.Д.* Порошковая технология: материалы, технология, свойства, области применения. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1985. – 624 с.
14. *Захаров А.М.* Диаграммы состояния двойных и тройных систем. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
15. *Plansee Group.* Сферы компетенции. Технологии: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plansee.com/en/About-us-Expertise-Technology-118.htm>.
16. *Hula R. Ch., Edmaier Ch.* Silver Coated Tungsten Carbide Powders for Composite Electrical Contact Application / Powder Metallurgy Progress. – 2000. – 9, № 1. – P. 34–41. Режим доступа: http://www.imr.saske.sk/pmp/issue/1-2009/PMP_Vol09_No1_p034-041.pdf.
17. *P. Slade.* The vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application. CRC Press and Taylor and Francis, ISBN 0849390915. – 2007. – 528 p.
18. *Найдич Ю.В.* Контактные явления в металлических расплавах. – Киев: Наук. думка, 1972. – 196 с.
19. *Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д.* Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура и свойства. – М.: МГИУ, 1999 – 206 с.
20. *Смага Н.Н., Юдин Б.А., Марков Е.В.* Метод изготовления и результаты испытаний мелкодисперсных металло-керамических композиций для контактов электрических аппаратов // Электротехнические металлокерамические изделия. – М.: ВНИИЭМ, 1965. – С. 61–68.
21. *Корниенко В.П., Юдин Б.А., Колесников В.Н.* Мелкозернистые композиционные контакты для низковольтной аппаратуры // Электрические контакты и электроды. – Киев: Наук. думка, 1977. – С. 70–79.
22. *The influence of composition and Cr-particle size of Cu/Cr Contacts on Chopping Current, Contact resistance and Breakdown Voltage in Vacuum Interrupters / W.F. Rieder, M. Schussek, W. Glatzle, E. Kny // IEEE Trans. Components Hybrids and Manufact. Tech. – 1989. – 12, № 2. – P. 273–283.*
23. *Solid State impact sintering in vacuum of composites based on copper and silver / A. Laptiev, O. Tolochyn, O. Khomenko, L. Kryachko. // Proc. 27th Conference on Electrical Contacts, June 22–26, 2014, Dresden, Germany. – P. 457–462.*
24. *Tungsten and Molybden Based Materials. Powered by Doduco: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php/Tungsten_and_Molybdenum_Based_Materials*
25. *Plansee Group [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plansee.com/ru/Products-Electrical-contacts-Tungsten-copper-WCu-58.htm>.*
26. *Plansee Group [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plansee.com/ru/Products-Electrical-contacts-Copper-chromium-CuCr-59.htm>*
27. *Найдич Ю.В., Лавриненко И.А., Евдокимов В.А.* Исследование процесса уплотнения при жидкофазном спекании под давлением в системе вольфрам–медь // Порошковая металлургия. – 1974. – № 1. – С. 34–39.
28. *Паничкина В.В., Сиротюк М.М., Скороход В.В.* Жидкофазное спекание высокодисперсных смесей вольфрам–медь // Там же. – 1982. – № 6. – С. 27–31.
29. *WC/Ag contact materials with improved homogeneity / R. Grill, P. Klausler, F. E.-H. Mueller et al. // Proc. 16 th Inter. Plansee Seminar. Reutte. – 2005. – P. 200–211.*
30. *Amirjan M., Zangeneh-Madar K., Parvin N.* Evaluation of microstructure and contiguity of W/Cu composites prepared by coated tungsten powders // Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. – V. 27. – P. 729–733.
31. *Пам. № US6375708 B1.* Alloy for electrical contacts and electrodes and method of making / L.P. Dorfman, M.J. Scheithauer, M. Paliwal, D.L. Houck, J.R. Spencer.; Оpubл. 23.04.2002.
32. *Пам. US 7172725 B2.* W-Cu alloy having homogeneous micro-structure and manufacturing method thereof / Moon-Hee Hong, Ja-Ho Choi, Seoung Lee, Eun-Pyo Kim, Sung-Ho Lee, Joon-Woong Noh; Оpubл. 6.02.2007.
33. *Wingert P.S.* The effect of Ni on the Switching Performance of AgW Based on Contacts // Proc. 39 th IEEE Holm. Cong. – 1993. – P. 111–115.
34. *Batrkov A.V., Popov S.A., Proskurovsky D.I.* Electrodynamic Phenomena in Exploding Tungsten Electrical Contacts // Proc. 42 th IEEE Holm. conference. – 1996. – P. 129–136.
35. *Гуляев А.И.* Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1985. – 254 с.
36. *Технология и оборудование контактной сварки / Под общ. ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.*
37. *Toshiba materials Co Ltd. Elconite. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.toshiba-tmat.co.jp/eng/list/ta_elc.htm.*
38. *Contacts Metals Welding. Typical properties of elkonite materials. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.tjsnow.com/supplies/cm/w/w49f.pdf>.*
39. *Pressing of partially oxide-dispersion-strengthened copper using the ECAP process / M. Kos, J. Ferrec, M. Bruncko et al. // Material and Technology. – 2014. – 48, issue 3. – P. 370–384.*
40. *Диском-сварка. Наноструктурные материалы и изделия из них. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [<http://discom-svarka.ru/dukml/>].*
41. *Аношин В.А., Илюшенко В.М., Минакова Р.В.* Жаропрочные материалы на основе меди. Способы получения. Свойства. Применение // Сб. научн. тр. ИПМ НАН Украины. – 2010 г. – С. 212–218.

Поступила в редакцию 27.04.2015

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84

E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 01.10.2015. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22 + 1 цв. вклейка. Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.