

УДК 621.762+621.923.74-408

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ

Оглезнева С.А., Оглезнев Н.Д.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29), osa@pm.pstu.ac.ru

Исследованы физико-механические и электротехнические свойства спеченных материалов на основе порошков меди различных марок и дисперсности, применяемых для изготовления электродов-инструментов при электроэрозионной обработке. Разработана технология спекания нанодисперсного порошка меди без приложения давления, включающая пониженные давления прессования, восстановительный отжиг прессовки. Показано, что при спекании нанодисперсных порошков меди формируется практически беспористая мелкозернистая структура, которая обеспечивает высокие прочностные и электрофизические свойства, а также существенно более высокую износостойкость при электроэрозионной обработке. Исследованы свойства композиционных электродов-инструментов на основе порошков меди с добавлением порошков молибдена, карбида вольфрама, карбида титана. Карбид титана обеспечил износостойкость электрода лучше, чем карбид вольфрама. Наименьший износ был у электрода на основе нанодисперсного порошка меди с добавлением молибдена.

Ключевые слова: электрод-инструмент, электроэрозионная прошивка, износ, порошковая металлургия, композиционный материал, спекание.

MATERIAL DEVELOPMENT TOOL ELECTRODE FOR ELECTRICAL DISCHARGE TUFTING

Oglezneva S.A., Ogleznev N.D.

Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, 614990, Komsomolsky Av. 29, osa@pm.pstu.ac.ru

The physical-mechanical and electrical properties of sintered materials based on copper powders of various grades and dispersion used for tool electrode for electrical discharge tufting. Developed the technology of sintering copper nanopowder without pressure, including reduced compaction pressure recovery annealing compact. It is shown that during sintering of copper nanosized powders formed almost non-porous fine-grained structure that provides high strength and electrical properties, and a substantially higher wear resistance electrical discharged tufting. The properties of the composite electrode-based tools with the addition of copper powder of molybdenum powders, tungsten carbide, titanium carbide. Titanium carbide electrode has better wear resistance than tungsten carbide. Low wear of the electrode was in a powder based on nanosized adding molybdenum.

Keywords: electrode-tool, electrical discharge tufting, wear, powder metallurgy, composite material, sintering.

Введение

Обработка металлов и других токопроводящих материалов электроэрозионным методом (ЭЭО) заключается в том, что под действием импульсов тока происходит расплавление и испарение обрабатываемого металла, под действием гидродинамических сил рабочей жидкости частицы металла выбрасываются из зоны разрядов. Основными преимуществами ЭЭО перед механической обработкой являются возможность обработки электропроводных материалов вне зависимости от их твердости, возможность сложного формообразования и высокая точность обработки любых, даже сверхтвердых материалов [3].

Рабочая часть электрода-инструмента (ЭИ) представляет собой негативную копию обрабатываемой поверхности с учетом необходимых технологических припусков.

Неизбежным результатом действия импульса тока является расплавление не только обрабатываемого материала, но и материала электрода, поэтому к нему предъявляются особые требования, как и к подобным функциональным электротехническим материалам, включающие механическую прочность, электропроводность в интервале температур от комнатной до температуры плавления материала электрода, эрозионную стойкость, электрическую прочность [6].

Основными материалами для изготовления ЭИ являются графит, медь и ее сплавы (латунь, дюралюмин), а также композиционные материалы на основе меди с добавлением хрома, молибдена, нитрида бора, карбида вольфрама. При использовании ЭИ из графитовых материалов на черновых режимах повышение скорости съема материала детали достигается применением графитовых ЭИ с большими размерами зерен, пор и большой пористостью. Процесс съема материала активизируется благодаря увеличению количества испаряющейся из пор ЭИ рабочей жидкости. Электродные материалы на основе меди составляют основную часть применяемых металлических материалов. Наиболее часто используется электролитическая медь М1 и М2, имеющая высокую электро- и теплопроводность. Износ медных компактных ЭИ с увеличением расхода жидкости в межэлектродном промежутке увеличивается (в отличие от пористых медных и графитовых). Применение ЭИ из меди МП-15 с пористой структурой (15% пор) позволяет при обработке импульсами прямоугольной формы до 1,5 раз по сравнению с ЭИ из меди М1 повысить скорость съема материала детали, стойкость ЭИ также возрастает. Латунь ЛС-59-1 имеет ограниченное применение при ЭЭО закрытых полостей вследствие ее пониженной до 1,5-3 раз эрозионной стойкости по сравнению с медью [3].

В настоящее время разработаны композиционные материалы на основе меди с дисперсными добавками окислов, боридов, нитридов и бора, позволяющие улучшить эксплуатационные свойства ЭИ. Для изготовления ЭИ из этих материалов применяют методы порошковой металлургии, благодаря чему существенно повышается экономическая эффективность обработки деталей из твердых, жаропрочных и титановых сплавов, а также из термически обработанных сталей [3; 6; 7]. Лучший из новых композиционных материалов - МБХ-3 обладает повышенной стойкостью и дает возможность увеличить скорость съема материала детали до 2-3 раз. Для ЭЭО деталей из твердых сплавов применяются также ЭИ из композиции МНБ-3. Электроды-инструменты, выполненные из композиции медь-вольфрам, используются для обработки деталей повышенной точности из твердых сплавов, тугоплавких металлов и сплавов.

Наиболее предпочтительными для удовлетворения требований к ЭИ являются композиционные материалы типа псевдосплавов. Псевдосплав относится к системе «несмешивающихся компонентов», т.е. к системе, в которой проявляется тенденция к

расслоению уже в жидком состоянии и фактически отсутствует растворимость в твердом [1]. Микроструктура контактных псевдосплавов представляет собой тонкую равномерную смесь двух (или более) фаз, из которых одна обладает значительно большей тугоплавкостью, чем другая (например, вольфрам-серебро, хром-медь). При переходе в такой гетерогенной структуре одной из фаз в жидкое состояние она силами поверхностного натяжения удерживается в порах тугоплавкой фазы, образующей капилляры. При выборе компонентов псевдосплавов должны соблюдаться следующие основные условия: одна из фаз должна иметь высокую электропроводность, так как она несет токовую нагрузку; вторая фаза должна быть механически прочной и значительно более тугоплавкой, чем первая, ее электропроводность играет второстепенную роль; тугоплавкая и легкоплавкая фазы практически не должны взаимодействовать (сплавляться) между собой в интервале рабочих температур; легкоплавкая фаза должна смачивать тугоплавкую фазу [1]. Электроконтактный материал на основе псевдосплавов системы Cu-Cr был разработан еще в 80-е годы и показал ряд преимуществ по сравнению с известными, в частности при работе в вакууме [9]. Медь обеспечивает высокую электропроводность материала, а хром в качестве тугоплавкой составляющей - необходимую для электроконтактного материала твердость. Растворимость компонентов друг в друге составляет сотые доли процента, что сохраняет дисперсность структуры материала и, следовательно, его однородность по свойствам.

Для получения материалов с высокой плотностью методами порошковой металлургии к размерам и форме частиц порошков предъявляется ряд требований, так как от них в значительной степени зависят насыпная плотность укладки частиц, усадка при спекании и механические свойства готовых изделий. Использование нанодисперсных порошков позволяет создавать спеченные материалы с качественно и количественно новыми эксплуатационными свойствами [2]. Однако высокая удельная поверхность дисперсных порошков является причиной повышенного содержания примесей, которые загрязняют материал и ухудшают его свойства. Все эти проблемы технически преодолимы при разработке специального технологического процесса, но в настоящее время промышленные порошковые изделия, как правило, изготавливаются из электролитического порошка, частицы которого имеют дендритную форму и средний размер порядка 100 мкм.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния дисперсности медного порошка на физико-механические и эксплуатационные свойства материалов для ЭЭО.

Материалы и методы исследования

Для экспериментов использовали электролитический порошок меди марки ПМС-1, полученный в соответствии с ГОСТ 4960-75 на ОАО «Уралэлектромедь», п. В. Пышма Свердловской обл., распыленный 21GSG 100/2, полученный по ТУ 48-1318-02-89 на ООО

«УЭМ-ЭККА», п. В. Пышма Свердловской обл., и ультрадисперсный медный порошок ПМВД-0, полученный методом газофазной конденсации по ТУ 1790 – 040 – 12288779 – 2005 на заводе Научно-производственного предприятия «Высокодисперсные металлические порошки» (ВМП), г. Екатеринбург, таблица 1.

Таблица 1 - Характеристики порошков меди

	Гранулометрический состав, мкм	Содержание кислорода, %	Хим. состав	Насыпная плотность, г/см ³
Электролитический ПМС-1	< 100 99.5% <71 90% <45 65-80%	Не более 0,2%	Cu>99.5 Fe<0.18 Sb<0.005 Pb<0.05	1,25-1,9
Распыленный 21GSG 100/2	>200 следы >160 < 0.4% >100 остальное >40 42-53%	Не более 0,01%	Cu>99.35 Mg<0.2 Sn<0.1 Pb<0.1	2,72-2,88
Газофазно осажденный ПМВД-0	Менее 0,150	Более 5%	Cu>99.96	0,1

При изготовлении спеченных медных образцов применялись стандартные технологические приемы порошковой металлургии. Образцы, приготовленные из порошков ПМС – 1 и 21GSG 100/2, прессовали при давлении 400 МПа и спекали в атмосфере водорода при 1100 °С в течение 2 часов. Нанопорошки ПМВД-0 прессовали в стальных пресс-формах при давлении 50-300 МПа, прессовки предварительно восстанавливали в атмосфере осушенного водорода при температуре 380 °С и затем спекали при температуре 1050 °С в течение 2 часов. Композиционные материалы готовили смешиванием медных порошков с порошками карбида титана углетермического ТУ 6-09-492-75 (18,5 мас. %), молибдена МП4 ТУ 48-19-105-73 (25 мас. %), карбида вольфрама (ВК-8) ТУ 25395-90 (23 мас. %), прессованием при давлении 400 МПа и спеканием при 1100 °С в течение 2 часов в водороде.

Плотность всех полученных прессовок до и после спекания определяли геометрическим методом, пористость рассчитывали по ГОСТ 18898-89. После спекания проводили растяжение плоских образцов на разрывной машине модели FP 10/1 (ГОСТ 18227-85) с записью диаграммы «нагрузка-удлинение» со скоростью нагружения 2 мм/мин, твердость измеряли по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59), ударную вязкость испытывали при комнатной температуре на маятниковом копре БКМ-5 на образцах без надреза размером 6×6 ×50 мм (ГОСТ 9454-78). Электропроводность измеряли на цифровом программируемом миллиомметре GOM-802.

Структуру частиц, микроструктуру и зеренную структуру спеченных образцов изучали на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21 при увеличении до 2000 крат. Микроструктуру исследования на шлифах, травленных химическим реактивом HNO_3 : NH_4OH в соотношении 3 : 1.

Испытания эксплуатационных свойств электродов проводили при электроэрозионной прошивке стали 40X на станке Electronica Smart CNC.

Результаты исследования и их обсуждение

Методом РФЭС установлено, что в порошке ПМВД-0 кислород содержится в виде оксида CuO толщиной $5\div 6$ нм на поверхности частиц [8]. При спекании образцов ПМВД-0 в водороде в интервале температур $230\text{--}330$ °C наблюдалось интенсивное выделение водяного пара, образовавшегося при восстановлении оксидов на поверхности медных частиц. Восстановление оксидов, с одной стороны, способствовало активации спекания благодаря образованию чистых (ювенильных) металлических зон контакта между порошинками. Однако выделение газов из прессовки может приводить к разрушению металлического каркаса и образованию крупных пор в металле. Для корректировки режима спекания нанопорошка меди был введен предварительный отжиг прессовок с медленным нагревом, который преследовал цели улучшения металлического контакта при спекании и уменьшения давления воды в порах прессовки. Давление прессования по сравнению с электролитическим и распыленным порошками было снижено, чтобы обеспечить необходимый объем пор для испарения воды при восстановлении поверхностных оксидов. Кроме того, меньшее давление прессования создает меньшие внутренние напряжения в прессовке. Медленное восстановление при низких температурах и короткой временной выдержке в процессе предварительного отжига привело к формированию металлического контакта и усадке порошковых прессовок (табл. 2). Пористость после отжига снизилась на 20-30% для всех образцов, вне зависимости от давления прессования (объемы пор после отжига составили 30-38%). При последующем спекании предварительно восстановленных прессовок в более пористых образцах, условия восстановления в которых были более благоприятными, сформировалась практически беспористая структура, объем пор которой составил только 3-7%. Измерения твердости показали, что она выше у более плотных образцов (табл. 2), полученных при более низких давлениях прессования. Высокая плотность спеченных материалов на основе ПМВД-0, отсутствие примесей и низкое удельное сопротивление делают их пригодными для использования в качестве электропроводящих материалов. Сравнение свойств спеченных материалов из трех порошков меди показаны в таблице 3: оба медных порошка с микроразмерными частицами обладают хорошей прессуемостью (пористость прессовки 21%), однако активация спекания недостаточна (остаточная

пористость после спекания 20-13%); так как содержание примесей в электролитическом порошке (по сравнению с распыленным) было меньше, качество срачивания частиц лучше и размер зерна был в 2 раза меньше, то прочностные свойства, несмотря на более высокую пористость, были выше, а удельное электросопротивление – меньше.

Таблица 2 – Свойства спеченных из ПМВД-0 медных образцов в зависимости от давления прессования

№	Давление прессования, МПа	НВ	Усадка, %	Пористость, %	Удельное электросопротивление, Ом*мм ² /м
1	50	377	60	3	0,018
2	100	436	54	7	0,019
3	150	415	55	6	-
4	200	415	44	19	0,020
5	300	341	42	17	-

Таблица 3 – Свойства спеченных материалов из медных порошков

Параметр	ПМС-1	21GSG 100/2	ПМВД-0
Давление прессования, МПа	400	400	50
Пористость прессовки, %	21	21	58
Пористость спеченных образцов, %	20	13	3
Усадка, об. %	1	8	60
Микротвердость, МПа	670	600	610
Средний размер зерна, мкм	22	50	2,3
Ударная вязкость, кДж/м ²	260	200	-
Предел прочности при растяжении, МПа	100	150	-
Относительное удлинение, %	6,7	10,0	-
Удельное электросопротивление, Ом*мм ² /м	0,021	0,030	0,018
Твердость НВ, МПа	420	580	377

Таким образом, свойства материалов из микродисперсных порошков оказались примерно одинаковы. Спеченный материал из нанодисперсного порошка меди отличался практически нулевой пористостью, на порядок более мелким зерном и, благодаря удалению примесей при отжиге, значением удельного электросопротивления на уровне справочных значений для литой меди.

Физико-механические и эксплуатационные свойства электродов на основе порошков меди показаны в таблице 4. Тугоплавкая фаза была выбрана из следующих соображений: она должна обладать значительно более высокой твердостью и электропроводностью, а, кроме того, учитывая высокое содержание кислорода в порошках меди, тугоплавкая фаза не

должна окисляться или ее окислы должны легко восстанавливаться. Исходя из этих рассуждений вместо традиционно применяемого порошка хрома с высоким сродством к кислороду использовали порошок молибдена (восстановление триоксида молибдена до молибдена в присутствии водорода происходит примерно с 300 °С) [4]; карбид титана обладает более высокой твердостью и меньшим электросопротивлением при высоких температурах, чем традиционно применяемый карбид вольфрама [5]. Анализ характеристик композиционных материалов на основе меди показал, что в материалах с карбидами остаточная пористость была выше (23-24%), чем в материалах с молибденом, поэтому значения удельного электросопротивления оказались во много раз выше, чем у чистой меди; оба этих фактора обусловили более интенсивный износ электродов по сравнению с материалом на основе нанодисперсной меди с добавлением молибдена.

Таблица 4 - Эксплуатационные свойства электродов на основе меди

Порошок основы	добавка	П, %	ρ , Ом·мм·10 ⁻³	Износ, %
ПМС-1	-	15	0,021	3
ПМС-1	WC	24	0,683	3
ПМС-1	Mo	17	0,558	2
ПМС-1	TiC	23	0,624	2
ПМВД-0	-	3	0,018	2
ПМВД-0	Mo	4	0,258	1

Выводы

1. Спеченный нанодисперсный порошок меди имеет высокие прочностные и электротехнические свойства благодаря высокой плотности и мелкозернистой структуре, однако для получения высокого качества изделий необходимо создать условия для восстановления поверхности частиц порошка.
2. Электроды-инструменты для электроэрозионной прошивки, изготовленные из нанодисперсного порошка меди, благодаря высокой плотности и чистоте по примесям, обладают более высокой износостойкостью по сравнению с материалом из электролитического порошка. Добавление порошка молибдена уменьшает износ электрода в 2 раза.

Список литературы

1. Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства. – М. : МГИУ, 1999. - 206 с.
2. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. - М. : Academia, 2005. - 192 с.

3. Елисеев Ю.С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. – М. : Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. - 437 с.
4. Ивенсен В.А. Феноменология спекания и некоторые вопросы теории. - М. : Металлургия, 1985. - 247 с.
5. Косолапова Т.Я. Карбиды. - М. : Металлургия, 1968. - 300 с.
6. Металлические порошки и порошковые материалы : справочник / Б.Н. Бабиц, Е.В. Вершинина, В.А. Глебов и др.; под ред. Ю.В. Левинского. – М. : ЭКОМЕТ, 2005. - 520 с.
7. Порошковая металлургия: материалы, технология, свойства, области применения : справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, Н.Д. Радомысльский и др. – Киев : Наукова думка, 1985. - 550 с.
8. Фетисов А.В., Кузнецов М.В. Анализ электронных состояний оксидного слоя на поверхности ультрадисперсной меди методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Журнал прикладной спектроскопии. - 2009. - Т. 76. - № 4. - С. 552-556.
9. Horst Kippenberg, Wilfried Kuhl, Wolfgang Schlenk. Kontakt material fur Vakuumschalter, Siemens Energie & Automation. - 1985. - V. 7. - P. 18-21.

Рецензенты:

Ханов А.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Материалы, технологии и конструирование машин» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Порозова С.Е., д.т.н., профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.