

С.А. Оглезнева, О.В. Доливец
S.A. Oglezneva, O.V. Dolivets

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
И СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ
ИЗ ПСЕВДОСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ**

**INVESTIGATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES
OF TOOL ELECTRODE FROM COPPER-BASED
PSEUDOALLOYS**

Рассмотрены свойства электрода-инструмента и параметры режимов ЭЭО. Изучено взаимодействие меди с тугоплавкими металлами. Рассмотрен процесс получения композиционного материала на основе системы медь – тугоплавкий металл. Исследовано влияние содержания тугоплавкого металла в системах медь – хром, медь – вольфрам, медь – молибден на прочность, твердость, пористость, электросопротивление композиционного материала. Исследованы эксплуатационные характеристики электродов-инструментов на различных режимах электроэрозионной прошивки.

The properties of the electrode-tools and mode settings of electrical discharge machining. The interaction of copper with refractory metals is investigate. The process of production the composite materials based on copper – refractory metal. The influence of the content of the refractory metal systems copper – chromium, copper – tungsten, copper – molybdenum the strength, hardness, porosity, electrical resistivity of the composite material. Investigated the performance of the tool-electrode spark on various modes of firmware.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, тугоплавкий металл, прессование, спекание, плотность, пористость, твердость, электросопротивление, прочность, относительный износ.

Keywords: electrical discharge machining, tool electrode, refractory metals, pressing, sintering, density, porosity, hardness, electrical resistance, strength, relative wear.

Электроэрозионная обработка металлов и других токопроводящих материалов с помощью электроэрозионной обработки (ЭЭО) заключается в том, что под действием импульсов тока происходит расплавление и испарение обрабатываемого металла, под действием гидродинамических сил рабочей жид-

кости 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 [1, 2].

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, касающиеся механической прочности, электропроводности в интервале температур от комнатной до температуры плавления материала электрода, эрозионной стойкости, электрической прочности [3].

Все материалы, которые применяются для изготовления ЭИ, можно расположить в ряд в порядке уменьшения эрозионной стойкости. На первом месте будут находиться материалы на основе углерода, далее по мере уменьшения стойкости расположатся медь и материалы на основе меди, а затем серый чугун и алюминиевые сплавы [4]. Electroды-инструменты из меди и композиционных материалов на основе меди с добавлением вольфрама и могут быть использованы практически на всех режимах ЭЭО, обеспечивая высокую производительность.

Цель работы – разработка материалов электродов-инструментов системы медь – тугоплавкий металл с улучшенными эксплуатационными характеристиками для электроэрозионной обработки.

Медь является отличным проводником тепла и электрического тока. Электропроводность меди в 1,7 раза выше, чем у алюминия, и в 6 раз выше, чем у железа [5]. Хром жаростоек, он начинает окисляться при более высоких температурах (500–600 °С) с образованием защитной окисной пленки, которая не разрушается до 1200 °С. Самое важное свойства хрома – его высокая износостойкость при работе на трение. Однако он не стоек к ударным нагрузкам вследствие своей хрупкости. Твердость по Бринеллю 750–760. Теплопроводность при 400 К – 91 Вт/(м·К), электропроводность хрома при 20 °С составляет $1,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м [5].

Диаграмма состояния медь – хром наиболее подробно исследована в области, богатой медью. По данным термодинамического расчета и данным о параметрах взаимодействия компонентов температура плавления хрома 1856 °С. В структуре сплавов присутствуют две фазы: твердые растворы на основе меди (α) и хрома (β). При 1074,8 °С происходит эвтектическое превращение при содержании хрома 1,56 ат. % (1,28 мас. %). Растворимость ме-

ди в хrome в твердом состоянии изменяется от 0,16 ат. % при 1300 °С до 0,085 ат. % при 1150 °С [6]. Смачиваемость хрома водой, маслом и расплавленными металлами очень низкая [7].

Механические свойства молибдена зависят от чистоты металла и предшествующей механической и термической его обработки. Так, твердость по Бринеллю 1500–1600 МН/м², модуль упругости 285–300 ГН/м². Молибден более пластичен, чем вольфрам. Теплопроводность при 400 К – 134 Вт/(м·К), температура плавления 2620 °С, удельное электрическое сопротивление молибдена $5,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м ($5,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·см) [5]. Диаграмма состояния Cu–Mo экспериментально не построена. Согласно обзорам, медь и молибден не смешиваются в жидком и твердом состоянии, а взаимная растворимость компонентов при температуре 900 °С чрезвычайно мала. Диаграмма состояния получена в основном с учетом данных, которые были получены исключительно расчетным методом с использованием термодинамических параметров. В системе имеет место монотектическое и эвтектическое равновесие [8]. Взаимодействие в системе Mo–Cu отсутствует, степень смачивания высокая: при температуре 1623 К $\theta_c = 0^\circ$ [9].

Вольфрам является наиболее тугоплавким металлом (температура плавления 3410 °С), обладает высокой прочностью (50–90 кГ/мм²), твердостью (320–415 кГ/мм) и высоким модулем упругости (40 000 кГ/мм²). Отрицательным качеством вольфрама является его хрупкость при комнатной температуре ($\delta = 0$, $\psi = 0$), и поэтому его обработка возможна только при температуре выше порога хрупкости (температура перехода из пластичного в хрупкое состояние). Температурный порог хрупкости деформированного вольфрама технической чистоты (99,95 %) лежит около 300–400 °С, а рекристаллизованного – около 500 °С. Теплопроводность при 400 К – 159 Вт/(м·К), удельная проводимость вольфрама – $18\,200\,000$ Ом·м, удельное электросопротивление при 20 °С равно $5,5$ Ом·см· 10^{-6} ; при 2700 °С – $90,4$ Ом·см· 10^{-6} [5]. Медь и вольфрам не взаимодействуют ни в твердом, ни в жидком состоянии [8]. Смачиваемость вольфрама медью растет с повышением температуры, и при 1350 °С наблюдается почти полное растекание меди, краевой угол близок к нулю [9, 10].

Методики эксперимента. Для изготовления электродов из композиционных материалов использованы порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60–75), хрома ПХ-1С (ГОСТ 14-1-1474–75), молибдена МПЧ (ТУ 48-19-69–80), вольфрама ПВ-0 (ТУ 48-19-101–84). Порошок меди смешивали с порошками хрома, вольфрама и молибдена в смесителе со смещенной осью вращения в течение 4 ч. Из смесей на прессе П-125 прессовали образцы размером 6×6×50 мм при давлении 600 МПа, затем образцы отжигали в вакуумной печи при температуре 700 °С и проводили повторное прессование при 60 МПа. Прессовки оконча-

тельно спекали в вакуумной печи при температуре 1100 °С в течение 2 ч. Плотность композиционных материалов определяли на образцах размером 6×6×50 мм расчетным методом по стандартной методике (ГОСТ 18898–89). Твердость спеченных образцов измеряли с помощью прессы Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012–59. Использовали индентор диаметром 5 мм, нагрузка 750 кг, выдержка под нагрузкой 30 с. Испытания на прочность при трехточечном изгибе образцов 6×6×50 мм без трещины производили на машине FP 10/1 по ГОСТ 18227–85 со скоростью нагружения 2 мм/мин, расстояние между опорами 40 мм. Электросопротивление измеряли на цифровом программируемом миллиомметре GOM-802 на образцах размером 6×6×50 мм. Рассчитывали удельное электросопротивление проводника R , Ом:

$$R = \rho l / S,$$

где Ом; ρ – удельное электросопротивление, Ом·м; l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения проводника, мм².

Испытания эксплуатационных свойств электродов проводили при электроэрозионной прошивке листа стали X12Ф толщиной 5,5 мм с твердостью 58 HRC на станке Electronica Smart CNC на черновых режимах обработки E81 (длительность импульса 100 мкс, пауза 32 мкс, сила тока 15 А) и E93 (длительность импульса 150 мкс, пауза 32 мкс, сила тока 20 А). Относительный износ электрода определяли по отношению глубины прошитога в стали отверстия к линейному износу электрода [11].

Результаты исследований. Пористость композиционных материалов до спекания составляла 12–26 % (табл. 1), при увеличении добавки тугоплавкого и более твердого, чем медь, металла пористость увеличивалась ввиду уменьшения пластичности смеси порошков. После окончательного спекания пористость уменьшилась. При анализе влияния тугоплавкой фазы можно сделать вывод, что при увеличении объема тугоплавкой фазы у данных образцов увеличивается пористость (рис. 1). На большую величину пористость возросла у образцов с добавлением молибдена, затем – вольфрама и хрома. Данные результаты связаны с отсутствием химического взаимодействия при спекании меди и тугоплавких фаз и сокращением площади металлического контакта. При исследовании образцов на прочность наблюдали, что при увеличении объема тугоплавкой фазы прочность образцов понижается (рис. 2).

Наиболее низкими значениями прочности обладали системы, содержащие молибден и вольфрам, так как они не взаимодействуют с медью. Незначительная растворимость хрома в меди (около 1 %) обеспечивает формирование более прочного межчастичного контакта.

Таблица 1

Пористость композиционных материалов

Система	Содержание тугоплавкой фазы, мас. %	Пористость, %	
		до спекания	после спекания
Cu–Cr	25	12	4
	35	13	8
	50	13	7
Cu–Mo	25	15	11
	35	17	12
	50	20	16
	80	26	24
Cu–W	25	11	15
	35	14	11
	50	14	13
	80	20	22

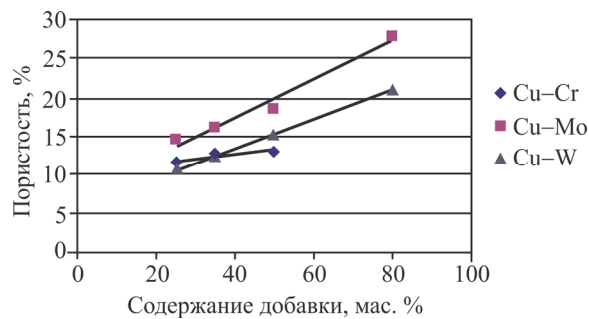


Рис. 1. Пористость композиционных материалов систем медь – хром, медь – вольфрам, медь – молибден в зависимости от содержания тугоплавкой добавки

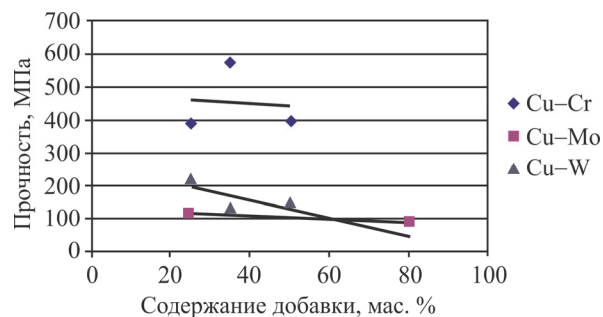


Рис. 2. Прочность на изгиб композиционных материалов систем медь – хром, медь – вольфрам, медь – молибден в зависимости от содержания тугоплавкой добавки

Анализ полученных результатов показал, что при увеличении объема тугоплавкой фазы возрастает твердость образцов (рис. 3). Самой большой твердостью обладают образцы с добавлением хрома, так как образуются (хоть и в незначительных количествах) соединения меди с хромом. По абсолютным значениям твердости композиционных материалов с различными тугоплавкими металлами были тем больше, чем больше твердость тугоплавкого металла. При измерении электросопротивления образцов наблюдали повышение значения электросопротивления при увеличении объема тугоплавкой фазы, обладающей высоким значением электросопротивления по сравнению с медью (рис. 4).

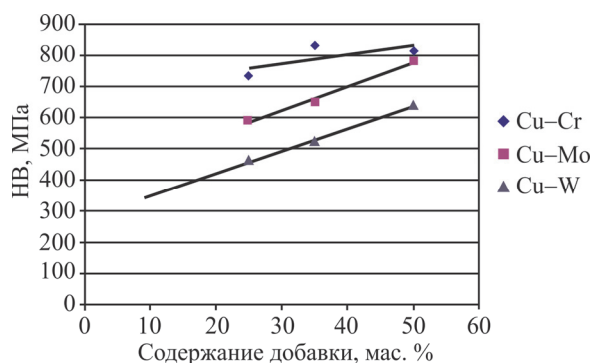


Рис. 3. Твердость композиционных материалов систем медь – хром, медь – вольфрам, медь – молибден в зависимости от содержания тугоплавкой добавки

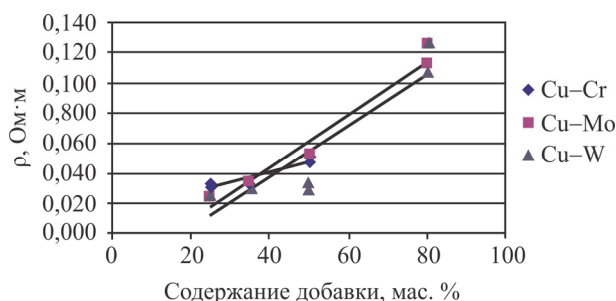


Рис. 4. Удельное электросопротивление композиционных материалов систем медь – хром, медь – вольфрам, медь – молибден в зависимости от содержания тугоплавкой добавки

Влияния вида тугоплавкой добавки на электросопротивление не выявлено, оказало влияние только количество добавки. Результаты исследования физико-механических свойств композиционных материалов после спекания показали, что с увеличением количества добавки увеличивается пористость. Увеличение количества добавок с высоким электросопротивлением и одновременно рост пористости приводит к увеличению удельного электросопр-

тивления композиционного материала. Оба фактора – пористость и электро-сопротивление – оказали влияние на относительный износ электрода: чем больше была пористость П и электросопротивление композиционного материала, тем больше был износ (система медь – молибден, табл. 2, рис. 5, 6).

Таблица 2

Относительный износ электродов

Номер образца	Тугоплавкая фаза	Содержание тугоплавкой фазы, мас. %	П, %	ρ , Ом·м	Относительный износ электрода, %	
					E81	E92
122	Cr	35	3,5	0,033	1,40	3,40
131	Cr	50	6,5	0,046	2,70	3,40
212	Mo	20	9,5	0,024	5,60	4,60
221	Mo	35	12,5	0,034	4,30	6,00
232	Mo	50	13,9	0,048	5,10	8,00
242	Mo	80	24,7	0,112	36,00	–
312	W	25	12,0	0,025	4,50	3,40
322	W	35	10,6	0,029	4,18	4,00
331	W	50	12,5	0,028	4,00	4,00
342	W	80	13,8	0,107	3,60	–
* Медь М1		–	0	0,017 5	5,60	6,90

* Данные для сравнения.

Относительный износ электрода из чистой меди на этих же режимах обработки E81 и E92 составил соответственно 5,6 и 6,9 %. Меньшее значение износа было в системах медь – хром и медь – вольфрам.

Относительный износ систем, содержащих молибден, был самым высоким, возможно ввиду окисления молибдена (оксид молибдена образуется при 600 °С и способен к испарению [12]).

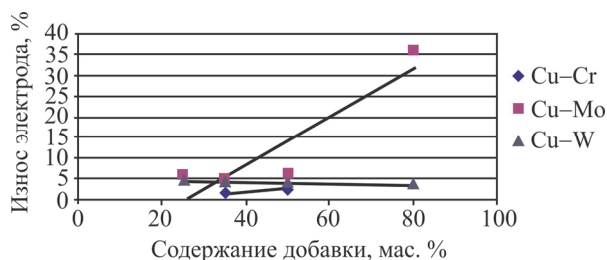


Рис. 5. Износ электрода в зависимости от содержания тугоплавкой фазы в режиме E81

При исследовании относительного износа ЭИ на разных режимах было установлено, что наилучшей износостойкостью обладают электроды системы Cu–Cr, в обоих режимах (E81 и E92) он показал наилучшие эксплуатационные

свойства (относительный износ при одинаковом времени меньше в два раза). В отличие от молибдена, взаимодействие хрома с кислородом протекает сначала довольно активно, затем резко замедляется благодаря образованию на поверхности металла оксидной пленки, которая разрушается при 1200 °С [5].

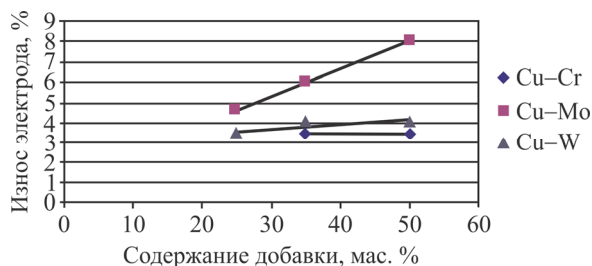


Рис. 6. Износ электрода в зависимости от содержания тугоплавкой фазы в режиме E92

Немного уступил по износостойкости материал медь – вольфрам. Причем в обеих системах (с хромом и вольфрамом) относительный износ незначительно зависел от концентрации тугоплавкой фазы, хотя ожидаемый износ должен был снижаться при увеличении концентрации добавки. Очевидно, повышенная пористость материалов с высокой концентрацией тугоплавкого металла не позволила реализовать преимущества этих систем.

В результате проделанной работы было выявлено, что при увеличении содержания тугоплавкой фазы у образцов увеличилась пористость. Данные результаты связаны с отсутствием химического взаимодействия при спекании меди и тугоплавких фаз и сокращением площади металлического контакта. При исследовании физико-механических свойств образцов установлено понижение прочности на изгиб при увеличении концентрации тугоплавкой фазы и увеличение твердости; увеличение количества добавки с высоким электросопротивлением и одновременно рост пористости приводит к увеличению удельного электросопротивления конструкционных материалов. При исследовании относительного износа ЭИ на разных режимах было установлено, что наилучшей износостойкостью обладает система медь – хром, а система медь – молибден характеризуется низкой износостойкостью.

Список литературы

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие: в 2 т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 208 с.
2. Иванайский А.В., Свириденко Д.С., Рябцева А.В. Применение электроэрозионной обработки при производстве деталей машин // Технология машиностроения. – 2013. – № 2. – С. 18–20.

3. Оглезнева С.А., Оглезнев Н.Д. Разработка материала электрода-инструмента для электроэрозионной прошивки [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/116-12692> (дата обращения: 23.05.2014).

4. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление и применение электродов-инструментов / под ред. А.Л. Лившица и А. Роша / Науч.-исслед. ин-т информации по машиностроению. – М., 1980. – 223 с.

5. Свойства химических элементов // Справочник химика: сайт. – URL: <http://www.chem100.ru/table.php> (дата обращения: 18.04.2014).

6. Двойные и многокомпонентные системы меди / под редакцией С.В. Шухардина: Наука, 1979. – 248 с.

7. Хромирование – Химические и механические свойства хромовых покрытий // Гальвано&техника: сайт. – URL: <http://www.plastograd.ru/articles.php?st=1&ag=60> (дата обращения: 29.05.2014).

8. Карпинос Д.М. Композиционные материалы: справочник / под ред. Г.М. Ледяева, З.П. Чернюк. – М.: Наукова думка, 1985. – 592 с.

9. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2. – 1023 с.

10. Элиот Р.П. Структуры двойных сплавов. Первое дополнение / пер. с англ. А.М. Захарова; под ред. И.И. Новикова, И.П. Рогельберга. – М.: Металлургия, 1970. – 455 с.

11. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

12. Ивенсон В.А. Феноменология спекания и некоторые вопросы теории. – М.: Металлургия, 1985. – 247 с.

Получено 7.10.2014

Оглезнева Светлана Аркадьевна – доктор технических наук, профессор, ПНИПУ, МТФ, e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Доливец Олеся Владимировна – магистрант, ПНИПУ, МТФ, гр. МТН-14м, e-mail: skvidi@mail.ru.