

С.А. Оглезнева, О.П. Морозов
S.A. Oglezneva, O.P. Morozov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

**РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ
ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ
СИСТЕМЫ МЕДЬ – КЕРАМИКА**

**DEVELOPING OF MATERIALS FOR TOOL ELECTRODE
SYSTEM "COPPER-CERAMIC" FOR ELECTRICAL
DISCHARGE MASHINING**

Рассмотрена сущность процесса электроэрозионной обработки и основные требования, предъявляемые к электродам-инструментам. Описаны композиционные материалы для изготовления электродов-инструментов, области их применения и способ изготовления. Приведены физические свойства тугоплавких фаз, используемых для изготовления электродов-инструментов. Изложены методики эксперимента и исследований. Показано влияние состава композиционного материала на пористость, твердость, прочность, электросопротивление, износостойкость электрода-инструмента.

The essence of the process of electrical discharge machining, and basic requirements to the tool electrode. Composite materials are presented for manufacturing an electrode-tool, their uses and production methods. Describes the physical properties of refractory phases used for the manufacture of electrode tools. Sets out methods of experiment and research. Studied the effect of composition on the porosity of the composite material, the hardness strength, electrical resistance, wear resistance electrode tool.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, композиционный материал, медь, соединения титана, прочность, электросопротивление, износостойкость.

Keywords: electrical discharge machining, the tool-electrode, composite material, copper, titanium compound, strength, electrical resistance, wear resistance.

При выборе материала электрода принимают во внимание его эрозионную стойкость, удельную проводимость, возможность изготовления инструмента требуемой формы с минимальными затратами, стоимость, прочность,

коррозионную стойкость, отсутствие вредных выделений при разряде [1]. Наиболее предпочтительными для удовлетворения требований к электроду-инструменту (ЭИ) являются композиционные материалы типа псевдосплавов. 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 [2].

В настоящее время разработаны композиционные материалы на основе меди с дисперсными добавками окислов, боридов, нитридов и бора, позволяющие улучшить эксплуатационные свойства ЭИ [3]. При изготовлении электрода-инструмента методами порошковой металлургии материал технологичен в том случае, когда он поставляется в виде порошка со средним размером частиц менее 40 мкм. Фасонный электрод-инструмент может быть изготовлен на серийно выпускаемом оборудовании, значения основных технологических параметров должно удовлетворять следующим требованиям: удельное давление формования должно быть не более 4 т/см², температура спекания (горячего прессования, обжига и т.д.) – до 1200 °С, время выдержки при температуре спекания (горячего прессования, обжига и т.д.) – до 1 ч [4].

Лучший из новых композиционных материалов – МБХ-3. Изготовленный из этого материала ЭИ обладает повышенной стойкостью и дает возможность увеличить скорость съема материала детали до 2–3 раз. Для электроэрозионной обработки деталей из твердых сплавов применяются также ЭИ из композиции МНБ-3. Electroды МНБ-3 и МБХ-3 получают методом холодного прессования с последующим спеканием или горячим прессованием. При использовании электродов на основе меди у электродов из МБХ-3 по сравнению с электродами из меди М1 и материала МНБ-3 износ в 1,3–3,4 раза меньше, а производительность обработки в 1,3–2,3 раза выше [5]. Наименьший износ – у эльконайта, из него изготавливают электроды для обработки точных каналов матриц с последующим припуском на доводку 0,02–0,05 мм. Однако ввиду высокого содержания в эльконайте дефицитного вольфрама его применяют в ограниченном количестве. Перспективным композицион-

ным материалом для ЭИ является система медь – карбид кремния благодаря невысокому значению удельного электросопротивления карбида кремния, которое с повышением температуры уменьшается [6].

Цель работы – разработка материалов электродов-инструментов с улучшенными эксплуатационными свойствами для электроэрозионной обработки системы медь – неметалл.

В качестве тугоплавкой фазы были выбраны карбиды вольфрама (как традиционно используемого для данных материалов) и некоторые новые материалы: карбид кремния, карбид титана, карбонитрид титана, карбосилицид титана. По электрическим свойствам карбид кремния относится к полупроводникам. Удельное электрическое сопротивление внутри кристаллов SiC лежит в пределах от 1 до 10 Ом·см, суммарное удельное сопротивление кристаллов с учетом сопротивления поверхностного слоя имеет нелинейный характер: при больших плотностях тока (около 10^3 А/см²) суммарное удельное сопротивление составляет около 10 Ом·см, при малых плотностях тока (порядка 10^{-6} А/см²) оно возрастает до 10^6 Ом·см и более [7, 8]. Электросопротивление карбида кремния зависит от температуры: уменьшается при ее повышении, рис. 1 [9]. Микротвердость карбида кремния 32 400 МН/м², модуль упругости 380 000 МН/м² [9].

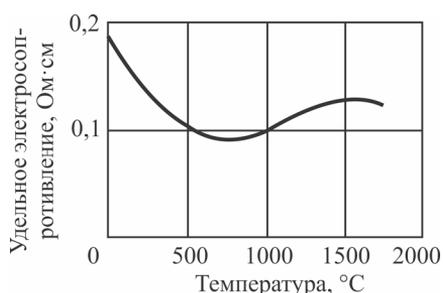


Рис. 1. Зависимость электросопротивления карбида кремния от температуры

Удельное электросопротивление плотных образцов составляет 0,003 Ом·м, что на три порядка выше, чем у титана, однако значительно ниже, чем у большинства керамических материалов [11]. Замечательной особенностью карбосилицида титана является независимость его удельного электросопротивления от температуры, что характерно для большинства карбидов (рис. 2) [10].

Абсолютно несмачиваемые карбид титана и медь при спекании в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза образуют псевдосплав с пористостью менее 2 % и достаточно равномерным распреде-

Карбосилицид титана Ti_3SiC_2 обладает уникальным комплексом физико-механических свойств. За счет слоистого строения кристаллической решетки, которое позволяет охарактеризовать его как наноструктурное слоистое соединение, карбосилицид титана обладает свойством квазипластичности, что повышает его стойкость к повреждениям. Защитные покрытия из карбосилицида титана выдерживают знакопеременные нагрузки, удары и вибрации [10]. Удельное

лением частиц TiC [12]. Стехиометрический состав карбида титана может изменяться при взаимодействии с кислородом: кислород медленно окисляет карбид титана уже при 600 °С, при этом возрастает электросопротивление [9, 13, 14], т.е. свойства проводимости карбида титана зависят от его стехиометрического состава. Краевой угол смачивания металлами на поверхности карбида титана также зависит от его состава. Так, при температуре 1100–1300 °С в вакууме краевой угол смачивания медью уменьшается при уменьшении содержания углерода со 105 до 50°. Такие металлы, как титан, цирконий, ниобий, хром, никель, кобальт и железо, активно взаимодействуют с карбидом титана [15, 16].

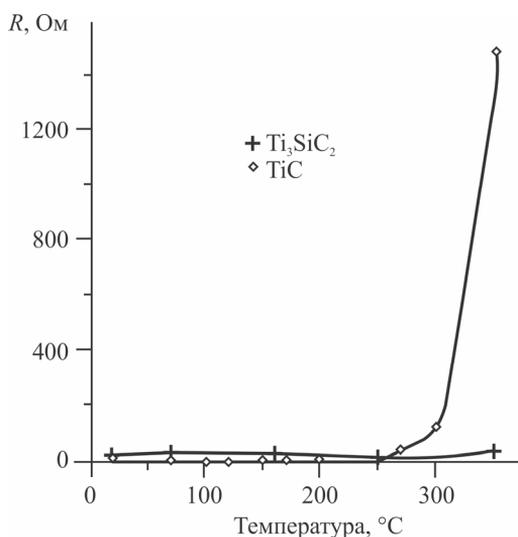


Рис. 2. Зависимость электросопротивления карбида титана и карбосилицида титана от температуры

Наноструктурированный дисперсно-упрочненный карбонитрид титана, не уступает карбиду вольфрама по механическим характеристикам и отличается более высокой температурой плавления, микротвердостью, не имеет склонности к прихватуванию, обладает более высоким температурным коэффициентом расширения, меньшим коэффициентом трения, меньшей плотностью, сырье для его производства доступно. Композиционные материалы и покрытия на основе наноструктурированного дисперсно-упрочненного карбонитрида титана обладают более высокими эксплуатационными свойствами, чем материалы и покрытия такого же назначения на основе карбида вольфрама [17].

Методики эксперимента и исследований. Для изготовления электродов из композиционных материалов использованы порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60–75), твердого сплава ВК-8 (92 % карбида вольфрама, ГОСТ 3882–74), карбонитрида титана КНТ-20–80 (ТУ МИХМ-2009), карбида титана углерет-

мического (ТУ 6-09-492–75), карбида кремния зеленый 64С (ГОСТ 36–47), карбосилицида титана, полученного методом механоактивации в Научном центре порошкового материаловедения, г. Пермь. Порошок меди смешивали с порошками керамики 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 600 МПа. Прессовки окончательно спекали 2 ч в вакуумной печи при температуре 1100 °С.

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 пресса 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 на образцах размером 6×6×50 мм. Рассчитывали удельное электросопротивление проводника R , Ом:

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

где 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, 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 прошитого в стали отверстия к линейному износу электрода [17].

Результаты эксперимента. Можно сделать вывод, что при увеличении объема тугоплавкой фазы у данных образцов увеличивается пористость (рис. 3). Пористость в системах медь – карбид по абсолютному значению выше, чем в системах с карбонитридом титана и карбосилицидом титана. Наибольшая пористость – у систем с карбидами вольфрама, титана и карбонитридом титана, так как эти соединения не взаимодействуют с медью [9], а наименьшая – в системах с карбосилицидом титана.

Анализ полученных результатов показал, что при увеличении объема тугоплавкой и более твердой, чем медь, фазы возрастает твердость образцов (рис. 4). Наиболее сильно на твердость влияют карбид вольфрама и карбид кремния, не-

зависимо от их количества. По абсолютным значениям твердость выше в системах с более твердой тугоплавкой фазой. Самая низкая твердость – в системах с карбидом титана, не смачиваемым медью и с высокой пористостью.

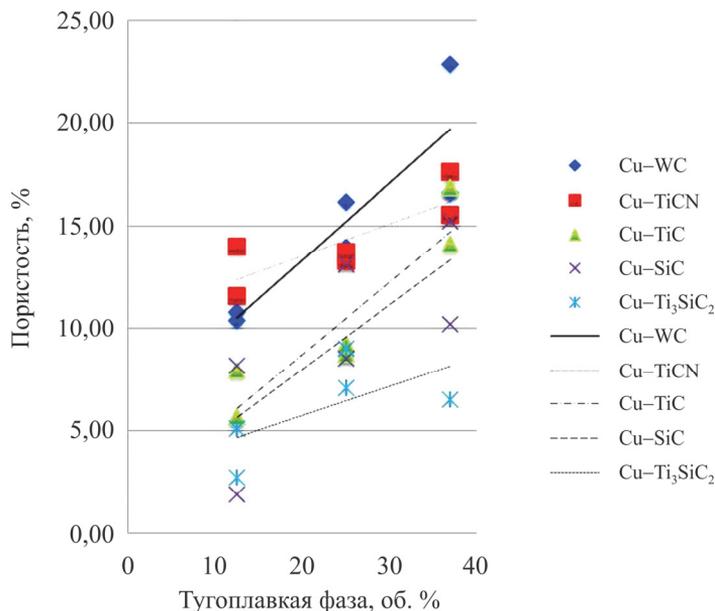


Рис. 3. Пористость композиционных материалов

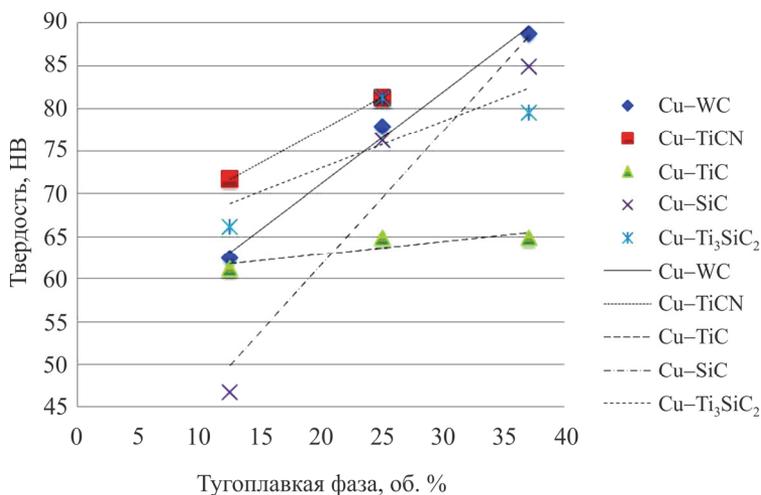


Рис. 4. Твердость композиционных материалов

При исследовании образцов на электросопротивление наблюдается повышение электросопротивления при увеличении объема тугоплавкой фазы, обладающей высоким значением электросопротивления по сравнению с медью

(рис. 5). Системы с содержанием карбосилицида титана и карбида кремния при повышении их концентрации наиболее сильно влияют на электросопротивление образцов. 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 электросопротивления композиционного материала. Наиболее высокие значения электросопротивления установлены в системах с карбидом кремния и карбосилицидом титана, у которых пористость была наиболее низкой, но, очевидно, имеется химическое взаимодействие с медью с образованием неэлектропроводных фаз. В системах с карбидами вольфрама и титана, а также с карбонитридом титана электросопротивление было меньше и при увеличении количества тугоплавкой добавки изменялось незначительно, так как не было взаимодействия с медью этих добавок и рост сопротивления был обусловлен только уменьшением объема меди в материале.

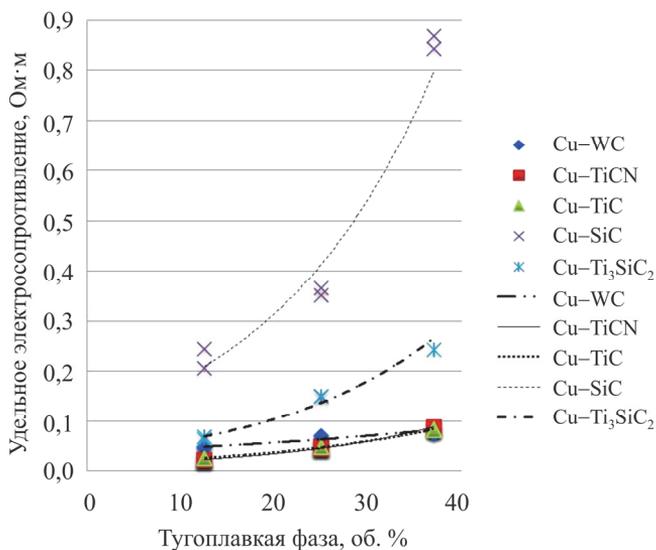


Рис. 5. Удельное электросопротивление композиционных материалов

Относительный износ электродов-инструментов сравнивали между собой и с медью марки М1 при разных режимах (рис. 6, 7). Медь была принята в качестве эталона. Как можно видеть из графиков, нет определенной зависимости износа электрода от концентрации тугоплавкой фазы, например, износ электрода с добавлением SiC при концентрации 12,5 и 25 % примерно одинаков и возрастает в два раза при концентрации 37 % (см. рис. 6), но по абсолютному значению износ выше, чем у меди, в несколько раз ввиду высокого значения электросопротивления, несмотря на невысокую пористость.

При повышении концентрации WC в электроде износ электрода уменьшается (см. рис. 7), при этом в режиме E81 он практически такой же, как у меди, а при увеличении содержания от 12,5 до 25 % – меньше, так как образуется более прочный каркас из тугоплавких частиц, который удерживает расплав меди капиллярными силами (в системе есть смачивание) [9]. Чем больше объем твердой фазы, тем капилляры мельче и силы поверхностного натяжения больше. В режиме E81 при концентрации 25 % износ электрода был бы меньше, чем у меди марки M1.

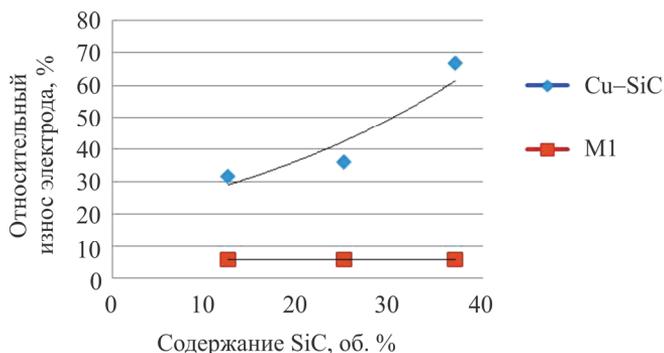


Рис. 6. Относительный износ электрода с различным содержанием SiC в режиме E81

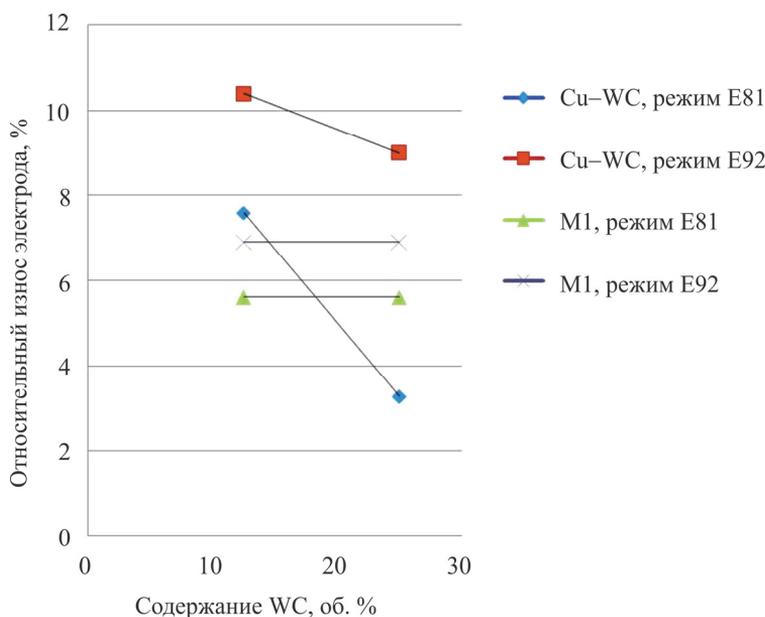


Рис. 7. Относительный износ электрода с различным содержанием WC в режимах E81 и E92

У систем с карбидом титана и карбонитридом титана износ электрода возрастает при повышении их концентрации (рис. 8, 9), так как медь не смачивает поверхности этих тугоплавких фаз [9] и в этих материалах довольно высокая пористость. Однако при невысоких концентрациях (12,5 %) относительный износ примерно в два раза меньше, чем у меди.

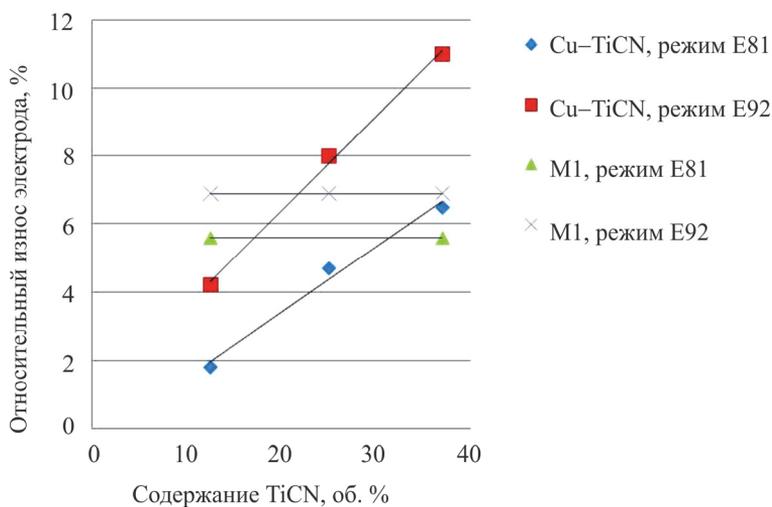


Рис. 8. Относительный износ электрода с различным содержанием TiCN в режимах E81 и E92

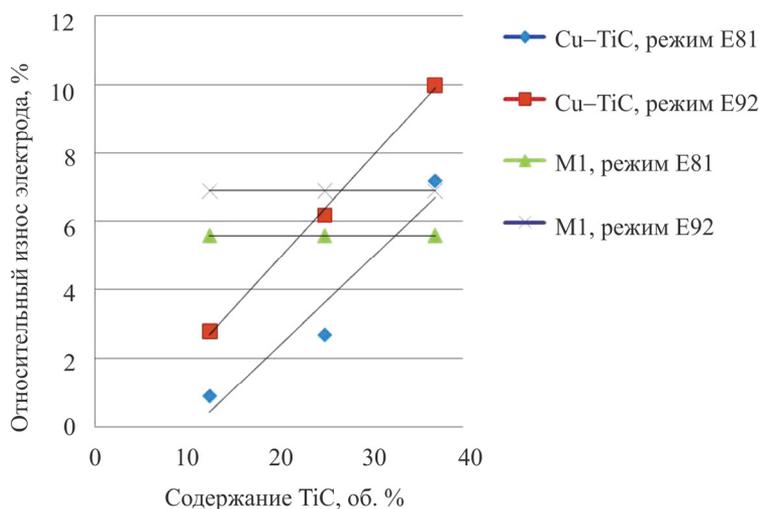


Рис. 9. Относительный износ электрода с различным содержанием TiC в режимах E81 и E92

Износ электродов с Ti_3SiC_2 на обоих испытанных режимах был меньше, чем у меди, особенно в режиме E81 (рис. 10). В режиме E81 износ увеличивается на 1 % при повышении концентрации, а в режиме E92 износ уменьшается сразу на 2,5 %.

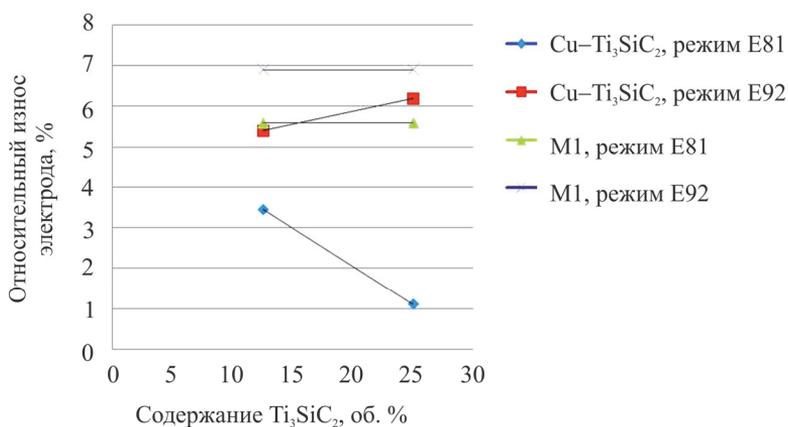


Рис. 10. Относительный износ электрода с различным содержанием Ti_3SiC_2 в режимах E81 и E92

Хорошие эксплуатационные свойства материала электрода обусловлены низкой пористостью, а также, вероятно, его слоистой структурой, образующей наноразмерные капилляры для удержания расплава меди, и постоянством электросопротивления карбосилицида титана в диапазоне температур при ЭЭО. Установлено также, что электроды работают по-разному при различных режимах и возможно подобрать такие режимы, что износ можно свести практически к нулю. В режиме E81 наиболее эффективно проявили себя системы медь – 25 % WC, медь – 12,5 % TiC и медь – 12,5 % TiCN. В режиме E92 – медь – 12,5 % TiC и медь – 12,5 % TiCN.

Сделаем следующие выводы. При увеличении содержания тугоплавкой фазы у композиционных материалов увеличивается пористость, уменьшается прочность в системах с отсутствием химического взаимодействия при спекании меди и тугоплавких фаз и сокращением площади металлического контакта. К увеличению электросопротивления приводит увеличение количества добавки с высоким электросопротивлением, пористость и химическое взаимодействие между медью и добавкой. При исследовании относительного износа ЭИ при прошивке инструментальной стали на черновых режимах было установлено, что наилучшей износостойкостью обладают системы: Cu – Ti_3SiC_2 – за счет стабильности электросопротивления в рабочем диапазоне температур; Cu – TiC, Cu – TiCN – при содержании добавки до 12,5 об. % (износ в два раза меньше).

Список литературы

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – Т. 1. – 247 с.
2. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства. – М.: Изд-во МГИУ, 1999. – 208 с.
3. Елисеев Ю.С., Савушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Савушкина. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.
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. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент / В.С. Самойлов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 371 с.
6. Косолапова С.А. Повышение эффективности размерной электроэрозионной обработки пресс-инструмента на основе применения электродов-инструментов, изготовленных из композиционного материала Cu – SiC: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Красноярск, 1996. – 21 с.
7. Properties of Silicon Carbide / ed. by G.L. Harris; The Institute of Electrical Engineers. – London, 1995. – 289 p.
8. Донской А.В., Куляшов С.М. Электротермия. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 312 с.
9. Косолапова Т.Я. Карбиды. – М.: Metallurgia, 1968. – 300 с.
10. Пат. 2341839 Российская Федерация, МИК Н01С7/00. Электропроводящий композиционный материал, шихта для его получения и электропроводящая композиция / Лепаква О.К., Голобоков Н.Н., Китлер В.Д., Шульпеков А.М., Максимов Ю.М.; патентообладатель Томский научный центр СибОРАН. – Заявл. 31.10.2007; опубл. 20.12.2008, Бюл. № 35. – 7 с.
11. Каченюк М.Н. Получение композиционных материалов на основе карбосилицида титана методом механосинтеза: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06. – Пермь, 2008. – 18 с.
12. Колубаев А.В., Фадин В.В. Об аномальном поведении теплопроводности композиционных материалов, содержащих карбид титана // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, вып. 16. – С. 33–36.
13. Кипарисов С.С., Левинская Ю.В., Петров А.П. Карбид титана: получение, свойства, применение. – М.: Metallurgia, 1987. – 215 с.
14. Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения: справочник. – М.: Metallurgia, 1976. – 560 с.

15. Композиционные материалы. Справочник / под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 550 с.

16. Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности [Электронный ресурс] / А.К. Климов, Д.А. Климов, В.Е. Низовцев, П.А. Ухов // Труды МАИ: электр. журнал. – Вып. № 67. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41403> (дата обращения: 6.06.2014).

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

Получено 7.10.2014

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

Морозов Олег Павлович – студент, ПНИПУ, МТФ, гр. МТН-14м, e-mail: tapochek-plus@list.ru.