

УДК 621.762+621.923.74-408

**Н.Д. Оглезнев**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Рассмотрены требования, предъявляемые к электродам-инструментам. Исследовано влияние электропроводных покрытий на электросопротивление и износостойкость стальных и латунных электродов. Изучено влияние состава порошковых композиционных материалов на основе меди на пористость, электросопротивление, износостойкость и производительность электрода-инструмента.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, композиционный материал, медь, тугоплавкие фазы, покрытие, электросопротивление, износостойкость, производительность.

**N.D. Ogleznev**

Perm National Research Polytechnic University

**STUDY EROSION RESISTANCE ELECTRODE TOOL  
FROM COMPOSITE MATERIALS FOR ELECTRICAL  
DISCHARGE MACHINING**

The requirements to the tool electrode are studied. The influence of conductive coatings on electrical resistivity and durability of steel and brass electrodes are investigated. Studied the influence of powder composite materials based on copper porosity, electrical resistance, durability and performance of the electrode-tool.

**Keywords:** electrical discharge machining, the tool-electrode, composite material, copper, refractory phase, coating, electrical resistance, erosion resistance, productivity.

Развитие электроэрозионного метода обработки (ЭЭО) сдерживается недостаточной износостойкостью или дороговизной и сложностью изготовления электродов-инструментов (ЭИ). Например, эрозионный износ ЭИ, изготовленных из меди, латуни, чугуна, может быть в 10–100 раз выше, чем объем снятого металла с детали, что значи-

тельно снижает эффективность или даже делает нецелесообразным применение метода электроэрозионной обработки. Разработка новых технологических процессов создания эрозионно-стойких материалов, обладающих низкой стоимостью, представляет собой весьма важную задачу и имеет большое экономическое значение. При обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов на основе вольфрама, молибдена и ряда других материалов широко применяют ЭИ из композиционных материалов, так как при использовании графитовых ЭИ не обеспечивается высокая производительность из-за низкой стабильности электроэрозионного процесса, а ЭИ из меди имеют большой износ, достигающий десятка процентов, и высокую стоимость [1].

Наиболее предпочтительными для удовлетворения требований к ЭИ являются композиционные материалы типа псевдосплавов. 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 и фасонный электрод-инструмент может быть изготовлен на серийно выпускаемом оборудовании, а значение основных технологических параметров удовлетворяют следующим требованиям: удельное давление формования менее 4 т/см<sup>2</sup>, температура спекания (горячего прессования, обжига и т.д.) ≤ 1200 °С, время выдержки при температуре спекания (горячего прессования, обжига и т.д.) до 1 ч [4].

Цель работы – исследование влияния физико-механических характеристик композиционных материалов электродов-инструментов на относительный износ и производительность при электроэрозионной

прошивке сталей. Исследовали влияние электропроводящего покрытия и состава композиционных материалов на пористость, электросопротивление, относительную износостойкость и производительность ЭИ.

Электроды-инструменты были выполнены из стали 30ХГСА и латуни ЛС 59-1 с медным покрытием и без покрытия на поверхности. Диаметр рабочей части 6,0 мм. В процессе работы в заготовке прошивались отверстия на глубину 2 мм. Нанесение покрытия производилось на предварительно очищенную поверхность заготовки ЭИ. Покрытие наносили методом термического испарения в вакууме на установке термического нанесения покрытий «Чайка». В качестве обрабатываемого материала использовалась пластина стали 65Г толщиной 2 мм. В качестве рабочей жидкости использовалось масло EDM Oil – IPOL SEO 450.

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) твердого сплава ВК-8 (92 % карбида вольфрама, ГОСТ 3882-74), карбонитрида титана КНТ-20-80 (ТУ МИХМ-2009), карбида титана углетермического (ТУ 6-09-492-75), карбида кремния зеленый 64С (ГОСТ 3647), карбосилицида титана, полученного методом механоактивации в Научном центре порошкового материаловедения ПНИПУ, ультрадисперсный медный порошок ПМВД-0, полученный методом газофазной конденсации по ТУ 1790-040-12288779-2005, препарат сухого коллоидального графита марки С-1 (ТУ 113-08-48-63-90), материал углеродный наноструктурный «Таунит МД» (ТУ 2166-001-02069289-2007). Порошок меди смешивали с порошками тугоплавких фаз, из смесей прессовали образцы, затем образцы отжигали в вакуумной печи и проводили повторное прессование, прессовки окончательно спекали в вакуумной печи при температуре 1100 °С, 2 ч. Испытания эксплуатационных свойств электродов [3] проводили при электроэрозионной прошивке листа стали Х12Ф толщиной 5,5 мм с твердостью 58 HRC на станке Electronica Smart CNC на черновых режимах обработки.

Относительный износ электрода определяли по отношению глубины прошитога в стали отверстия к линейному износу электрода. Производительность определяли как отношение времени работы инструмента к объему выработанного материала, мм<sup>3</sup>/мин.

Толщина покрытия из меди на стальном электроде составила 5 мкм, на латунном – 5 мкм (таблица). Покрытие имело равную толщину по всей длине электрода, отслоений не наблюдалось. Нанесение

электропроводящего покрытия уменьшило значение удельного электросопротивления как на латунном, так и на стальном электроде. В результате ЭЭО стали при обоих примененных режимах были получены отверстия диаметром 6,1 мм. При этом износ электродов из стали 30ХГСА с покрытием и без оказался меньше, чем у электродов из латуни. Более высокая износостойкость стальных электродов может быть связана с более высокой температурой плавления стали. Износостойкость и стального, и латунного электродов с покрытием из меди была выше, чем у этих же электродов без покрытия. Таким образом, установлена зависимость относительной износостойкости электрода-инструмента от его удельного электросопротивления.

#### Характеристики электродов

Материал	Толщина покрытия, мкм	Удельное электросопротивление, Ом·м	Относительный износ инструмента $\gamma$	
			E63	E73
Сталь 30ХГСА	–	$1,983 \cdot 10^{-5}$	0,3	0,27
Сталь 30ХГСА с покрытием медью	5	$1,921 \cdot 10^{-5}$	0,2	0,2
Латунь ЛС 59-1	–	$5,550 \cdot 10^{-4}$	2,2	–
Латунь ЛС 59-1 с покрытием медью	5	$5,408 \cdot 10^{-4}$	1,8	–

Нанесение электропроводящего медного покрытия методом термического испарения в вакууме на стальной электрод-инструмент понизило относительный износ в 1,5 раза, на латунный – на 15 %, при электроэрозионной прошивке стали на прецизионном и чистовом режимах обработки.

Экспериментальные исследования физико-механических свойств композиционных материалов системы медь – тугоплавкий металл показали, что при увеличении добавки тугоплавкой фазы у 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 [5] и сокращением площади металлического контакта.

При измерении электросопротивления образцов наблюдали повышение значения электросопротивления при увеличении объема тугоплавкой фазы, обладающей высоким значением электросопротивления по сравнению с медью (рис. 2). Влияния вида тугоплавкой добавки на электросопротивление не выявлено, оказало влияние только коли-

чество добавки. Увеличение количества добавок с высоким электросопротивлением и одновременно рост пористости приводят к увеличению удельного электросопротивления композиционного материала. Оба фактора – пористость и электросопротивление – оказали влияние на относительный износ электрода: чем больше были пористость и электросопротивление композиционного материала, тем больше был износ (система медь – молибден), рис. 3–4.

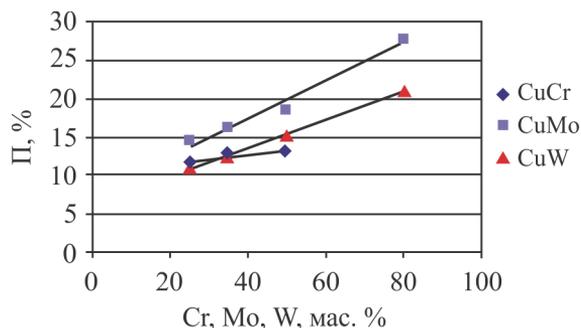


Рис. 1. Пористость композиционных материалов систем медь – хром, медь – вольфрам, медь – молибден в зависимости от количества тугоплавкой добавки

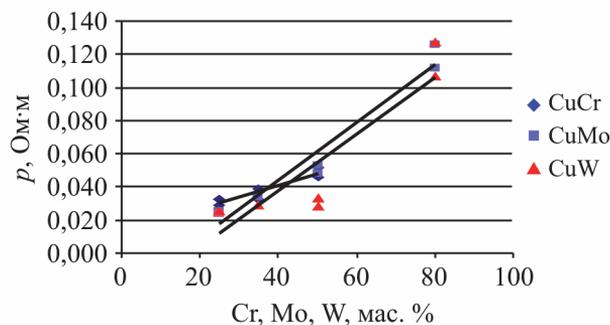


Рис. 2. Удельное электросопротивление композиционных материалов систем медь – хром, медь – вольфрам, медь – молибден в зависимости от количества тугоплавкой добавки

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 [6]).

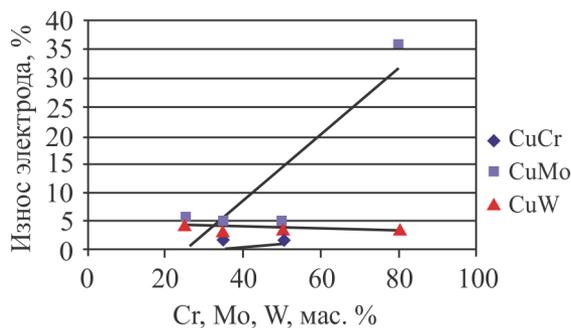


Рис. 3. Износ электрода от количества тугоплавкой фазы при режиме E81

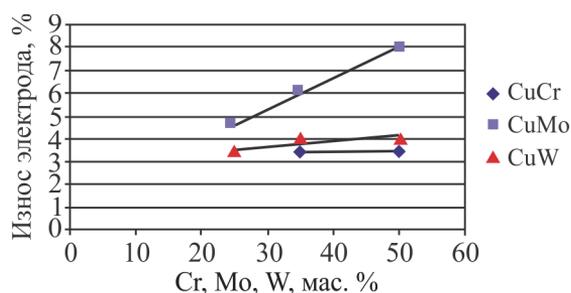


Рис. 4. Износ электрода от количества тугоплавкой фазы при режиме E92

При исследовании относительного износа ЭИ на разных режимах было установлено, что наилучшей износостойкостью обладают электроды системы Cu–Cr, на обоих режимах (E81 и E92) он показал наилучшие эксплуатационные свойства (относительный износ при одинаковом времени меньше в 2 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. В 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 их преимущества. При исследовании производительности ЭИ установлено, что наилучшими показателями обладают электроды системы Cu–W, так как к черновым режимам обработки предъявляются требования высокой скорости обработки при

повышенной стойкости электрода, и эти материалы показывают наилучшие эксплуатационные свойства (рис. 5).

С увеличением концентрации тугоплавких металлов производительность снижалась, очевидно, это связано с увеличением удельного электросопротивления за счет пористости и концентрации тугоплавкого металла. Ухудшение электропроводности приводит к уменьшению числа разрядов, снижающих производительность ЭЭО. Производительность электрода из меди на этих режимах составила 34,7 и 49,7 мм<sup>3</sup>/мин. Более высокая производительность была у электродов системы медь – вольфрам.

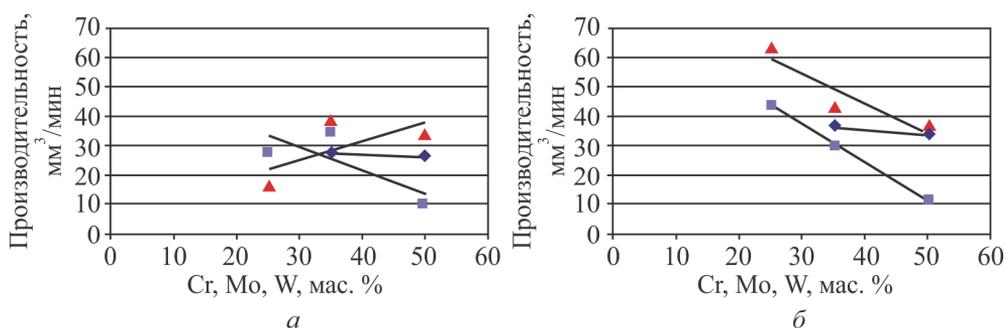


Рис. 5. Зависимость производительности от количества тугоплавкой фазы: *а* – при режиме E81; *б* – при режиме E92;  
◆ – CuCr; ■ – CuMo; ▲ – CuW

В системах медь – углеродная фаза при анализе влияния углеродных фаз можно сделать вывод, что при увеличении объема таунита увеличивается пористость (рис. 6), так как ввиду высокой удельной поверхности наноматериала существенно сокращается площадь металлического контакта и ухудшаются условия срачивания частиц при спекании; чем меньше была концентрация таунита, тем меньше была пористость (0,1 % – пористость 13 %, 0,3 % – пористость 25 %). При добавлении коллоидального графита к электролитическому порошку пористость незначительно снижается. Возможно, при прессовании меди с добавками графита, действующего как твердая смазка, в прессовке была достигнута более высокая плотность.

При исследовании влияния образцов на электросопротивление наблюдается незначительное повышение электросопротивления при увеличении объема коллоидального графита до 5 %, возможно, связанное с выгоранием некоторого количества углерода и образованием до-

полнительной пористости, ухудшающей свойства проводимости по сравнению с медью (рис. 7). Добавление таунита способствовало увеличению удельного электросопротивления композиционного материала ввиду высокой остаточной пористости после спекания.

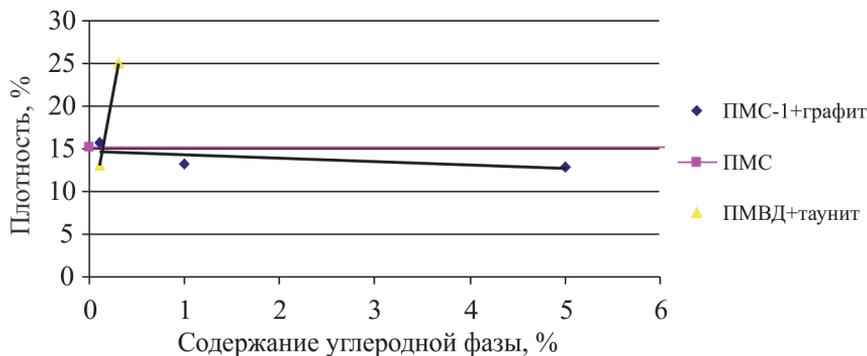


Рис. 6. Пористость композиционных материалов систем медь – углеродная фаза в зависимости от содержания углеродной добавки

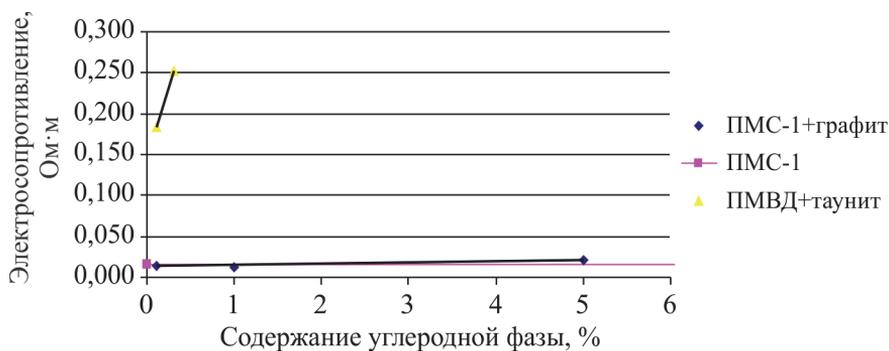


Рис. 7. Удельное электросопротивление композиционных материалов систем медь – углеродная фаза в зависимости от содержания углеродной добавки

Относительный износ ЭИ из спеченного порошка чистой меди был больше в 15 раз, чем в композиционных материалах (рис. 8). В системе медь – графит улучшение эксплуатационных свойств достигнуто за счет низкого электросопротивления композиционных материалов даже с достаточно высокой пористостью (до 13 %). Кроме того, улучшение свойств обусловлено формированием трехмерной сетки из тугоплавкой фазы с меньшим размером ячейки (капилляра) за счет более высокой дисперсности частиц тугоплавкой фазы – графита.

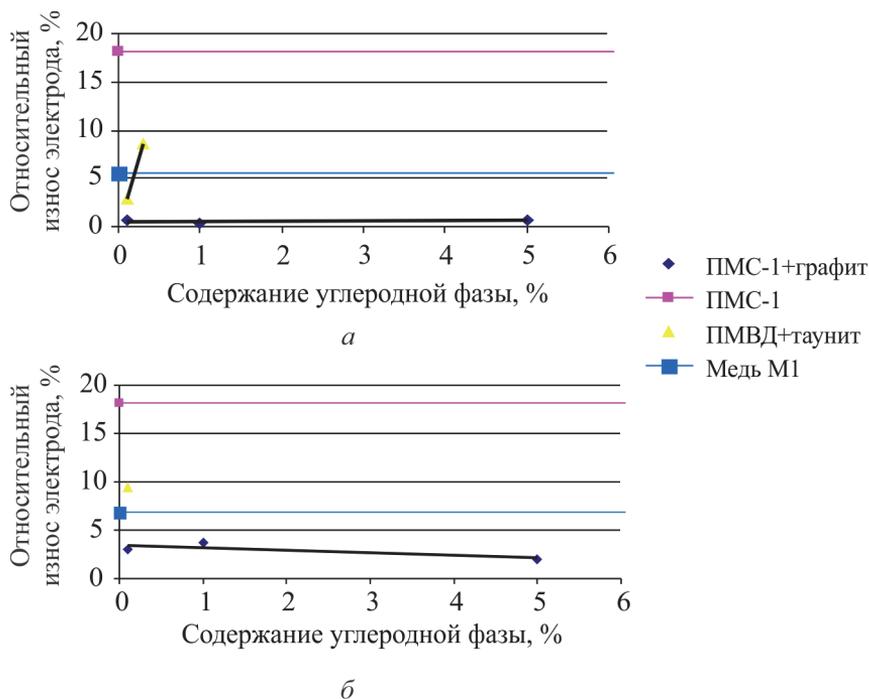


Рис. 8. Относительный износ композиционных материалов систем медь – углеродные фазы в зависимости от содержания углеродной добавки: *a* – на режиме E81; *б* – на режиме E92

Относительный износ электрода из литой меди М1 на этих же режимах обработки составил соответственно 5,6 и 6,9 %. ЭИ, содержащие графит и таунит, обладают износостойкостью в 2–5 раз большей, чем литая медь.

При исследовании производительности ЭИ установлено, что наилучшими показателями обладает электрод системы ПМС-1+С, так как к черновым режимам обработки предъявляются требования высокой скорости обработки при повышенной стойкости электрода (рис. 9).

При анализе влияния тугоплавкой керамической фазы можно сделать вывод, что при увеличении объема тугоплавкой фазы у всех образцов увеличивается пористость (рис. 10). При этом пористость в системах медь – карбид по абсолютному значению выше, чем в системах с карбонитридом титана и карбосилицидом титана. Наибольшая пористость наблюдается у систем с карбидами вольфрама, титана и карбонитридом титана, так как эти соединения не взаимодействуют с медью [7], а наименьшая – в системах с карбосилицидом титана.

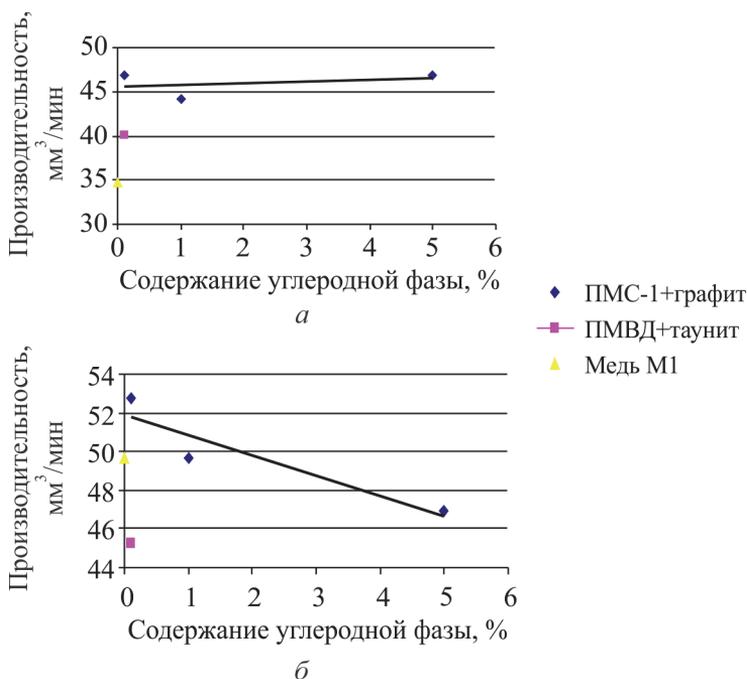


Рис. 9. Зависимость производительности от содержания тугоплавкой фазы: *а* – при режиме E81; *б* – при режиме E92

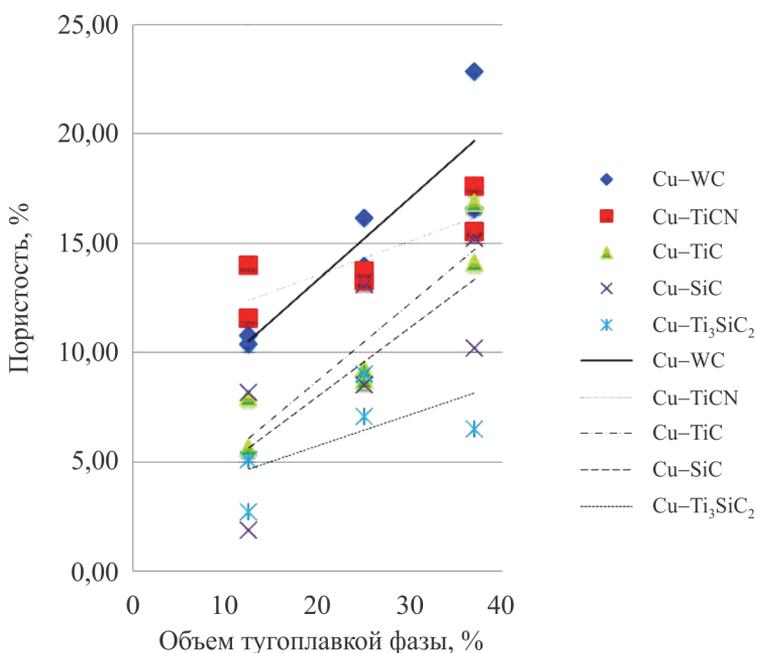


Рис. 10. Пористость композиционных материалов

При увеличении объема тугоплавкой фазы, обладающей высоким значением электросопротивления по сравнению с медью, наблюдали повышение электросопротивления (рис. 11).

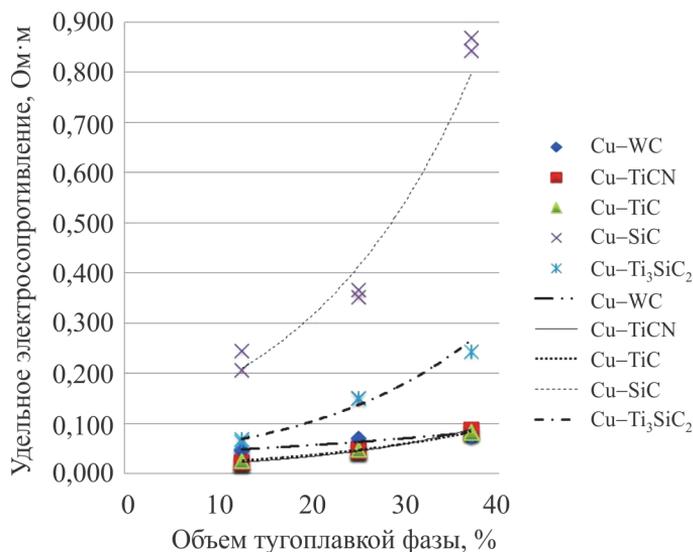


Рис. 11. Удельное электросопротивление композиционных материалов

Увеличение количества добавок с высоким электросопротивлением и одновременный 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 электросопротивления был обусловлен только уменьшением объема меди в материале.

Относительный износ электродов-инструментов сравнивали между собой и с медью марки М1 при разных режимах. Износ электрода с добавлением SiC при концентрации 12,5 и 25 % был примерно одинаков и возрастал в два раза при концентрации 37 % (рис. 12) ввиду высокого значения электросопротивления, несмотря на невысокую пористость.

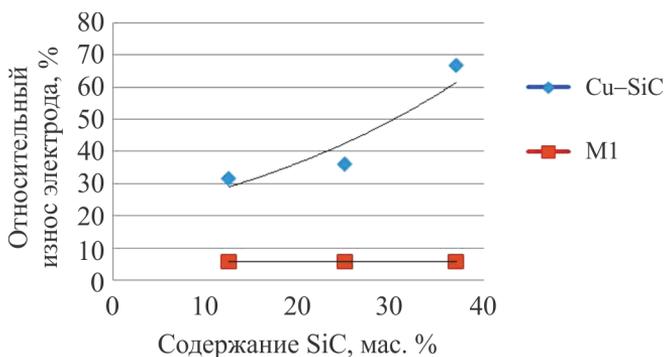


Рис. 12. Относительный износ электрода с различным содержанием SiC при режиме E81

При повышении концентрации WC в меди износ электрода уменьшался (рис. 13), при увеличении содержания от 12,5 до 25 %, так как в системе есть смачивание и образуется более прочный каркас из тугоплавких частиц, который удерживает расплав меди капиллярными силами [7], и чем больше объем твердой фазы, тем капилляры мельче и силы поверхностного натяжения больше.

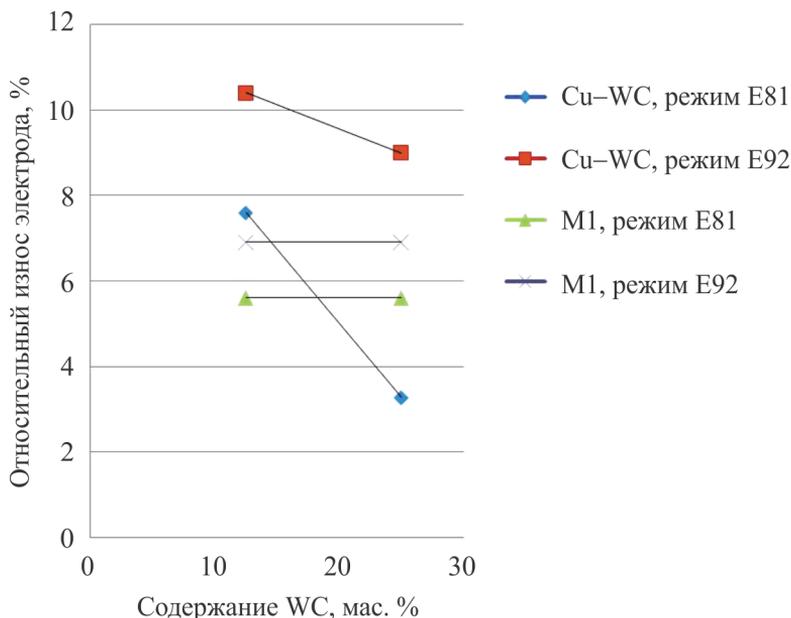


Рис. 13. Относительный износ электрода с различным содержанием WC при режимах E81 и E92

У систем с карбидом титана и карбонитридом титана износ электрода возрастал при повышении их концентрации (рис. 14), так как

медь не смачивает поверхности этих тугоплавких фаз [7] и в этих материалах довольно высокая пористость. Однако при невысоких концентрациях (12,5 %) относительный износ примерно в два раза меньше, чем у меди.

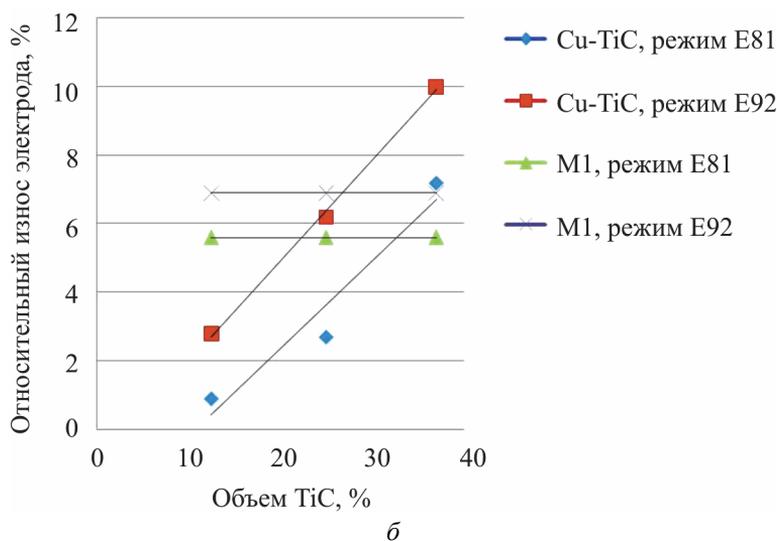
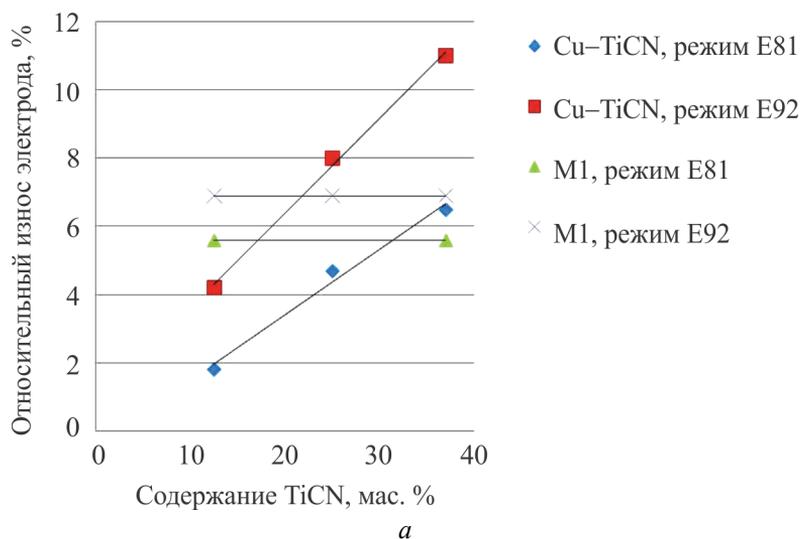


Рис. 14. Относительный износ электрода при режимах E81 и E92: а – с различным содержанием TiCN; б – с различным содержанием TiC

Износ электродов с  $Ti_3SiC_2$  в обоих испытанных режимах был меньше, чем у меди, особенно при режиме E81 (рис. 15). Хорошие эксплуатационные свойства обусловлены низкой пористостью, а так-

же, вероятно, его слоистой структурой, образующей наноразмерные капилляры для удержания расплава меди, и постоянством электросопротивления карбосилицида титана в диапазоне температур при ЭЭО. 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. Производительность больше, чем у меди, была установлена в системе медь – карбосилицид титана (рис. 16).

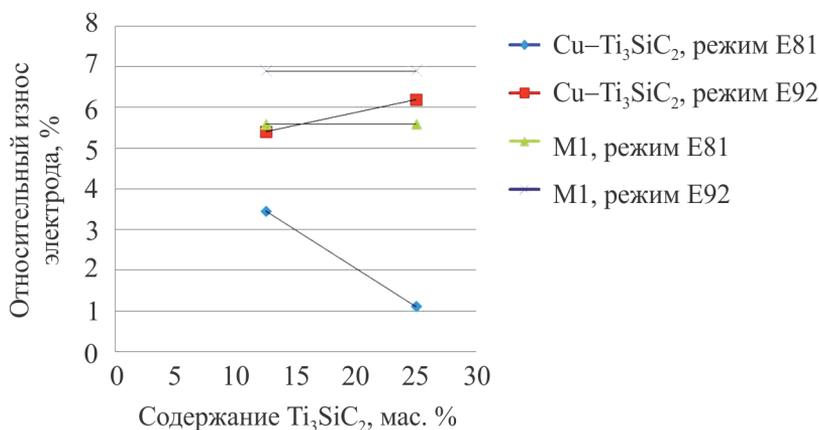


Рис. 15. Относительный износ электрода с различным содержанием  $Ti_3SiC_2$  при режимах E81 и E92

Сделаем выводы. При исследовании эксплуатационных свойств ЭИ установлено, что нанесение электропроводящих медных покрытий толщиной 5 мкм методом термического испарения в вакууме на стальной электрод-инструмент понизило относительный износ в 1,5 раза, на латунный – на 15 %, при электроэрозионной прошивке стали на прецизионном и чистовом режимах обработки.

При увеличении содержания тугоплавкой фазы в композиционных материалах увеличилась пористость 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:  $Cu-Cr$  –

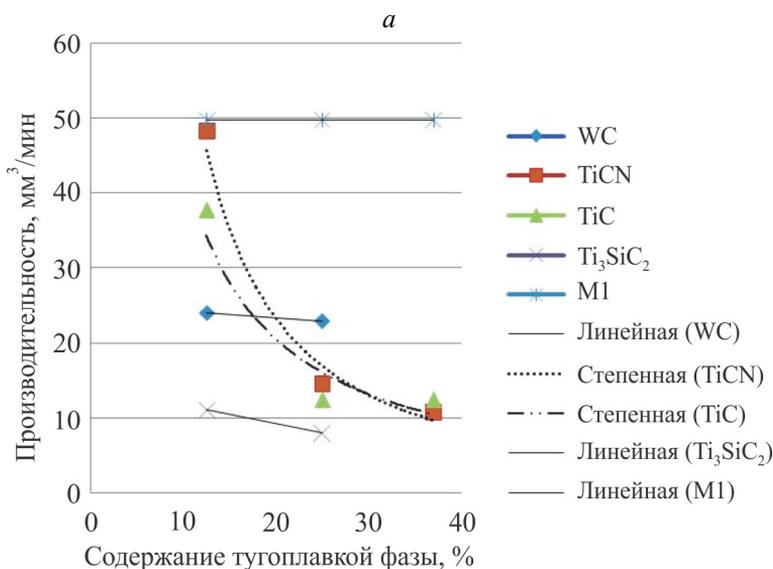
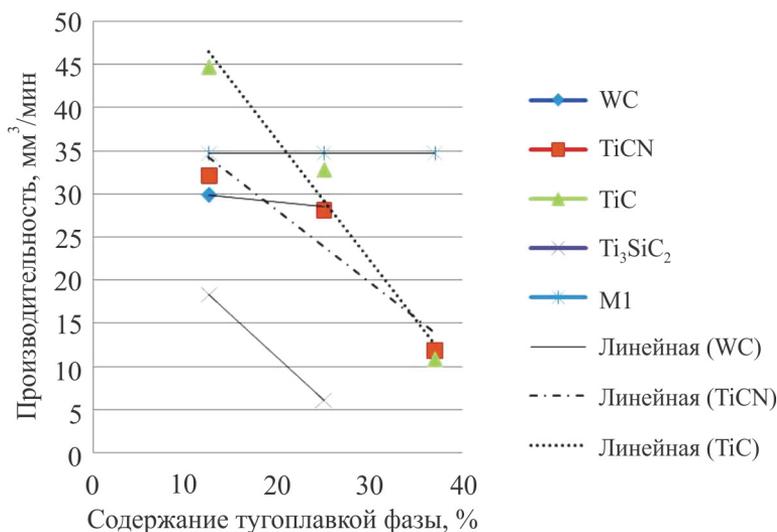


Рис. 16. Производительность композиционных ЭИ от содержания тугоплавкой фазы: *а* – при режиме E81; *б* – при режиме E92

за счет формирования прочного каркаса из хрома при незначительном химическом взаимодействии с медью и жаростойкости хрома при температуре обработки (износ в два раза меньше, чем у M1); Cu-C – за счет низкого электросопротивления, низкой пористости и формирования тонких капилляров в графитовой сетке, удерживающих расплавленную медь (износ в 8–15 раз меньше, чем у M1); Cu-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> – за счет стабильности электросопротивления в рабочем диапазоне температур, низкой

пористости, а также, вероятно, его слоистой структуры, образующей наноразмерные капилляры для удержания расплава меди, и постоянства электросопротивления карбосилицида титана в диапазоне температур при электроэрозионной обработке; Cu–TiC, Cu–TiCN – при содержании до 12,5 об. % (износ в два раза меньше). Для ЭИ систем медь – вольфрам и медь – графит зафиксирована производительность на 20–30 % выше, чем для меди М1.

В изготовлении электродов и проведении исследований участвовали студенты О.В. Доливец, К.А. Мазуренко, О.П. Морозов, Д.Д. Ларионов.

### **Список литературы**

1. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 146 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. Двойные и многокомпонентные системы меди / под ред. С.В. Шухардина. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
6. Ивенсон В.А. Феноменология спекания и некоторые вопросы теории. – М.: Metallurgy, 1985. – 247 с.
7. Косолапова Т.Я. Карбиды. – М.: Metallurgy, 1968. – 300 с.

Получено 17.07.2014

**Оглезнев Никита Дмитриевич** – аспирант кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: fastrex@mail.ru

**Ogleznev Nikita Dmitrievich** – Graduate Student, Department “Materials, Technologies and Design of Machines”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: fastrex@mail.ru