

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ РЕЗКИ СИСТЕМ «МЕДЬ – МЕТАЛЛ» И «МЕДЬ – ГРАФИТ»

С.А. Оглезнева, Н.Д. Оглезнев, Л.Д. Сиротенко

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

Целью исследования было установление зависимости относительного износа электрода от его структуры и разработка материалов для электродов-инструментов с улучшенными характеристиками.

Рассмотрены требования к электродам-инструментам для электроэрозионной прошивки. Композиционные материалы на основе меди с различным содержанием тугоплавкой фазы изготовлены методом порошковой металлургии. Методами рентгенофазового анализа и рамановской спектроскопии обнаружено образование интеркалированного медью графита и sp^3 связей в графите, спеченном с медью, которые способствуют повышению электропроводности и капиллярных свойств материала.

Исследовано влияние содержания тугоплавкой фазы в системах «медь – тугоплавкий металл», «медь – графит» на пористость, твердость, прочность, электросопротивление, относительную износостойкость электродов-инструментов из композиционных материалов. Установлено, что с увеличением содержания тугоплавких металлов увеличивается пористость и электросопротивление композиционных материалов. Определено, что относительная износостойкость при электроэрозионной прошивке электрода-инструмента из композиционных материалов на основе меди, содержащих тугоплавкие металлы, более всего зависит от жаростойкости тугоплавкого металла; в системах на основе меди с графитом относительный износ уменьшается за счет повышения электропроводности и капиллярного эффекта.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, композиционный материал, рамановская спектроскопия, интеркалирование, медь, тугоплавкие металлы, графит, эрозионная стойкость

Введение. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала в основном под тепловым воздействием импульсов электрической энергии. Эта энергия выделяется в канале разряда между поверхностью обрабатываемой детали и электродом-инструментом, погруженным в жидкую (обычную неэлектропроводящую) среду. Следующие друг за другом импульсные разряды производят выплавление и испарение микропорции материала; частицы расплавленного материала выбрасываются из зоны обработки развивающимся в канале разряда давлением, и электрод-инструмент получает возможность внедряться в обрабатываемую деталь [1].

Электроды-инструменты (ЭИ) являются одними из основных элементов, участвующих в электроэрозионном процессе. Параметры их оказывают существенное влияние на стабильность электроэрозионного процесса, его эффективность и область использования. Производительность и качество ЭЭО также находятся в зависимости от материала ЭИ. Электрод-инструмент должен изготавливаться из эрозионностойкого материала, обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов ЭЭО и максимальную производительность, имея малый износ [2].

Разработка новых технологических процессов создания эрозионностойких материалов, обладающих низкой стоимостью и высокой износостойкостью, представляет собой весьма важную задачу и имеет большое экономическое значение, так как эрозионный износ электродов-инструментов, изготовленных из меди, латуни, чугуна, может быть в 10–100 раз выше, чем объем снятого металла с детали, что значительно снижает эффективность или делает даже нецелесообразным применение метода электроэрозионной обработки [3].

Одним из путей снижения износа электрода-инструмента является использование материалов, имеющих высокую эрозионную стойкость [4].

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 [5]. В настоящее время разработаны композиционные материалы на основе меди с дисперсными добавками окислов, боридов, нитридов и бора, позволяющие улучшить эксплуатационные свойства ЭИ [6]. При увеличении доли тугоплавкой составляющей повышается твердость и эрозионная стойкость электрода, но ухудшается электро- и теплопроводность, поэтому оптимизация состава материала может быть связана с заменой тугоплавкой фазы на твердую и электропроводную. В пользу улучшения износостойкости электродов за счет повышения электропроводности свидетельствуют исследования свойств электродов с токопроводящими покрытиями, например, покрытия из меди и цинка на стальные электроды [7, 8]. По этой причине физико-механические свойства медно-графитовых электродов лучше, чем графитовых – они менее хрупки, допустимая плотность тока больше, поэтому производительность выше [9].

Электроды-инструменты из графита, углеграфитового, графитизированного материала широко используются при ЭИ благодаря высокой электроэрозионной стойкости, хорошей обрабатываемости и низкой стоимости. По стабильности процесса электроды несколько уступают медным, особенно на чистовых режимах обработки. Ограничение применения графитизированного материала диктуется, главным образом, его сравнительно низкой механической прочностью, что не позволяет получать механообработкой сложнопрофильные тонкостенные конструкции ЭИ [10]. Кроме того, создание подобных материалов технологически осложнено тем, что системе «медь – графит» практически отсутствует смачивание [11]. Оно происходит только в тех случаях, когда металл достаточно интенсивно вступает в химическую реакцию с углеродом.

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 [2].

При расплавлении электрода обрабатываемая поверхность неизбежно легируется материалом электрода, поэтому ограничение по химическому составу электрода необходимо учитывать в ряде случаев, например, в титане растворимы практически все металлы и огнеупоры, которые ухудшают свойства титана [12].

Целью исследования было установление зависимости относительного износа электрода от его структуры и разработка материалов для электродов-инструментов с улучшенными характеристиками

1. Методики эксперимента и исследований

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) препарат сухого коллоидального графита марки С-1 (ТУ 113-08-48-63-90). Порошок меди смешивали с порошками тугоплавких фаз, из смесей пресовали образцы, затем образцы отжигали в вакуумной печи и проводили повторное прессование, пресовки окончательно спекали в вакуумной печи при температуре 1070 ± 10 °С, 2 часа.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-4 в $K\alpha$ -Fe излучении. Рамановскую спектроскопию проводили на многофункциональном дисперсионном спектрометре комбинационного рассеяния света Senterra. Плотность композиционных материалов определяли на образцах размерами $6 \times 6 \times 50$ расчетным методом по стандартной методике (ГОСТ 18898-89). Электросопротивление измеряли на цифровом программируемом миллиомметре GOM на образцах размерами $6 \times 6 \times 50$ мм. Рассчитывали удельное электросопротивление:

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

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

Твердость спеченных образцов измеряли с помощью пресса Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012-59. Использовали индентор с диаметром 5 мм, нагрузку 750 кг, выдержка под нагрузкой 30 с. Испытания на прочность при трехточечном изгибе образцов $6 \times 6 \times 50$ мм без трещины

производили на машине FP 10/1 по ГОСТ 18227-85 со скоростью нагружения 2 мм/мин, расстояние между опорами 40 мм.

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). В качестве РЖ использовалось масло EDM Oil – IPOL SEO 450.

Относительный износ электрода определяли по отношению глубины прошитого в стали отверстия к линейному износу электрода [13].

2. Экспериментальные исследования

Коллоидный графит получают измельчением природного или искусственного чешуйчатого графита до размера менее 4 мкм и последующей обработкой в серной или азотной кислотах с целью образования окислов или солей (самые распространенные бисульфаты) графита, способных к образованию растворов с водой и органическими жидкостями [14]. В процессе химической обработки образуются интеркалаты графита, содержащие молекулы или ионы кислот между графеновыми слоями [15].

Рентгенофазовым анализом порошка графита С-1 и спеченного композиционного материала «медь – графит» установлено появление дополнительных рефлексов с межплоскостными расстояниями, соответствующими [16], табл. 1. В работе [16] обнаружено образование интеркалированных соединений графита и расплавленной меди, результатом которого после выхода ионов меди из межслоевых пространств графита является гофрирование графеновых плоскостей с образованием sp^3 связей (около 5 %). Признаками образования алмазных связей является появление дополнительных рефлексов в спектре графита отражений с нечетным l (001) и (003) и раздвоение некоторых существующих рефлексов (002), (004), (006). Учитывая способ предварительной обработки графита кислотами и высокую упругость паров меди, образование интеркалированных соединений с медью при предплавильной температуре, вполне вероятно. Причем, в исходном коллоидный графите признаков образования sp^3 связей методом рентгенофазового анализа не обнаружено.

Таблица 1

Межплоскостные расстояния порошка графита С-1 и спеченного композиционного материала «медь – 5 мас. % графита»

Индекс плоскости hkl	D, нм			
	Графит С-1	Медь – 5 мас. % графита С-1	Графит [16]	Графит – медь [16]
001	нет	0,701	нет	0,7 _{0,3}
002	0,336 ₁₀₀	0,336	0,336 ₁₀₀	0,336 ₉₇ (пик размыт)
003	нет	0,199 ₆	нет	0,2 _{0,2}
004	0,168 ₅	0,162 ₂₆	0,168 ₆	0,168 ₁₀₀ (пик размыт)
006	0,112 _{0,3}	0,113 ₆ (пик размыт)	0,112 ₁	0,112 ₇₃ (пик размыт)

Примечание. * – индексы – интенсивность линии.

Подтверждают формирование sp^3 связей при спекании графита с медью и результаты спектров комбинационного рассеяния, табл. 2. В спектрах обоих образцов графита присутствуют сильные линии G и $D1$, идентифицирующие sp^2 связи, очень слабый пик $2D$, указывающий на разупорядочение по оси графита c [17]. В структуре графита, спеченного с медью, пики G и $D1$ становятся более широкими, что свидетельствует о появлении разупорядоченности графита. На пике G появляется «плечо» $D2$ – так называемое «плечо дефектов», появившихся на краях и внутри графеновых плоскостей. Кроме того, появляется слабый пик $D4$, который указывает на наличие sp^3 связей. Невысокая интенсивность рефлексов связана с небольшой концентрацией графита в меди и, вероятно, небольшим количеством гофрированных плоскостей.

Пористость композиционных материалов до спекания составляла 12–20 %, табл. 3.

Экспериментальные исследования физико-механических свойств композиционных материалов системы «медь – тугоплавкий металл» показали, что, при увеличении добавки тугоплавкой

Технология

фазы у образцов увеличивается пористость, что связано с отсутствием химического взаимодействия при спекании меди с металлическими тугоплавкими фазами [18] и сокращением площади металлического контакта. При увеличении объема тугоплавкой фазы прочность образцов понижается, табл. 3.

Таблица 2

Спектры комбинационного рассеяния порошка графита С-1 и спеченного композиционного материала «медь – 5 мас. % графита»

Материал	$G, \text{см}^{-1}$	$2D, \text{см}^{-1}$	$D1, \text{см}^{-1}$	$D2, \text{см}^{-1}$	$D4, \text{см}^{-1}$
Графит С-1	1580 ₆	2682 _{оч.сл.}	1352 ₄	нет	нет
Медь-5 мас. % графита С-1	1582 ₆	2682 ₁	1352 ₄	1620 _{сл}	1212 _{сл}

Таблица 3

Пористость композиционных материалов

Система	Содержание тугоплавкой фазы, об. %	Пористость, % после спекания	Предел прочности на изгиб, МПа	Твердость НВ, МПа
Cu – Cr	25	4	400 ± 40	720 ± 30
	35	8	400 ± 40	710 ± 30
	50	7	400 ± 40	810 ± 30
Cu – Mo	25	11	110 ± 10	590 ± 20
	35	12	–	650 ± 20
	50	16	–	790 ± 30
	80	24	90 ± 20	–
Cu – W	25	15	200 ± 20	340 ± 15
	35	11	120 ± 20	450 ± 20
	50	13	150 ± 30	510 ± 20
	80	22	50 ± 10	620 ± 20
Cu – C	0,4	14	500 ± 50	360 ± 15
	4,0	11	480 ± 50	300 ± 15
	20,0	10	200 ± 20	300 ± 15

Наиболее низкими значениями прочности обладали системы, содержащие молибден и вольфрам, так как они не взаимодействуют с медью. Незначительная растворимость хрома в меди (ок. 1 %) обеспечивает формирование более прочного межчастичного контакта [18].

Увеличение количества добавок с высоким электросопротивлением (хром, вольфрам, молибден) и одновременно рост пористости приводят к увеличению удельного электросопротивления композиционного материала пропорционально количеству добавки и электросопротивлению тугоплавкого металла (удельное электросопротивление молибдена, вольфрама, хрома составляет, соответственно $5,2 \cdot 10^{-8}$, $5,5 \cdot 10^{-8}$, $1,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м), рис. 1.

При добавлении коллоидального графита к порошку меди пористость незначительно снижалась с увеличением его содержания, так как при прессовании меди с добавками графита, действующего как твердая смазка, в прессовке была достигнута более высокая плотность. Добавление графита к меди понизило проводимость материала на основе меди, но не так сильно, как тугоплавкие металлы, несмотря на достаточно высокую пористость, что обусловлено низки электросопротивлением графита и, возможно, интеркалированием графита медью. Наблюдали незначительное повышение электросопротивления при увеличении объема коллоидального графита до 18 об. %, возможно, связанное с образованием дополнительной пористости при сокращении металлического контакта при спекании, ухудшающей свойства проводимости по сравнению с чистой медью, рис. 1.

Оба фактора – пористость и электросопротивление – оказали влияние на относительный износ электрода: чем больше были пористость и электросопротивление композиционного материала, рис. 1.

Относительный износ электрода из чистой меди 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 [19]). 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 [18].

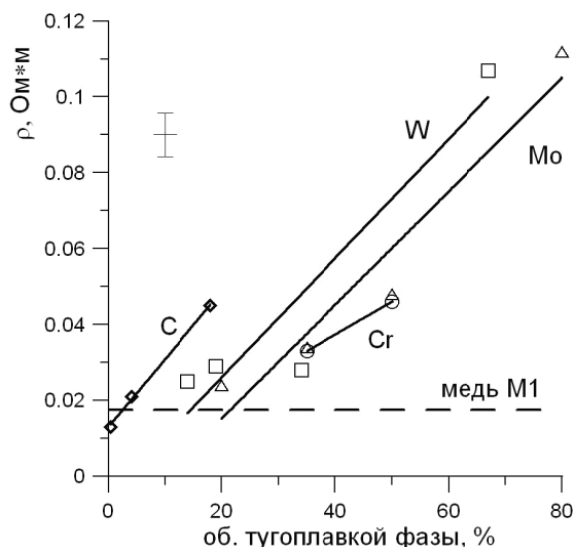


Рис. 1. Удельное электросопротивление композиционных материалов систем «медь – хром», «медь – вольфрам», «медь – молибден», «медь – графит» в зависимости от содержания тугоплавкой добавки

Относительный износ ЭИ из спеченного порошка чистой меди был больше в 15 раз, чем в композиционных материалах «медь-графит», рис. 2, а, б. 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 слоистой структуры и интеркалирования графита.

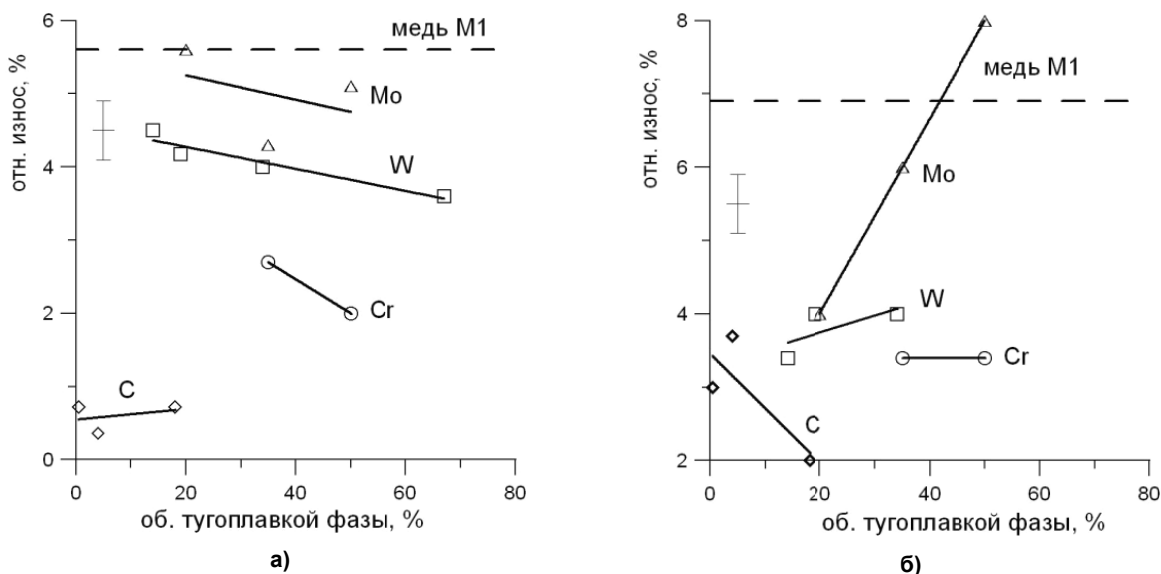


Рис. 2. Износ электрода от содержания тугоплавкой фазы в системах «медь – хром», «медь – вольфрам», «медь – молибден», «медь – графит» при электроэрозионной прошивке стали, а – при режиме E81, б – при режиме E92

При прошивке титанового сплава на режиме E92 наблюдали очень высокий износ электродов, что является характерным для обработки титана (относительный износ может достигать 200 % и более), табл. 4. Наименьший износ был у электродов с минимальным количеством графита как и при прошивке стали, но при обработке титана, активно взаимодействующего с графитом, наименьшее количество графита более предпочтительно.

Таблица 4
Относительный износ электродов при прошивке сплава ВТ 5

Состав электрода	Отн. износ, %
Cu + 0,4 об. % графита	70
Cu + 20 об. % графита	100
Медь M1	100

3. Выводы

1. Методами рентгенофазового и анализа и рамановской спектроскопии обнаружено образование интеркалированного медью графита и sp^3 связей в графите, спеченном с медью.

2. Интеркалирование медью графита уменьшает удельное электросопротивление материалов «медь – графит».

3. К увеличению электросопротивления приводит увеличение количества добавки с высоким электросопротивлением, пористость и химическое взаимодействие между медью и добавкой.

4. При исследовании относительного износа ЭИ при прошивке инструментальной стали на черновых режимах установлено, что наилучшей износостойкостью обладают системы: Cu–Cr за счет формирования прочного каркаса из хрома при незначительном химическом взаимодействии с медью и жаростойкости хрома при температуре обработки (износ в 2 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).

4. Обсуждение и применение

До сих пор считалось, что медь и графит не взаимодействуют химически и адгезионно, медь является графитизирующим элементом и не является катализатором для синтеза алмаза. Обнаруженное формирование sp^3 связей в графите, спеченном с медью в твердой фазе, открывает перспективы для фундаментальной науки в области исследований фазовых превращений графита и создание новых интеркалированных соединений с новыми свойствами.

Установленные механизмы влияния структуры композиционных материалов открывают новые возможности создания материалов для электродов-инструментов с улучшенными свойствами методом порошковой металлургии.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору С.Е. Порозовой и доценту А.С. Иванову за проведенный рентгенофазовый анализ и рамановскую спектроскопию.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки по государственному заданию (базовая часть) № 2014/152, НИР № 1460.

Литература

1. Иванайский, А.В. Применение электроэрозионной обработки при производстве деталей машин / А.В. Иванайский, Д.С. Свириденко, А.В. Рябцева // *Технология машиностроения*. – 2013. – № 2. – С. 18–20.

2. Немилев, Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Е.Ф. Немилев. – М.: Машиностроение, 1989. – 146 с.

3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 1. – 247 с.

4. Чернышев, К.А. Пути снижения износа электрода-инструмента при электроэрозионной обработке / К.А. Чернышев // *Успехи современного естествознания*. – 2011. – № 7. – С. 233.

5. Авраамов, Ю.С. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. – М.: МГИУ, 1999. – 208 с.

6. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 2. – 268 с.

7. Пат. 2341839 Российская Федерация, МИК Н01С7/00. Электропроводящий композиционный материал, шихта для его получения и электропроводящая композиция / О.К. Лепакова, Н.Н. Голобоков, В.Д. Китлер и др.; патентообладатель Томский науч. центр Сибир. отд-ния Рос. акад. наук (ТНЦ СО РАН). – Заявл. 31.10.2007; опублик. 20.12.2008.

8. Ярмонов, А.Н. Исследование влияния электропроводящего покрытия на износостойкость электродов-инструментов при электроэрозионной прошивке // *Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (4–5 июня 2014 года): в 3 т.* / А.Н. Ярмонов, Н.Д. Оглезнев. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 2. – С. 300–304.

9. Елисеев, Ю.С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Савушкин; под ред. Б.П. Савушкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.

10. Серебrenицкий, П.П. *Современные электроэрозионные технологии и оборудование* / П.П. Серебrenицкий. – 2-е изд., доп. и перераб. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – С. 352.
11. Гершман, И.С. Уменьшение краевого угла смачивания углерода медью в графито-медных токоъемных материалах / И.С. Гершман, Е.И. Гершман, П.Г. Тюрнин // *Вестник Науч.-исследоват. ин-та железнодорож. транспорта*. – 2013. – № 2. – С. 21–27.
12. *Материаловедение и технология конструкционных материалов* / Ю.П. Солнцев [и др.]; под ред. Ю.П. Солнцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МИСиС, 1996. – 575 с.
13. Фотеев, Н.К. *Технология электроэрозионной обработки* / Н.К. Фотеев. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
14. *Формы существования углерода. Их получение и применение* / С.А. Оглезнева, Л.М. Гревнов, И.В. Жигалова [и др.]. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2003. – 88 с.
15. Белова, М.Ю. От «черного мела» к уплотнениям из ТРГ / М.Ю. Белова // *Арматуростроение*. – 2008. – № 1 (52). – С. 42–49.
16. Андреева, В.Д. Влияние атомов меди на структуру графита / В.Д. Андреева, Т.Р. Степанова // *Письма в ЖТФ*. – 2002. – Т. 28. – Вып. 18. – С. 18–23.
17. Бискэ, Н.С. Спектроскопия комбинационного рассеяния графита из месторождений и рудопроявлений Приладожья / Н.С. Бискэ, В.А. Колодей // *Геология и полезные ископаемые Карелии*. – 2014. – № 17. – С. 103–109.
18. *Свойства неорганических соединений: справ.* / А.И. Ефимов [и др.]. – Л.: Химия, 1983. – 392 с.
19. Ивенсен, В.А. *Феноменология спекания и некоторые вопросы теории* / В.А. Ивенсен. – М.: Металлургия, 1985. – 246 с.

Оглезнева Светлана Аркадьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, osa@pm.pstu.ac.ru.

Оглезнев Никита Дмитриевич, инженер, аспирант кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, fastrex@mail.ru.

Сиротенко Людмила Дмитриевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, sirotenko@pstu.ru.

Поступила в редакцию 13 января 2015 г.

DOI: 10.14529/engin160105

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTRODES FOR EDM TOOLS CUTTING SYSTEMS “COPPER – METAL” AND “COPPER – GRAPHITE”

S.A. Oglezneva, osa@pm.pstu.ac.ru,

N.D. Ogleznev, fastrex@mail.ru,

L.D. Sirotenko, sirotenko@pstu.ru

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The aim of the study was to determine the dependence of the relative electrode wear on its structure and development of materials for electrodes tools with improved characteristics. The requirements to the tool electrode for EDM firmware are reviewed. Composite materials based on copper with different contents of refractory phase produced by powder metallurgy. X-ray diffraction and Raman spectroscopy analysis and revealed the formation of intercalated

graphite and copper sp³ bonds in graphite, sintered copper that enhance conductivity and capillary properties of the material. It has been investigated the influence of the content of the refractory phase systems “copper – refractory metal”, “copper – graphite” on the porosity, hardness, strength, electrical resistivity, the relative wear resistance of electrode-tool made of composite materials. It has been established that an increase in the refractory metal content and the electrical resistance increases porosity composites. It has been determined that the relative wear resistance at EDM insertion tool electrode made of composite materials based on copper-containing refractory metals, most of all depends on the heat resistance of the refractory metal; in systems based on copper and graphite the relative wear decreased by increasing the conductivity and the capillary effect.

Keywords: electro-discharge machining, tool electrode, composite material, Raman spectroscopy, intercalation, copper, refractory metals, graphite, erosion resistance.

References

1. Ivanaysky A.V., Sviridenko D.S., Riabtseva A.V. *Primenenie elektroerozionnoy obrabotki pri proizvodstve detaley mashin* [Use Electrical Discharge Machining in the Manufacture of Machinery Parts]. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering Technology], 2013, no. 2, pp. 18–20. (in Russ.)
2. Nemilov E.F. *Spravochnik po elektroerozionnoy obrabotke materialov* [Reference EDM Material Processing]. Moscow, Mechanical Engineering, 1989. 146 p.
3. Smolentseva V.P. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov: tom 1* [Electrophysical and Electrochemical Methods of Processing Materials: Vol. 1]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 247 p.
4. Chernyshev K.A. [Ways to Reduce Electrode Wear-Tool During Electrical Discharge Machining]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [The Successes of Modern Science], 2011, no. 7, pp. 233. (in Russ.)
5. Avraamov Y.S., Shlyapin A.D. *Novye kompozitsionnye materialy na osnove nesmeshivayushchikhsya komponentov: poluchenie, struktura, svoystva* [New Composite Materials Based on Immiscible Components: Preparation, Structure, Properties]. Moscow, MGIU Publ., 1999. 208 p.
6. Smolentseva V.P. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov: tom 2* [Electrophysical and Electrochemical Methods of Processing Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 268 p.
7. Lepakova O.K., Golobokov N.N., Kitler V.D., Shulpekov A.M., Maksimov Yu.M. *Elektroprovodyashchiy kompozitsionnyy material, shikhta dlya ego polucheniya i elektroprovodyashchaya kompozitsiya* [Electrically Conductive Composite Material, Charge for Its Production and the Electrically Conductive Composition]. Patent RF, no. 2341839, 2008.
8. Yarmonov A.N., Ogleznev N.D. [Investigation of the Effect of the Electrically Conductive Coating on the Wear Resistance of the Tool-Electrode Spark with Firmware]. *Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh: Sbornik nauchnykh trudov 4-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (4–5 iyunya 2014 goda)* [Innovation, Quality and Service in Engineering and Technology: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference (June 4–5, 2014)]. Kursk, 2014, vol. 2, pp. 300–304. (in Russ.)
9. Eliseev Y.S., Savushkin B.P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electrical Discharge Machining Manufacturing Aerospace Engineering]. Moscow, MSTU N.E. Bauman Publ., 2010. 437 p.
10. Serebrenitsky P.P. *Sovremennyye elektroerozionnyye tekhnologii i oborudovanie* [Modern EDM Technology and Equipment]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013. 352 p.
11. Gershman J.S., Gershman E.I., Tyurnin P.G. [The Decrease in the Contact Angle of Carbon in Copper Graphite-Copper Current Collector Materials]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Journal Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2013, no. 2, pp. 21–27. (in Russ.)
12. Solntseva Y.P. *Materialovedenie i tekhnologiya konstruksionnykh materialov* [Materials Science and Technology of Structural Materials]. Moscow: Publishing House of the MISA, 1996. 575 p.
13. Foteev N.K. *Tekhnologiya elektroerozionnoy obrabotki* [Technology Electrical Discharge Machining]. Moscow, Mechanical Engineering, 1980. 184 p.

14. Oglezneva S.A., Grevnov L.M., Zhigalova I.V. *Formy sushchestvovaniya ugleroda. Ikh poluchenie i primenenie* [Forms of Existence of Carbon. Their Preparation and Use]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2003. 88 p.
15. Belova M.Y. [From “Black Chalk” to Seal from the TWG]. *Armaturostroenie* [Valve], 2008, no. 1 (52), pp. 42–49. (in Russ.)
16. Andreeva V.D., Stepanova T.R. [Influence of Copper Atoms in the Graphite Structure]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Letters], 2002, vol. 28, iss. 18, pp. 18–23. (in Russ.)
17. Biske N.S., Kolodey V.A. *Spektroskopiya kombinatsionnogo rasseyaniya grafita iz mestorozhdeniy i rudoproyavleniy Priladozh'ya* [Raman Spectroscopy of Graphite Deposits and Occurrences Priladozh'ya]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and Mineral Resources of Karelia], 2014, no. 17, pp. 103–109. (in Russ.)
18. Efimov A.I. *Svoystva neorganicheskikh soedineniy: spravochnik* [The Properties of Inorganic Compounds. Directory]. Leningrad, Khimiya Publ., 1983. 392 p.
19. Ivensen V.A. *Fenomenologiya spevaniya i nekotorye voprosy teorii* [Phenomenology of Sintering and Some Questions of the Theory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 246 p.

Received 13 January 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Оглезнева, С.А. Исследование взаимосвязи между структурой и свойствами электродов-инструментов для электроэрозионной резки систем «медь – металл» и «медь – графит» / С.А. Оглезнева, Н.Д. Оглезнев, Л.Д. Сиротенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 63–71. DOI: 10.14529/engin160105

FOR CITATION

Oglezneva S.A., Ogleznev N.D., Sirotenko L.D. Study of the Relationship Between Structure and Properties of Electrodes for EDM Tools Cutting Systems “Copper – Metal” and “Copper – Graphite”. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 63–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160105