

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.09

УДК 621.762+621.923.74-408

С.А. Оглезнева, В.Г. Гилев, Н.Д. ОглезневПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ РЕЗКИ СИСТЕМЫ
МЕДЬ – КАРБОСИЛИЦИД ТИТАНА**

Исследовано влияние содержания карбосилицида титана Ti_3SiC_2 на формирование структуры, пористость, твердость, прочность, электросопротивление, эрозионную износостойкость электродов-инструментов из композиционных материалов на основе меди. Выбор состава материала был основан на изучении требований к электродам-инструментам для электроэрозионной прошивки и выявлении основных функций тугоплавкой фазы, способствующих повышению эрозионной стойкости электрода.

Композиционные материалы на основе меди с содержанием карбосилицида титана 12,5–37,5 об. % были изготовлены методом порошковой металлургии с использованием электролитического порошка меди и порошка карбосилицида титана, полученного реакционным спеканием. Рентгенофазовым, электронно-микроскопическим, энергодисперсионным и другими методами анализа изучено фазообразование в системе медь – карбосилицид титана при спекании и обнаружено, что из зерен карбосилицида титана происходит деинтеркалирование кремния в медь и диффузия меди в зерна карбосилицида, при этом часть зерен превращается в силицид титана Ti_5Si_3 и незначительные количества TiC , SiC , $TiSi_2$.

Установлено, что с увеличением содержания карбосилицида титана увеличиваются твердость и прочность композиционного материала, однако частичное разложение карбосилицида титана при спекании приводит к небольшому увеличению пористости и росту электросопротивления композиционных материалов. Экспериментально установлено, что карбосилицид титана является перспективной тугоплавкой добавкой для изготовления электрода-инструмента на основе меди для электроэрозионной прошивки благодаря слоистой структуре и невысокому электросопротивлению. Определено, что при электроэрозионной прошивке листа инструментальной стали на черновых режимах относительная износостойкость электрода-инструмента из композиционных материалов на основе меди, содержащих карбосилицид титана, была выше в пять раз, чем у чистой меди.

Ключевые слова: порошковая металлургия, электроэрозионная обработка, электрод-инструмент, композиционный материал, медь, карбосилицид титана, спекание, инфильтрация, структура, физико-механические свойства, эрозионная стойкость.

S.A. Oglezneva, V.G. Gilev, N.D. Ogleznev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MATERIALS CU–Ti₃SiC₂ OF TOOL-ELECTRODE FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

The influence of the content of Ti₃SiC₂ on the structure, porosity, hardness, strength, electrical resistance, wear resistance of the electrode erosion tools of composite materials based on copper. The choice of material composition was based on a study of the requirements for the tool electrode for electrical discharge machining and identification of the main functions of the refractory phase that increase the erosion resistance of the electrode. Composite materials based on copper with a content 12.5–37.5 vol. % of Ti₃SiC₂ were produced by powder metallurgy using electrolytic copper powder and Ti₃SiC₂ powder produced by a reaction sintering. X-ray diffraction, the electron microscope, energy dispersive and other methods of analysis, the phase formation in the copper-Ti₃SiC₂ during sintering and found that of the grains Ti₃SiC₂ occurs deintercalation of silicon in copper and diffusion of copper to the Ti₃SiC₂ grain, wherein a portion of grain is converted into titanium silicide Ti₅Si₃ and minor amounts of TiC, SiC, TiSi₂. It is found that with increasing content of Ti₃SiC₂ increases the hardness and strength of the composite material, but partial decomposition of Ti₃SiC₂ during sintering leads to a small increase in the porosity and increase the resistivity of composite materials. It was established experimentally that Ti₃SiC₂ is a promising refractory addition to the manufacture of tool electrode based on copper for EDM firmware through a layered structure and a low electrical resistance. It was determined that the EDM firmware of sheet of the tool steel on draft mode relative wear resistance of the electrode-tool made of composite materials based on copper-containing Ti₃SiC₂ was 5 times higher than that of pure copper.

Keywords: powder metallurgy, electrical discharge machining, tool-electrode, composite material, copper, Ti₃SiC₂, sintering, infiltration, structure, physical and mechanical properties, erosional-resistance.

Введение

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала в основном под тепловым воздействием импульсов электрической энергии. Следующие друг за другом импульсные разряды производят выплавление и испарение микропорций материала; частицы расплавленного материала выбрасываются из зоны обработки развивающимся в канале разряда давлением, и электрод-инструмент (ЭИ) получает возможность внедряться в обрабатываемую деталь. Электрод-инструмент должен изготавливаться из эрозионностойкого материала, обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов ЭЭО и максимальную производительность, имея малый износ [1]. Разработка новых технологических процессов создания эрозионностойких материалов, обладающих низ-

кой стоимостью и высокой износостойкостью, является весьма важной задачей и имеет большое экономическое значение, так как эрозионный износ электродов-инструментов может быть в 10–100 раз выше, чем объем снятого с детали металла, что значительно снижает эффективность или делает даже нецелесообразным применение метода электроэрозионной обработки [2].

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 [3]. В настоящее время разработаны композиционные материалы на основе меди с дисперсными добавками окислов, боридов, нитридов и бора, позволяющие улучшить эксплуатационные свойства электрода-инструмента [4]. При увеличении доли тугоплавкой составляющей повышается твердость и эрозионная стойкость электрода, но ухудшается электро- и теплопроводность, поэтому оптимизация состава материала может быть связана с повышением электропроводности тугоплавкой фазы. Перспективной тугоплавкой добавкой может быть карбосилицид титана Ti_3SiC_2 благодаря слоистой структуре и удельному электросопротивлению, не зависящему от температуры, как у большинства карбидов [5]. Карбосилицид титана Ti_3SiC_2 относится к семейству тернарных соединений со слоистой структурой с общей формулой $M_{N+1}AX_N$, где $N = 1, 2$ или 3 ; M – легкий переходный металл; A – элемент главной подгруппы (в большинстве случаев IIIA и IVA), а X – углерод или азот. Плотнупакованные слои атомов титана чередуются со слоями атомов кремния, а атомы углерода занимают октаэдрические междуузлия между атомами титана. Более крупные, чем углеродные, атомы кремния располагаются в более просторных треугольных призмах. Соединения $M_{N+1}AX_N$ относятся к новому классу твердых веществ наноструктурных слоистых материалов [6, 7].

Связи титан – углерод обладают исключительной прочностью, так как являются преимущественно металлическими, с ковалентными и ионными составляющими. Связи титан – кремний слабы, что обуславливает высокую подвижность плотноупакованных слоев титана, включающих атомы углерода, и позволяет производить сдвиг слоев в базальной плоскости без макроскопического разрушения

материала [6]. Теплопроводность карбосилицида титана с повышением температуры почти не изменяется в отличие, например, от карбида титана.

Высокая теплопроводность Ti_3SiC_2 обусловлена его хорошей электрической проводимостью; его удельное сопротивление при комнатной температуре составляет 0,21–0,227 мкОм·м. Как и для металлов, удельное сопротивление линейно падает с понижением температуры [5]. Удельное сопротивление Ti_3SiC_2 ниже, чем у титана, и значительно ниже, чем у большинства керамических материалов [8]. Замечательной особенностью карбосилицида титана является независимость его удельного электросопротивления от температуры, как у большинства карбидов¹.

Цель работы – изучение формирования структуры в композиционном порошковом материале медь – карбосилицид титана и исследование эрозионной износостойкости электрода-инструмента из этого материала при электроэрозионной прошивке металлических сплавов.

Методика эксперимента

Для изготовления электродов из композиционных материалов использованы порошки электролитической меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60–75) и карбосилицида титана, полученного методом реакционного спекания. Порошки смешивали в течение 4 ч. Из смесей прессовали образцы при давлении 600 МПа, затем образцы отжигали в вакуумной печи при температуре 700 °С и проводили повторное прессование при 600 МПа. Прессовки окончательно спекали в вакуумной печи при температуре (1070 ± 10) °С 2 ч. Композиционные материалы получали также методом инфильтрации прессовки карбосилицида титана медью при температуре 1200 °С.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Shimadzu-XRD 6000 в $CuK\alpha$ -излучении. Идентификация фазового состава была выполнена по картотеке Международного центра дифрактометрических измерений. Электронно-микроскопические исследования

¹ 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, А.М. Шульпеков, Ю.М. Максимов; патентообладатель Том. науч. центр СО РАН. Заявл. 31.10.2007; опубл. 20.12.2008.

проводили на растровом электронном микроскопе Tescan Vega3 Sem. Плотность композиционных материалов определяли по стандартной методике (ГОСТ 18898–89). Электросопротивление измеряли на цифровом программируемом миллиомметре GOM-802 на образцах размерами $6 \times 6 \times 50$ 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 15А) и E93 (длительность импульса 150 мкс, пауза 32 мкс, сила тока 20А). В качестве рабочей жидкости использовалось масло EDM Oil – IPOL SEO 450.

Относительный износ электрода определяли по отношению глубины прошитого в стали отверстия к линейному износу электрода [9].

Результаты и обсуждение

На дифрактограмме порошка карбосилицида титана (рис. 1, а), обнаружены рефлексы отражений практически от всех идентифицированных плоскостей [10] (табл. 1). На дифрактограмме композиционного материала, кроме меди, присутствуют рефлексы фаз, идентифицированных по работам¹ [10, 11] как Ti_3SiC_2 , Ti_5Si_3 , TiC , SiC , $TiSi_2$ (рис. 1, б, табл. 2), что свидетельствует о частичном разложении карбосилицида и согласуется с данными исследованиями [12].

Межплоскостные расстояния в карбосилициде титана уменьшились. Поскольку карбосилицид имеет слоистое строение с расположением плоскостей Si между плоскостями TiC, то, учитывая слабую связь кремния с титаном, вероятно деинтеркалирование Si из слоев решетки карбосилицида [12, 13].

Межплоскостные расстояния меди немного увеличены, и микротвердость медной матрицы выше, чем чистой меди, что может быть следствием образования твердых растворов кремния в меди (табл. 3). Содержание углерода после спекания уменьшилось примерно на 5 % по сравнению с исходным.

¹ Картоотека Международного центра дифрактометрических измерений (International Center for Diffraction Data). PDF-2. The Powder Diffraction Files, 2001, лицензия № 81200030.

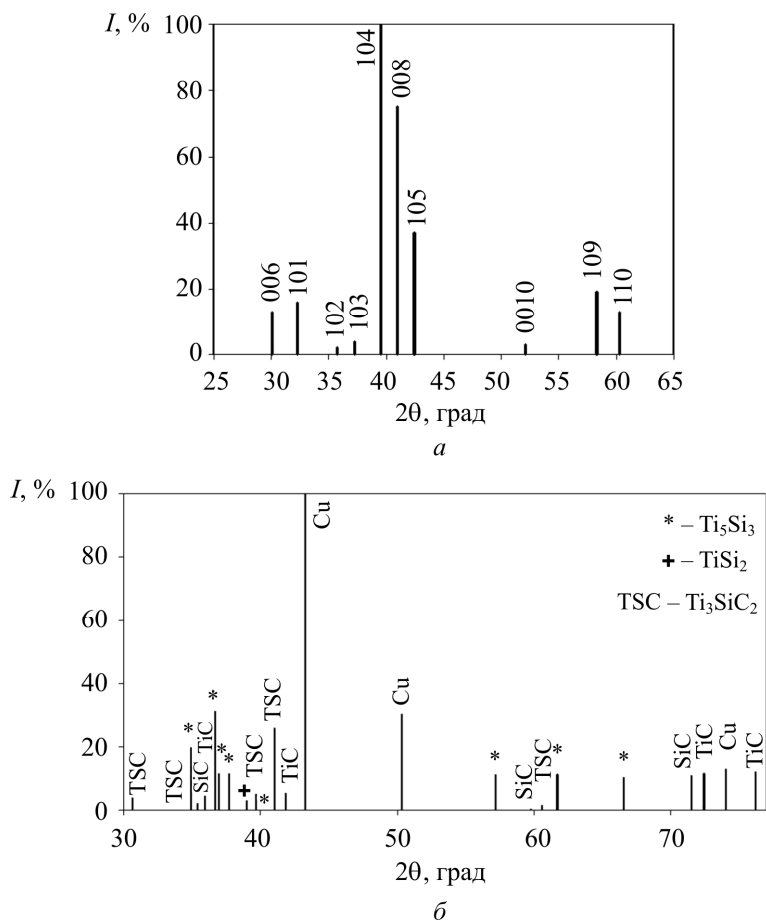


Рис. 1. Штрих-дифрактограммы Ti_3SiC_2 и спеченного порошкового материала медь – 37,5 об. % Ti_3SiC_2

Таблица 1

Межплоскостные расстояния порошка Ti_3SiC_2

Угол $2\theta, ^\circ$	Межплоскостные расстояния, нм	Интенсивность, %	Фаза (hkl)
30,080	0,2975	13	Ti_3SiC_2 (006)
32,257	0,2779	16	Ti_3SiC_2 (101)
35,693	0,2519	2	Ti_3SiC_2 (102)
37,206	0,242	4	Ti_3SiC_2 (103)
39,49	0,22845	100	Ti_3SiC_2 (104)
40,91	0,22093	75	Ti_3SiC_2 (008)
42,42	0,21337	37	Ti_3SiC_2 (105)
52,097	0,17581	3	Ti_3SiC_2 (0010)
58,292	0,15851	19	Ti_3SiC_2 (109)
60,301	0,15367	13	Ti_3SiC_2 (110)

Таблица 2

Межплоскостные расстояния спеченного порошкового материала
медь – 37,5 об. % Ti_3SiC_2

Межплоскостные расст., нм	Интенсивность, %	Фаза (hkl)	Межплоскостные расст., нм	Интенсивность, %	Фаза (hkl)
0,2917	4	$Ti_3SiC_2(006)$	0,20878	100	Cu (111)
0,26441	0,21	$Ti_3SiC_2(101)$	0,18105	30,14	Cu (200)
0,25674	0,25	$Ti_5Si_3(002)$	0,16096	0,24	$Ti_5Si_3(400)$
0,25672	19,72		0,16096	11,34	
0,2521	2	SiC	0,15448	0,46	SiC
0,24937	4,5	TiC	0,15270	1,46	$Ti_3SiC_2(110)$
0,24482	31,07	$Ti_5Si_3(210)$	0,15016	11,07	$Ti_5Si_3(222)$
0,24425	0,4		0,15013	0,19	
0,24285	11,52	$Ti_5Si_3(102)$	0,14030	10,44	$Ti_5Si_3(213)$
0,23828	0,31		0,13181	0,186	SiC
0,23823	11,56		0,13174	11,04	
0,23052	2,98	$TiSi_2(311)$	0,13035	0,37	TiC
0,22688	5,18	$Ti_3SiC_2(104)$	0,13034	11,63	
0,21973	1,21	$Ti_5Si_3(211)$	0,12790	12,94	Cu (220)
0,21964	25,97	$Ti_3SiC_2(008)$	0,12478	12,19	TiC
0,21571	5,46	TiC	0,12473	0,27	

Таблица 3

Микротвердость и содержание углерода в КМ
после спекания Ti_3SiC_2

Кол-во Ti_3SiC_2 , об. %	HV, МПа	Содержание углерода, мас. %
12,5	1070 ± 50 (медь) 4870 ± 100 (Ti_3SiC_2)	0,67
37,5	1070 ± 40 (медь) 5850 ± 100 (Ti_3SiC_2)	2,4

Энергодисперсионный анализ показал, что после твердофазного спекания системы медь – карбосилицид титана взаимодействие с медью приводит к превращению части зерен карбосилицида титана в карбид титана, карбид кремния, силицид титана $TiSi_2$ и твердый раствор углерода на базе силицида титана $Ti_5Si_3(C)$, имеющий неравномерную окраску по зерну (рис. 2). В зернах карбосилицида титана содержание кремния ниже стехиометрического примерно на 14 % ввиду деинтеркаляции кремния (табл. 4).

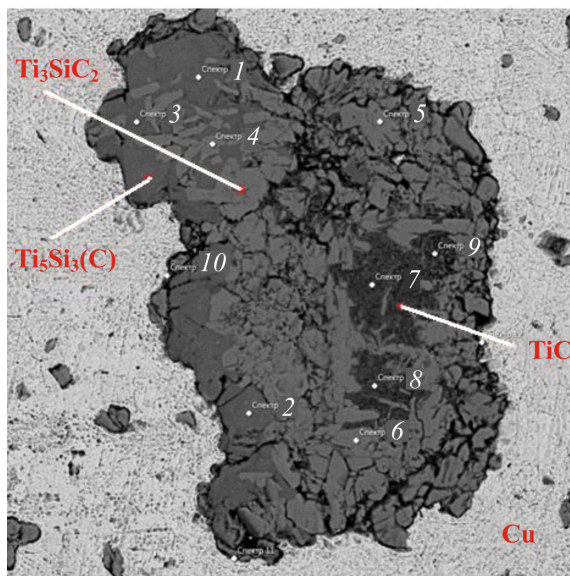


Рис. 2. Микроструктура материала медь – карбосилицид титана

Таблица 4

Элементный состав спеченного материала медь – карбосилицид титана

Номер спектра	Si	Ti	Cu	Фаза
1	25,84	70,77	2,66	Ti ₅ Si ₃ (C)
2	25,45	70,34	3,53	Ti ₅ Si ₃ (C)
3	25,51	71,53	2,23	Ti ₅ Si ₃ (C)
4	8,88	68,79	22,33	Ti ₃ SiC ₂ + Cu
5	8,79	68,83	22,38	Ti ₃ SiC ₂ + Cu
6	8,45	69,05	22,50	Ti ₃ SiC ₂ + Cu
7	0,41	92,82	6,14	TiC
8	0,78	90,11	8,62	TiC
9	2,66	86,46	10,64	TiC
10	6,63	68,51	24,12	TiC
11	6,19	20,87	68,45	Cu
12	4,11	26,45	64,79	Cu

Особенностями формирования структуры материала медь – карбосилицид титана при спекании является, во-первых, образование наряду с TiSi₂ силицида Ti₅Si₃.

Во-вторых, рефлексы отражений от большинства плоскостей Ti₅Si₃ раздвоены и межплоскостные расстояния немного отличаются от таб-

личных, что, скорее всего, связано с образованием твердых растворов внедрения углерода $Ti_5Si_3(C)$, что уже фиксировали в работе [14] при спекании данного карбосилицида. Меди в зернах силицида содержится не более 2 %, что согласуется с данными о том, что силицид не взаимодействует с медью (растворимость не более 3 %) ¹. Карты распределения элементов показали, что медь (до 20 %) в композиционном материале занимает дисперсные поры (диаметром меньше 1 мкм) в ламелеобразных зернах карбосилицида титана (рис. 3).

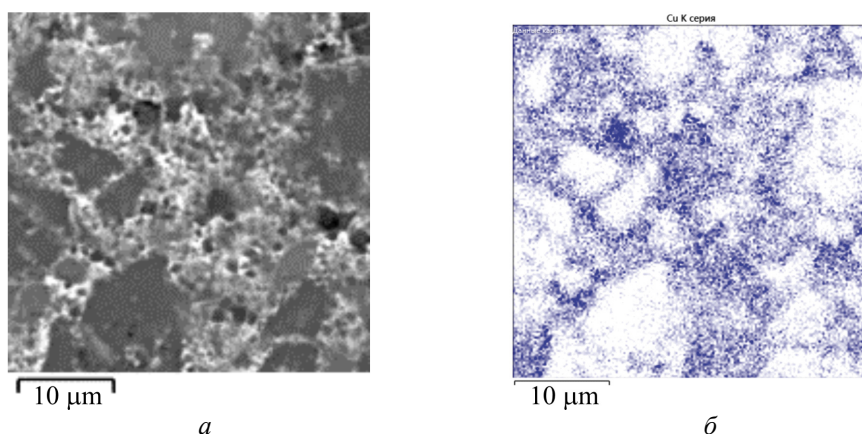


Рис. 3. Микроструктура карбосилицида титана, спеченного с медью (а) и карта распределения меди на участке микроструктуры (б)

Для исследования физико-химического взаимодействия были изготовлены композиционные материалы путем инфильтрации медью спеченного методом плазменно-искрового спекания порошка карбосилицида титана. Пористость спеченного карбосилицида титана была 11 %, после инфильтрации медью расчеты показали заполнение пор медью на 100 %. Исследования микроструктуры также выявили заполненные медью поры. Угол смачивания карбосилицида титана медью при температуре 1200 °С в вакууме составил 28,5° (рис. 4).

Элементный анализ диффузионной пары карбосилицид титана – медь показал плавное уменьшение содержания меди от межфазной границы (рис. 5). Содержания кремния и титана при приближении к границе понижаются.

¹ Картоотека Международного центра дифрактометрических измерений (International Center for Diffraction Data).

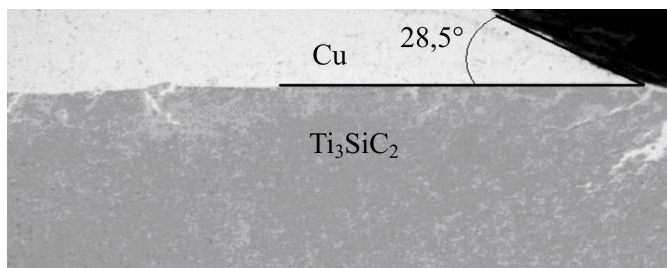
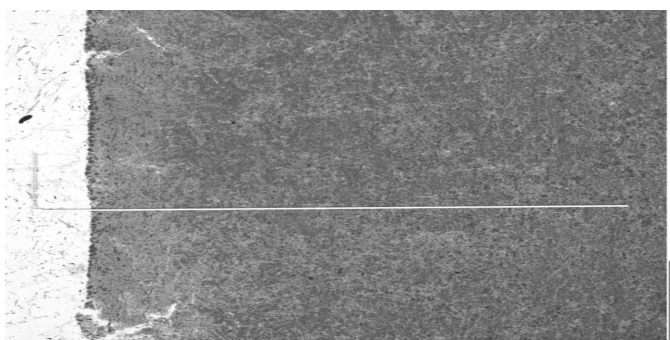
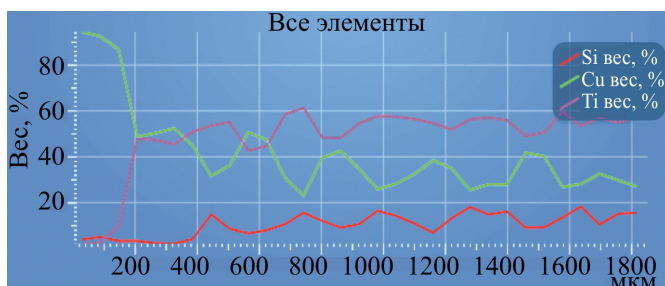


Рис. 4. Угол смачивания карбосилицида титана медью при температуре 1200 °С в вакууме



а



б

Рис. 5. Профиль линии карбосилицида титана, пропитанного медью (а), и распределение элементов в системе медь – карбосилицид титана, пропитанный медью (б): в сечении по линии на рисунке, а: титан (верхняя), медь (средняя), кремний (нижняя)

Как и в случае твердофазного спекания, в карбосилициде формируются три типа зерен: карбида титана; карбосилицида титана с соотношением масс кремния и титана равным 0,13, близким к стехиометрии; области с высоким соотношением масс кремния и титана равным

0,34, характерным для силицида титана Ti_5Si_3 . Светлые участки относятся к меди. Вблизи границы диффузионной зоны со стороны меди содержится кремний в количестве до 13 мас. %, в зернах карбосилицида титана меньше кремния, но больше меди, возможно, что кремний удаляется при деинтеркаляции, а медь заполняет дисперсные поры при образовании жидкой фазы.

При увеличении концентрации карбосилицида титана с 12,5 до 37,5 об. % в меди пористость повышалась незначительно, так как между медью и карбосилицидом титана имеется физико-химическое взаимодействие, благоприятное для спекания; прочность при изгибе и твердость значительно увеличились. Электросопротивление композиционного материала увеличивалось при повышении концентрации карбосилицида титана, так как при спекании примерно половина карбосилицида превратилась в неэлектропроводный силицид титана (табл. 5).

Таблица 5

Свойства порошкового спеченного материала
медь – карбосилицид титана

Концентрация Ti_3SiC_2 , об. %	Пористость, %	НВ, МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	ρ , Ом·м	Относительный эрозионный износ, %	
					Режим E81	Режим E93
0	0	400	500	0,021	5,6	6,9
12,5	2	650	280	0,06	3,2	5,2
25,0	6	770	300	0,010	–	–
37,5	7	800	340	0,014	1,0	4,0

Износ электродов медь – карбосилицид титана при электроэрозионной прошивке на обоих испытанных режимах был меньше, чем у чистой меди (см. табл. 5). Хорошие эксплуатационные свойства обусловлены низкой пористостью, структурой, образующей наноразмерные капилляры для удержания расплава меди, и постоянством электросопротивления карбосилицида титана в диапазоне температур при электроэрозионной обработке.

Выводы

При спекании композиционного материала медь – карбосилицид титана происходит частичное превращение карбосилицида в твердый раствор $Ti_5Si_3(C)$ и небольшие количества карбида титана, карбида

кремния, силицида титана $TiSi_2$, а содержание меди в зернах карбосилицида достигает 20 %. Возможно изготовление композиционного материала с высоким содержанием карбосилицида титана методом инфльтрации медью.

Карбосилицид титана, впервые примененный для изготовления электрода-инструмента для электроэрозионной прошивки, показал перспективные свойства. При повышении концентрации в меди карбосилицида титана с 12,5 до 37,5 об. % пористость композиционного материала повышается незначительно, а твердость и прочность возрастают. Относительная эрозионная стойкость электродов из композиционных порошковых материалов медь – карбосилицид титана при прошивке инструментальной стали на черновом режиме в 5–6 раз ниже, чем у электрода из чистой меди.

В изготовлении образцов для исследований принимал участие студент Пермского национального исследовательского политехнического университета О.П. Морозов.

Список литературы

1. Серебrenицкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 228 с.
2. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Состояние и перспективы развития наукоемких технологий машиностроительного производства // Металлообработка. – 2010. – № 2. – С. 9–17.
3. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники; под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.
4. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. 1. – 247 с.
5. Nickl J.J., Schweitzer K.K., Luxenberg P. Gasphasenabscheidung im systeme Ti-C-Si // J. Les Common Metals. – 1972. – Vol. 26. – P. 382–389.
6. Barsoum W. The $Mn+iAX_n$: A new class of solids; thermodynamically stable nanolaminates // Prog. Solid St. Chem. – 2000. – Vol. 28. – P. 201–281.

7. Kisi E.H., Crossley A.A. Structure and crystal chemistry of Ti_3SiC_2 // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1998. – Vol. 59, № 9. – P. 1437–1443.
8. Косолапова Т.Я. Карбиды. – М.: Metallurgiya, 1968. – 300 с.
9. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
10. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Физматлит, 1961. – 863 с.
11. Kero I. Ti_3SiC_2 . Synthesis by powder metallurgical methods // Licentiate thesis / Luleå University of Technology. – 2007. – № 34. – P. 971–987.
12. Yanchun Zhou, Wanli Gu. Chemical reaction and stability of Ti_3SiC_2 in Cu during high-temperature processing of Cu/ Ti_3SiC_2 composites // Zeitschrift für Metallkunde. – 2004. – Vol. 95, № 1. – P. 50–56.
13. Tungwai L. Ngai, Wei Zheng, Yuanyuan Li. Effect of sintering temperature on the preparation of Cu– Ti_3SiC_2 metal matrix composite // Progress in Natural Science: Materials International. – 2013. – Vol. 23(1). – P. 70–76.
14. Надуткин А.В. Изучение процессов синтеза Ti_3SiC_2 и формирования конструкционной керамики на его основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2007. – 16 с.
15. Двойные и многокомпонентные системы меди / под ред. С.В. Шухардина. – Наука, 1979. – 248 с.

References

1. Serebrenitskii P.P. Sovremennyye elektroerozionnyye tekhnologii i oborudovanie [Contemporary EDM technology and equipment]. Saint Petersburg: Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 228 p.
2. Eliseev Iu.S., Saushkin B.P. Sostoianie i perspektivy razvitiia naukoemkikh tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva [The state and prospects of development of high technologies of machine-building production]. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 2, pp. 9-17.
3. Eliseev Iu.S., Saushkin B.P. Elektroerozionnaia obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosive treatment of the products of aviation and space technology]. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2010. 437 p.
4. Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials]. Ed. V.P. Smolentseva. Moscow: Vysshaya shkola, 1983. Vol. 1. 247 p.

5. Nickl J.J., Schweitzer K.K., Luxenberg P. Gasphasenabscheidung im systeme Ti-C-Si. *Journal Les Common Metals*, 1972, vol. 26, pp. 382-389.
6. Barsoum W. The Mn+iAX_n: A new Class of Solids; Thermodynamically Stable Nanolaminates. *Progress in Solid State Chemistry*, 2000, vol. 28, pp. 201-281.
7. Kisi E.H., Crossley A.A. Structure and crystal chemistry of Ti₃SiC₂. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1998, vol. 59, no. 9, pp. 1437-1443.
8. Kosolapova T.Ia. Карбиды [Carbides]. Moscow: Metallurgii, 1968. 300 p.
9. Foteev N.K. Tekhnologiya elektroerozionnoi obrabotki [The technology of electrical discharge machining]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 184 p.
10. Mirkin L.I. Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov [Handbook of X-ray structural analysis of polycrystals]. Moscow: Fizmatlit, 1961. 863 p.
11. Kero I. Ti₃SiC₂. Synthesis by Powder Metallurgical Methods. *Licentiate thesis*. Luleå University of Technology, 2007, no. 34, pp. 971-987
12. Yanchun Zhou, Wanli Gu. Chemical reaction and stability of Ti₃SiC₂ in Cu during high-temperature processing of Cu/Ti₃SiC₂ composites. *Zeitschrift für Metallkunde*, 2004, vol. 95, no. 1, pp. 50-56.
13. Tungwai L. Ngai, Wei Zheng, Yuanyuan Li. Effect of sintering temperature on the preparation of Cu–Ti₃SiC₂ metal matrix composite. *Progress in Natural Science. Materials International*, 2013, vol. 23(1), pp. 70-76.
14. Nadutkin A.V. Izuchenie protsessov sinteza Ti₃SiC₂ i formirovaniia konstruktsionnoi keramiki na ego osnove [The study of the processes of synthesis and formation of Ti₃SiC₂ construction yard-Noah ceramics based on it]. Ph. D. thesis. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 16 p.
15. Shukhardina S.V. Dvoinye i mnogokomponentnye sistemy medi [Binary and multicomponent systems copper]. Moscow: Nauka, 1979. 248 p.

Получено 30.01.2016

Сведения об авторах

Оглезнева Светлана Аркадьевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Гилев Виктор Григорьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научного центра порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: xray@pm.pstu.ac.ru.

Оглезнев Никита Дмитриевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: fastrex@mail.ru.

About the authors

Svetlana A. Oglezneva (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Materials, Technologies and Construction of Machines”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Victor G. Gilev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific Center of Powder Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: xray@pm.pstu.ac.ru.

Nikita D. Ogleznev (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department “Materials, Technologies and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: fastrex@mail.ru.