

DOI: 15593/2224-9877/2017.3.11

УДК 621.762-621.923.74

Н.Д. Оглезнев, С.А. Оглезнева, Л.М. Гревнов, Т.Р. АблязПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ
ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ
И КАРБИДА, КАРБОНИТРИДА, КАРБОСИЛИЦИДА ТИТАНА**

Целью работы являлось исследование микроструктуры и свойств электродов-инструментов из порошковых композиционных материалов для электроэрозионной обработки на основе меди, содержащих карбид, карбонитрид, карбосилицид титана.

Для изготовления композиционных материалов на основе меди с различным содержанием тугоплавкой фазы использована технология порошковой металлургии. При спекании систем медь – карбид титана и медь – карбонитрид титана химического взаимодействия не наблюдалось, в системе медь – карбосилицид титана установлена диссоциация карбосилицида титана на силициды титана $Ti_5Si_3(C)$ и $TiSi_2$, карбиды кремния и титана. Карбосилицид при этом обеднялся кремнием, который диффундировал в медь с образованием твердых растворов.

Установлено, что при увеличении концентрации тугоплавкой добавки от 12,5 до 80 об. % повышается твердость и прочность композиционных материалов, а также удельное электросопротивление. Наименьшая пористость (6 %) была в материалах, содержащих карбосилицид титана, независимо от его количества. Прочность на изгиб была в два раза выше в содержащих карбосилицид титана псевдосплавах, чем в материалах, содержащих карбид и карбонитрид титана.

Относительный износ ЭИ на черновых режимах электроэрозионной обработки инструментальной стали показал, что все исследованные системы обладают лучшей износостойкостью, чем чистая медь и материал медь – карбид вольфрама. Точность электроэрозионной обработки материалом медь – карбосилицид титана была выше, чем при обработке чистой медью и другими исследованными материалами. Наименьший относительный износ при прошивке титана наблюдали при использовании медного электрода, содержащего зерна карбида титана в количестве 12,5 об. %.

Ключевые слова: медь, карбид, карбонитрид, карбосилицид титана, композиционный материал, электрод-инструмент, электроэрозионная обработка, прочность, твердость, электросопротивление, эрозионная стойкость.

N.D. Ogleznev, S.A. Oglezneva, L.M. Grevnov, T.R. Ablyaz

Perman National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND RELATIVE
EROSION RESISTANCE OF ELECTRODES-TOOLS MADE
FROM POWDER MATERIALS BASED ON COPPER
AND CARBIDE, CARBONITRIDE, TUNGSTEN CARBOSILICIDE
OF TITANIUM**

The purpose of the research was to study the physical, mechanical and operational properties of electrode tools made from composite materials based on copper with the addition of carbide, carbonitride, titanium carbosilicide in the erosion of tool steel.

Composite materials based on copper with different contents of the refractory phase were made by powder metallurgy. During the sintering of the systems "copper-titanium carbide" and "copper titanium carbonitride" chemical interaction was not observed, in the copper-carb-silicate titanium system, dissociation of the compound was established de-silicization from titanium carbosilicide grains, part of titanium carbosilicide grains was converted to a solid solution of carbon based on Titanium silicide $Ti_5Si_3(C)$ and small amounts of titanium carbide, silicon carbide and titanium silicide $TiSi_2$.

It was found that with an increase in the concentration of the refractory additive from 12.5 to 80 vol.% increases the hardness and strength of composite materials, as well as the electrical resistivity. The lowest porosity (6%) was in materials containing titanium carbosilicide, regardless of its content. The flexural strength was 2 times higher in systems with titanium carbosilicide in comparison with carbide and titanium carbonitride.

When investigating the relative wear of the EI during the piercing of tool steel on draft modes, it was established that all the systems studied have better wear resistance than pure copper and copper-tungsten carbide material. The accuracy of the treatment with copper-carbolicidal titanium was higher than with pure copper and other materials studied. The least relative wear during titanium insertion was observed when using an electrode "copper-12 vol.% Titanium carbide".

Keywords: electroerosion treatment, electrode-tool, composite material, copper, carbide, carbonitride, titanium carbosilicide, strength, hardness, electrical resistivity, erosion resistance.

Введение

Самые распространенные материалы электродов для электроэрозионной обработки (ЭЭО) изготавливают на основе меди. Однако анализ литературы показывает, что износостойкость композиционных материалов для электродов-инструментов (ЭИ) недостаточно высока, а механизмы износа и улучшения износостойкости материалов для электроэрозионной обработки практически не изучены.

Поскольку условия работы электродов-инструментов для прошивки весьма сходны с условиями работы электрических контактов, большинство закономерностей формирования структуры и механизмов работы электроконтактных материалов могут быть применимы для

электродов-инструментов при электроэрозионной обработке. Наиболее предпочтительными считают композиционные материалы, содержащие смесь электропроводной и тугоплавкой фаз. При расплавлении такой системы жидкий металлический сплав удерживается в капиллярной пористой системе тугоплавкого каркаса с помощью сил поверхностного натяжения Лапласа. Тугоплавкая фаза должна быть механически прочной, а ее электропроводность не имеет значения; легкоплавкая фаза должна смачивать тугоплавкую фазу; тугоплавкая и легкоплавкая фазы не должны взаимодействовать между собой [1]. При кристаллизации композиционного материала (КМ) легкоплавкая фаза кристаллизуется на поверхностях зерен тугоплавкой фазы. Известными составами материалов для электроконтактов и ЭИ, получаемых из порошков, являются системы на основе меди или серебра с добавлением W, Mo, C, Ni, WC, Zr₂O₃, TiO₂, CdO, ZnO, SnO, Al₂O₃ и др. [2–4]. Таким образом, улучшение эксплуатационных свойств электродов может быть выполнено при добавлении тугоплавких фаз.

Исходя из этого цель работы – исследование микроструктуры и свойств электродов-инструментов из порошковых композиционных материалов для электроэрозионной обработки на основе меди, содержащих карбид, карбонитрид, карбосилицид титана.

Методика эксперимента

Электроды были изготовлены методом порошковой металлургии из порошков меди ПМС-1 (ГОСТ 49-60–75) и порошков тугоплавких фаз: карбида титана углетермического (ТУ 6-09-492–75), карбонитрида титана КНТ-20-80 (ТУ МИХМ–2009), ВК-8 (8 % кобальта и 92 % карбида вольфрама) (ГОСТ 3882–74), карбосилицида титана (синтезированного Институтом химии КомиНЦ УрО РАН реакционным спеканием) [5]. Порошки металла и тугоплавких соединений смешивали в смесителе, затем из смесей прессовали электроды в виде параллелепипедов, далее спрессованные образцы спекали в вакуумной печи с промежуточными допрессовками и окончательно спекали в вакуумной печи при температуре (1070 ± 10) °С 2 ч.

Микроструктуру композиционных материалов после спекания изучали на полированных и травленных шлифах, а также в изломах при помощи оптического микроскопа AXIOVERT 40 MAT при увеличении 50–500 и электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 SEM,

оснащенного энергодисперсионным спектрометром X-Max 50. Содержание углерода в композиционных материалах определяли с соответствием с ГОСТ 12344–88 на приборе «АУС-8144».

Фазовый состав исследовали рентгенофазовым анализом с использованием дифрактомета XRD-6000 Shimadzu в $K_{\alpha}Cu$ -излучении. Расшифровку дифрактограмм выполняли по справочным таблицам [6].

Плотность композиционных материалов измеряли по ГОСТ 18898–89. Электросопротивление определяли на миллиомметре GOM-802. Твердость спеченных КМ измеряли с помощью прессы Бриелля в соответствии с ГОСТ 9012–59. Изучение прочностных характеристик образцов без нанесения трещины на трехточечный изгиб производили на машине FP 10/1 по ГОСТ 18227–85.

Эксплуатационные свойства ЭИ испытывали на станке Electronica Smart CNC при электроэрозионной прошивке стали X12Ф с использованием масла EDM Oil – IPOL SEO 450 в качестве рабочей жидкости.

Шероховатость обработанной поверхности измеряли с помощью профилометра Mahr Perthometer S2 по ГОСТ 2789–73.

Производительность ЭИ при ЭЭО вычисляли по отношению времени работы инструмента к объему выработанного материала (mm^3/min). Относительный износ электрода рассчитывали по отношению глубины отверстия в стали к линейному износу электрода [4].

Результаты и обсуждение

Данные рентгенофазового анализа показали в составе композиционных материалов, содержащих карбид или карбонитрид титана, медь и соответствующее соединение титана, что свидетельствует об отсутствии взаимодействия в системах при спекании.

В составе композиционного материала с карбосилицидом титана обнаружены фазы меди, карбосилицид титана Ti_3SiC_2 , силициды титана Ti_5Si_3 и $TiSi_2$, карбиды титана и кремния TiC и SiC соответственно, что не противоречит данным работ [6–8] и согласуется с данными исследований [9, 10] о частичном разложении карбосилицида титана.

В структуре спеченных КМ различимы медная матрица и керамические тугоплавкие частицы (рис. 1). После спекания количество углерода в материалах, содержащих карбид и карбонитрид титана, не изменилось, а в материалах, содержащих карбосилицид титана, понизилось на 5 % по сравнению с исходным (табл. 1).

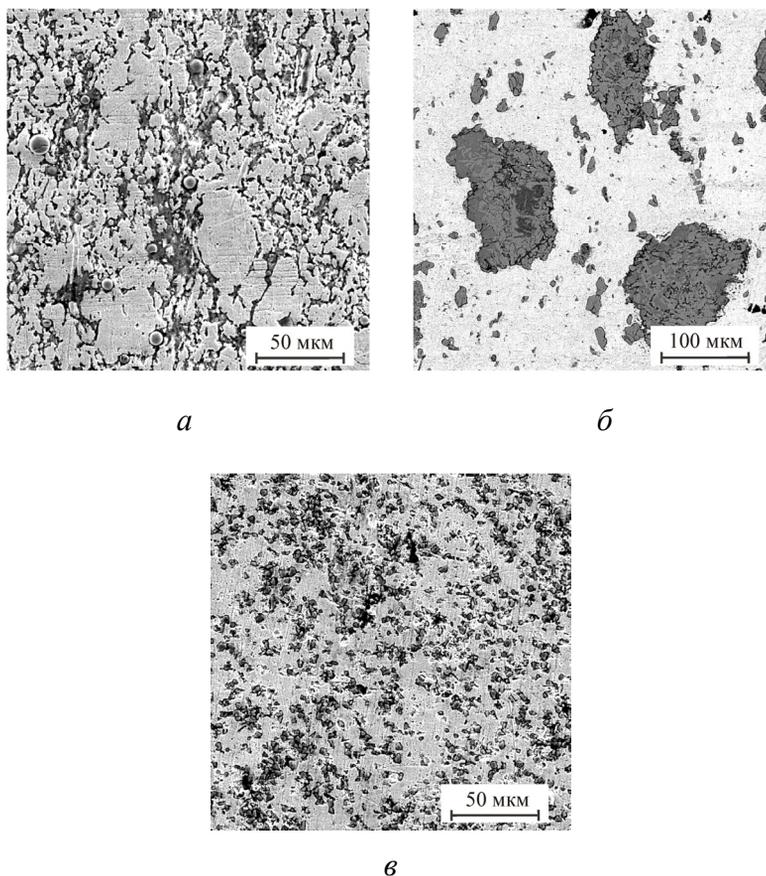


Рис. 1. Микроструктура спеченных порошковых композиционных материалов на основе меди, содержащих 37,5 об. %: *а* – карбонитрида титана; *б* – карбосилицида титана; *в* – карбида титана

В спеченных КМ на основе меди, содержащих карбонитрид титана, микротвердость основы (меди) практически не зависела от количества тугоплавкой добавки (см. табл. 1) ввиду отсутствия взаимодействия меди с керамическими частицами. Микротвердость медной основы в материалах, содержащих карбид титана, возрастала при снижении концентрации карбида титана (см. табл. 1).

Микротвердость медной основы в материалах, содержащих карбосилицид титана, была значительно более высокой, чем в псевдосплавах с карбидом и карбонитридом титана, но от концентрации карбосилицида титана не зависела. Наблюдалась более высокая микротвердость частиц карбосилицида в материалах с более высокой его концентрацией.

Таблица 1

Содержание углерода и микротвердость КМ после спекания

Концентрация тугоплавкой фазы, об. %	Концентрация углерода, мас. %	HV, МПа
12,5 TiCN	1,02	970 ± 50
25 TiCN	2,15	940 ± 40
37,5 TiCN		940 ± 40
12,5 Ti ₃ SiC ₂	0,67	1070 ± 50 (медь) 4870 ± 100 (Ti ₃ SiC ₂)
37,5 Ti ₃ SiC ₂	2,4	1070 ± 40 (медь) 5850 ± 100 (Ti ₃ SiC ₂)
12,5 TiC	1,25	1340 ± 55
25 TiC	2,6	1110 ± 50
37,5 TiC	4,35	1010 ± 40

Исследования материалов, содержащих соединения титана, были проведены в сравнении с известными составами медь – карбид вольфрама.

Пористость спеченных КМ увеличивалась с увеличением доли тугоплавких частиц, так как количество металлических контактов при спекании уменьшалось, поэтому в системах, содержащих карбиды вольфрама, титана и карбонитрид титана, не взаимодействующих с медью, пористость была достаточно высокой [11], а наименьшую пористость наблюдали в материалах, содержащих карбосилицид титана, отличающихся физическим и химическим взаимодействием (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические свойства КМ

Концентрация тугоплавкой фазы, об. %	Пористость после спекания, %	Твердость HV, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа
12,5 TiC	6	590 ± 20	150 ± 30
25 TiC	8	650 ± 20	150 ± 30
37,5 TiC	14	650 ± 20	160 ± 30
12,5 Ti ₃ SiC ₂	3	620 ± 20	250 ± 20
37,5 Ti ₃ SiC ₂	6	750 ± 30	300 ± 30

Окончание табл. 2

Концентрация тугоплавкой фазы, об. %	Пористость после спекания, %	Твердость НВ, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа
12,5 TiCN	12	650 ± 20	Не опр.
25 TiCN	13	790 ± 30	150 ± 30
37,5 TiCN	14	Не опр.	110 ± 10
12,5 WC	11	Не опр.	Не опр.
25 WC	13	770 ± 40	250 ± 20
37,5 WC	22	880 ± 60	300 ± 30

В соответствии с правилом аддитивности свойств КМ повышение содержания керамических фаз, обладающих высоким удельным электросопротивлением, а также пористостью, привели к повышению удельного электросопротивления композиционного материала (рис. 2).

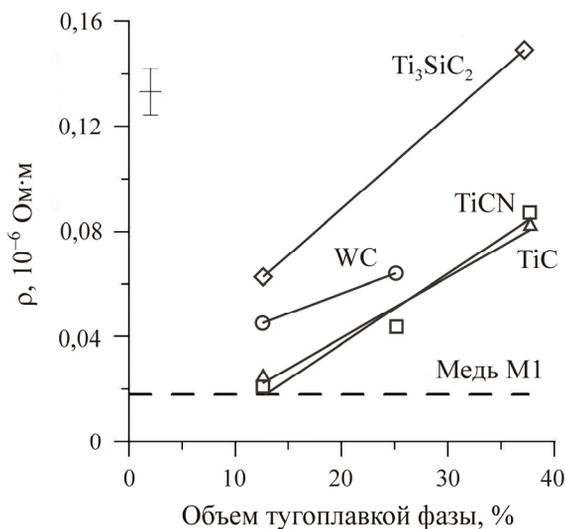


Рис. 2. Удельное электросопротивление композиционных материалов на основе меди, содержащих карбосилицид титана, карбонитрид титана, карбид титана, карбид вольфрама

В материалах с карбидами вольфрама и титана, а также с карбонитридом титана электросопротивление было меньше, чем в материалах с карбосилицидом титана, и при увеличении количества тугоплавкой добавки изменялось незначительно, так как в этих системах не бы-

ло взаимодействия тугоплавких частиц с медью и рост электросопротивления был обусловлен только сокращением количества меди в композиционном материале.

В системе, где имеется химическое взаимодействие керамических частиц карбосилицида титана с медью, образование твердых растворов и неэлектропроводных фаз также оказало влияние на увеличение значения электросопротивления КМ, что согласуется с данными работы [11].

Твердость спеченных КМ увеличивалась пропорционально увеличению твердости и концентрации тугоплавких и твердых керамических частиц (см. табл. 2), особенно в КМ, содержащих карбосилицид титана и карбид вольфрама.

Поскольку в системах медь – карбид вольфрама и медь – карбосилицид титана есть смачивание [12], а во второй системе имеет место образование твердых растворов и инфильтрация [10, 12–14], то прочность на изгиб этих материалов была наиболее высокой (см. табл. 2). В системах на основе меди с карбидом и карбонитридом титана нет взаимодействия на межфазной границе [12], поэтому здесь была высокая пористость и низкая прочность на изгиб (см. табл. 2).

Относительный износ разработанных электродов из КМ, по сравнению с относительным износом ЭИ из чистой меди марки М1, был меньше при обоих режимах прошивки (характеристики режимов представлены в табл. 3) (рис. 3, а, б).

Таблица 3

Режимы ЭЭО

Параметры	Режим E81	Режим E92
Напряжение, В	50	50
Сила тока, А	15	20
Скважность	1,32	1,82
Частота, Гц	10	6,67

Хотя тенденции изнашивания ЭИ на обоих режимах одинаковы, по абсолютному значению износ больше на более грубом режиме E92. Износ электродов в системе с карбидом вольфрама при увеличении его концентрации в меди от 12,5 до 25 % уменьшался на обоих режимах

ЭЭО (см. рис. 3), так как в этой системе формируется каркас из тугоплавких частиц, который смачивается расплавленной медью и удерживает ее с помощью капиллярного взаимодействия [13]; повышение концентрации частиц твердой фазы приводит к образованию более мелких капилляров с высокими значениями удельной поверхности тугоплавкого каркаса и сил поверхностного натяжения. В системах с карбидом и карбонитридом титана, наоборот, относительный износ электродов на обоих режимах ЭЭО увеличивался с повышением их концентрации (см. рис. 3, *а, б*), так как поверхности этих тугоплавких фаз не смачиваются расплавленной медью [12]. Однако в КМ, содержащих малые количества частиц карбида или карбонитрида титана (12,5 об. %), относительный износ ЭИ был в два раза меньше, чем у чистой меди, что связано с наличием центров кристаллизации жидкой меди на частицах керамики.

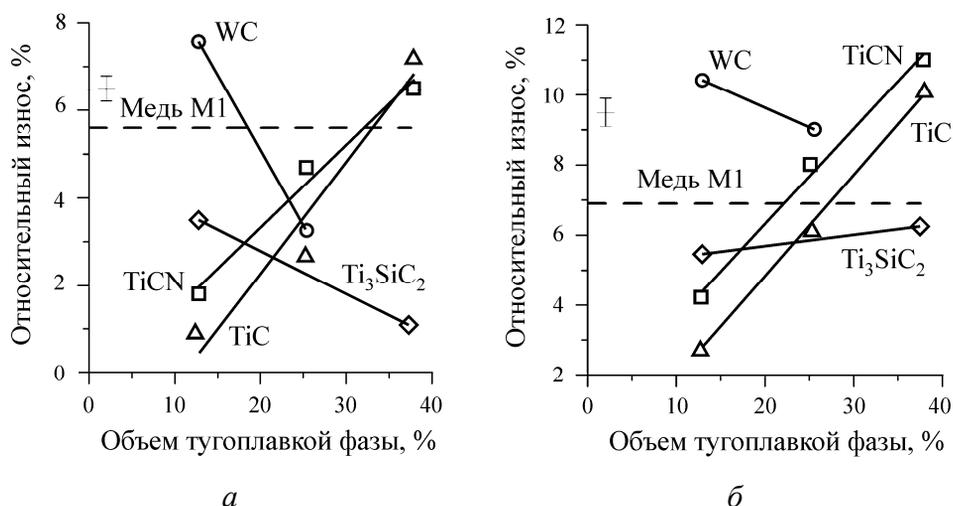


Рис. 3. Относительный износ электродов систем медь – соединение титана в зависимости от содержания тугоплавкой фазы: *а* – режим E81; *б* – режим E92

Хорошие эксплуатационные свойства установлены у ЭИ, содержащих Ti_3SiC_2 , на обоих режимах испытаний. Относительный износ данных составов был меньше, чем у ЭИ из меди, особенно на режиме E81 (см. рис. 3). Улучшение свойств обеспечивалось за счет низкой пористости электрода, а также слоистой наноструктуры карбосилицида титана, служащей капиллярами для удержания расплавленной меди.

Кроме того, меньший износ может быть связан с высокими свойствами проводимости карбосилицида при высоких температурах в процессе ЭЭО.

Производительность обработки ЭИ с карбосилицидом титана была значительно ниже, чем медных. Производительность ЭИ, содержащих невысокие концентрации керамических тугоплавких частиц, была сопоставима с производительностью из чистой меди (составы с карбидом и карбонитридом титана) (табл. 4).

Таблица 4

Точность обработки, шероховатость поверхности, производительность электродов на основе меди при электроэрозионной прошивке стали Х12Ф

Количество тугоплавкой добавки к меди, об. %	Отклонение на сторону, мкм	Ra, мкм	Производительность, мм ³ /мин	
			Е81	Е92
12,5 TiC	0,3–0,2	12	45	37,7
25 TiC	Не опр.	Не опр.	33	Не опр.
37,5 TiC	Не опр.	Не опр.	11	12,3
12,5 TiCN	0,1–0,15	16,5	32	48
25 TiCN	0,1–0,15	15,5	28	14
37,5 TiCN	0,1–0,2	11,5	12	10
12 Ti ₃ SiC ₂	Не опр.	Не опр.	18	11
25 Ti ₃ SiC ₂	0,1–0,1	5	Не опр.	Не опр.
37,5 Ti ₃ SiC ₂	Не опр.	Не опр.	6	8
12,5 WC	0,1–0,15	15	Не опр.	Не опр.
25 WC	0,2–0,5	11,5	Не опр.	Не опр.
Без добавок	0,15–0,15	14	34,7	49,7

Точность обработки (отклонение на сторону) и шероховатость обработанных поверхностей при прошивке инструментальной стали Х12Ф на режиме Е81 была не хуже, чем при ЭЭО медным электродом, более высокая точность достигалась на составах с карбонитридом титана и карбосилицидом титана (см. табл. 4).

Наименьший параметр шероховатости поверхности Ra отверстия был после обработки ЭИ, содержащим карбосилицид титана (см. табл. 4).

Известно, что точность обработки напрямую зависит от высокой износостойкости электродов, поэтому достаточным комплексом эксплуатационных свойств обладают составы ЭИ, содержащие карбосилицид титана.

Разработанные электроды системы медь – карбид титана были испытаны при прошивке титанового сплава (табл. 5).

Таблица 5

Производительность и относительный износ электродов при электроэрозионной прошивке сплава BT5

Состав электрода	Производительность, мм ³ /мин	Относительный износ, %
Cu + 12,5 об. % TiC	1,8	66
Медь M1	1,5	100

Износ ЭИ из КМ был значительно выше, чем при прошивке стали, что является характерным для ЭЭО титана, однако меньше, чем износ электрода из меди при сопоставимых показателях производительности обработки

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При спекании систем медь – карбид титана и медь – карбонитрид титана химического взаимодействия между фазами не обнаружено, в системе медь – карбосилицид титана наблюдали диссоциацию карбосилицида титана с образованием твердых растворов кремния в меди.

2. Пористость была наименьшей в системе медь – карбосилицид титана благодаря химическому взаимодействию с медью по этой же причине, однако и электросопротивление было самым высоким среди разработанных КМ; в системах с карбидом и карбонитридом титана с увеличением доли тугоплавкой фазы увеличивалась пористость, электросопротивление в этих системах было меньше, чем в известной системе медь – карбид вольфрама.

3. Прочность на изгиб была в два раза выше в системах с карбосилицидом титана по сравнению с карбидом и карбонитридом титана.

4. Установлено, что системы на основе меди, содержащие карбид титана, карбонитрид титана и карбосилицид титана, обладают лучшей износостойкостью при прошивке инструментальной стали на черновых режимах, чем чистая медь и материал медь – карбид вольфрама. Точность обработки материалом медь – карбосилицид титана была выше, чем при обработке чистой медью и другими исследованными материалами.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-5310.2016.8.

Список литературы

1. Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства. – М.: Изд-во Моск. гос. индустр. ун-та, 1999. – 206 с.
2. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / Б.Н. Бабич, Е.В. Вершинина, В.А. Глебов [и др.]; под ред. Ю.В. Левинского. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с.
3. Temborius S., Lindmayer M., Gentsch D. Switching behavior of different contact materials for vacuum interrupters under load switching conditions // XIX International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – 2000. – Vol. 2. – P. 519–523.
4. 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.
5. Надуткин А.В. Изучение процессов синтеза Ti_3SiC_2 и формирования конструкционной керамики на его основе: дис. ... канд. техн. наук. – Сыктывкар, 2007.
6. Картоотека Международного центра дифрактометрических измерений (International Center for Diffraction Data) – PDF-2 (The Powder Diffraction Files, 2001, лицензия № 81200030) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cdd.com/translation/rus/pdf2.htm> (дата обращения: 30.06.2017).
7. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Физматлит, 1961. – 863 с.
8. Kero I. Ti_3SiC_2 . Synthesis by powder metallurgical methods // Licentiate Thesis. – Luleå: Luleå University of Technology, 2007. – May. – № 34.
9. Оглезнева С.А., Каченюк М.Н., Оглезнев Н.Д. Исследование формирования структуры и свойств материалов в системе «медь – карбосилицид титана» // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. – № 4. – С. 60–67.
10. Zhou Yanchun, 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.
11. Interparticle interactions during consolidation of Ti_3SiC_2 -Cu powders influenced by preliminary mechanical milling / D.V. Dudina, V.Yu. Ulianitsky, I.S. Batraev,

M.A. Korchagin, V.I. Mali, A.G. Anisimov and O.I. Lomovsky // *Met. Mater. Int.* – 2013. – Vol. 19, № 6. – P. 1235–1241.

12. Карпинос Д.М. Композиционные материалы: справочник / под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – С. 588.

13. Косолапова Т.Я. Карбиды. – М.: Metallургия, 1968. – 300 с.

14. 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). – P. 70–76.

References

1. Avramov Iu.S., Shliapin A.D. Novye kompozitsionnye materialy na osnove neshivaiushchikhsia komponentov: poluchenie, struktura, svoistva [New composite materials on the basis of immiscible components: receiving, structure, properties]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta, 1999, 206 p.

2. Babich B.N., Vershinina E.V., Glebov V.A. et al. Metallicheskie poroshki i poroshkovye materialy [Metal powders and powder materials]: spravochnik. Ed. Iu.V. Levinskogo. Moscow: EKOMET, 2005, 520 p.

3. Temborius S., Lindmayer M., Gentsch D. Switching behavior of different contact materials for vacuum interrupters under load switching conditions. *XIX International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, 2000, vol. 2, pp. 519–523.

4. Eliseev Iu.S., Saushkin B.P. Elektroerozionnaia obrabotka izdelii aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electroerosive processing of products of the aerospace equipment]. Ed. B.P. Saushkina. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baubana, 2010, 437 p.

5. Nadutkin A.V. Izuchenie protsessov sinteza Ti₃SiC₂ i formirovaniia konstruktsionnoi keramiki na ego osnove [Studying of processes of synthesis of Ti₃SiC₂ and formation of constructional ceramics on its basis]. Abstract of P.D. thesis. Syktyvkar, 2007.

6. Kartoteka Mezhdunarodnogo tsentra difraktometricheskikh izmerenii [Card file of the International center difraktometricheskikh of measurements]. (International Center for Diffraction Data) – PDF-2 (The Powder Diffraction Files, 2001, litsenziia № 81200030), available at: <http://www.cdd.com/translation/rus/pdf2.htm> (accessed 30 June 2017).

7. Mirkin L.I. Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov [Reference book on the X-ray diffraction analysis of polycrystals]. Moscow: Fizmatlit, 1961, 863 p.

8. Kero I. Ti₃SiC₂. Synthesis by powder metallurgical methods. *Licentiate Thesis. Luleå: Luleå University of Technology*, 2007, may, no. 34.

9. Oglezneva C.A., Kacheniuk M.N., Ogleznev N.D. Issledovanie formirovaniia struktury i svoistv materialov v sisteme «med' – karbosilitsid titana» [Research of formation of structure and properties of materials in the “copper-carbolized titanium” system]. *Izvestiia vuzov. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia*, 2016, no. 4, pp. 60–67.

10. Zhou Yanchun, 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.

11. Dudina D.V., Ulianitsky V.Yu., Batraev I.S., Korchagin M.A., Mali V.I., Anisimov A.G., Lomovsky O.I. Interparticle interactions during consolidation of Ti₃SiC₂-Cu rowders influenced by preliminary mechanical milling. *Met. Mater. Int.*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 1235–1241.

12. Karpinos D.M. Kompozitsionnye materialy [Composite materials]: spravochnik. Ed. D.M. Karpinosa. Kiev: Nauk. dumka, 1985, pp. 588.

13. Kosolapova T.Ia. Karbidy [Carbides]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 300 p.

14. 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.

Получено 4.07.2017

Об авторах

Оглезнев Никита Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: fastrex@mail.ru.

Оглезнева Светлана Аркадьевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Гревнов Лев Михайлович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, инженер кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: detali@pm.pstu.ac.ru.

Абляз Тимур Ризович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

About the authors

Nikita D. Ogleznev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: fastrex@mail.ru.

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

Lev M. Grevnov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Engineer, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: detali@pm.pstu.ac.ru.

Timur R. Ablyaz (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.