

УДК 544.3

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-4-11

Опыт получения композиционных материалов системы Ti–Cu–C СВС-процессом

© 2021 г. В.Г. Цикарев¹, А.А. Филиппенков^{1,3}, М.А. Филиппов²,
А.В. Алабушев³, В.А. Шарапова²

¹ ООО «НПП ФАН», г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

³ ООО «СВС-Композит», г. Екатеринбург, Россия

Статья поступила в редакцию 18.11.20 г., доработана 09.04.21 г., подписана в печать 13.04.21 г.

Аннотация: Цель работы – с помощью СВС-технологии получить износостойкие изделия из композиционных материалов нового типа. С учетом имеющихся данных в научно-технической литературе выбрана система Ti–Cu–C. Экспериментальным сжиганием различных составов СВС-шихт, состоящих из титанового порошка, медного порошка и сажи, выявлены составы, способные гореть при СВС-процессе и обеспечивать получение расплава, содержащего карбид титана и, в качестве связки, куприды титана, имеющие более высокие механические свойства и меньшие температуры плавления, чем чистая медь. Получение модельных образцов изделий в виде втулок наружным диаметром 70 и 110 мм осуществляли путем сжигания СВС-шихты выбранных составов в реакторе с последующим компактированием образующегося расплава при усилии 50–60 т. После электроэрозионной обработки черновой заготовки вырезали образцы для фазового и рентгеноспектрального анализов, а также испытаний на износостойкость. При оптимальном соотношении компонентов СВС-шихт в материале модельных образцов выявлены карбид титана и связка в виде купридов титана разных составов. Путем испытания на изнашивание при скольжении по закреплённому абразиву под удельным давлением 1 МПа определено, что относительная абразивная износостойкость нового материала при твердости 50–52 HRC составляет 1,8–2,0 ед. по сравнению с закаленной инструментальной штамповой сталью X12МФЛ. Для практической реализации технологии предложен алгоритм расчета составов СВС-шихты новой композиции, при этом его принципом является такое соотношение компонентов, при котором вводимый углерод образует с титаном карбид титана, а вводимый избыточный титан образует с медью куприды титана. Разработанный материал можно рассматривать как перспективный для использования в качестве элементов оборудования, работающих в условиях абразивного изнашивания. По данной разработке получен патент 2691656 (РФ).

Ключевые слова: СВС-технология, композиционные материалы, карбид титана, куприды титана, твердость, абразивная износостойкость.

Цикарев В.Г. – канд. техн. наук, гл. инженер ООО «НПП ФАН»
(620062, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 14, оф. 611). E-mail: tsikarevv@mail.ru.

Филиппенков А.А. – докт. техн. наук, ген. директор ООО «НПП ФАН» и ООО «СВС-Композит»
(620062, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 14, оф. 611). E-mail: mail@nppfan.ru.

Филиппов М.А. – докт. техн. наук, проф. УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19).
E-mail: Filma1936@mail.ru.

Алабушев А.В. – гл. технолог ООО «СВС-Композит».
E-mail: alabushev.aleks@mail.ru.

Шарапова В.А. – канд. техн. наук, доцент УрФУ.
E-mail: v.a.sharapova@urfu.ru.

Для цитирования: Цикарев В.Г., Филиппенков А.А., Филиппов М.А., Алабушев А.В., Шарапова В.А. Опыт получения композиционных материалов системы Ti–Cu–C СВС-процессом. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т. 15. № 4. С. 4–11. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-4-11.

Obtaining Ti–Cu–C system composite materials by SHS process

V.G. Tsikarev¹, A.A. Filippenkov^{1,3}, M.A. Filippov², A.V. Alabushev³, V.A. Sharapova²

¹ LLC «NPP FAN», Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University (UrFU), Ekaterinburg, Russia

³ LLC «SVS-Composite», Ekaterinburg, Russia

Received 18.11.2020, revised 09.04.2021, accepted for publication 13.04.2021

Abstract: The aim of the research is to obtain wear-resistant products from composite materials of a new type using the SHS technology. The Ti–Cu–C system was selected taking into account the data available in the scientific and technical literature. Various SHS charge compositions consisting of titanium powder, copper powder, and carbon black were experimentally burned to determine compositions that can burn during the SHS process and provide a melt containing titanium carbide and titanium cuprides as a binder featuring higher mechanical properties and lower melting points than pure copper. Model samples of products in the form of bushings with an outer diameter of 70 and 110 mm were produced by burning the SHS charge with selected compositions in a reactor followed by the compaction of the resulting melt with a force of 50–60 t. After the rough workpiece electrical discharge machining, samples were cut out for phase analysis, X-ray spectral analysis, and wear tests. With an optimal ratio of SHS charge components, titanium carbide and a binder in the form of titanium cuprides of different compositions were revealed in the model sample material. Using the method of testing for wear when sliding on a fixed abrasive under a specific pressure of 1 MPa, it was determined that the relative abrasive resistance of the new material at a hardness of 50–52 HRC is 1.8–2.0 units in comparison with the hardened tool and die steel Kh12MFL. In order to implement the technology in practice, an algorithm was developed for calculating the compositions of the newly formulated SHS charge, while its principle is such a ratio of components where the introduced carbon forms titanium carbide with titanium, and the added excess titanium forms titanium cuprides with copper. The developed material can be considered as promising for use as elements of equipment operating under abrasive wear conditions. This development is patented, Patent No. 2691656 (Russian Federation).

Keywords: SHS technology, composite materials, titanium carbide, titanium cuprides, hardness, abrasive resistance.

Tsikarev V.G. – Cand. Sci. (Eng.), chief engineer of LLC «NPP FAN» (620062, Russia, Ekaterinburg, Gagarin str., 14, of. 611). E-mail: tsikarevv@mail.ru.

Filippenkov A.A. – Dr. Sci. (Eng.), general director of LLC «NPP FAN» and LLC «SVS-Composite» (620062, Russia, Ekaterinburg, Gagarin str., 14, of. 611). E-mail: mail@nppfan.ru.

Filippov M.A. – Dr. Sci. (Eng.), prof. of the Ural Federal University (UrFU) (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: Filma1936@mail.ru.

Alabushev A.V. – chief technologist of LLC «SVS-Composite». E-mail: alabushev.aleks@mail.ru.

Sharapova V.A. – Cand. Sci. (Eng.), lecturer of the UrFU. E-mail: v.a.sharapova@urfu.ru.

For citation: Tsikarev V.G., Filippenkov A.A., Filippov M.A., Alabushev A.V., Sharapova V.A. Obtaining Ti–Cu–C system composite materials by SHS process. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2021. Vol. 15. No. 4. P. 4–11 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2021-4-11.

Введение

Для повышения стойкости сменного оборудования и увеличения межремонтных сроков работы различных машин и механизмов актуальной является разработка новых материалов с повышенной износостойкостью.

В последнее время все большее внимание уделяется композиционным материалам (КМ), создаваемым с использованием самых разнообразных технологий, в числе которых достойное место занимает самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС-процесс) — его родоначальником является Институт структурной

макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН, г. Черноголовка). Сегодня СВС-процессы получили широкое развитие в самых различных направлениях [1–4], они не требуют подведения энергии извне, тепло выделяется за счет экзотермических реакций синтеза нитридов, карбидов, интерметаллидов, инициируемых поджигом смесей шихты, после чего синтез реализуется с высокой скоростью. При последующем компактировании образующегося расплава можно получать практически готовые изделия из КМ. СВС-технологии нашли применение и за рубежом [5–8].

Примером реализации СВС-технологии является, в частности, получение высокотвердых сплавов марок СТИМ с использованием системы Ti—Ni—C в качестве базовой. С учетом применения силового компактирования в этом случае могут быть изготовлены, например, режущие пластины с высокой режущей способностью, штамповый инструмент, фильеры, волокна и другие изделия [9].

Имеющийся опыт обуславливает целесообразность развития работ по прямому получению изделий для узлов и устройств современной техники с использованием СВС-технологии с силовым компактированием. Наше внимание привлекла система Ti—Cu—C, в которой связкой карбидов титана является медь вместо никеля. Известен способ получения изделий из КМ на основе карбида титана [10], в соответствии с которым шихта для процесса СВС состоит из порошка титана и углерода, взятых в стехиометрическом соотношении для образования карбида титана (TiC), и 21—46 об.% металла-связки, роль которой может выполнять порошок меди. Медь находится в составе материала в свободном виде со всеми присущими ей низкими физико-механическими свойствами, что является недостатком данного способа.

В то же время медь с титаном могут образовывать интерметаллиды различных составов (куприды титана) — Cu_4Ti , Cu_2Ti , Cu_3Ti_2 , Cu_4Ti_3 , CuTi , CuTi_2 и др. — с температурой плавления ниже, чем у меди [11], и с выделением тепла, способствующего прохождению СВС-реакций.

Куприды титана имеют твердость более высокую (~4500÷5500 МПа, или ~45÷55 HRC) [12], чем не только медь, но и, например, медь в сочетании с твердосплавными отходами — 3500 МПа (~35 HRC) [13]. Показано, что относительная износостойкость таких купридов титана, как Cu_4Ti_3 и CuTi , выше, чем стали 40 (49—53 HRC), в 1,6—2,4 раза [12]. Полезность купридов титана в составе порошковых КМ, содержащих нитриды бора и титана, борид титана, отмечена авторами [14]; кроме того, авторами [15] положительно оценена перспектива создания КМ путем спекания на основе Ti—C и матрицы, упрочненной TiC (20—30 %), с достижением микротвердости матрицы около 3500 МПа (36 HRC).

Известен патент США [16], в соответствии с которым реализуется процесс СВС-наплавки на изделия при введении в СВС-шихту порошков титана, меди и графита с получением покрытия, со-

держашего карбид титана и куприды титана. При этом отмечается полезность купридов титана в композиционном сплаве для достижения повышенных эксплуатационных характеристик в случае, например, составных тормозных колодок для велосипедов. Наша идея принципиально иная, так как состав СВС-шихты отличается содержанием компонентов, и технология строится на применении СВС-процесса с компактированием для получения цельных заготовок (изделий).

Можно предположить, что материалы, полученные СВС-процессом в системе Ti—Cu—C, могут иметь механические свойства ниже, чем при использовании системы Ti—Ni—C, но в то же время в процессах волочения, например, рационально применение волок с твердостью меньшей, чем у твердосплавных материалов, но с лучшими антифрикционными характеристиками, а с другой стороны, имеется большой класс оборудования, который содержит изделия, требующие высокой износостойкости, во многом определяющие межремонтный срок работы всего оборудования.

Главным принципом составления СВС-шихты при введении в нее меди является соблюдение такого соотношения компонентов, при котором вводимый углерод образует с титаном карбид титана, а вводимый избыточный титан образует с медью куприды титана.

Материалы и методика исследования

Сначала была проведена оценка возможности горения (т.е. достаточности выделяемого тепла) СВС-шихт при следующем содержании (мас.%) в них компонентов: порошок титана (марка ТПП-7) — 52—70 %, порошок меди (ПМС-В) — 19—41 %, сажа (П-803, технический углерод) — 7—12 %. Методика экспериментов состояла в приготовлении уплотненных образцов шихты, завернутых в бумагу (типа сигар), иницировании реакции с одной из сторон образцов с помощью сварочной дуги, визуальной оценке характера горения (рис. 1).

Из всех опробованных составов наиболее «вялое» горение зафиксировано при содержании сажи 7 мас.%. Фазовый анализ продуктов горения при содержании сажи до 12 мас.% показал присутствие в них карбида титана (TiC) — от 48 до 68 мас.%, а также интерметаллидов медь—титан в различных сочетаниях, а именно CuTi , CuTi_2 , Cu_3Ti_2 , Cu_3Ti . Их наличие в составе материала и позволяет обе-



Рис. 1. Вид горения двух «сигарных» образцов СВС-шихты системы Ti—Cu—C

Fig. 1. Appearance of two burning «cigar» samples of Ti—Cu—C SHS charge

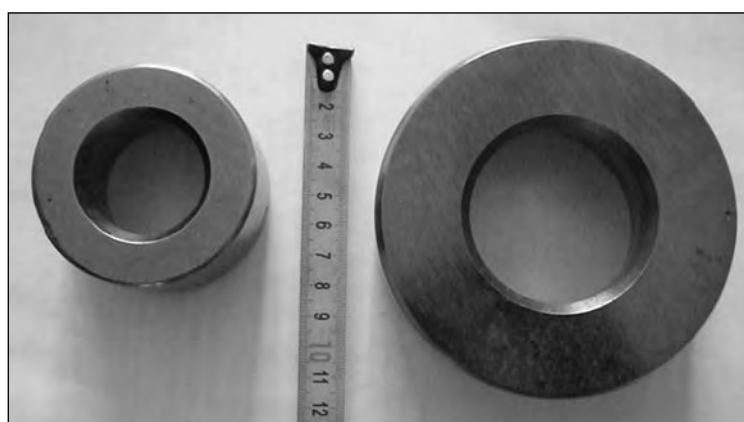


Рис. 2. Втулки, полученные СВС-методом с прессованием из композиционного материала системы Ti—Cu—C

Fig. 2. Bushings obtained by SHS with pressing from Ti—Cu—C composite material

спечить более высокие показатели износостойкости в сравнении со связкой на основе только свободной меди.

Рентгенофазовый анализ проб проведен на рентгеновском автодифрактометре STADI-P (STOE, Germany) в CuK_α -излучении. Дифрактограммы сняты в угловом интервале от 5,00 до 90,00° при шаге сканирования 0,03° с экспозицией 20 с на точку. Полуколичественный фазовый анализ выполнен с использованием «Порошкового дифракционного файла PDF 2» (ICDD, USA, Release 2016) по программе «Match v.3.11».

Микрорентгеноспектральный анализ (MPCA) осуществлен на растровом электронном микроанализаторе SEM 535 (Philips, Япония) с приставкой «Jeol JSM-6490LV» (Jeol, Япония) с системой микроанализа «INCA Energy 350» (Oxford Instruments, Великобритания).

Полученные «сигарные» образцы в условиях принятой методики не удалось деформировать для

получения плотных образцов, пригодных для механических испытаний, поэтому провели дополнительные укрупненные эксперименты.

Шихту для укрупненных экспериментов СВС-процесса системы Ti—Cu—C готовили из порошков титана и меди, которые вместе с сажей смешивали, засыпали в форму, инициировали горение и после окончания реакции через 5 с производили прессование с усилием 50 т, затем извлекали продукт и охлаждали его в песке. Полые черновые заготовки подвергали электроэрозионной обработке и шлифованию с получением изделий в виде втулки с наружным диаметром 70 или 110 мм и внутренним диаметром 40 или 60 мм (рис. 2). Проводили визуальную оценку плотности, измеряли твердость и вырезали образцы для испытания на износостойкость.

Для оценки относительной износостойкости сплавов принята методика изнашивания по закрепленному абразиву на лабораторной установке,

схожая с известной методикой М.М. Хрущева по ГОСТ 17367-71. В качестве эталона принята марка стали Х12МФЛ с твердостью 61 HRC (после закалки от 1020 °С в масло).

Образцы размером 10×10×25 мм с площадью рабочей части 10×10 мм совершали возвратно-поступательное движение по шлифовальной бумаге 14A32МН481 (ГОСТ 6456-82) на корундовой основе.

Абразивную износостойкость оценивали по результатам двух параллельных испытаний с расчетом относительной износостойкости (ϵ) по формуле

$$\epsilon = \Delta M_{\text{эт}} / \Delta M_{\text{обр}},$$

где $\Delta M_{\text{эт}}$ и $\Delta M_{\text{обр}}$ — потери массы образца-эталона стали Х12МФЛ и испытуемого образца.

Результаты и их обсуждение

Составы СВС-шихт для получения КМ на основе карбидов титана и интерметаллидов титан—медь, а также результаты полупромышленных экспериментов приведены в таблице.

Из данных таблицы видно (опыт 1п), что при повышенном расходе сажи (15 %) образовался карбид титана в количестве ~81,4 %, при этом интер-

металлиды титан—медь практически отсутствуют, а введенная в состав шихты медь находится в свободном состоянии.

Наличие в составе материала свободной меди предопределяет относительно невысокий уровень твердости (40 HRC) и износостойкости (0,9 от эталона). В то же время в присутствии карбида титана даже в меньшем количестве (когда его связкой служат интерметаллиды Cu—Ti разных составов) достигнуты более высокая твердость материала (50—52 HRC) и существенно более высокая его износостойкость (1,8—2,0 от эталона).

В последующих экспериментах при увеличении усилия давления на расплав (до 60 т) и снижении микропористости материала получена твердость изделия 58—60 HRC.

Микроструктура образца 4п представляет собой ряд параллельных вертикальных чередующихся темных и более светлых полос, которые включают глобулярные темные частицы диаметром 1—5 мкм (рис. 3). Разница в оттенках, видимо, связана со специфичностью волн горения смеси: в темных полосах глобулярные темные частицы преобладают, а их доля в светлых полосах несколько ниже. Спектры 2 и 3 на участках микроструктуры со значительным преобладанием темных частиц содержат свыше 80 % титана, который находится в

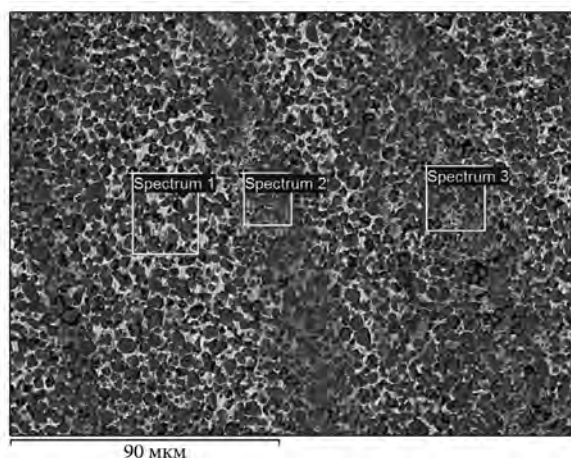
Составы СВС-шихт системы Ti—Cu—C и характеристики полученных модельных образцов изделий

Ti—Cu—C SHS charge compositions and properties of model samples of products obtained

Номер опыта	Состав шихты, мас. %			Количество выявленных в материале фаз, мас. %									HRC	ОКИ**
	Порошок титана	Сажа*	Порошок меди	TiC	Ti ₂ C	TiCu	TiCu ₃	Ti ₂ Cu	Ti ₂ Cu ₃	TiCu ₂	Cu _{св}	Cu ₂ O		
1п	65	15 (92)	20	81,4	—	—	1,5	—	—	—	12,4	4,7	40	0,9
2п	64	12 (75)	24	61,4	2,8	7,2	10,3	15,3	—	—	1,2	1,8	50	1,8
3п	60	10 (66)	30	54,4	1,6	18,4	8,4	12,2	—	4,2	—	0,8	50	1,8
4п	58	9 (62)	33	51,6	—	8,4	18,8	15,2	2,9	3,1	—	—	52	2,0
5п	56	8 (57)	36	49,9	2,1	—	19,8	14,8	4,3	3,7	2,5	2,9	50	1,8

* В скобках указана доля (в %) сажи по отношению к стехиометрическому количеству углерода для образования карбида титана (TiC) из всего введенного в шихту порошка титана.

** Относительный коэффициент износостойкости.



Спектр	O, %	Ti, %	Cu, %	Σ
1	5,88	65,32	28,80	100,00
2		82,24	17,76	100,00
3		80,11	19,89	100,00

Рис. 3. Микрорентгеноспектральный анализ образца 4п

Fig. 3. X-ray microanalysis of Sample 4п

основном в составе карбидов, но, с учетом присутствия на этих участках и меди (17–20 %), имеются также здесь и куприды титана. Наличие купридов титана подтверждается на светлых полосах микроструктуры (спектр 1), где отмечено более существенное содержание меди — 28,8 %.

По результатам локального микрорентгеноспектрального анализа (при котором углерод не выявляется) темные частицы представляют собой карбиды титана (рис. 4, спектр 2 и рис. 5, спектр 3).

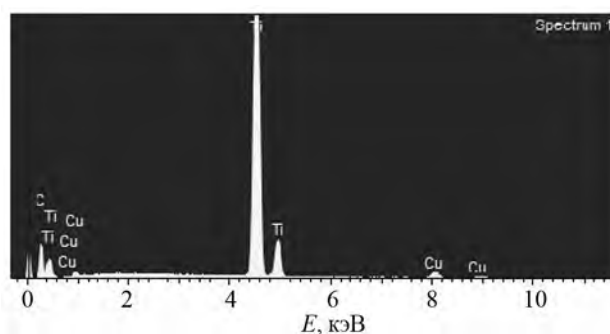
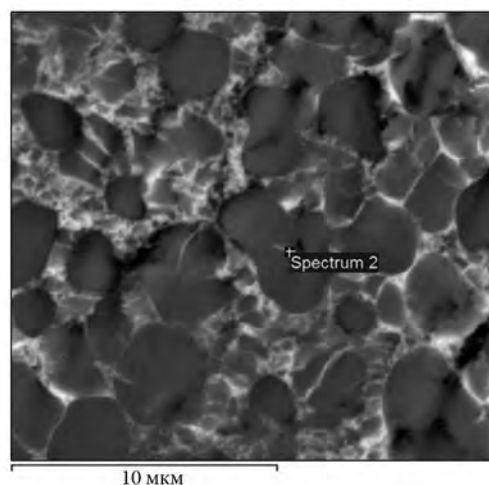
Спектры светлого фона (1, 2, 4 и 5 на рис. 5) показали наличие титана и меди в разных соотношениях, которые следует отнести к купридам титана.

Таким образом, МРСА подтвердил данные фазового анализа о наличии в СВС-продукте карбидов титана и купридов титана в качестве связки.

Известны различные методики моделирования параметров процесса и его прогнозирования [17–21]. Для оценки конкретного расхода порошков титана, меди и сажи в составе СВС-шихты разработан алгоритм расчета на базе проведенных экспериментов, учитывающий выбранный расход сажи, расход титана для образования карбида титана из выбранного количества сажи, количество избыточного титана и расход меди для образования ку-

придов титана при средней доле титана в пределах 0,3–0,45 в потенциально образующихся купридах титана различного состава.

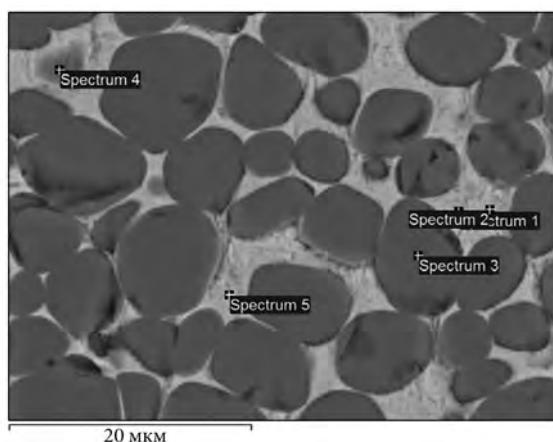
Разработанный алгоритм расчета позволяет рассчитать следующее оптимальное соотношение компонентов СВС-шихты, мас. %: сажа — 9–13; порошок титана — 54–67; порошок меди — 20–37. Изделия из данного композиционного порошкового материала системы Ti–Cu–C, полученные по предлагаемой СВС-технологии, могут найти применение в качестве износостойкого материала для широкого круга изделий, работающих при абразивном и адгезионном изнашивании (например, инструмента для волочения проволоки, а также профилей), в том числе для замены более дорогих импортных материалов.



Элемент	Содержание	
	мас. %	ат. %
Ti	93,29	94,86
Cu	6,71	5,14

Рис. 4. Локальный МРСА участка образца 4п

Fig. 4. Local X-ray microanalysis of Sample 4п section



Спектр	Ti	Cu	Σ
1	8,46	86,72	100,00
2	13,57	80,21	100,00
3	98,80	0,51	100,00
4	67,03	32,36	100,00
5	20,08	70,78	100,00

Рис. 5. Сравнительный МРСА участков образца 4п
Fig. 5. Comparative X-ray microanalysis of Sample 4p sections

Заключение

Решена техническая задача получения композиционных износостойких СВС-материалов системы Ti—Cu—C для изделий различного назначения, обладающих высокими эксплуатационными свойствами, на основе карбида титана и (в качестве связки карбида титана) интерметаллидов медь—титан (купридов титана). Новизна технических решений (по составу СВС-шихты и способу получения износостойкого материала системы Ti—Cu—C методом СВС) подтверждена получением патента РФ [22].

Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» — договор (соглашение) № 1762 ГС1/24296 от 27.12.2016 г.

Acknowledgments: The research was funded by the Federal State Budgetary Institution «Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology» — Contract (Agreement) № 1762 ГС1/24296 dated 27.12.2016.

Литература/References

1. Мержанов А.Г., Шкиро В.М., Боровинская И.П. Способ синтеза тугоплавких неорганических соединений:

А.с. 255221 (СССР). 1967; Пат. 2088668 (Франция). 1972; Пат. 3726643 (США). 1973; Пат. 1321084 (Англия). 1974; Пат. 1098839 (Япония). 1982.

Merzhanov A.G., Shkiro V.M., Borovinskaya I.P. Method for the synthesis of refractory inorganic compounds: Author's Certificate 255221 (USSR). 1967; Pat. 2088668 (France). 1972; Pat. 3726643 (USA). 1973; Pat. 1321084 (UK). 1974; Pat. 1098839 (Japan). 1982.

2. Концепция развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как области научно-технического прогресса (Отв. ред. А.Г. Мержанов). Черноголовка: Территория, 2003.

The concept of development of self-propagating high-temperature synthesis as a field of scientific and technological progress (Resp. ed. A.G. Merzhanov). Chernogolovka: Territoriya, 2003 (In Russ.).

3. Мержанов А.Г., Юхвид В.И., Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез литых тугоплавких неорганических изделий. Докл. АН СССР. 1980. Т. 255. No. 2. С. 336-339.

Merzhanov A.G., Yuxhvid V.I., Borovinskaya I.P. Self-propagating high-temperature synthesis of cast refractory inorganic products. *Doklady AN USSR*. 1980. Vol. 255. No. 2. P. 336-339 (In Russ.).

4. Амосов А.П. Наноматериалы, технологии СВС для триботехнического применения: Обзор. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2016. No. 4. С. 17-33.

Amosov A.P. Nanomaterials of SHS technology for tribological applications: A review. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2016. No. 4. P. 17-33. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2016-4-17-33>.

5. Bassani P., Giuliani P., Tuissi A., Zanotti C. Thermo-mechanical properties of porous NiTi alloy produced by SHS. *J. Mater. Eng. Perform.* 2009. No. 18. P. 594-599. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9493-8>.

6. Bai Y., He X., Li Y., Zhu C., Zhang S. Rapid synthesis of bulk Ti₂AlC by self-propagating high temperature combustion synthesis with a pseudo-hot isostatic pressing process. *J. Mater. Res.* 2009. No. 24. P. 2528-2535. <https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0327>.

7. Hosseini S.A., Alizadeh M., Ghasemi A., Meshkoti M.A. Highly porous NiTi with isotropic pore morphology fabricated by self-propagated high-temperature synthesis. *J. Mater. Eng. Perform.* 2013. No. 22. P. 405-409. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0289-x>.

8. Radek N. Experimental investigations of the Cu—Mo and Cu—Ti electro-spark coatings modified by laser beam. *Adv. Manuf. Sci. Technol.* 2008. Vol. 32. No. 2. P. 53-68.

9. Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Vorotilo S., Pogozhev Yu.S., Patsera E.I. Prospective SHS composites for high-tempe-

- rature applications. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 558. No. 012025.
10. Алабушев В.А., Рожков А.С. Способ получения изделий из композиционных материалов на основе карбида титана: Пат. 1338209 (РФ). 1995.
Alabushev V.A., Rozhkov A.S. A method of obtaining products from composite materials based on titanium carbide: Pat. 1338209 (RF). 1995 (In Russ.).
 11. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т. М.: Машиностроение, 1997.
Lyakishev N.P. Phase diagrams of binary metallic systems: Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1997 (In Russ.).
 12. Евстропов Д.А. Формирование структуры и свойств композиционных покрытий системы Cu—Ti на поверхности медных изделий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград: Волгоградский гос. техн. ун-т, 2016.
Evsropov D.A. The formation of the structure and properties of composite coatings of the Cu—Ti system on the surface of copper products: Abstract of the dissertation of PhD. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2016 (In Russ.).
 13. Гиршов В.Л., Александров А.А., Крупнова И.В., Цеменко В.Н., Часов В.В., Шалашов Е.В. Порошковый износостойкий материал и способ его изготовления: Пат. 2472866 (РФ). 2013.
Girshov V.L., Aleksandrov A.A., Krupnova I.V., Tsemenko V.N., Chasov V.V., Shalashov E.V. Powder-wear-resistant material and method for its manufacture: Pat. 2472866 (RF). 2013 (In Russ.).
 14. Ермоленко А.В., Филоненко В.П., Каличкина Н.С. Сверхтвердый композиционный материал: Пат. 2108404 (РФ). 1998.
Ermolenko A.V., Filonenko V.P., Kalichkina N.S. Superhard composite material: Pat. 2108404 (RF). 1998 (In Russ.).
 15. Пашинский В.В., Субботина М.Г. Оценка перспектив создания композиционных материалов на основе Ti—Cu матрицы, упрочненной TiC. *Наукові праці ДонНТУ. Металургія.* 2012. Вып. 1 (14)—2 (15). С. 103—109.
Pashinskii V.V., Subbotina M.G. Assessment of the prospects of creating composite materials based on the Ti—Cu matrix hardened by TiC. *Naukovi pratsi DonNTU. Metallurgiya.* 2012. Iss. 1 (14)—2 (15). P. 103—109 (In Ukr.).
 16. Iwai T., Souwa M. Bicycle brake pad and method manufacturing bicycle brace pad: Pat. 0223042 (USA). 2016.
 17. Makino A. Fundamental aspects of the heterogeneous flame in the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) process. *Progr. Energy Combust. Sci.* 2001. Vol. 27. Iss. 1. P. 1—74. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00004-6).
 18. Gennaria S., Tamburini U.A., Maglia F., Spinolo G., Munir Z.A. A new approach to the modeling of SHS reactions: Combustion synthesis of transition metal aluminides. *Acta Mater.* 2006. Vol. 54. Iss. 9. P. 2343—2351. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.01.009>.
 19. Gennaria S., Maglia F., Tamburini U.A., Spinolo G. SHS (Self-sustained high-temperature synthesis) of intermetallic compounds: effect of process parameters by computer simulation. *Intermetallics.* 2003. Vol. 11. Iss. 11-12. P. 1355—1359. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(03\)00179-1](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(03)00179-1).
 20. Zuccaro G., Lapenta G., Maizza G. Particle in cell simulation of combustion synthesis of TiC nanoparticles. *Comput. Phys. Commun.* 2004. Vol. 162. Iss. 2. P. 89—101. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2004.05.004>.
 21. Sdobnyakov N., Khort A., Myasnichenko V., Podbolotov K., Romanovskaia E., Kolosov A., Sokolov D., Romanovski V. Solution combustion synthesis and Monte Carlo simulation of the formation of CuNi integrated nanoparticles. *Comput. Mater. Sci.* 2020. Vol. 184. No. 109936. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109936>.
 22. Филиппенков А.А., Цикарев В.Г., Алабушев А.В. Шихта и способ получения износостойкого материала с ее использованием методом СВС: Пат. 2691656 (РФ). 2018.
Filippenkov A.A., Tsikarev V.G., Alabushev A.V. Charge and method of manufacturing wear-resistant material using the SHS method: Pat. 2691656 (RF). 2018 (In Russ.).