

УДК 536.712

ПРОПИТКА ПОДЛОЖЕК ИЗ МОНОКАРБИДА ВОЛЬФРАМА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЬЮ КОНТАКТНЫМ И БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДАМИ*

Чуманов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Общая металлургия» (chumanoviv@susu.ac.ru)
Аникеев А.Н., к.т.н., доцент кафедры «Общая металлургия» (anikeev-ml@mail.ru)

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте
(456217, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

Аннотация. Представлено исследование взаимодействия монокарбида вольфрама и низкоуглеродистой стали контактными и бесконтактными вариантами. Подложки из спрессованного порошка карбида вольфрама, спеченные в вакуумной печи, пропитывались низкоуглеродистой сталью определенного химического состава. Весь процесс фиксировался на высокоскоростную видеокамеру, что позволяло измерить контактный угол смачивания в любое время эксперимента. Практическое исследование проводилось на экспериментальном комплексе в Центре высокотемпературных исследований Научно-исследовательского института литья (Foundry Research Institute, г. Краков, Польша). Представлен ход эксперимента, исследование микроструктур полученных подложек. Изучение химического состава продуктов взаимодействия монокарбида вольфрама с низкоуглеродистой сталью проводили на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6460 LV. Пропитка всех образцов прошла успешно, во всех областях на срезах подложек наблюдается одинаковая структура, состоящая из трех фаз: зерен карбида вольфрама и железо-углерод-вольфрамовых соединений с различным содержанием железа (86,72 % и 22,86 – 23,68 %). На краевых областях, примыкающих к верхней грани, можно наблюдать большее количество Fe–C–W-соединений с содержанием железа 22,86 – 23,68 %. Это объясняется тем, что пропитка данных областей происходила в последнюю очередь, и железо растворило карбид в большей степени, чем в других областях. В местах непосредственного взаимодействия подложки и металла четко идентифицируются зерна карбида вольфрама, скрепленные между собой расплавом на основе железа (с различным содержанием железа в разных фазах). На обоих образцах на горизонтальной грани подложки в области, прилегающей к области впитывания, наблюдается частичное покрытие поверхности образцов пленкой железа. Краевые зоны горизонтальной грани подложки полностью покрыты пленкой железа, под которой располагаются зерна карбида вольфрама. Несмотря на применение различных методик изучения взаимодействия монокарбида вольфрама с низкоуглеродистой сталью (контактного и бесконтактного нагрева), значительной разницы между структурами образцов не наблюдается.

Ключевые слова: монокарбид вольфрама, низкоуглеродистая сталь, контактный нагрев, бесконтактный нагрев, микроструктура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-407-412

Перспективным направлением получения композиционных материалов, обладающих высокими механическими свойствами, является внедрение в структуру металла дисперсных частиц карбидов, оксидов или нитридов [1 – 9]. Представителями таких материалов являются карбидостали, твердые сплавы и дисперсно-упрочненные материалы [10 – 12]. Вводимые частицы в большей или меньшей степени взаимодействуют с расплавом, и от степени этого взаимодействия, а также от продуктов химических реакций их взаимодействия зависят свойства, приобретаемые материалом [13 – 18]. Таким образом, целью данной работы является теоретическое и практическое изучение процесса и продуктов взаимодействия монокарбида вольфрама с низкоуглеродистой сталью.

Практическое исследование взаимодействия монокарбида вольфрама и низкоуглеродистой стали проводили в Центре высокотемпературных исследований Научно-исследовательского института литья (Foundry

Research Institute, г. Краков, Польша). Исследование выполнялось на экспериментальном комплексе, состоящем из нескольких аппаратов с различными возможностями, предназначенными для оценки комплексных характеристик материалов при высоких температурах, в том числе различные методы изучения смачиваемости. Данный комплекс позволяет производить испытания различных материалов (металлов, сплавов, стекла, шлаков, керамики и др.) в условиях контролируемой температуры (до 2100 °С), под вакуумом (до 10^{-10} гПа) или в защитной атмосфере [16].

Из мелкодисперсного монокарбида вольфрама были получены две подложки размером 20×20 мм, толщиной 5 мм. Подложки получали прессованием порошка (исходный размер частиц 4 – 9 мкм) в стальной пресс-форме при температуре 180 °С и давлении 300 бар. Далее они подвергались спеканию в вакуумной печи ($P = 5 \cdot 10^{-3}$ Па). Полученные подложки для исследования процесса смачивания не полировались. В качестве пропитывающего материала использовались кубические образцы экспериментальной стали размером (длина×высота×ширина) 5×5×5 мм следующего химического состава, %:

* Южно-Уральский государственный университет благодарит за финансовую поддержку Министерство образования и науки РФ (проект № 11.9658.2017/8.9.).

C	Mn	Si	S
0,19 – 0,21	0,3 – 0,5	0,22 – 0,52	<0,04
P	W	Fe	
<0,035	0,069 – 0,080	Основа	

Эксперимент по пропитке подложек проводили двумя различными вариантами: контактной и бесконтактной пропиткой в атмосфере аргона.

Контактная пропитка. Суть контактной пропитки заключается в совместном контактом нагреве подложки и образца металла (образец стали помещается на подложку) в изолированной от атмосферы камере и совместном нагреве до плавления стали.

Нагрев спрессованной подложки из монокарбида вольфрама с установленным на нее образцом низкоуглеродистой стали проводили в течение трех часов до температуры 1485 °С со скоростью 495 °С/ч в атмосфере аргона (степень чистоты 99,9992 %) при давлении 850 – 900 мбар. Точность температуры нагрева гарантировалась четырьмя термопарами, расположенными внутри камеры.

Бесконтактная пропитка. Суть бесконтактной пропитки состоит в том, что нагрев металла происходит в керамической капельнице, размещенной над подложкой. По достижению заданной температуры на подложку из капельницы выдавливается капля жидкого металла и фиксируется на образце. Использование бесконтактной

пропитки позволяет избежать реагирования изучаемых материалов во время нагрева. Более подробно методики и возможности установки описаны в работах [19, 20].

Нагрев спрессованной подложки из монокарбида вольфрама проводили в течение трех часов до температуры 1650 °С со скоростью 550 °С/ч в атмосфере аргона (степень чистоты 99,9992 %) при давлении 850 – 900 мбар. Одновременно с нагревом подложки, в отдельной мини-камере (капельнице), имеющей форму наконечника и расположенной внутри камеры, где производился нагрев спеченного образца, производили расплавление металлического образца низкоуглеродистой стали. По достижению заданной температуры на спеченный образец из мини-камеры выдавливалась капля жидкого металла.

В ходе эксперимента пропитки подложки контактным методом было установлено, что активное взаимодействие металла и подложки начинается уже при температуре 1450 °С, что подтверждается фактом изменения площади соприкосновения металлического образца и подложки. Эксперимент также показал, что при расплавлении металла (1450 °С) формирование капли на подложке из монокарбида вольфрама не происходит. Расплавленный металл полностью впитывается в подложку в течение 10 с.

В процессе изучения пропитки подложки бесконтактным методом установлено, что при выдавливании капли металла на подложку формирование капли не происходит – расплавленный металл полностью впитывается в подложку в течение 5 с (рис. 1).

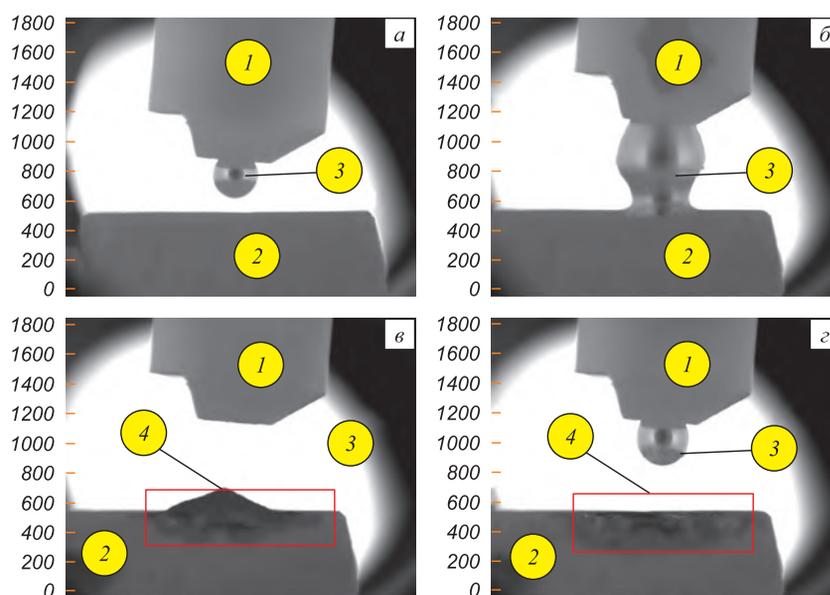


Рис. 1. Кинетика высокотемпературного взаимодействия образца низкоуглеродистой стали с подложкой WC в атмосфере аргона вариантом бесконтактной пропитки:

1 – капельница с расплавленным металлом; 2 – подложка; 3 – капля выдавливаемого металла; 4 – место впитывания металла в подложку; а – выдавливание капли ($T = 1650\text{ °C}$); б – взаимодействие металла и подложки ($T = 1650\text{ °C}$); в – процесс впитывания капли металла в подложку ($T = 1650\text{ °C}$); з – впитавшаяся капля металла в подложке ($T = 1650\text{ °C}$)

Fig. 1. Kinetics of high-temperature interaction of a low-carbon steel sample with a WC substrate in argon atmosphere by non-contact impregnation:

1 – dropper with the molten metal; 2 – substrate; 3 – drop of extruded metal; 4 – place of metal absorbed into the substrate; а – squeezing of the drop ($T = 1650\text{ °C}$); б – interaction of metal with substrate ($T = 1650\text{ °C}$); в – process of metal droplets absorption into the substrate ($T = 1650\text{ °C}$); з – absorbed metal droplet in the substrate ($T = 1650\text{ °C}$)

Исследование продуктов взаимодействия подложек из монокарбида вольфрама и низкоуглеродистой стали проводили на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6460LV с EDS-, WDS- и Crystal-приставками фирмы Oxford. Каждая подложка была распиlena по области впитывания и исследована на верхней горизонтальной грани (рис. 2, области 1–3) и по срезу (рис. 2, области 4–6). Верхнюю горизонтальную грань подложек исследовали неполированной, срезы подвергались шлифовке и полировке.

Исследование микроструктур на верхней горизонтальной грани подложек показало (рис. 3–5), что в местах непосредственного взаимодействия подложек и металла на обеих подложках четко идентифицируются зерна карбида вольфрама (спектры 1 и 8), скрепленные между собой расплавом на основе железа (спектры 2 и 9). На обоих образцах в зоне 2 наблюдается частичное покрытие поверхности образцов пленкой железа (спектры 3, 10). Краевые зоны обоих образцов полностью покрыты пленкой железа, под которой располагаются зерна карбида вольфрама (спектры 6, 7, 11, 12). Химический состав спектров 1–12 представлен в табл. 1.

Исследование срезов подложек показало, что все области на обеих подложках, полученных как по методике контактной, так и бесконтактной пропитки, различий в микроструктуре и химическом составе практически не имеют. В данных областях наблюдаются три различные фазы: зерна карбида вольфрама (спектры 14, 15, 17), железо–углерод–вольфрамовое (Fe–C–W) соединение с преобладанием железа (спектр 13) и «переходная»

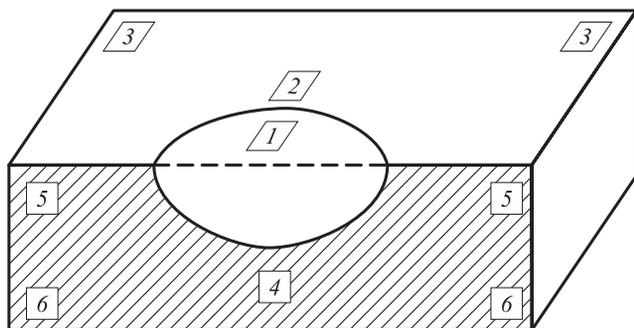


Рис. 2. Схема исследования подложек из монокарбида вольфрама после экспериментов:

1 – область впитывания металла; 2 – область, прилегающая к области впитывания; 3 – край образца в верхней горизонтальной грани; 4 – область под впитавшимся металлом; 5 – край подложки, граничащий с верхней горизонтальной гранью; 6 – край подложки, граничащий с нижней горизонтальной гранью

Fig. 2. The research scheme of tungsten monocarbide substrate after the following experiments:

1 – area of the metal absorption; 2 – area, adjacent to the area of absorption; 3 – edge of the sample at the top of the horizontal board; 4 – area under the absorbed metal; 5 – substrate zone, bordering on the upper horizontal edge; 6 – substrate edge, bordering on the lower horizontal edge

фаза (спектры 16 и 18). Химический состав спектров 13–18 представлен в табл. 2.

Результаты исследования показывают, что, несмотря на применение различных вариантов пропитки монокарбида вольфрама низкоуглеродистым металлом

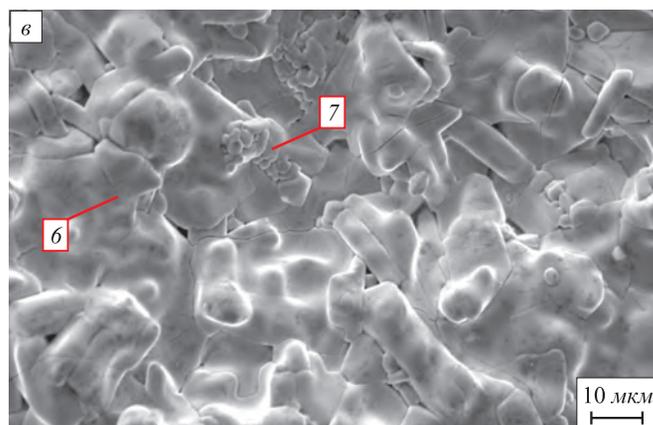
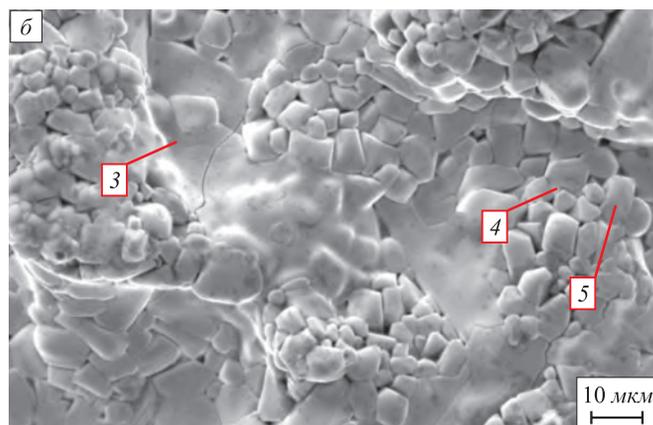
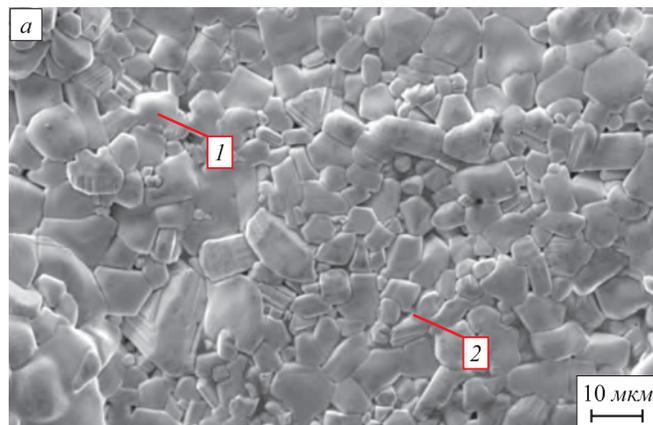


Рис. 3. Микроструктура и места отбора спектров с подложки из монокарбида вольфрама после экспериментов вариантом контактной пропитки:

а – в области впитывания металла 1; б – в области, прилегающей к зоне впитывания 2; в – на краю образца в верхней горизонтальной грани 3, $\times 1000$

Fig. 3. Microstructures and zones of spectra selection of tungsten monocarbide substrate after experiments on contact impregnation: а – in metal absorption zone 1; б – in the region adjacent to the absorption zone 2; в – on the edge of the sample in the upper horizontal border 3, $\times 1000$

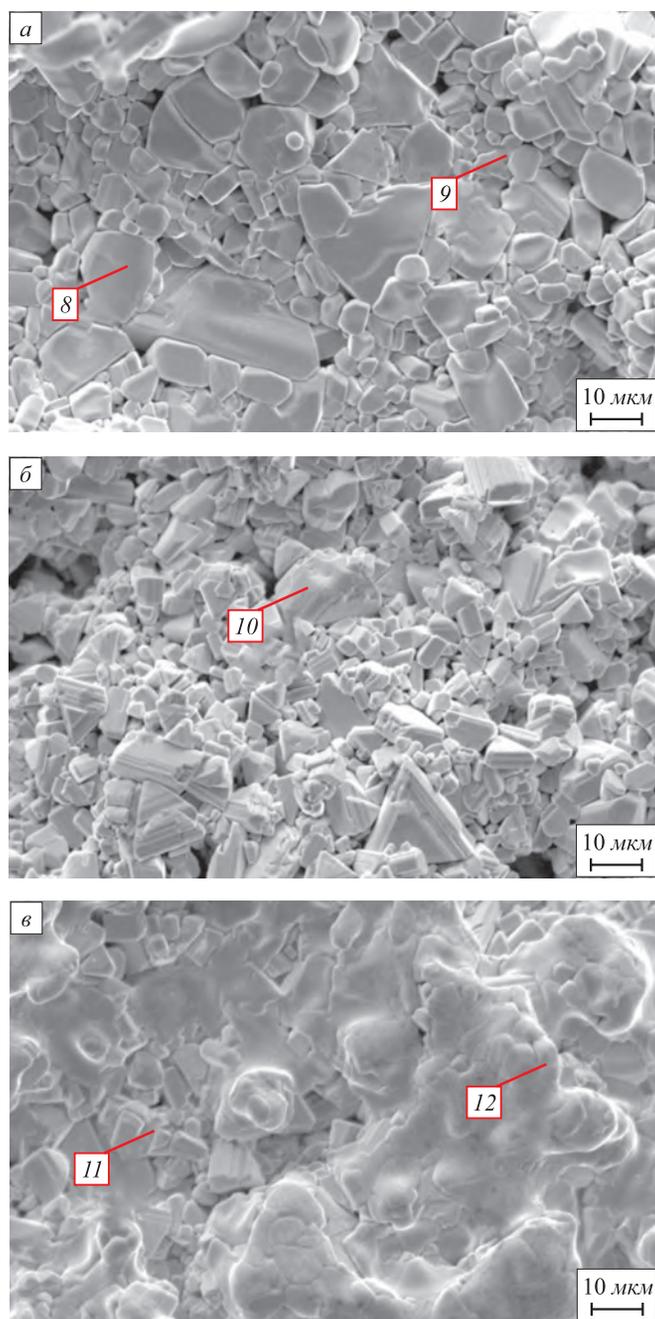


Рис. 4. Микроструктура и места отбора спектров с подложки из монокарбида вольфрама после экспериментов вариантом бесконтактной пропитки:
a – в области впитывания металла 1; *б* – в области, прилегающей к зоне впитывания 2; *в* – на краю образца в верхней горизонтальной грани 3, $\times 1000$

Fig. 4. Microstructures and zones of spectra selection of tungsten monocarbide substrate after experiments on non-contact heating impregnation:
a – in metal absorption zone 1; *б* – in the region adjacent to the absorption zone 2; *в* – on the edge of the sample in the upper horizontal border 3, $\times 1000$

(применялась контактная и бесконтактная пропитка), значительной разницы между структурами образцов не наблюдается. В местах непосредственного взаимодействия подложек и металла четко идентифицируются

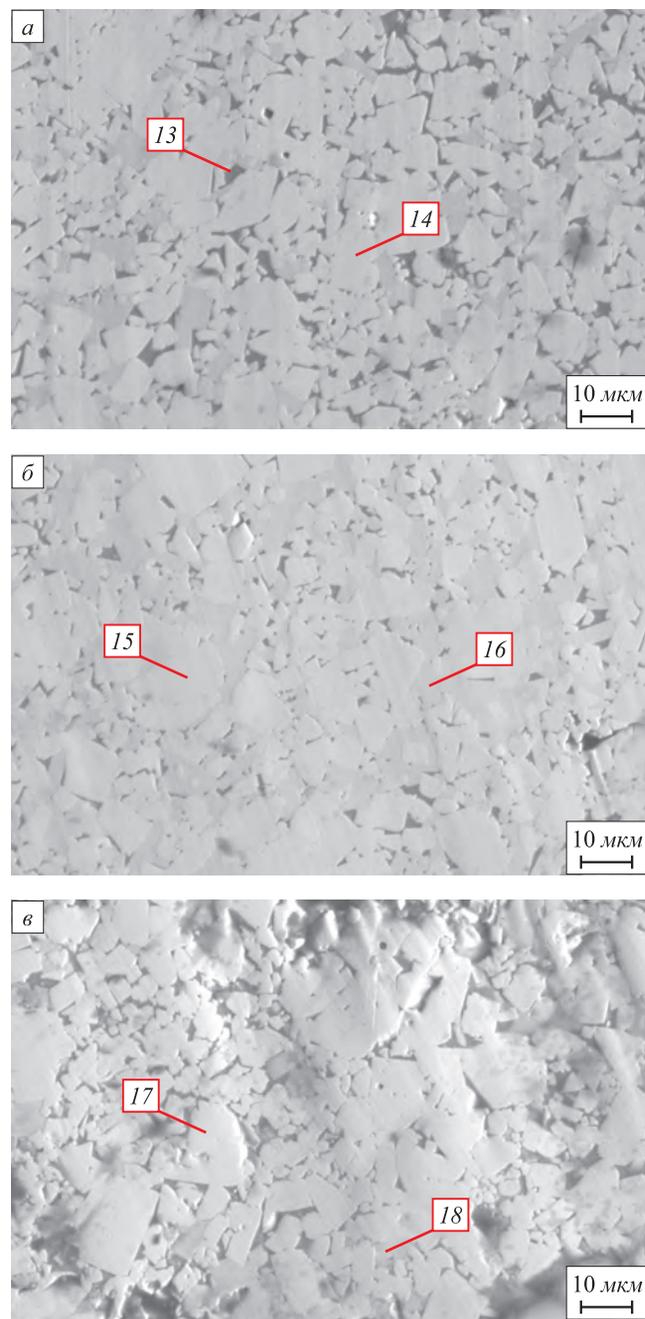


Рис. 5. Микроструктура и места отбора спектров с подложек из монокарбида вольфрама после экспериментов контактной и бесконтактной пропитками:
a – в области, прилегающей к зоне впитывания 4; *б* – на краю подложки, граничащей с верхней горизонтальной гранью 5; *в* – на краю подложки, граничащей с нижней горизонтальной гранью 6, $\times 1000$

Fig. 5. Microstructures and zones of spectra selection of tungsten monocarbide substrate after experiments on both contact and noncontact impregnation:
a – in the region adjacent to the absorption zone 4; *б* – at the substrate edge bordering on the upper horizontal border 5; *в* – at the substrate edge bordering on the lower horizontal border 6, $\times 1000$

зерна карбида вольфрама, скрепленные между собой расплавом на основе железа (с различным содержанием железа в разных фазах). На обоих образцах на горизонтальной грани подложек в области, прилегающей к об-

Таблица 1

Состав спектров, отобранных с подложек

Table 1. Composition of spectra selected from substrates

Спектр	Содержание, % (по массе)		
	C	Fe	W
1	7,91	–	92,09
2	2,97	16,94	80,09
3	6,02	21,70	72,28
4	1,75	84,72	13,52
5	5,48	25,42	69,09
6	6,28	21,81	71,91
7	5,28	25,42	69,09
8	7,06	–	92,94
9	7,29	13,39	79,33
10	10,69	–	89,31
11	1,72	73,46	24,83
12	4,44	24,27	71,29

ласти впитывания, наблюдается частичное покрытие поверхности образцов пленкой железа. Краевые зоны горизонтальной грани подложек полностью покрыты пленкой железа, под которой располагаются зерна карбида вольфрама.

Выводы. Пропитка обоих образцов прошла успешно: во всех областях на срезах подложек наблюдается одинаковая структура, состоящая из трех фаз: зерен карбида вольфрама и железо-углерод-вольфрамовых соединений с различным содержанием железа (86,72 % и 22,86 – 23,68 %). На краевых областях 5, примыкающих к верхней грани, можно наблюдать большее количество Fe–C–W-соединений с содержанием железа 22,86 – 23,68 %. Видимо это объясняется тем, что пропитка данных областей происходила в последнюю очередь, и железо растворило карбид в большей степени, чем в других областях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Harris I.R., Jones I.P. Grain boundaries: their character, characterization and influence on properties. – London: Institute of Materials, 2001.
- Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Preparation of precipitation-strengthened hollow billets for rotary dispersers // Metallurgist. 2011. Vol. 55. P. 439 – 443.
- Chumanov I.V., Kareva N.T., Chumanov V. I., Anikeev A.N. Study and analysis of the structural constituents of billets hardened by fine-grained particles and formed by centrifugal casting // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 6. P. 540 – 543.
- Шульга А.В. Композиты. Часть 1: Основы материаловедения композиционных материалов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 96 с.
- Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

Таблица 2

Состав спектров, отобранных с подложек

Table 2. Composition of spectra selected from substrates

Спектр	Содержание, % (по массе)		
	C	Fe	W
13	6,13	86,72	7,15
14	10,99	–	89,01
15	11,01	–	88,99
16	8,88	22,86	68,26
17	12,30	–	87,70
18	9,00	23,68	67,32

- Нейман А. Материалы будущего: перспективные материалы для народного хозяйства / Пер. с нем. – Л.: Химия, 1985. – 239 с.
- Чувильдеев В.Н., Москвичева А.В., Болдин М.С. Электроимпульсное плазменное спекание наноструктурированного карбида вольфрама и твердых сплавов на его основе // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 2(2). С. 115 – 119.
- Григоревич В.К., Шефтель Е.Н. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов. – М.: Наука, 1988. – 296 с.
- Комшуков В.П., Фойгт Д.Б., Черепанов А.Н., Амелин А.В. Модифицирование непрерывнолитой стали нанопорошками тугоплавких соединений // Сталь. 2009. № 4. С. 65 – 67.
- Гуревич Ю.Г., Нарва В.К., Фраге Н.Р. Карбидостали. – М.: Металлургия, 1988. – 144 с.
- Федорченко И.М., Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. – Киев: АН УССР, 1961. – 420 с.
- Зайцев А.А., Вершинников В.И., Панов В.С. и др. Влияние технологических параметров спекания на структуру и свойства твердого сплава ВК5 из СВС-порошка вольфрама // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 3. С. 21 – 27.
- Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
- Костиков В.И., Антипов В.И., Кривцун В.М., Кошелев Ю.И. Исследование смачивания углеродных материалов расплавами металлических матриц // Композиционные материалы: Сб. тр. – М.: Наука, 1981. С. 89 – 92.
- Либенсон Г.А. Процессы порошковой металлургии. Т. 2. Формование и спекание. – М.: МИСиС, 2002. – 320 с.
- Sobczak N., Nowak R., Radziwill W. etc. Experimental complex for investigations of high temperature capillarity phenomena // Materials Science and Engineering A. 2008. Vol. 495 (1 – 2). P. 43 – 49.
- Аникеев А.Н., Бигеев А.В., Гордеев Е.Н. и др. О возможности введения твердых тугоплавких частиц при получении трубной заготовки методом центробежного литья // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2009. № 36 (169). С. 24 – 27.
- Chumanov I.V., Anikeev A.N., Chumanov V.I. Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframium carbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM's structure // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 816 – 820.
- Sobczak N. Some methodological aspects of high temperature capillarity phenomena investigations. Part I // Transactions of the Foundry Research Institute. 1994. Vol. XLIV (4). P. 221 – 238.
- Eustathopoulos N., Sobczak N., Passerone A., Nogi K. Measurements of contact angle and work of adhesion at high temperatures // Materials Science. 2005. Vol. 40 (9/10). P. 2271 – 2280.

Поступила 12 ноября 2015 г.

IMPREGNATION OF SUBSTRATES OF TUNGSTEN MONOCARBIDE WITH LOW CARBON STEEL USING CONTACT AND NON-CONTACT METHODS

I.V. Chumanov, A.N. Anikeev

Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The article presents a study of the interaction of tungsten monocarbide and carbon steel by contact and non-contact methods. Substrates of compressed powder of tungsten carbide, sintered in a vacuum furnace, were impregnated with carbon steel with certain chemical composition. The whole process was recorded on a high-speed video camera that allows to measure the contact angle of the experiment at any time. The practical study was conducted on the experimental complex in the center of high-temperature studies of the Research Institute of Casting (Foundry Research Institute, Krakow, Poland). The experimental course and microstructures of obtained substrates were represented. The study of the chemical composition of tungsten monocarbide reaction products with low carbon steel was carried out by a scanning electron microscope “Jeol JSM-6460 LV”. According to the study of all areas on the substrate sections it can be observed the same structure, consisting of three phases: the grains of tungsten carbide and iron-carbon-tungsten compounds with different iron content. On the edge regions, adjacent to the upper face can be seen more of Fe–C–W-compounds with iron content of 22.86% – 23.68%. This is because these areas impregnation occurred at the last turn, and dissolved the iron carbide to a greater extent than in other areas. In areas of direct interaction between the substrate and the metal clearly identified tungsten carbide grains, bonded together by molten iron (with different content of iron in different phases). On both samples on horizontal surfaces of the substrates in the region adjacent to the absorption field, partially iron film covering is observed over the sample surface. Boundary zone horizontal surfaces of substrates are completely covered with iron film, under which the tungsten carbide grains are located. Despite the use of different methods of studying the interaction of tungsten monocarbide with low carbon steel (contact and contactless heating), a significant difference is not observed between the structure of the samples.

Keywords: tungsten monocarbide, low carbon steel, contact heating, non-contact heating, microstructure.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-5-407-412

REFERENCES

- Harris I.R., Jones I.P. *Grain boundaries: their character, characterization and influence on properties*. London: Institute of Materials, 2001.
- Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Preparation of precipitation-strengthened hollow billets for rotary dispersers. *Metalurgist*. 2011, vol. 55, pp. 439–443.
- Chumanov I.V., Kareva N.T., Chumanov V. I., Anikeev A.N. Study and analysis of the structural constituents of billets hardened by fine-grained particles and formed by centrifugal casting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, vol. 6, pp. 540–543.
- Shul’ga A.V. *Kompozity. Chast’ I: Osnovy materialovedeniya kompozitsionnykh materialov* [Composites. Part. 1: Foundations of materials science composite materials]. Moscow: NIYaU MIFI, 2013, 96 p. (In Russ.).
- Tarnopol’skii Yu. M., Zhigun I. G., Polyakov V. A. *Prostranstvenno-armirovannye kompozitsionnye materialy: Spravochnik* [Spatially-reinforced composite materials: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p. (In Russ.).
- Baumann K., Bernst R., Braune G. *Werkstoffe mit Zukunft: Perspektiven volkswirtschaftlich wichtiger Werkstoffe*. Neiman A. Hrsg., 1977, 256 S. (Russ.ed.: Neiman A. *Materialy budushchego: perspektivnye materialy dlya narodnogo khozyaistva*. Leningrad: Khimiya, 1985, 239 p.).
- Chuvil’deev V.N., Moskvicheva A.V., Boldin M.S. Electro pulse plasma sintering of nanostructured tungsten carbide and hard alloys based on it. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2013, no. 2 (2), pp. 115–119. (In Russ.).
- Grigorovich V.K., Sheftel’ E. N. *Dispersionnoe uprochnenie tugoplavkikh metallov* [Dispersion hardening of refractory metals]. Moscow: Nauka, 1988, 296 p. (In Russ.).
- Komshukov V.P., Foigt D.B., Cherepanov A.N., Amelin A.V. Modifying continuous-cast steel with refractory nanopowder. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 4, pp. 363–365.
- Gurevich Yu.G., Narva V.K., Frage N.R. *Karbidostali* [Carbide steels]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 144 p. (In Russ.).
- Fedorchenko I.M., Andrievskii R.A. *Osnovy poroshkovoi metallurgii* [Fundamentals of powder metallurgy]. Kiev: AN USSR, 1961, 420 p. (In Russ.).
- Zaitsev A.A., Vershinnikov V.I., Panov V.S., Levashov E.A., Borovinskaya I.P., Konyashin I.Yu., Rupasov S.I., Patsera E.I., Shumenko V.N., Zamulaeva E.I. Influence of technological parameters of sintering on the structure and properties of VK5hard alloy of SVS-tungsten powder of. *Izvestiya VUZov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional’nye pokrytiya*. 2013, no. 3, pp. 21–27. (In Russ.).
- Summ B.D., Goryunov Yu.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya* [Physico-chemical fundamentals of wetting and spreading]. Moscow: Khimiya, 1976, 232 p. (In Russ.).
- Kostikov V.I., Antipov V.I., Krivtsun V.M., Koshelev Yu. The study of wetting of carbon materials by melts of metal matrix. In: *Kompozitsionnye materialy: Sbornik trudov* [Composite materials: The collection of works]. Moscow: Nauka, 1981, pp. 89-92. (In Russ.).
- Libenson G.A. *Protsessy poroshkovoi metallurgii. T. 2. Formovanie i spekanie* [Powder metallurgy processes. Vol. 2. Molding and sintering]. Moscow: MISiS, 2002, 320 p. (In Russ.).
- Sobczak N., Nowak R., Radziwill W., Budzioch J., Glenz A. Experimental complex for investigations of high temperature capillarity phenomena. *Materials Science and Engineering A*. 2008, vol. 495(1-2), pp. 43–49.
- Anikeev A.N., Bigeev A.V., Gordeev E.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. On the possibility of the introduction of solid refractory particles at billets production by centrifugal casting. *Vestnik Yuzhno-Ural’skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2009, no. 36 (169), pp. 24–27.
- Chumanov I.V., Anikeev A.N., Chumanov V.I. Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframium carbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM’s structure. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 129, pp. 816–820.
- Sobczak N. Some methodological aspects of high temperature capillarity phenomena investigations. Part I. *Transactions of the Foundry Research Institute*. 1994, vol. XLIV (4), pp. 221–238.
- Eustathopoulos N., Sobczak N., Passerone A., Nogi K. Measurements of contact angle and work of adhesion at high temperatures. *Materials Science*. 2005, vol. 40 (9/10), pp. 2271–2280.

Acknowledgements. South Ural State University expresses gratitude for financial support to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 11.9658.2017 / 8.9.).

Information about the authors:

I.V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of the General Metallurgy (chumanoviv@susu.ac.ru)
A.N. Anikeev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of the General Metallurgy (anikeev-ml@mail.ru)

Received November 12, 2015