



Оригинальная статья

УДК 669.014:669.142

DOI 10.17073/0368-0797-2022-2-79-84



О ВВЕДЕНИИ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА W_2C В КОРРОЗИОННОСТОЙКУЮ СТАЛЬ МАРКИ 08X18N10T И ЕГО ВЛИЯНИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

И. В. Чуманов, А. Н. Анিকেев, В. В. Седухин

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст (Россия, 456209, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

Аннотация. Изучены межфазные явления и реакции между карбидом вольфрама W_2C и расплавом коррозионнстойкой стали с помощью экспериментов по смачиванию. Исследование рассматриваемого процесса проведено по методике высокотемпературного контактного нагрева подложки W_2C и металлического образца из стали марки 08X18N10T. Установлено, что карбид вольфрама W_2C обладает хорошими показателями смачиваемости коррозионнстойкой сталью. Угол смачивания составляет 135 – 145°. Исследована поверхность подложки методом электронной сканирующей микроскопии для определения состава полученных продуктов реакции. Анализ полученных результатов позволяет констатировать, что по всей площади контакта содержание химических элементов варьируется, но картина их распределения по площади контакта равномерная. Полученные данные позволяют сделать предположение о применимости сочетания рассматриваемых компонентов для создания дисперсно-упрочненных материалов. С этой целью проведены эксперименты по получению дисперсно-упрочненных центробежно-литых заготовок различными типами литья (горизонтального и вертикального). Для получения экспериментальных материалов проводилось введение в процессе центробежного литья горизонтального и вертикального типов в слитки карбида вольфрама в количестве 1 % (по массе). После получения экспериментальных материалов проведены исследования ряда механических свойств (временное сопротивление разрыву, предел текучести и твердость). Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты позволяют сделать вывод о том, что при применении дисперсного упрочнения в процессе центробежного литья возможно получать металлические материалы с повышенными механическими свойствами. Временное сопротивление разрыву увеличивается (в среднем по всем образцам) на 2,49 %, предел текучести – на 2,27 %, твердость – на 5,02 %. Это соотносится с положениями о физико-химических свойствах металлов при применении технологий дисперсного упрочнения.

Ключевые слова: карбид вольфрама W_2C , сталь 08X18N10T, смачиваемость, взаимодействие, химический состав, центробежное литье, механические свойства

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90101.

Для цитирования: Чуманов И.В., Анিকেев А.Н., Седухин В.В. О введении карбида вольфрама W_2C в коррозионнстойкую сталь марки 08X18N10T и его влиянии на механические свойства // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 79–84.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-79-84>

Original article

INTRODUCTION OF TUNGSTEN CARBIDE INTO 08Kh18N10T CORROSION-RESISTANT STEEL AND ITS EFFECT ON MECHANICAL PROPERTIES

I. V. Chumanov, A. N. Anikeev, V. V. Sedukhin

Zlatoust Branch of South Ural State University (16 Turgeneva Str., Zlatoust, Chelyabinsk Region 456209, Russian Federation)

Abstract. Interfacial phenomena and reactions between tungsten semicarbide (W_2C) and corrosion-resistant steel melt have been studied using wetting experiments. This process was followed by the method of high-temperature contact heating of W_2C substrate and a metal sample made of 08Kh18N10T steel. It was established that wolfram carbide has good indicators of wettability by corrosion-resistant steel, wetting angle is 135 – 145°. Composition of the substrate surface has been studied by electron scanning microscopy to determine composition of reaction products. Analysis of the obtained results allows us to state that content of chemical elements varies over the entire contact area, but pattern of their distribution there is uniform. Due to the obtained data we can make an assumption about the applicability of combination of these components to create dispersed-hardened materials. To this end, experiments have been carried out to produce dispersedly hardened centrifugal cast blanks with various types of casting – horizontal and vertical. To obtain experimental materials, the horizontal and vertical type centrifugal casting was introduced into tungsten semicarbide ingots in an amount of 1 % wt. After producing experimental materials, a number of mechanical properties were studied, such as tensile strength, yield strength and hardness. The experimental results allow us to conclude that the use of dispersed hardening in process of centrifugal casting makes it possible to obtain metal

materials with increased mechanical properties. Indicators of ultimate strength increase (for all samples on average) by 2.49 %, yield strength – by 2.27 %, hardness – by 5.02 %, which correlates with the provisions on metals physico-chemical properties when using dispersed hardening technologies.

Keywords: tungsten semicarbide (W_2C), 08Kh18N10T steel, wettability, interaction, chemical composition, centrifugal casting, mechanical properties

Funding: The work was supported by the RFBR, project No. 20-33-90101.

For citation: Chumanov I.V., Anikeev A.N., Sedukhin V.V. Introduction of tungsten carbide into 08Kh18N10T corrosion-resistant steel and its effect on mechanical properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 79–84. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-79-84>

ВВЕДЕНИЕ

К свойствам (высокая прочность, твердость) современных материалов предъявляются разнообразные, часто противоречивые требования. В стальных отливках обычно только определенные поверхности должны быть твердыми и износостойкими, тогда как другие «объемные» поверхности могут иметь только стандартные свойства. Одним из перспективных направлений производства сталей и сплавов с высокими механическими характеристиками, а также повышения их функциональных свойств может быть включение в структуру материала полидисперсных частиц карбидов, оксидов или нитридов [1 – 3]. Примерами технологий получения таких материалов являются дисперсное упрочнение, дисперсионное упрочнение и получение твердых сплавов [4 – 6]. Дисперсно-упрочненные материалы – это металлические материалы (преимущественно сплавы), упрочненные дисперсными частицами тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов), которые не растворяются и не коагулируют в металлической матрице (основе) при высоких рабочих температурах. Максимальный упрочняющий эффект достигается при достаточно малом (0,01 – 0,05 мкм) размере частиц упрочняющей фазы, их равномерном распределении в структуре материала и оптимальном расстоянии между самими частицами [7, 8]. Введенные частицы, в зависимости от их состава и стехиометрического состава, в большей или меньшей степени взаимодействуют с расплавами. Характеристики, приобретаемые получаемыми материалами, зависят от характера и степени этого взаимодействия, а также от формируемых продуктов их взаимодействия [9 – 11]. Одним из важнейших показателей взаимодействия материалов является их смачиваемость [12 – 14].

При упрочнении материалов путем введения дисперсных частиц при литейных процессах основным критерием получения требуемых характеристик является распределение частиц по объему формируемой заготовки. Наибольший интерес с точки зрения контроля распределения дисперсных частиц при кристаллизации представляет введение дисперсно-упрочняющих частиц в металл при реализации технологии центробежно-лития [15 – 17].

В настоящей работе была поставлена задача изучения смачиваемости карбида вольфрама W_2C и корро-

зионностойкой стали, а затем для проверки полученных результатов проведение экспериментов по получению дисперсно-упрочненных центробежно-литых заготовок различными типами литья (горизонтального и вертикального).

ИЗУЧЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА W_2C КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛЬЮ

Из дисперсного порошка (1 – 2 мкм) карбида вольфрама W_2C была изготовлена подложка размером $12 \times 12 \times 5$ мм. Формирование осуществляли при температуре 180 °С под давлением 300 МПа. Полученный образец подвергали спеканию в вакуумной печи, оснащенной газоанализатором, при температуре 1200 °С в течение 15 мин. Спектрограмма газов, испарившихся с образца в процессе спекания, подтвердила удаление связующего из спекаемого образца. В качестве металла-реагента использовали кубический образец из стали марки 08X18N10T (ГОСТ 5632 – 72) размером $5 \times 5 \times 5$ мм. Химический состав используемой коррозионностойкой стали, % (по массе): 0,07 C; 0,65 Si; 1,75 Mn; 9,66 Ni; 0,005 S; 0,015 P; 18,58 Cr; 0,19 Cu; 0,57 Ti.

Подложку из дисперсных частиц W_2C с установленными на них кубическими образцами металла помещали в область нагревателя. После этого рабочую зону установки закрывали водоохлаждаемым куполом для создания защитной атмосферы путем формирования вакуума 1,01 кПа, а затем заполнения вакуума аргоном со степенью чистоты 99,996 %.

Нагрев осуществлялся со скоростью 20 °С/мин, что позволило обеспечить равномерный прогрев реагирующих материалов и избежать возникновения термических ударов.

Результаты эксперимента показали, что активное взаимодействие металла с подложкой из карбида вольфрама W_2C начинается уже при температуре 1450 °С (рис. 1, а), что подтверждается фактом изменения площади соприкосновения металлического образца и подложки. При достижении температуры 1490 °С образец полностью расплавляется, образуя с подложкой угол 135 – 145° (рис. 1, е), после чего происходит его впитывание в подложку.

Проведены исследования полученных продуктов реакции на поверхности подложки W_2C , пропитанной

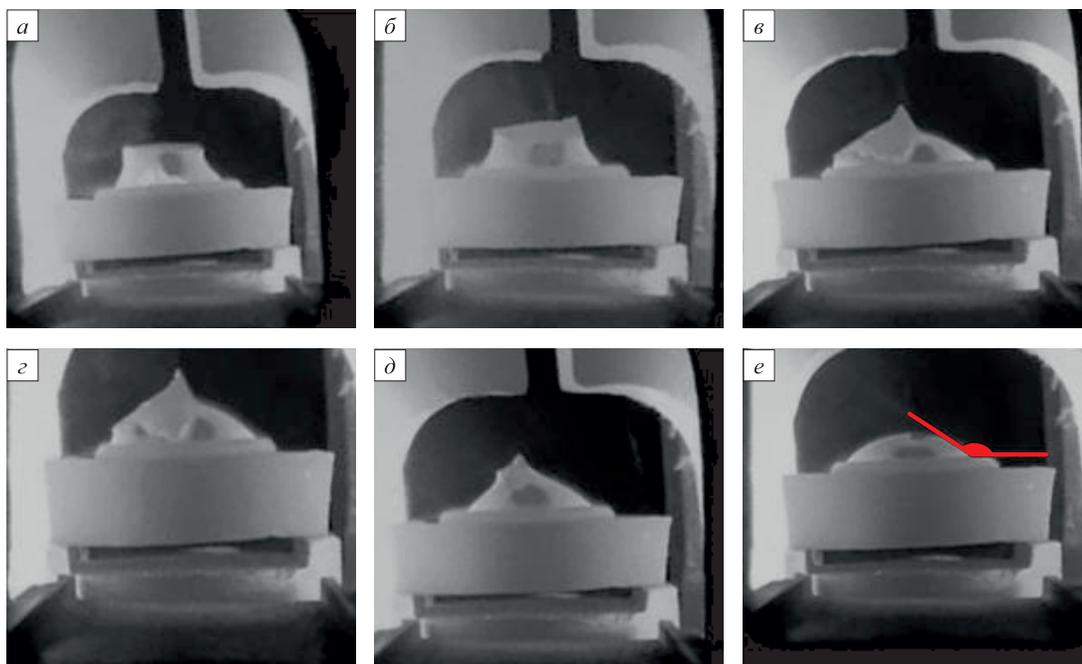


Рис. 1. Хронология эксперимента по смачиваемости пары материалов W₂C – сталь 08X18N10T при температурах 1450 (а), 1460 (б), 1470 (в), 1480 (г), 1485 (д), 1490 °C (е)

Fig. 1. Chronology of the experiment on wetting of couples of materials W₂C– 08Kh18N10T steel at temperatures of 1450 (a), 1460 (б), 1470 (в), 1480 (г), 1485 (д), 1490 °C (e)

коррозионностойкой сталью марки 08X18N10T. Продукты взаимодействия исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6460LV, поверхность подложки не полировали. Изучение проводили от центра капли к краю. Полученные результаты были обработаны и представлены в виде диаграммы на рис. 2.

По всей площади контакта (рис. 2) содержание химических элементов варьируется, но картина их распределения по площади контакта равномерная.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Химический состав шихты соответствовал составу стали марки 08X18N10T. Плавление шихтовых материалов осуществляли с помощью индукционной печи СЭЛТ-001-40/12-Т с рабочим тиглем объемом 40 кг.

Для наведения шлака во время плавления использовали известь, предварительно прокаленную в нагревательной печи. Разжижение шлака проводили путем добавки порошка вермикулита. Во время процесса переплава и наведения полного объема печи жидким металлом проводили три замера температуры термопарой со сменными наконечниками. При наведении полного объема осуществляли выдержку металла в течение 10 мин и легирование титаном. Первые выпуски металла в машины центробежного литья горизонтального и вертикального типов служили образцами сравнения (слитки 1 и 3), в связи с чем процедуру введения в них мелкодисперсных частиц карбида вольфрама W₂C на струю металла не проводили. Для получения дисперсно-упрочненных отливок проводили введение частиц на струю металла в количестве 1 % (по массе) от массы заготовок (слитки 2 и 4).

Дисперсность вводимых тугоплавких частиц составляла 1 – 2 мкм, скорость вращения изложниц –

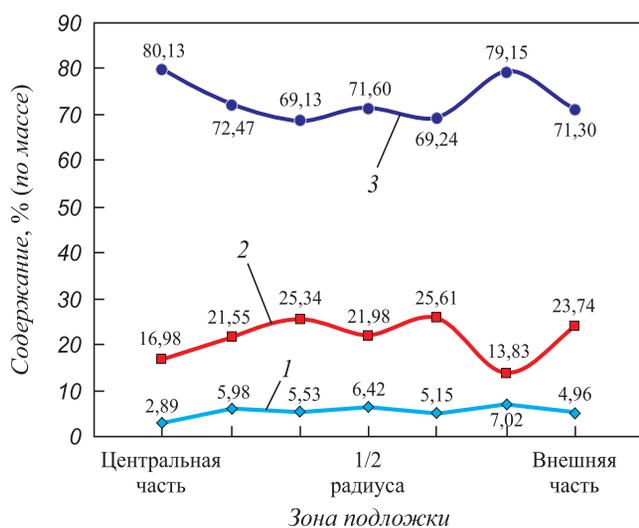


Рис. 2. Результаты исследования химического состава подложки по поверхности образца: 1 – C; 2 – Fe; 3 – W

Fig. 2. Researched chemical composition of the substrate on the sample surface: 1 – C; 2 – Fe; 3 – W

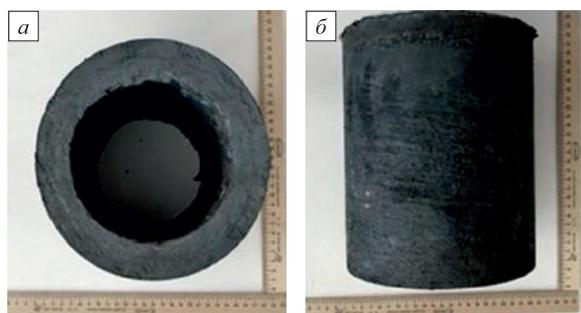


Рис. 3. Конфигурация заготовок, полученных методом центробежного литья:
а – вид сверху; б – вид сбоку

Fig. 3. Configuration of blanks obtained by centrifugal casting:
а – top view; б – side view

700 и 980 об./мин у машины горизонтального и вертикального типов. Конфигурация полученных заготовок представлена на рис. 3. Различными были лишь размеры заготовок. Размеры отливок 1, 2: внешний диам. 140 мм; толщина стенки 20 – 21 мм; длина 140 мм; масса 7,6 кг. Размеры отливок 3, 4: внешний диам. 156 мм; толщина стенки 18 – 22 мм; длина 180 мм; масса 10,9 кг.

Для исследования показателей механических свойств экспериментальных отливок были изготовлены образцы в количестве шести штук с одной отливки (по два образца на каждый вид испытаний). В настоящей работе исследовали временное сопротивление разрыву σ , предел текучести μ и твердость НВ. Результаты испытаний представлены в таблице. Таким образом, повышение физико-механических показателей хорошо согласуется с результатами, описанными в работах [18 – 20].

Выводы

Методом контактного нагрева проведено исследование смачиваемости карбида вольфрама высоколеги-

Результаты исследования механических свойств экспериментальных образцов

Mechanical properties of experimental samples

Номер слитка	Образец	σ , МПа	μ , Н/мм ²	НВ
Горизонтальный тип литья				
1	1.1	578,6	269,7	159
	1.2	579,6	268,7	159
2	2.1	593,3	273,6	166
	2.2	592,3	274,6	166
Вертикальный тип литья				
3	3.1	583,5	272,6	160
	3.2	582,5	270,7	160
4	4.1	598,2	279,5	169
	4.2	598,2	278,5	169

рованной сталью. Установлено, что карбид вольфрама W_2C обладает хорошей смачиваемостью высоколегированной сталью, угол смачивания составляет 135 – 145°. По всей площади контакта подложки и жидкого расплава содержание химических элементов варьируется, но картина их распределения по площади контакта относительно равномерная. Проведены эксперименты по получению дисперсно-упрочненных центробежно-литых заготовок методом центробежного литья горизонтального и вертикального типов. Результаты работ свидетельствуют о том, что технология центробежного литья с введением дисперсных частиц в процессе разлива позволяет получать дисперсно-упрочненные металлические материалы, которые обладают повышенными механическими свойствами. Так, временное сопротивление разрыву увеличивается (в среднем по всем образцам) на 2,49 %, предел текучести – на 2,27 %, твердость – на 5,02 %. Это согласуется с положениями о физико-химических свойствах металлов при применении технологий дисперсного упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Guzenkov S.A., Fedorov D.N., Rutsikii D., Gamanyuk S.B. Increasing the structural strength of cast steel by powder modification // *Steel in Translation*. 2010. Vol. 40. No. 3. P. 294–297. <https://doi.org/10.3103/S096709121003023X>
- Korostelev A.B., Zherebtsov S.N., Sokolov P., Chumak-Zhun D.A. Modification of heat-resistant nickel alloy with a combined inoculator // *Metallurgist*. 2011. Vol. 54. No. 9. P. 711–713. <https://doi.org/10.1007/s11015-011-9363-0>
- Harris I.R., Jones I.P. *Grain Boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties*. London: IOM Communications Ltd., 2001. 456 p.
- Kuzmanov P., Dimitrova R., Lazarova R., Cherepanov A., Popov S., Petrov R., Manolov V. Investigation of the structure and mechanical properties of castings of alloy AlSi7Mg, cast iron GG15 and GG25 and steel GX120Mn12, modified by nanosized powders // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. 2014. Vol. 228. No. 1. P. 11–18. <https://doi.org/10.1177/1740349913510295>
- Guzenkov S.A., Fedorov D.N., Rutsikii D., Gamanyuk S.B. Increasing the structural strength of cast steel by powder modification. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 294–297. <https://doi.org/10.3103/S096709121003023X>
- Korostelev A.B., Zherebtsov S.N., Sokolov P., Chumak-Zhun D.A. Modification of heat-resistant nickel alloy with a combined inoculator. *Metallurgist*. 2011, vol. 54, no. 9, pp. 711–713. <https://doi.org/10.1007/s11015-011-9363-0>
- Harris I.R., Jones I.P. *Grain Boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties*. London: IOM Communications Ltd., 2001, 456 p.
- Kuzmanov P., Dimitrova R., Lazarova R., Cherepanov A., Popov S., Petrov R., Manolov V. Investigation of the structure and mechanical properties of castings of alloy AlSi7Mg, cast iron GG15 and GG25 and steel GX120Mn12, modified by nanosized powders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*. 2014, vol. 228, no. 1, pp. 11–18. <https://doi.org/10.1177/1740349913510295>

5. Lamei C., Guangxun L., Huaipeng G. Modification of the structure and properties of heat-resistant alloys with the help of nanopowders of refractory, compounds. In: *Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO: Int. Conf. on Manipulation*. 2012. P. 385–388. <https://doi.org/10.1109/3M-NANO.2012.6472998>
6. 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. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.111>
7. Krishna A.R., Arun A., Unnikrishnan D., Shankar K.V. An investigation on the mechanical and tribological properties of alloy A356 on the addition of WC // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. No. 5. Part 2. P. 12349–12355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.213>
8. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 706. P. 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.149>
9. Wei C., Song X., Fu J., etc. Effect of carbon addition on microstructure and properties of WC–Co cemented carbides // *Journal of Materials Science and Technology*. 2015. Vol. 28. No. 9. P. 837–843.
10. Li H.W., Li G.P., Chen W., Sun L.H., Luo F.H., Du Y., Wang S.T. Effect of WC and Co on the microstructure and properties of TiC steel-bonded carbide // *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 898. P. 1468–1477. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.1468>
11. Chumanov I.V., Matveeva M.A., Anikeev A.N. On the prospects of introduction of modifying carbides WC and B₄C in the production of 12Kh18N10T steel used in power engineering industry // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020. No. 12. P. 1362–1365. <https://doi.org/10.1134/S0036029520120101>
12. Kiviö M., Holappa L., Yoshikawa T., Tanaka T. Interfacial phenomena in Fe–TiC systems and the effect of Cr and Ni // *High Temperature Materials and Processes*. 2012. Vol. 31. No. 4-5. P. 645–656. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0102>
13. Kiviö M., Holappa L., Yoshikawa T., Tanaka T. Interfacial phenomena in Fe/stainless steel–TiC systems and the effect of Mo // *High Temperature Materials and Processes*. 2014. Vol. 33. No. 6. P. 571–584. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0082>
14. Xi L., Kaban I., Nowak R., Kudyba A., Bruzda G., Polkowska A., Homa M., Turalska P., Tangstad M., Safarian J., Moosavi-Khoonsari E., Datas A. Wetting, reactivity, and phase formation at interfaces between Ni–Al melts and TiB₂ ultrahigh-temperature ceramic // *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 101. P. 911–918. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3114-8>
15. Watanabe Y., Inaguma O., Sato H., Miura-Fujiwara E. A novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-powder method // *Materials*. 2009. Vol. 2. No. 4. P. 2510–2525. <https://doi.org/10.3390/ma2042510>
16. El-Hadad S., Sato H., Miura-Fujiwara E., Watanabe Y. Fabrication of Al/Al₃Ti functionally graded materials by reaction centrifugal mixed-powder method // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 50. No. 1. Part 2. Article 01AJ02. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.01AJ02>
17. Chumanov V.I., Chumanov I.V., Anikeev A.N., Garifulin R.R. Hardening of the surface layers of a hollow billet formed by centrifugal casting // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010. Vol. 2010. No. 12. P. 1125–1128. <https://doi.org/10.1134/S0036029510120104>
18. Sabirov I., Enikeev N.A., Murashkin M.Y., Valiev R.Z. *Bulk Nanostructured Materials with Multifunctional Properties*. Cham: Springer International Publishing, 2015. 118 p.
19. Singla S., Grewal J.S., Kang A.S., Grewal J.S., Cheema G.S. Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth // *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5. P. 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.265>
20. Anikeev A.N., Chumanov I.V., Sedukhin V.V. Studying the effect of fine particles of tungsten carbide on the macro-structure, hardness and microhardness of gradient steel billets // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 986 MSF. P. 3–8.
5. Lamei C., Guangxun L., Huaipeng G. Modification of the structure and properties of heat-resistant alloys with the help of nanopowders of refractory, compounds. In: *Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO: Int. Conf. on Manipulation*, 2012, pp. 385–388. <https://doi.org/10.1109/3M-NANO.2012.6472998>
6. 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. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.111>
7. Krishna A.R., Arun A., Unnikrishnan D., Shankar K.V. An investigation on the mechanical and tribological properties of alloy A356 on the addition of WC. *Materials Today: Proceedings*. 2018, vol. 5, no. 5, part 2, pp. 12349–12355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.213>
8. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 706, pp. 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.149>
9. Wei C., Song X., Fu J., etc. Effect of carbon addition on microstructure and properties of WC–Co cemented carbides. *Journal of Materials Science and Technology*. 2015, vol. 28, no. 9, pp. 837–843.
10. Li H.W., Li G.P., Chen W., Sun L.H., Luo F.H., Du Y., Wang S.T. Effect of WC and Co on the microstructure and properties of TiC steel-bonded carbide. *Materials Science Forum*. 2017, vol. 898, pp. 1468–1477. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.1468>
11. Chumanov I.V., Matveeva M.A., Anikeev A.N. On the prospects of introduction of modifying carbides WC and B₄C in the production of 12Kh18N10T steel used in power engineering industry. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020, vol. 2020, no. 12, pp. 1362–1365. <https://doi.org/10.1134/S0036029520120101>
12. Kiviö M., Holappa L., Yoshikawa T., Tanaka T. Interfacial phenomena in Fe–TiC systems and the effect of Cr and Ni. *High Temperature Materials and Processes*. 2012, vol. 31, no. 4-5, pp. 645–656. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0102>
13. Kiviö M., Holappa L., Yoshikawa T., Tanaka T. Interfacial phenomena in Fe/stainless steel–TiC systems and the effect of Mo. *High Temperature Materials and Processes*. 2014, vol. 33, no. 6, pp. 571–584. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0082>
14. Xi L., Kaban I., Nowak R., Kudyba A., Bruzda G., Polkowska A., Homa M., Turalska P., Tangstad M., Safarian J., Moosavi-Khoonsari E., Datas A. Wetting, reactivity, and phase formation at interfaces between Ni–Al melts and TiB₂ ultrahigh-temperature ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017, vol. 101, pp. 911–918. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3114-8>
15. Watanabe Y., Inaguma O., Sato H., Miura-Fujiwara E. A novel fabrication method for functionally graded materials under centrifugal force: the centrifugal mixed-powder method. *Materials*. 2009, vol. 2, no. 4, pp. 2510–2525. <https://doi.org/10.3390/ma2042510>
16. El-Hadad S., Sato H., Miura-Fujiwara E., Watanabe Y. Fabrication of Al/Al₃Ti functionally graded materials by reaction centrifugal mixed-powder method. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 50, no. 1, part 2, article 01AJ02. <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.01AJ02>
17. Chumanov V.I., Chumanov I.V., Anikeev A.N., Garifulin R.R. Hardening of the surface layers of a hollow billet formed by centrifugal casting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010, vol. 2010, no. 12, pp. 1125–1128. <https://doi.org/10.1134/S0036029510120104>
18. Sabirov I., Enikeev N.A., Murashkin M.Y., Valiev R.Z. *Bulk Nanostructured Materials with Multifunctional Properties*. Cham: Springer International Publishing, 2015, 118 p.
19. Singla S., Grewal J.S., Kang A.S., Grewal J.S., Cheema G.S. Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 5, pp. 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.265>
20. Anikeev A.N., Chumanov I.V., Sedukhin V.V. Studying the effect of fine particles of tungsten carbide on the macro-structure, hardness and microhardness of gradient steel billets. *Materials Science Forum*. 2020, vol. 986 MSF, pp. 3–8.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Валерьевич Чуманов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст
E-mail: chumanoviv@susu.ru

Ilya V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair "Technique and Technology of Materials Production", Zlatoust Branch of South Ural State University
E-mail: chumanoviv@susu.ru

Андрей Николаевич Аникеев, к.т.н., доцент кафедры «Техника и технологии производства материалов», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст
E-mail: anikeevan@susu.ru

Andrei N. Anikeev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Technique and Technology of Materials Production", Zlatoust Branch of South Ural State University
E-mail: anikeevan@susu.ru

Вадим Валерьевич Седухин, аспирант, инженер кафедры «Пирометаллургические и литейные технологии», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст
E-mail: sedukhinvv@susu.ru

Vadim V. Sedukhin, Postgraduate, Engineer of the Chair "Technique and Technology of Materials Production", Zlatoust Branch of South Ural State University
E-mail: sedukhinvv@susu.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

И. В. Чуманов – аналитический обзор научной литературы по исследуемой тематике, подготовка экспериментов, анализ полученных данных.

I. V. Chumanov – analytical review of scientific literature on the article subject, preparation of experiments, analysis of the results.

А. Н. Аникеев – аналитический обзор научной литературы по исследуемой тематике, подготовка и проведение экспериментов, анализ полученных данных.

A. N. Anikeev – analytical review of scientific literature on the article subject, preparation and conduction of experiments, analysis of the results.

В. В. Седухин – подготовка и проведение экспериментов, исследование полученных образцов.

V. V. Sedukhin – preparation and conduction of experiments, study of obtained samples.

Поступила в редакцию 28.09.2021
 После доработки 11.10.2021
 Принята к публикации 19.10.2021

Received 28.09.2021
 Revised 11.10.2021
 Accepted 19.10.2021