Металлургические технологии / Metallurgical technologies

Оригинальная статья
УДК 621.791.927.5
DOI 10.17073/0368-0797-2021-9-679-684

Модификация поверхностного слоя стали соединениями с высокой температурой плавления методами электрошлаковой наплавки

Ю. Н. Сараев, В. П. Безбородов, М. В. Перовская, В. М. Семенчук

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Россия, 634021, Томск, Академический пр., 2/4)

Аннотация. В работе изучено влияние легирования на структуру, микротвердость и абразивную износостойкость слоев электрошлаковой наплавки на низколегированную конструкционную сталь 09Г2С. Для модифицирования использовали смеси порошков Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si, полученные в отделе структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН методом СВС-синтеза, а также порошковых композиций на основе TiC. Из низколегированной стали Ст3 изготавливался расплавляемый электрод, на который высыпались модифицирующие композиции Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si в первом случае, и модифицирующие композиции Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si, располагаемые снизу, во втором случае. Методами металлографии и рентгеновского микроанализа определена структура и проведен анализ состава наплавленных слоев, зоны термического влияния и основного металла, на основании которого высказаны предположения о природе формирования свойств покрытий – твердости, износостойкости. Показано, что основное влияние на износостойкость оказывает структура металла наплавки. Установлено положительное влияние модифицирования покрытий легирующими материалами со сплавами Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si и Ст3, TiC и Ст3. В расплавленном слое выделяется множество новых центров кристаллизации в виде дисперсных частиц TiC. Дисперсные частицы TiC, обладающие высокой температурой плавления (3180 °C), первыми выпадают из расплава и не только служат множественными центрами кристаллизации, но и препятствует росту аустенитного зерна, что обеспечивает формирование дисперсной структуры. Покрытия содержат частицы карбида TiC, а также включения других фаз. При этом повышение твердости наплавленного слоя, содержащего включения карбида титана, наблюдается в направлении к границе с основой. Износостойкость слоя возрастает при формировании покрытия на основе TiC. Полученные данные могут быть использованы при создании на поверхности металла наплавленных слоев с высокой стойкостью против абразивного износа.

Ключевые слова: электрошлаковый, наплавка, покрытие, сплав, структура, свойство, модификации, плавление

Финансирование: Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием ИФПМ СО РАН на 2021 – 2023 годы, проект FWRW-2021-0003.

Для цитирования: Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В., Семенчук В.М. Модификация поверхностного слоя стали соединениями с высокой температурой плавления методами электрошлаковой наплавки // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 9. С. 679–684. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-679-684

Original article

Modification of steel surface layer by electroslag surfacing using compounds with high melting point

Yu. N. Saraev, V. P. Bezborodov, M. V. Perovskaya, V. M. Semenchuk

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634021, Russian Federation)

Abstract. The authors have studied the effect of alloying on the structure, microhardness and abrasive wear resistance of electroslag surfacing layers on low-alloy structural steel 09G2S. For modification, mixtures of Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si powders obtained in the Department of Structural Macrokinetics of the Tomsk Scientific Centre SB RAS by the method of SHS synthesis, as well as powder compositions based on TiC, were used. A molten electrode was made of low-alloy steel St3, on which modifying compositions Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si were poured out, in the first case, and modifying compositions Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si, located below, in the second case. Metallography and X-ray microanalysis methods were used to determine the structure and to analyze the composition of the deposited layers, heat-affected zone (HAZ) and the base metal, on the basis of which assumptions were made about the nature of the formation of coating properties – hardness and wear resistance. It is shown that the main influence on the wear resistance is exerted by structure of the surfacing metal. There is a positive effect of modifying coatings by alloying materials with the alloys Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si + St3 and TiC + St3. In the molten layer, many new crystallization centers are released in the form of dispersed TiC particles. Dispersed TiC particles with a high melting point (3180 °C) are the first to fall out of the melt and not only serve as multiple crystallization centers, but also prevent the growth of austenitic grains, which ensures the formation of dispersed structure. The coatings contain TiC carbide particles, as well as inclusions of other phases.

At the same time, an increase in hardness of the deposited layer containing titanium carbide inclusions is observed in direction of the boundary with the base. Wear resistance of the layer increases when a TiC-based coating is formed. The obtained data can be used to create deposited layers on the metal surface with high resistance against abrasive wear.

Keywords: electroslag, surfacing, coating, alloy, structure, property, modifications, melting

Funding: The work was performed in accordance with the State Assignment of the Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS for 2021 – 2023, project FWRW-2021-0003.

For citation: Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V., Semenchuk V.M. Modification of steel surface layer by electroslag surfacing using compounds with high melting point. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 9, pp. 679–684. (In Russ.).
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-679-684

Введение

Электрошлаковая наплавка (ЭШН) является одним из самых производительных способов формирования покрытий на изделиях, подверженных интенсивному износу [1 – 5]. При этом структура и свойства покрытий как правило зависят от количества легирующих добавок, вводимых в наплавочную ванну, а также энергетических и настраиваемых параметров ЭШН, которые определяют технологию как дуговую, электрошлаковую или электрошлаково-дуговую. Выбор способа наплавки оказывает доминирующее влияние на тепловложение в обрабатываемое изделие, и, как следствие, влияет на структуру и свойства деталей машин, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания [6, 7]. Анализ работ [1 – 7] показал, что способы электрошлаковой наплавки с использованием легирующих присадок находят на практике все более широкое применение. В процессе ЭШН присадочный материал легированного состава помещают на расплавляемый электрод или на поверхность наплавляемого изделия. Принципиально важной особенностью ЭШН, по сравнению с традиционным способом электродуговой наплавки, является то, что процесс должен протекать без коротких замыканий в межэлектродном промежутке. С учетом данного обстоятельства расстояние между электродом и изделием устанавливается таким, чтобы избежать появления дуги и случайных коротких замыканий. Место наплавки на изделии ограничивают кристаллизаторами, внутреннее пространство между которыми заполняют специальным флюсом. Возбуждение процесса осуществляют путем локального расплавления части флюса, который становится электропроводным, а выделяемое при этом тепло обеспечивает интенсивное плавление электрода и присадочного материала, а также поверхностного слоя обрабатываемого изделия.

Анализ используемых современных наплавочных материалов, а также способов воздействия на процессы формирования, структуру и физико-механические характеристики покрытий из различных металлов и сплавов позволил оценить возможности применения новых порошковых материалов [7 – 16]. Известно [8 – 16], что перспективным является применение материалов, имеющих субмикрокристаллическую структуру, а также композиционных материалов с включениями легирующих частиц. При этом успешный выбор химического состава легирующих материалов позволяет оптимизировать режим формирования получаемого слоя при ЭШН [1 – 5]. Важно отметить, что при выборе типа легирующих фаз следует ориентироваться на физико-механические и специальные свойства (износостойкость, коррозионностойкость и др.) обрабатываемого изделия, которые могут быть повышены с добавлением различных модифицирующих соединений, таких как карбиды, бориды, нитриды и прочие химические соединения [6]. Повышение абразивной износостойкости наплавленных покрытий таким легированием является одним из наиболее эффективных путей повышения работоспособности упрочняемых деталей и срока их эксплуатации [7].

С учетом сказанного, изучение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, получаемых ЭШН с добавлением легирующих элементов, установление зависимостей изменения этих свойств от исходных материалов и технологических параметров является актуальной задачей.

Цель работы – исследование физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, получаемых электрошлаковой наплавкой с добавлением соединений из легирующих элементов, имеющих высокую температуру плавления.

Изучение и оптимизация процессов кристаллизации, регулирования температуры расплава за счет ввода в состав модифицирующих наплавочных материалов, компонентов с высокой температурой плавления, может обеспечить повышение физико-механических и эксплуатационных свойств обрабатываемых изделий, а также позволит оптимизировать не только режимы, но и всю технологию наплавки.

Материалы и методика исследований

Электрошлаковую наплавку производили на образцы из стали 09Г2С толщиной 12 мм. Расплавляемый электрод изготавливали из низколегированной стали Ст3 размером 85×40×4 мм. Схема ЭШН приведена на рис. 1. Для наплавки использовали плавленый флюс АН-348А. В работе применяли следующий режим ЭШН: I – 500 А, U – 30 В, вылет электрода (h) изменялся в пределах от 9 до 12 мм.

Для модифицирования использовали смеси порошков Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si, полученные в отделе структурной

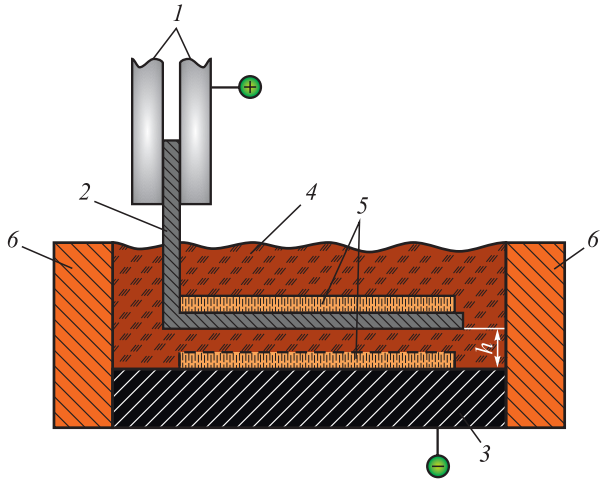


Рис. 1. Схема электрошлаковой наплавки покрытий:
1 – токоподводящие губки-зажимы; *2* – расплавляемый пластинчатый электрод; *3* – основа; *4* – флюс; *5* – насыпаемый композиционный материал; *6* – медные кристаллизаторы для предотвращения вытекания расплавленного металла и флюса; *h* – расстояние между расплавляемым электродом и основой

Fig. 1. Scheme of electroslag surfacing of coatings:
1 – current-carrying jaws-clamps; *2* – molten plate electrode; *3* – base; *4* – flux; *5* – bulk composite material; *6* – copper crystallizers to prevent the leakage of molten metal and flux; *h* – distance between the melted electrode and the base

макрокинетики Томского научного центра СО РАН методом СВС-синтеза, а также порошковых композиций на основе TiC. Модифицирующие компоненты в объеме до 1 % массы расплавляемого электрода равномерно распределялись по поверхности электрода, либо непосредственно на обрабатываемом изделии (см. рис. 1).

Микроструктуры наплавленного металла покрытий, зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла анализировали с помощью металлографических микроскопов Axio Observer D1m и Neophot-32. Шлифы для проведения металлографического анализа изготавливали из образцов, вырезаемых из пластин в сечении, перпендикулярном продольной оси наплавленных покрытий.

Измерение микротвердости наплавленных покрытий, металла ЗТВ и основного металла проводили на микротвердомере Leika при нагрузке на индентор 1,0 Н. Микроанализ выполняли на электронном микроскопе Philips SEM 515. Испытания покрытий на абразивный износ производили о нежестко закрепленные абразивные частицы кварцевого песка (ГОСТ 23.208-79).

Результаты исследований и их обсуждение

Структуры покрытий из сплавов Ст3 и Si_3N_4 + + $FeSi_2$ + Si, Ст3 и TiC представлены на рис. 2. На рис. 2, *а* видно, что структура материала – ферритно-перлитная, а из рис. 2, *б* следует, что в структуре покрытия содержится большое количество мелких зерен карбида титана.

Средние значения твердости (HRC) наплавленных металлов и сплавов: Ст3 – 18, TiC – 66. Значения коэффициента износостойкости покрытий ($K_и$): сталь Ст3 – 1,25, TiC – 3.

При ЭШН материал расплавляемого электрода перемешивается с материалом основы [17 – 20].

На рис. 3 в качестве примера приведен график изменения средних значений микротвердости композиции

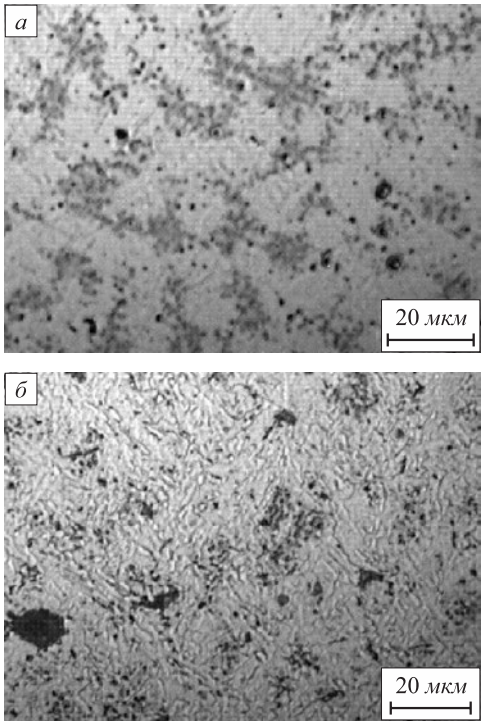


Рис. 2. Структура покрытий из сплавов:
а – расплавляемый электрод из Ст3 и Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si;
б – расплавляемый электрод из Ст3 и TiC

Fig. 2. Structure of coatings from alloys:
a – molten electrode made of St3 and Si_3N_4 + $FeSi_2$ + Si;
б – molten electrode made of St3 and TiC

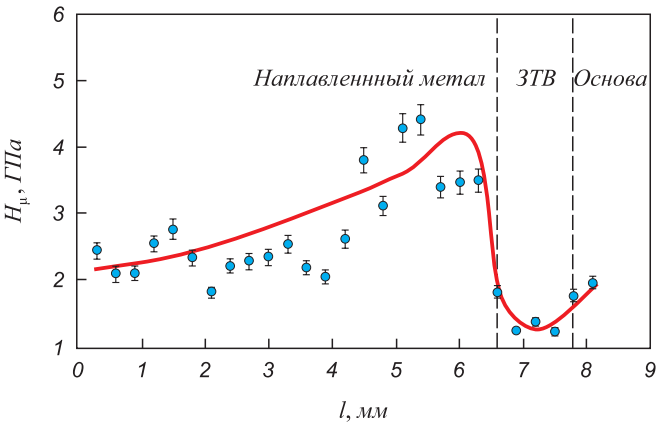
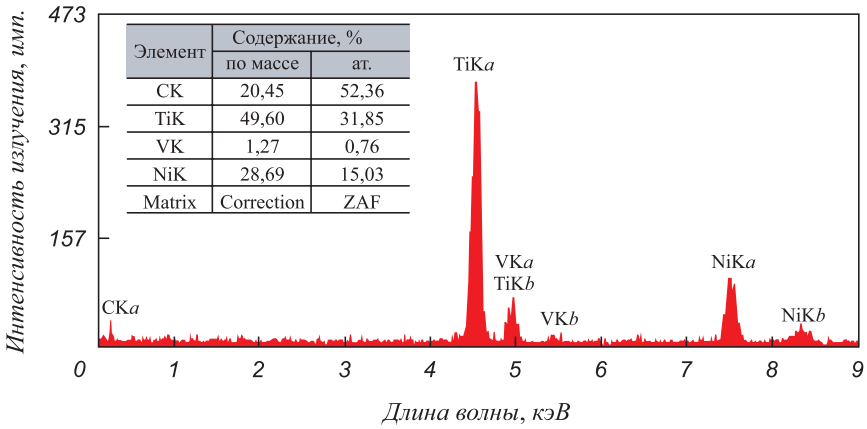


Рис. 3. Изменение средних значений микротвердости композиции по сечению покрытия сплава TiC + основа 09Г2С

Fig. 3. Change in the average values of the composition microhardness over cross-section of coating of the TiC + base 09G2C alloy



Элемент	Содержание, %	
	по массе	ат.
CK	20,45	52,36
TiK	49,60	31,85
VK	1,27	0,76
NiK	28,69	15,03
Matrix	Correction	ZAF

Рис. 4. Элементный состав наплавленного покрытия (со спеченным TiC) и таблица обнаруженных в покрытии элементов (в весовых и атомарных процентах)

Fig. 4. Elemental composition of the surfaced coating (with sintered TiC), and a table of elements detected in the coating (in weight and atomic percentages)

по сечению: покрытие из сплава TiC + сталь 09Г2С. Микротвердость стальной основы (стали 09Г2С) составляла ~2000 МПа.

Анализ графика показывает, что имеет место резкая граница перехода значений микротвердости от покрытия, содержащего TiC, к основе.

Элементный состав наплавленного покрытия со спеченным СВС-методом, TiC и таблица обнаруженных в покрытии элементов в весовых и атомных процентах представлены на рис. 4.

Применение элементов V и Ni в данном сплаве очень важно. Ванадий обеспечивает более высокие свойства покрытия как карбидообразующий элемент. Никель способствует повышению смачиваемости частиц TiC и аустенизации покрытия.

Также были исследованы композиционные составы легирующих элементов $Si_3N_4 + Si_3Al_3O_3N_5 + FeSi_2 + Fe$ и $Cr_2N + AlN$ и произведена оценка степени их влияния на структуру и свойства покрытий на малоуглеродистой низколегированной стали. Анализ полученных результатов позволил отсеять композиции, имеющие более низкие результаты при испытаниях по сравнению с компонентами $Si_3N_4 + FeSi_2 + Si$ и TiC.

Результаты испытаний абразивной износостойкости ($K_и$) наплавленных покрытий представлены на рис. 5.

Следует отметить, что на рис. 5 приведены результаты с наиболее высокими значениями показателей стойкости изделий, подвергающихся абразивному износу. Кроме того, выбранные материалы оказывают не только модифицирующее влияние на наносимое покрытие, но и повышают их дюрометрические свойства, не увеличивая при этом хрупкость модифицированной поверхности, проявляемой в растрескивании. Таким образом, применение методов ЭШН с модифицирующими композициями позволяет повышать износостойкость обрабатываемых изделий.

Результаты испытаний образцов, наплавленных электрошлаковым способом на абразивный износ, показали, что максимальную износостойкость имеет сплав, сформированный на основе TiC, который более, чем в два раза повышает износостойкость материала основы – 09Г2С, а также превосходит показатели остальных

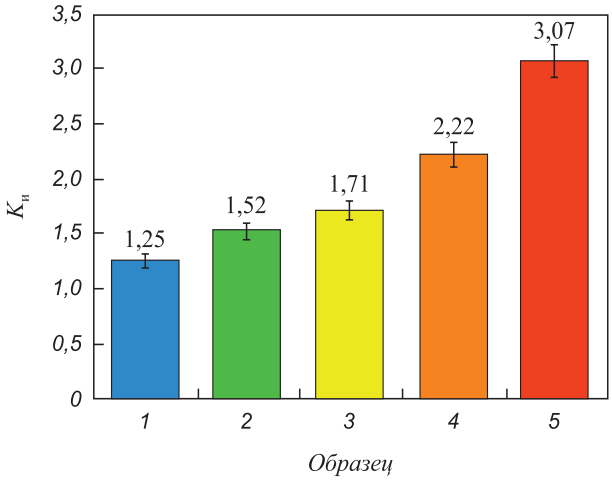


Рис. 5. Изменение абразивной износостойкости наплавленного металла ($K_и$) ЭШН в зависимости от режима наплавки: *1* – наплавка электродом из Ст3 без модификатора; *2* – основа 09Г2С; *3* – наплавка с модификаторами $Si_3N_4 + FeSi_2 + Si$, располагаемыми сверху расплавляемого электрода из Ст3; *4* – легирование металла модифицирующими композициями $Si_3N_4 + FeSi_2 + Si$, располагаемыми снизу расплавляемого электрода из Ст3; *5* – композиционный материал на основе TiC и расплавляемого электрода из Ст3

Fig. 5. Change in abrasive wear resistance of the deposited metal ($K_и$) of electroslag surfacing depending on the surfacing mode: *1* – surfacing with an electrode made of St3 without a modifier; *2* – base of 09G2C; *3* – surfacing with $Si_3N_4 + FeSi_2 + Si$ modifiers located on top of the molten electrode made of St3; *4* – alloying of metal with modifying compositions $Si_3N_4 + FeSi_2 + Si$ located on the bottom of the molten electrode made of St3; *5* – composite material based on TiC and the molten electrode made of St3

примененных модификаторов на 46 % (образец 4) и на 12,5 % (образец 3).

Выводы

Установлено положительное влияние модифицирования покрытий легирующими материалами со сплавами $Si_3N_4 + FeSi_2 + Si$ и Ст3, TiC и Ст3 на структуру и свойства покрытий, формируемых с применением способа электрошлаковой наплавки на малоуглеродистую низколегированную сталь 09Г2С.

Установлено, что покрытия содержат дисперсные частицы карбида TiC, а также включения других фаз. При этом повышение твердости наплавленного слоя, содержащего карбидные включения TiC, наблюдается в направлении к границе с основой.

Применение метода электрошлаковой наплавки, сформированного с применением карбида TiC, позволяет повышать абразивную износостойкость стали более, чем в два раза, что способствует увеличению эксплуатационных свойств изделий, изготавливаемых с его применением.

Список литературы

1. Wang H., Yu S.F., Khan A.R., Huang A.G. Effects of vanadium on microstructure and wear resistance of high chromium cast iron hardfacing layer by electroslag surfacing // Metals. 2018. Vol. 8. No. 6. Article 458. https://doi.org/10.3390/met8060458
2. Zahiri R., Sundaramoorthy R., Lysz P., Subramanian C. Hardfacing using ferro-alloy powdermixtures by submerged arc welding // Surface & Coatings Technology. 2014. Vol. 260. P. 220–229. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.076
3. Pavlov A.A. Development of new corrosion-resistant bimetals with increased corrosion resistance prepared by electroslag surfacing technology // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53. No. 7–8. P. 551–556. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0380-0
4. Cao Y., Jiang Z., Dong Y., Deng X., Medovar L., Stovpchenko G. Research on the bonding interface of high speed steel / ductile cast iron composite roll manufactured by an improved electroslag cladding method // Metals. 2018. Vol. 8. No. 6. Article 390. https://doi.org/10.3390/met8060390
5. Bao Y., Ren Q., Zhang Z., Yang K., Jiang Y. Study of intergranular corrosion resistance of overlay by electroslag cladding with austenitic stainless steel // Hanjie Xuebao. Transactions of the China Welding Institution. 2019. Vol. 37. No. 6. P. 65–68.
6. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. М.: Колос, 1981. 351 с.
7. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов и др. М.: Машиностроение, 1990. 220 с.
8. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375–377. No. 1–2. P. 213–218. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257
9. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J., Wang Y.L., Chen G.L. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2008. Vol. 466. No. 1–2. P. 201–204. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.11.110
10. Guo Sheng, Liu C.T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase // Progress in Science: Materials International. 2011. Vol. 21. No. 6. P. 433–446. https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60080-X
11. Yeh J.-W., Chang S.-Y., Hong Y.-D., Chen S.-K., Lin S.-J. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements // Materials Chemistry and Physics. 2007. Vol. 103. No. 1. P. 41–46. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.01.003
12. Mahlalela S.S., Pistorius P.G.H. Microstructural characterization of laser beam and gas tungsten arc welded zirconium-2.5Nb // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2017. Vol. 117. No. 10. P. 947–953. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n10a4
13. Gao X.-L., Liu J., Zhang L.-J., Zhang J.-X. Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of

References

1. Wang H., Yu S.F., Khan A.R., Huang A.G. Effects of vanadium on microstructure and wear resistance of high chromium cast iron hardfacing layer by electroslag surfacing. *Metals*. 2018, vol. 8, no. 6, article 458. https://doi.org/10.3390/met8060458
2. Zahiri R., Sundaramoorthy R., Lysz P., Subramanian C. Hardfacing using ferro-alloy powdermixtures by submerged arc welding. *Surface & Coatings Technology*. 2014, vol. 260, pp. 220–229. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.076
3. Pavlov A.A. Development of new corrosion-resistant bimetals with increased corrosion resistance prepared by electroslag surfacing technology. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017, vol. 53, no. 7–8, pp. 551–556. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0380-0
4. Cao Y., Jiang Z., Dong Y., Deng X., Medovar L., Stovpchenko G. Research on the bonding interface of high speed steel / ductile cast iron composite roll manufactured by an improved electroslag cladding method. *Metals*. 2018, vol. 8, no. 6, article 390. https://doi.org/10.3390/met8060390
5. Bao Y., Ren Q., Zhang Z., Yang K., Jiang Y. Study of intergranular corrosion resistance of overlay by electroslag cladding with austenitic stainless steel. *Hanjie Xuebao. Transactions of the China Welding Institution*. 2019, vol. 37, no. 6, pp. 65–68.
6. Volovik E.L. *Manual for Parts Restoring*. Moscow: Kolos, 1981, 351 p. (In Russ.)
7. Vinogradov V.N., etc. *Abrasive Wear*. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 220 p. (In Russ.)
8. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 375–377, no. 1–2, pp. 213–218. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257
9. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J., Wang Y.L., Chen G.L. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008, vol. 466, no. 1-2, pp. 201-204. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.11.110
10. Guo Sheng, Liu C.T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Science: Materials International*. 2011, vol. 21, no. 6, pp. 433–446. https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60080-X
11. Yeh J.-W., Chang S.-Y., Hong Y.-D., Chen S.-K., Lin S.-J. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements. *Materials Chemistry and Physics*. 2007, vol. 103, no. 1, pp. 41–46. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.01.003
12. Mahlalela S.S., Pistorius P.G.H. Microstructural characterization of laser beam and gas tungsten arc welded zirconium-2.5Nb. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017, vol. 117, no. 10, pp. 947–953. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n10a4
13. Gao X.-L., Liu J., Zhang L.-J., Zhang J.-X. Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed

pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets // Materials Characterization. 2014. Vol. 93. P. 136–149. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.04.005

14. Медовар Б.И., Саенко В.Я, Нагаевский И.Д., Чепурной А.Д. Электрошлаковая технология в машиностроении. Киев: Техніка, 1984. С. 18–19.
15. Электрошлаковая наплавка / Ю.М. Кусков и др. М.: ООО «Наука и технологии», 2001. 180 с.
16. Фромайер Г. Технология быстрого затвердевания для получения стали с высокими показателями механических и физических свойств // Черные металлы. 1988. № 9. С. 12–21.
17. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels // Welding International. 2013. Vol. 27. No. 9. P. 678–680. https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753276
18. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В., Семенчук В.М. Структура и твердость наплавленных на низкоуглеродистую сталь износостойких покрытий при низкочастотной модуляции тока // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 469–473. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-469-473
19. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V., Semenchuk V.M., Braverman B.S., Bolgaru K.A. Influence of energy action modes on heat and mass transfer of surfacing material, formation of structure and properties of coatings // 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). Tomsk, Russia, 2020. P. 1271–1274.
20. Saraev Yu.N., Perovskaya M.V., Braverman B.S., Bezborodov V.P., Semenchuk V.M., Bolgaru K.A. Influence of energy impact on the structure formation and properties of deposited coatings // 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). Tomsk, Russia, 2020. P. 1275–1278.

Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets. *Materials Characterization*. 2014, vol. 93, pp. 136–149. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.04.005

14. Medovar B.I., Saenko V.Ya, Nagaevskii I.D., Chepurnoi A.D. *Electroslag Technology in Mechanical Engineering*. Kiev: Tekhnika, 1984, 18-19 p. (In Russ.)
15. Kuskov Yu.M., etc. *Electroslag Surfacing*. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2001, 180 p. (In Russ.)
16. Fromaier G. Fast hardening technology for obtaining steel with high mechanical and physical properties. *Chernye metally*. 1988, no. 9, pp. 12–21. (In Russ.)
17. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 9. pp. 678–680. https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753276
18. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V., Semenchuk V.M. Structure and hardness of wear-resistant coatings with low-frequency current modulation deposited on low carbon. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 6, pp. 469–473. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-469-473
19. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V., Semenchuk V.M., Braverman B.S., Bolgaru K.A. Influence of energy action modes on heat and mass transfer of surfacing material, formation of structure and properties of coatings. In: *7th Int.Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). Tomsk, Russia, 2020*, pp. 1271–1274.
20. Saraev Yu.N., Perovskaya M.V., Braverman B.S., Bezborodov V.P., Semenchuk V.M., Bolgaru K.A. Influence of energy impact on the structure formation and properties of deposited coatings. In: *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). Tomsk, Russia, 2020*, pp. 1275–1278.

Сведения об авторах

Юрий Николаевич Сараев, *д.т.н., доцент, главный научный сотрудник лаборатории композиционных материалов,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

Валерий Павлович Безбородов, *к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории композиционных материалов,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: val@ispms.tsc.ru

Марина Владимировна Перовская, *к.т.н., научный сотрудник лаборатории композиционных материалов,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
ORCID: 0000-0003-2780-6023
E-mail: mv_perovskaya@inbox.ru

Вячеслав Максимович Семенчук, *младший научный сотрудник лаборатории композиционных материалов,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
ORCID: 0000-0002-7215-0505

Information about the authors

Yurii N. Saraev, *Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Composite Materials,* Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

Valerii P. Bezborodov, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Composite Materials,* Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: val@ispms.tsc.ru

Marina V. Perovskaya, *Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Composite Materials,* Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-2780-6023
E-mail: mv_perovskaya@inbox.ru

Vyacheslav M. Semenchuk, *Junior Researcher of the Laboratory of Composite Materials,* Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-7215-0505

Вклад авторов:

Сараев Ю.Н. – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, написание текста рукописи, анализ данных.
Безбородов В.П. – обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа, написание текста рукописи.
Перовская М.В. – получение данных для анализа, доработка текста, корректировка выводов.
Семенчук В.М. – обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа, визуализация результатов исследований, доработка текста.

Поступила в редакцию 29.06.2021
После доработки 21.07.2021
Принята к публикации 26.08.2021

Received 29.06.2021
Revised 21.07.2021
Accepted 26.08.2021